



Copper8



EEN CIRCULAIRE ENERGIETRANSITIE

*Verkenning naar de metaalvraag van het Nederlandse
energiesysteem en kansen voor de industrie*

00

SAMENVATTING

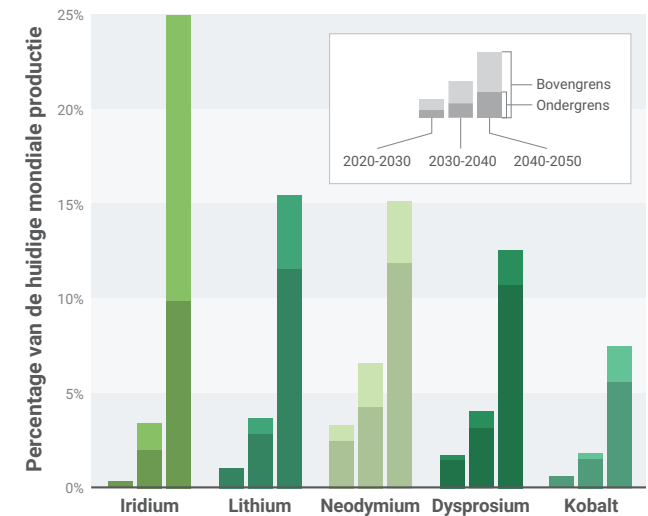
Er ontstaan steeds meer vragen over de beschikbaarheid van kritieke metalen voor de energietransitie. Deze verkenning geeft inzicht in de Nederlandse vraag naar kritieke metalen, biedt handelingsperspectief in hoe de metaalvraag kan worden verlaagd en laat zien welke kansen er liggen voor de Nederlandse industrie.

De beperkte beschikbaarheid van kritieke metalen is een groeiend risico voor de energietransitie. Om in 2050 een netto klimaatneutraal energiesysteem te kunnen realiseren, zijn veel kritieke metalen nodig voor de productie van duurzame opwek-, transport- en opslagtechnologieën. Zo groeit de jaarlijkse lithiumvraag voor de Nederlandse energietransitie naar gemiddeld 12-15% van de huidige wereldwijde productie in 2040-2050. Voor neodymium, dysprosium, praseodymium, iridium, kobalt en platina neemt de vraag toe tot ruim boven de 5% van de mondiale productie. Dit is significant meer dan het Nederlandse aandeel van het wereldwijd BNP (1,0%), finaal energieverbruik (0,5%) of aantal inwoners (0,2%).

Als gevolg van de snel groeiende vraag ontstaan er naar verwachting wereldwijd en in Nederland tekorten aan deze kritieke metalen. Dat kan de productie van opwek-, transport- en opslagcapaciteit voor de energietransitie vertragen, ook op de kortere termijn. Technisch is groei van de mijnbouwproductie mogelijk, maar opschaling hiervan en de opening van nieuwe mijnen heeft vaak een lange doorlooptijd (10-15 jaar). Daarnaast zorgt mijnbouw voor sociale- en milieu-impact en lopen de metaalconcentraties in ertsen langzaam maar zeker terug. Ook vinden mijnbouw en raffinage plaats in een beperkt aantal landen, waarbij China een dominante rol heeft in de ketens van meerdere kritieke metalen.

De risico's ten aanzien van de beschikbaarheid van materialen komen onvoldoende terug in huidig beleid rondom de energietransitie en circulaire economie. Op het gebied van de energietransitie ligt momenteel de focus op draagvlak, ruimtelijke inbedding en betaalbaarheid. Op het gebied van de circulaire economie zijn diverse initiatieven gestart, maar is een samenhangende en langjarige aanpak nodig. De beschikbaarheid van materialen wordt voornamelijk als een gegeven beschouwd. Materiaalgebruik moet één van de criteria worden op basis waarvan binnen de energietransitie keuzes worden gemaakt.

De risico's op onvoldoende beschikbaarheid van duurzame technologieën zijn groter bij klimaatneutrale energiescenario's waarin Nederland meer zelfvoorzienend is. Dit is het gevolg van de hoge metaalvraag van enerzijds systeembatterijen en anderzijds opwekcapaciteit voor wind- en zonne-energie. In energiescenario's waar meer energie wordt geïmporteerd (met name waterstof), verplaatst de metaalvraag voor de Nederlandse energiebehoefte naar het buitenland. Inzet op zowel energiebesparing, interconnectiviteit als innovatie helpt om de metaalvraag te beperken.



Figuur 1 Verwachte jaarlijkse vraag van vijf metalen voor de energietransitie.

Wij zien vier circulaire strategieën die een toekomstig tekort aan materialen kunnen beperken. Deze strategieën richten zich zowel op het verlagen van de vraag naar als het verhogen van het aanbod van kritieke metalen. Omdat inzetten op slechts één van deze strategieën onvoldoende effect heeft, is een combinatie van deze vier strategieën nodig.



Rethink: grootschalig besparen van energie en waar nodig herontwerpen van het energiesysteem om de benodigde duurzame opwek-, transport- en opslagcapaciteit te verlagen.



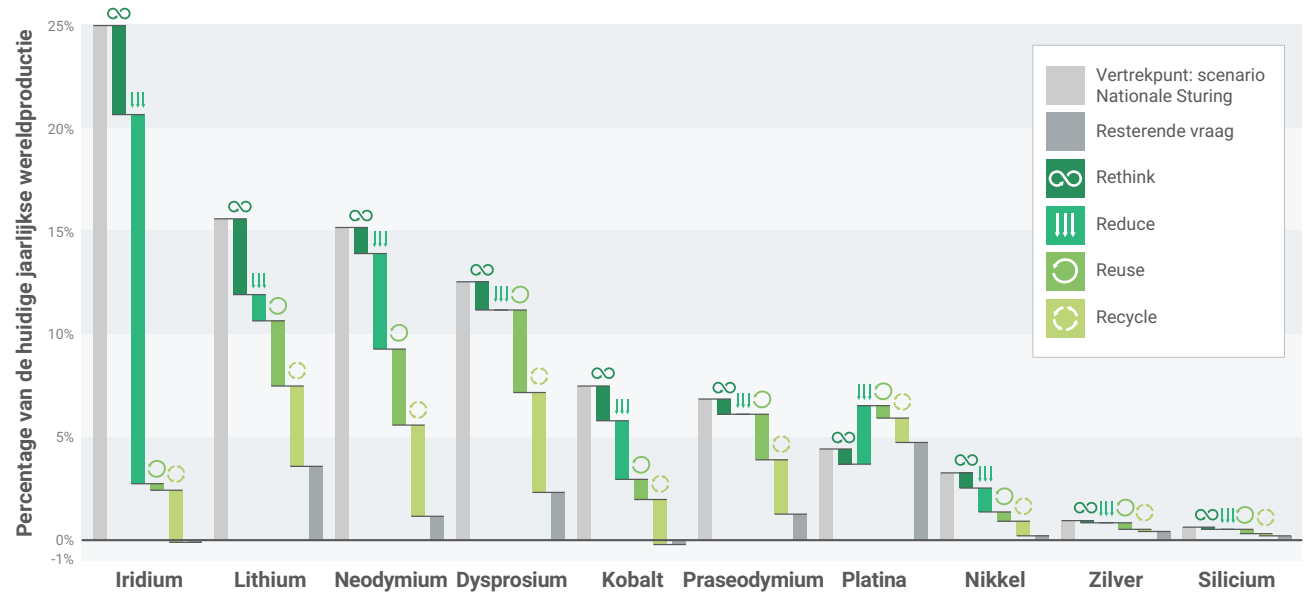
Reduce: aansturen op technologieën die minder kritieke metalen bevatten, zoals in windturbines of systeembatterijen.



Reuse, repair & refurbish: verlengen van de levensduur van producten en onderdelen, zoals herinzet van zonnepanelen of accu's van elektrische auto's.



Recycle: terugwinnen van grondstoffen aan het einde van de levenscyclus van producten.



Figuur 2 Reductiepotentieel van vier circulaire strategieën, op basis van het energiescenario *Nationale Sturing*.

Nederland heeft momenteel een beperkte positie in de toevoketen van kritieke metalen. Mijnbouw ontbreekt volledig; raffinage en productie van componenten vinden binnen Nederland nauwelijks plaats op het gebied van kritieke metalen. Wel heeft Nederland een positie in de fabricage van eindproducten, vooral op het gebied van reparatie en levensduurverlenging zijn beperkt. Nederland heeft wel een positie in (sommige onderdelen van) recycling en is sterk in logistiek. Vanwege de verwachte groei van recycling en de potentiële impact van levensduurverlenging liggen er vooral voor die posities economische kansen. Om deze kansen te realiseren moet een industrie worden opgebouwd.

Er zijn vier randvoorwaarden waaraan moet worden voldaan om leveringszekerheid te borgen en toekomstbestendige bedrijvigheid op te bouwen. Op ieder van deze randvoorwaarden vinden ontwikkelingen plaats, maar is aanvullende inzet nodig. Daarbij gaat het om:

- A. Opzetten van **permanente monitoring en continue kennisontwikkeling** om meer actuele kennis en inzichten te ontwikkelen rondom kritieke metalen en andere grondstoffen, bijvoorbeeld via een aan de overheid verbonden kennisinstituut. Daarmee kan beter worden ingespeeld op toekomstige ontwikkelingen;
- B. Vergroten van **ketentransparantie** van internationale toevoketen, om beter inzicht te creëren in de

milieu- en sociale impact van kritieke metalen in de keten en daarmee te kunnen sturen op het verlagen van die impact.

- C. Ontwikkelen van een **lange-termijn industriebeleid** als basis voor investeringsbeslissingen. Hiermee kan het speelveld worden gecreëerd waarbinnen de industrie zich kan ontwikkelen. In het opstellen van dat beleid is intensieve samenwerking tussen de overheid en industriële spelers essentieel, net als de relatie tussen activiteiten in Nederland en elders in Europa.
- D. Aanscherpen van **wet- en regelgeving om hoogwaardig hergebruik mogelijk te maken en te stimuleren**, waaronder aanscherping van productwetgeving als Ecodesign-richtlijnen en versterking van de verlengde producentenverantwoordelijkheid.

INHOUDSOPGAVE

01	Inleiding	6
02	Doelstellingen & beleid	8
03	Geopolitiek, ketencomplexiteit & impact mijnbouw	12
04	Metaalvraag Nederlandse energietransitie	18
05	Oplossingsrichtingen	26
06	Nederlandse metaalindustrie	36
07	Aanbevelingen	44
08	Bijlagen	52
	<i>I. Totstandkoming</i>	<i>52</i>
	<i>II. Eigenschappen kritieke metalen</i>	<i>53</i>
	<i>III. Toelichting energiescenario's</i>	<i>57</i>
	<i>IV. Toelichting energietechnologieën</i>	<i>62</i>
	<i>V. Bronvermelding</i>	<i>69</i>

COLOFON

AUTEURS



Metabolic
Pieter van Exter
Joris Bouwens



Copper8
Sybren Bosch
Stefan Favrin
Soemano Zeijlmans



Polaris Sustainability
Benjamin Sprecher



Quintel
Dorine van der Vlies
Alexander Wirtz



CML - Universiteit Leiden
Janneke van Oorschot

PARTNERS

Deze verkenning is uitgevoerd in opdracht van onderstaande partijen.



GRAFISCH ONTWERP

Metabolic
Cassie Björck
Sunniva Unneland

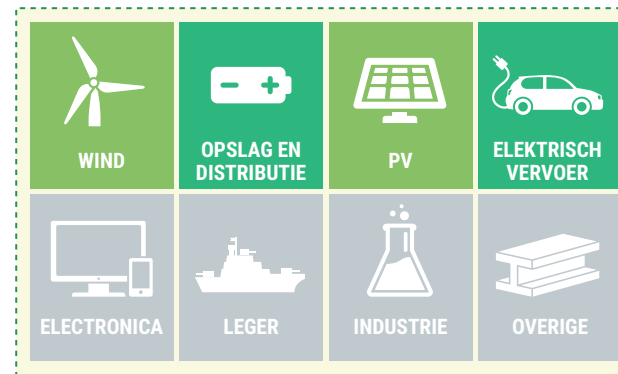
Juni 2021

01

INLEIDING

Nederland, Europa en de wereld staan voor de opgave om de CO₂-uitstoot flink terug te dringen. Om ernstige klimaatverandering te voorkomen moeten de wereldwijde emissies de komende tien jaar gehalveerd worden. Daarvoor is de grootschalige toepassing nodig van duurzame technologieën zoals zonnepanelen, windturbines, elektrische auto's, elektriciteitsopslag en waterstof. Deze technologieën vereisen kritieke metalen zoals nikkel, neodymium en platina om te kunnen functioneren. De hoeveelheid daarvoor benodigde kritieke metalen gaat een uitdaging worden.

Zonder structurele aandacht voor de benodigde materialen gaat een wereldwijde transitie naar een schoon energiesysteem niet slagen.¹ De hiervoor benodigde metalen zijn echter ook cruciaal voor onder andere militaire toepassingen, digitale infrastructuur en consumentenelektronica. Met een groeiende wereldbevolking en vooral een groeiende wereldwijde middenklasse neemt de druk op deze voorraden toe, ook zonder de transitie naar een duurzaam energiesysteem.² In de toepassing van deze metalen is er dus zowel concurrentie tussen landen als tussen toepassingen.



Figuur 3 Overzicht van verschillende toepassingen van kritieke metalen.

GROEIENDE AANDACHT VOOR KRITIEKE METALEN

De aandacht voor de uitdagingen rondom deze kritieke metalen groeit. Op Europees niveau zijn de benodigde metalen in kaart gebracht door de Europese Commissie.³ Eerdere studies voor Nederland hebben zich gericht op economische kwetsbaarheden⁴ en specifiek de metaalvraag voor zonnepanelen, windturbines^{5,6},

elektrische auto's⁷ en waterstof.⁸ Ook de gevolgen van de geopolitieke afhankelijkheid van China worden steeds breder erkend⁹, evenals een heel scala aan sociale en milieu-impacts over de gehele productieketen.^{10,11}

Het voorkomen van ernstige klimaatverandering gaat alleen slagen wanneer we - wereldwijd - op korte termijn voldoende tempo maken met zowel reductie van de energievraag als de overstap naar klimaatneutrale energieproductie. Dat vraagt een snelle uitrol van duurzame technologieën, zowel in Nederland en daarbuiten. Om die snelle uitrol mogelijk te maken is het belangrijk om onze afhankelijkheid van kritieke metalen en de bijbehorende risico's in kaart te brengen. Vervolgens kunnen we stappen zetten om die risico's te beperken, en kansen creëren voor de Nederlandse economie.

DRIE DOELEN

De uitdaging rondom kritieke metalen is groot. De ketens zijn lang, complex en internationaal, waardoor oplossingen zowel op technologisch, politiek als maatschappelijk vlak gezocht moeten worden. Met deze studie willen we drie doelen bereiken:

- 1 Inzicht geven in de Nederlandse vraag naar kritieke metalen richting 2030 en 2040, met een doorkijk naar 2050;
- 2 Handelingsperspectief bieden hoe de kritieke metaalvraag kan worden verlaagd, inclusief de bijbehorende risico's rondom leveringszekerheid, milieu-impact en geopolitieke afhankelijkheid;
- 3 Laten zien welke kansen dit biedt voor de Nederlandse industrie.

IEA: The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions

De *International Energy Agency* onderschrijft sinds kort de noodzaak van kritieke metalen voor een duurzame energievoorziening.¹ Daarbij bouwt zij voort op wetenschappelijke literatuur en eerdere rapporten van onder meer de Wereldbank.²

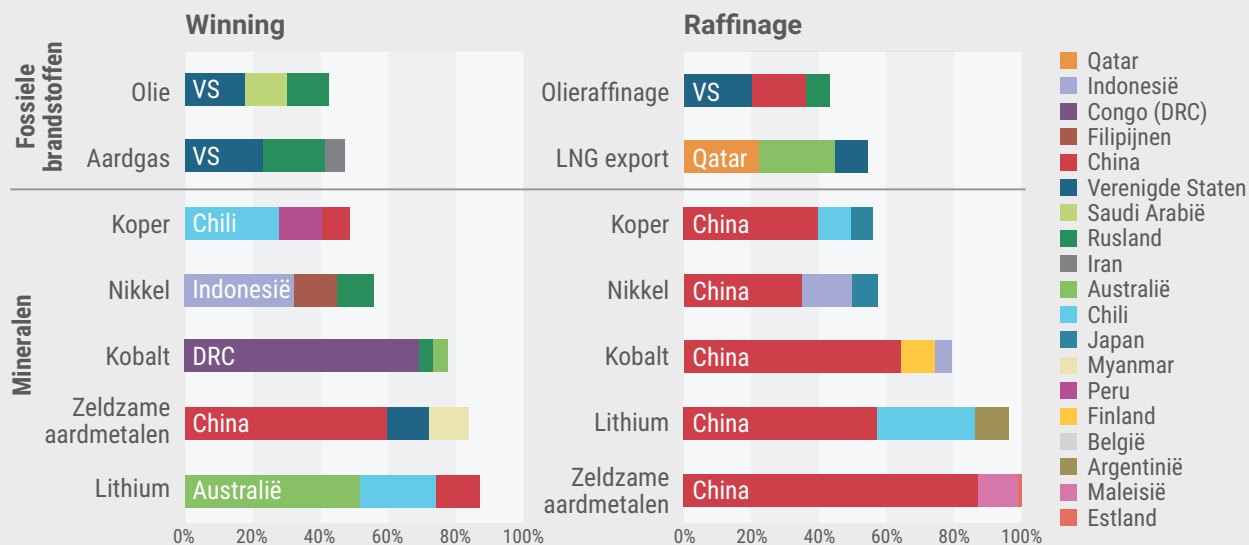
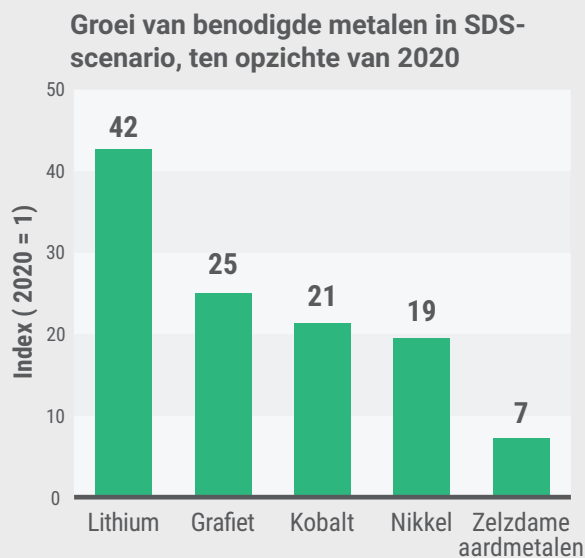
In haar rapport *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions* (mei 2021) geeft zij een globaal perspectief op drie aspecten van kritieke metalen:

- Benodigde kritieke metalen voor wereldwijde, duurzame energievoorziening
- Toevoerketen van kritieke metalen
- Duurzame mijnbouw en productie van kritieke metalen

Deze studie sluit aan bij de internationale IEA-bevindingen en creëert inzicht in de benodigde

metalen voor de Nederlandse energietransitie. Daarnaast biedt deze studie handelingsperspectief op nationaal (en Europees) niveau.

Ter illustratie zijn twee figuren toegevoegd over de benodigde productiegroei van vijf kritieke metalen in het IEA-SDS-scenario en de voornaamste productie- en raffinagelocaties van deze metalen (figuur 4).



Figuur 4 De benodigde groei in metaalproductie om klimaatdoelen te realiseren (links) en de aandelen in mijnbouw en raffinage van de grootste producenten van enkele kritieke metalen (rechts). Bron: *International Energy Agency* (2021) *The Role of Critical Metals in Clean Energy Transitions* - alle rechten voorbehouden.

02

DOELSTELLINGEN & BELEID

De richting van zowel Europees als nationaal beleid is helder: toewerken naar een klimaatneutrale en circulaire economie. De Europese Commissie heeft de doelstelling voor een 'klimaatneutraal continent' inmiddels geborgd in wetgeving en ook Nederland heeft een Klimaatwet aangenomen. Dit hoofdstuk omschrijft de doelstellingen en het beleid rondom klimaat en circulaire economie.

Nederland en Europa werken aan zowel een klimaatneutrale als een circulaire economie. Europa heeft haar klimaatdoelen recent aangescherpt tot 55% CO₂-reductie in 2030 en een 'klimaatneutraal continent' in 2050. Nederland heeft in haar Klimaatakkoord vooralsnog een CO₂-reductie van 49% (2030) en 95% (2050) afgesproken, waarbij er wordt gekeken naar aanscherping op basis van de Europese doelen.

Daarnaast werken zowel Nederland als de EU vanuit hun circulaire economie-ambities aan efficiënter en slimmer grondstofgebruik: wereldwijd is zo'n 45% van de emissies het gevolg van het maken van producten en gebouwen.¹² Dit moet leiden tot een lagere afhankelijkheid van nieuwe grondstoffen - veelal van buiten Europa - en tegelijkertijd de milieu-impact van grondstofgebruik verminderen. Daarnaast moet dit leiden tot nieuwe werkgelegenheid. Nederland heeft de ambitie om toe te werken naar een 'volledig' circulaire economie in 2050, en wil in 2030 haar primair grondstofgebruik met 50% hebben teruggebracht.¹³



HUIDIG BELEID SCHIET TEKORT VOOR GESTELDE AMBITIES

Om deze klimaatneutrale energievoorziening te realiseren, zijn kritieke metalen nodig. Op dit punt is zowel klimaat- als circulaire economiebeleid echter beperkt. Vooralsnog worden er vooral studies gedaan om de omvang van het probleem en de risico's en afhankelijkheden in kaart te brengen.^{3,14,9} Concrete maatregelen om te voorzien in de benodigde grondstoffen blijven echter uit.

Daarbij richten beleidsinitiatieven zich vaak op één onderdeel van de problematiek: het verduurzamen van mijnbouwactiviteiten, het anders ontwerpen van producten of het organiseren van inzameling voor hergebruik. Een structurele en samenhangende (keten) aanpak en bijbehorend grondstoffenbeleid ontbreekt op zowel nationaal als Europees niveau. Ook is er nog geen kwantitatief beeld van de verschillende industrieën en hun materiaalstromen. Als gevolg daarvan lijken de klimaatdoelstellingen niet haalbaar.

EUROPA ZET IN OP PRODUCTONTWERP & ONDERZOEK

De Europese Commissie benadrukt de noodzaak van een stabiele toegang tot kritieke metalen en verwante technologieën.³ Het recente *Circular Economy Action Plan* zet in op zo weinig mogelijk 'lekkage' van grondstoffen naar buiten de EU.¹⁵ Hierbij ligt de nadruk op kritieke metalen, zoals die in batterijen en motoren van elektrische auto's. Voor de aanpak van dit probleem richt het actieplan zich onder andere op Ecodesign-richtlijnen en op het opzetten van een Europese markt voor secundaire materialen.

Om de voorzieningszekerheid van kritieke metalen te verhogen is er daarnaast een strategie op materials resilience.¹⁴ Deze strategie geeft echter nog weinig

concrete handvatten. Om een eenduidig beeld te schetsen van de kritikaliteit van metalen heeft de EU een *Critical Raw Material List*, die eens per drie jaar wordt geactualiseerd.¹⁶ Daarnaast zet de EU in op responsible sourcing binnen handelsovereenkomsten die EU-breed worden onderhandeld met derde landen. Als onderdeel daarvan is vanuit de EU in 2021 de *Conflict Minerals Regulation* in werking getreden, om toe te zien op duurzame mijnbouw rondom tin, tantalum, wolfram en goud (ook wel '3TG' genoemd)¹⁴.

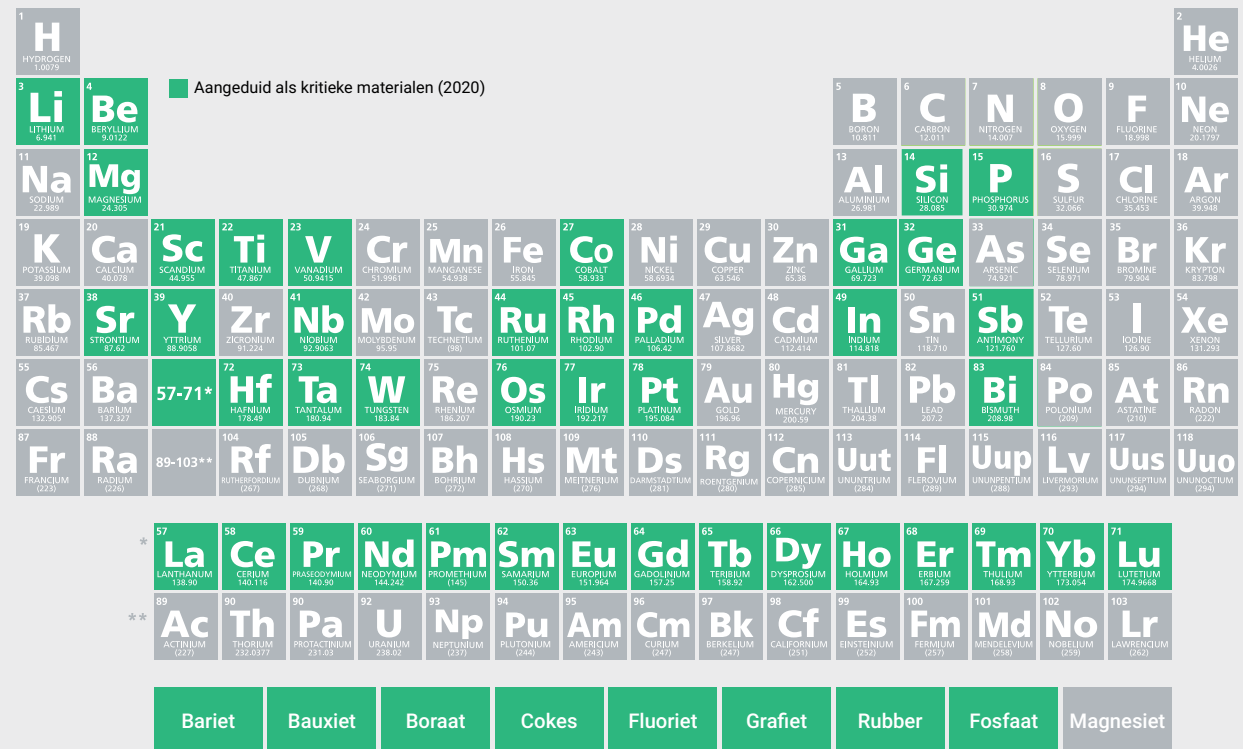
De inzet binnen Europa richt zich op twee pijlers:

- 1. Gezamenlijk onderzoek**, waarbij de EU onderzoek en innovatie financiert, bijvoorbeeld via *Horizon Europe* en *EIT Raw Materials (European Institute of Innovation & Technology)*. Dit onderzoek richt zich echter vooral op ontwikkeling van technologieën en onvoldoende op daadwerkelijke toepassing hiervan.
- 2. Gezamenlijke afspraken**, waarin bijvoorbeeld wordt gewerkt aan verdere ontwikkeling van Ecodesign-richtlijnen en Europese wetgeving. Daarbij zijn er diverse platforms en samenwerkingsverbanden die input geven aan de Europese Commissie.

Om de activiteiten binnen deze pijlers mogelijk te maken, zijn er diverse Europese samenwerkingsverbanden. Enkele van deze verbanden, die zich specifiek richten op kritieke metalen, zijn samengevat in kader *Belangrijke Europese Initiatieven*. Waar binnen deze samenwerkingsverbanden Nederlandse partijen relatief goed vertegenwoordigd zijn rondom windenergie, komen de voortrekkers vanuit de batterij-industrie veelal uit Frankrijk, Spanje, Duitsland en Scandinavië. Veel partijen ervaren deelname als een dilemma, omdat het wel belangrijk is voor de toekomst van de sector, maar vaak veel tijd kost.

Overzicht kritieke metalen

Om inzicht te creëren in welke metalen kritiek zijn op Europees niveau, onderhoudt de Europese Commissie een lijst met *Critical Raw Materials*.¹⁶ Op de vierde versie van de lijst, die in 2020 is gepubliceerd, staan 30 materialen, waaronder 22 (half)metalen of afgeleiden daarvan. In dit rapport hanteren we dezelfde definitie van kritiek (een metaal wat zeer belangrijk is en waar de toevoer problematisch is of kan worden), maar doordat we op een ander schaalniveau en toepassing onderzoeken dan de Europese Commissie komen we uit op een andere selectie van metalen. Figuur 5 laat zien welke metalen door de EC en in dit rapport als kritiek worden gezien.



Figuur 5 Overzicht van de elementen die als kritiek zijn aangeduid door de Europese Commissie.

Belangrijke Europese initiatieven

European Raw Material Alliance (ERMA): een groep partijen die aanbevelingen formuleert voor de Europese Commissie op onder meer onderzoeks- en investeringsprojecten en het opstellen van Ecodesign-richtlijnen.

European Battery Alliance (EBA): een samenwerkingsverband tussen industriële en innovatieve partijen, dat zich inzet voor een sterke Europese batterij-industrie. De EBA doet dat onder meer door het financieren van sectorbrede initiatieven om deze industrie verder te ontwikkelen.

European Innovation Partnership (EIP) Raw Materials: een stakeholdersplatform tussen industrieën, kennisinstellingen, overheden en NGOs, dat de Europese Commissie adviseert.

European Institute of Technology (EIT) Raw Materials: een samenwerkingsverband tussen onderwijs- en onderzoeksinstituten, dat zich onder meer richt op kritieke metalen. Het EIT faciliteert onderwijs- en onderzoeksprogramma's, verzorgt het secretariaat van de ERMA en adviseert de Europese Commissie.

European Platform for Responsible Mining (EPRM): een samenwerkingsverband met als doel om het aandeel verantwoord geproduceerde materialen te verhogen en lokale initiatieven en gemeenschappen te ondersteunen bij verduurzaming van de mijnbouw.

European Energy Research Alliance (EERA) Energy Storage: een samenwerkingsverband tussen onderzoeksinstituten dat zich richt op het ontwikkelen van oplossingen voor energie-opslag.

NEDERLANDSE INZET CIRCULAIRE ECONOMIE IS INCIDENTEEL EN KLEINSCHALIG

Ook binnen Nederland zijn er diverse initiatieven om de afhankelijkheid van kritieke metalen te verlagen, en hebben zowel TNO als HCSS recentelijk met rapporten het onderwerp onder de aandacht gebracht.^{17,9} Het belangrijkste beleidskader is de *Transitieagenda Circulaire Maakindustrie*, onderdeel van het Rijksbrede Programma Circulaire Economie.¹⁸ Ook is er een Nationale Batterijenstrategie gelanceerd waarin vijf belangrijke thema's rondom batterijen zijn geïdentificeerd.¹⁹ Ook is enkele jaren geleden de *Grondstoffenscanner* ontwikkeld om inzicht te creëren in de ketenrisico's en impact van grondstoffen. De onderliggende methode van deze

scanner is echter gericht op productgroepen in plaats van ketenrelaties, waarbij tevens recente innovaties niet accuraat meegenomen zijn vanwege het gebruik van oude data. Daardoor zijn de resultaten soms lastig bruikbaar.

Vanuit het Versnellingshuis Nederland Circulair wordt gewerkt aan diverse 'doorbraakprojecten' om ketensamenwerking op te zetten. Twee hiervan raken aan de behoefte naar kritieke metalen voor de energietransitie:

- **Doorbraakproject Circulaire koperketen**, met focus op het creëren nieuwe ketensamenwerkingen tussen partijen om minder primair koper te gebruiken;
- **Doorbraakproject Circulaire windmolens**, met focus op een ander ontwerp voor windturbines en het organiseren van toekomstig hergebruik.²⁰

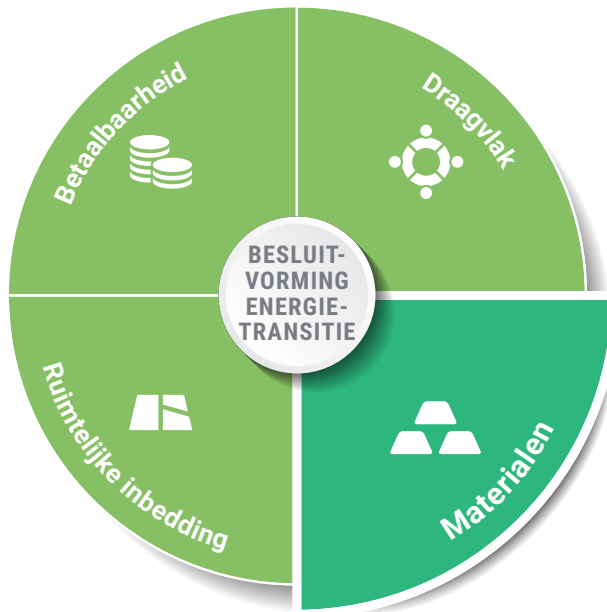
Ook zijn er verschillende regionale initiatieven, waarbij vaak echter nog niet duidelijk is wat de invloed daarvan is op internationale ketens. Zo bouwt de Provincie Zuid-Holland aan een regionaal netwerk Circulaire Zonnepanelen, met als intentie om lokale ketens en initiatieven te creëren en kennis op te bouwen.^{21,22} Tot slot doen kennisinstellingen als CML, HCSS, Clingendael en TNO met regelmaat onderzoeken om de laatste stand van zaken rondom kritieke metalen in kaart te brengen.

Deze initiatieven zijn voor het grootste deel echter incidenteel en kleinschalig. Langjarige inzet en financiering is vaak niet geborgd, waarmee doorlopende betrokkenheid lastig is en kennisopbouw beperkt blijft. Ook hebben de initiatieven veelal een technische focus en wordt er bijvoorbeeld nauwelijks ingezet op ander productgebruik of ander gedrag. Deze activiteiten lijken op dit moment nauwelijks een bijdrage te leveren aan het realiseren van de ambitieuze nationale beleidsdoelstellingen.

Beschikbaarheid van materialen als één van de criteria Het huidige beleid rondom de energietransitie is gebaseerd op drie criteria: betaalbaarheid, draagvlak en ruimtelijke inbedding. De sterke sturing op betaalbaarheid komt voort vanuit de wens van de Rijksoverheid om de maatschappelijke kosten te beperken. Draagvlak is cruciaal om lokale weerstand te voorkomen, bijvoorbeeld tegen windturbines - ondanks dat die weerstand momenteel al aan het ontstaan is. Bij de ruimtelijke inbedding wordt vooral gekeken naar conflicten met andere functies, zoals landbouw, natuur of klimaatadaptatie.

Wanneer er uitsluitend vanuit deze criteria worden gestuurd, kan dat leiden tot bepaalde verschuivingen in technologieën. Zo is er in de Regionale Energiestrategieën een verschuiving te zien van wind-op-land naar zon-op-veld, omdat daarmee minder hinder bij omwonenden ontstaat als gevolg van landschapsvervuiling en eventuele slagschaduw of geluidsoverlast. Dit leidt echter tot een hogere vraag aan kritieke metalen.

Voor toekomstbestendige keuzes is het nodig om de beschikbaarheid van materialen als vierde criterium toe te voegen in de afweging voor de te maken keuzes. Daarmee verlagen we het risico dat er nu plannen worden gemaakt die op lange termijn niet uitvoerbaar blijken te zijn door een tekort aan kritieke metalen of een verstoring in de productieketen.



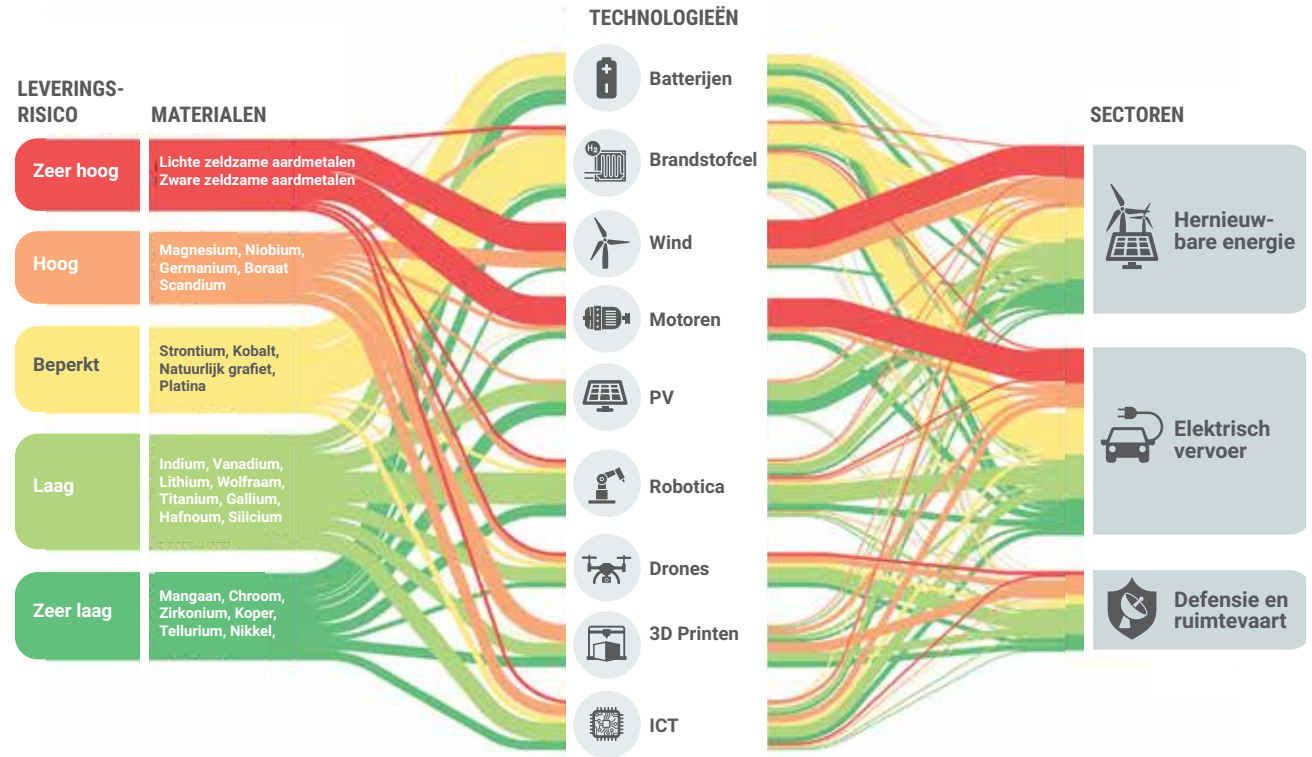
Figuur 6 Om toekomstbestendige keuzes te maken is het nodig om ook het materialen als criterium mee te nemen.



03

GEOPOLITIEK, KETEN- COMPLEXITEIT & IMPACT MIJNBOUW

Voor het realiseren van duurzame energietechnologieën zijn kritieke metalen nodig. Deze metalen zijn 'kritiek' als ze belangrijk zijn voor de economie en er relatief grote kansen zijn op verstoringen in de toelevering. Daarbij verschuift de geopolitieke afhankelijkheid van het Midden-Oosten naar het Verre Oosten, zijn de toevoketens weinig transparant en heeft mijnbouw per definitie sociale- en milieu-impact. Dit hoofdstuk gaat in op deze aspecten en biedt daarmee de context voor het werken met kritieke metalen.



Figuur 7 Overzicht van de verschillende kritieke metalen die nodig zijn voor verschillende technologieën, op basis van de verwachte ontwikkeling van deze technologieën binnen de EU (bron: Europese Commissie).²³

Steeds meer producten in onze wereld gebruiken kritieke metalen. Denk aan mobiele telefoons en laptops, aan batterijen en elektromotoren en aan zonnepanelen en windturbines. Veel van deze kritieke hebben lange internationale ketens, die door veel verschillende landen lopen. Daarmee is het lastig om deze ketens op een eenduidige manier te beïnvloeden. Om hier wel op te kunnen sturen, is een goed begrip van de risico's en afhankelijkheden in de keten van belang.

Bij het vraagstuk rondom kritieke metalen voor de energietransitie is het dus belangrijk om te beseffen dat deze kritieke metalen ook nog nodig zijn voor andere toepassingen. Daarbij is in absolute hoeveelheden de vraag voor het duurzaam energiesysteem het grootste. Een overzicht van welke kritieke metalen nodig zijn voor welke technologieën is opgenomen in figuur 7.

DEFINITIE KRITIEKE METALEN

Materialen die nodig zijn voor een schone energievoorziening, zijn belangrijk voor onze economie. Bij een deel van de benodigde metalen is er ook een relatief grote kans op verstoringen in de toevoer, waarmee er dus een flink aantal 'kritieke metalen' zijn voor de energietransitie. Verstoringen kunnen verschillende oorzaken hebben, zowel aan de vraagkant (een sterke groei) of aan de aanbodkant (een disruptie in de keten). Er zijn in absolute zin overigens meer dan voldoende metaalertsen in de aarde aanwezig, ook van de 'kritieke' metalen. De belangrijkste vraag is in hoeverre deze voldoende op tijd, op een economisch rendabele manier

De voorradigheid van metaalertsen



en zonder enorme milieu- en sociale impact daadwerkelijk gewonnen kunnen worden. Dit is toegelicht in onderstaand kader.

GEOPOLITIEKE UITDAGINGEN: VERSCHUIVING VAN MIDDEN-OOSTEN NAAR VERRE OOSTEN

Europa is voor haar energievoorziening geopolitiek afhankelijk: tot op heden van olie en gas, en in de toekomst van kritieke metalen. Op het gebied van fossiele brandstoffen zijn onder meer de oliecrisis (1973) en meer recentelijk verstoringen in gasleveringen uit

Een veelgestelde vraag over kritieke metalen is of er voldoende voorraad beschikbaar is. Over het algemeen zijn de wereldwijde ertsvoorraden meer dan voldoende om te voldoen aan de verwachte vraag. De daadwerkelijke productiecapaciteit en de opschaling hiervan kent echter een aantal grenzen:

- **Technische grenzen:** wat kan er gewonnen worden met de huidige techniek?
- **Economische grenzen:** wat is winstgevend om te winnen?
- **Maatschappelijke grenzen:** wat is de sociale- en milieu-impact?

Zowel opschaling van bestaande productielocaties en openen van nieuwe mijnen zijn tijdrovende en kapitaal-intensieve processen. Als gevolg van onder meer exploratie, vergunningaanvragen en de aanleg van infrastructuur kan het openen van een nieuwe mijn en bijbehorende raffinagecapaciteit zo'n 10-20 jaar duren. Alleen al daardoor is het produceren van voldoende metalen voor de technologieën die tot 2030 nodig zijn, uitdagend.

Rusland bekende voorbeelden van geopolitiek ingegeven disrupties.

Rondom kritieke metalen is de afhankelijkheid bij het grote publiek bekend geworden door de exportstop van 'zeldzame aardmetalen'¹ door China (eind 2010) vanwege een hoogoplopende ruzie met Japan over de Sankaku / Diaoyu eilandengroep. Omdat 97% van de totale wereldproductie op dat moment afkomstig was uit China, schoot de prijs met ruim 1000% omhoog.

CHINESE DOMINANTIE VAN TOEVOERKETENS

De Chinese dominantie van de economisch en militair belangrijke zeldzame aardmetalen is gevolg van een heldere visie en consistent Chinees industriebeleid sinds de jaren '60.²⁴ Deze strategische inzet op kritieke metalen vanuit China zal voorlopig blijven. Het huidige (13e) 5-jaarplan en de Nationale Industriestrategie *Made in China 2025* richten zich op het verder verlagen van de Chinese economische afhankelijkheid van derde landen.²⁵ De afgelopen jaren heeft China dan ook dominante posities ingenomen in de toevoerketens van bijna alle kritieke metalen, zowel in mijnbouw als in raffinagecapaciteit van metalen die elders worden gewonnen.⁹

Vanuit het *one belt, one road* initiatief ('Nieuwe Zijderoute') investeert China in logistieke infrastructuur (havens, wegen, spoor). Zo creëert het land naast haar eigen winning- en raffinagecapaciteit invloed op de stroom van producten – waaronder erts en metalen – die niet direct eigendom van Chinese bedrijven zijn.

¹ Ter verduidelijking: 'zeldzame aardmetalen' (Engels: *rare earth elements*) is een verzamelnaam voor diverse metalen, waaronder neodymium, dysprosium en praseodymium. Deze zijn, in tegenstelling tot wat de naam zegt, niet zeldzaam.

Voor China is het investeren in ketens van kritieke metalen een manier om ook in de toekomst controle over deze ketens te blijven behouden. Daarbij gaat het niet alleen over winning en metaalproductie, maar ook over de productie van onderdelen en producten waar deze kritieke metalen in verwerkt zitten. Mede als gevolg van de groeiende afhankelijkheid en toenemende handelsconflicten met China heeft de VS in september 2020 een presidentiële noodtoestand afgekondigd rondom kritieke metalen²⁶ en recent een taskforce aangekondigd om de toevoerketens van kritieke metalen te versterken.²⁷

Enkele landen hebben een expliciete strategie opgebouwd om te kunnen omgaan met deze afhankelijkheid. Europa en Nederland onderkennen het belang van samenwerking²⁸, maar hebben vooralsnog nauwelijks een inhoudelijke strategie. Dit lijkt vooral te komen door een onvoldoende gevoel van urgentie. In onder meer Japan en de VS wordt deze urgentie wel gevoeld. Een aantal initiatieven van deze landen is samengevat in het tekstkader.

Voorbeeld: initiatieven vanuit Japan en VS

Japan is zich al ruim voor de Tweede Wereldoorlog bewust van de afhankelijkheid van derden voor grondstoffen. In 1963 werd de *Metallic Minerals Exploration Financing Agency of Japan* opgericht, met als taak om het Japanse bedrijfsleven te steunen bij toegang tot grondstoffen. In 2004 werd dit omgevormd tot de *Japan Oil, Gas and Metals National Corporation*. JOGMEC onderhoudt expertise op het gebied van grondstoffen, coördineert samenwerking tussen overheid en bedrijfsleven en investeert in het verlagen van risico's voor het bedrijfsleven. Zij heeft daar ook de financiële middelen voor. Daarnaast heeft Japan sinds 1983 een nationaal voorraadprogramma met als doel om 60 dagen voorraad te houden voor de Japanse economie. Daarvan houdt de overheid 48 dagen en wordt van het bedrijfsleven verwacht altijd minimaal 18 dagen voorraad aan te houden.

De Verenigde Staten is zich ook al decennia bewust van de afhankelijkheden van kritieke metalen. Sinds 1947 beheert de *Defense Logistics Agency* daarom een nationale strategische voorraad van grondstoffen die kritiek worden geacht, ter waarde van ongeveer \$1,5 miljard.²⁹ Ook dit jaar besteedt het Amerikaanse leger een aanzienlijk bedrag aan het op peil houden van deze voorraad. Zo wil de Defense Logistics Agency in 2021 onder meer 600 Mton Neodymium en ongeveer 15 kton tantalum aanschaffen. In 2013 is het *Critical Materials Institute* opgericht om technische innovaties te helpen ontwikkelen van laboratorium naar pilot. Dit samenwerkingsverband van onderzoeksinstellingen heeft momenteel een direct budget van zo'n \$24 miljoen, naast alle onderzoeken die in de reguliere financieringsstromen en via militair onderzoeksbudget worden betaald.



Figuur 8 Overzicht van potentiële aankopen van strategische materiaalvoorraden door het Amerikaanse leger.

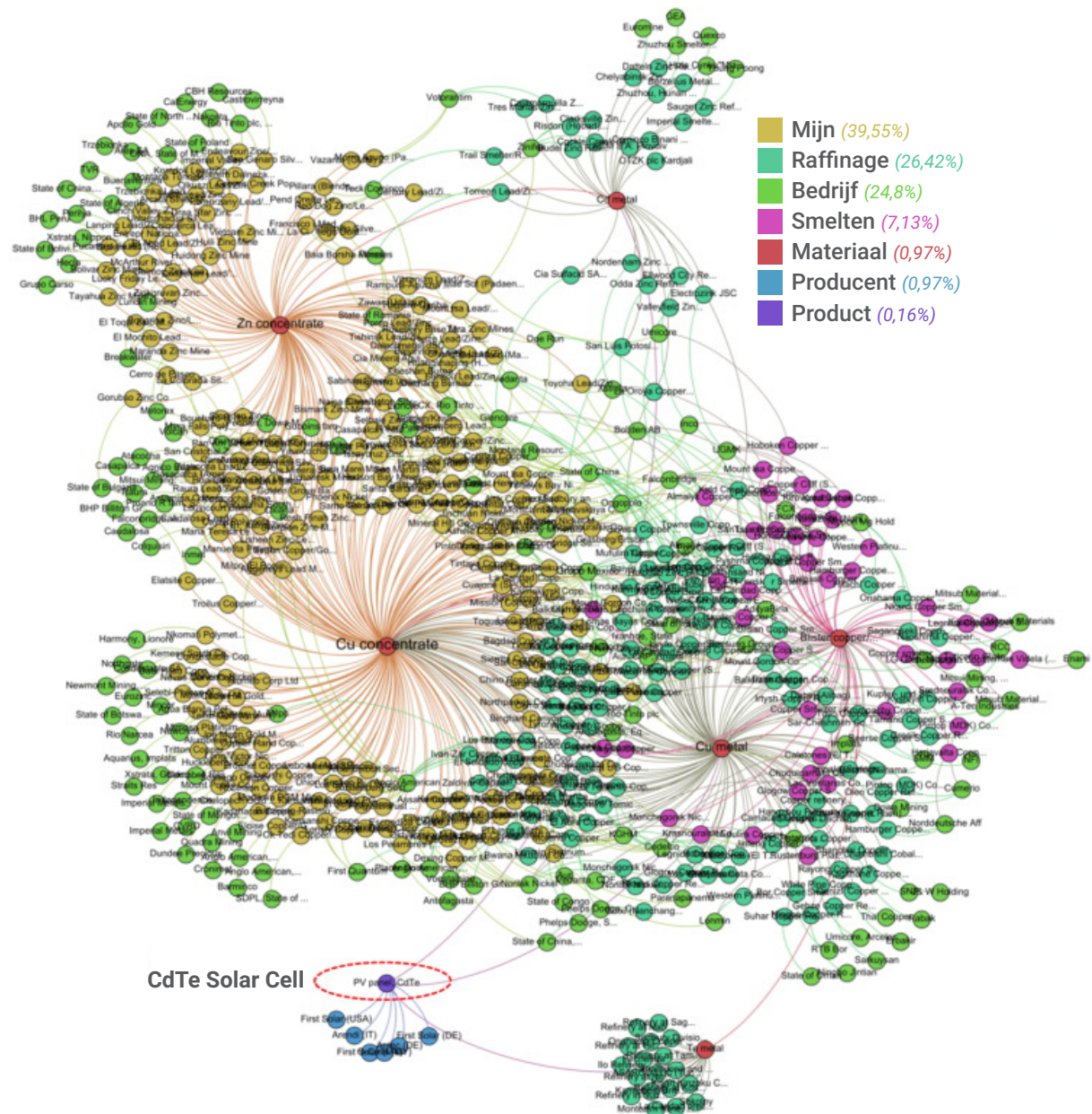
KETENS ZIJN WEINIG TRANSPARANT

Naast geopolitieke risico's zijn er ook risico's die ontstaan als gevolg van lange, complexe en vaak weinig transparante toevokerketens. Daarbij kent iedere stap van de keten zijn eigen complexiteit. Zo komt dit in de mijnbouw door de sterke samenhang tussen de mijnbouw van verschillende metalen - de winning van companions is afhankelijk van de winning van majors (zie tekstkader). Raffinage is een complex industrieel proces waar veel metallurgische kennis voor nodig is. Deze kennis is in Nederland bijna helemaal verdwenen. Bij de productie van onderdelen komt dit onder meer door de vele verschillende materialen - vaak uit verschillende landen - die hiervoor nodig zijn. Voor half- of eindproducten zijn dan weer veel verschillende onderdelen nodig. Ter illustratie laat figuur 9 de complexiteit van een deel van de keten van een zonnepaneel zien.

Een goed functionerende mondiale logistiek is cruciaal voor deze complexe ketens. Risico's op verstoringen in de keten zijn recent duidelijk geworden door zowel productiebeperkingen als gevolg van de COVID-pandemie als de korte blokkade van het Suez-kanaal.

Ketens zijn zo lang en complex dat het vrijwel onmogelijk is om alle risico's in kaart te brengen. Als gevolg daarvan worden ketenrisico's systematisch onderschat. Er is veel onderzoek naar *supply chain resilience*, maar als gevolg van de druk op efficiëntie en *just-in-time* management wordt er weinig geïnvesteerd in het aanhouden van voorraden en daarmee verhogen van de veerkracht van deze ketens. Hierdoor kunnen afnemers in Nederland nauwelijks kunnen anticiperen op verstoringen.

Figuur 9 Het netwerk van bedrijven wat betrokken is bij de productie van een Cadmium-Tellurium zonnepaneel, zo ver de onderzoekers in staat zijn geweest dit in kaart te brengen. Deze visuele weergave illustreert de complexiteit van een toevokerketen (bron: Nuss et al.)³⁰

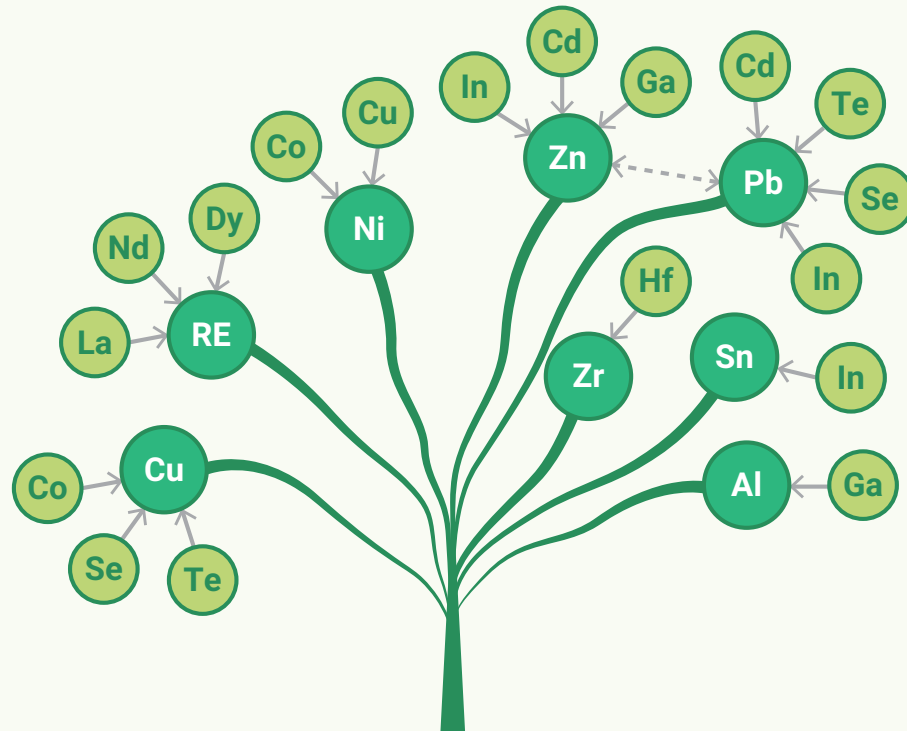


Mijnbouwproductie: *majors en companions*

De productie van de meeste kritieke metalen is extra onvoorspelbaar, omdat ze een nevenproduct (*companion metal*) zijn bij de winning van andere metalen zoals koper, ijzer en zink (*major metals*). Ter illustratie: meer dan 90% van de wereldwijde kobaltproductie is een bijproduct, met als voorbeeld de Katanga-mijn (Congo) die één ton kobalt produceert per 55 ton koper.

Als de vraag naar een *companion metal* stijgt, kan de productie in eerste instantie vaak relatief eenvoudig worden verhoogd. Echter, als de reserve productiecapaciteit volledig benut is moet de prijs plots extreem stijgen voordat het rendabel is om de productie van de totale mijn te verhogen om de vraag naar het *companion metal* te voldoen. Omdat er nauwelijks informatie beschikbaar is over onbenutte productiecapaciteit is het voorspellen van prijzen van companion metals erg moeilijk.

Niet alle kritieke metalen in dit rapport zijn *companion metals*: zo worden lithium en nikkel zelfstandig gewonnen. Zeldzame aardmetalen (REE's - *rare earth elements*) en kobalt zijn vaak een bijproduct, maar niet altijd. Ter illustratie: de Chinese Bayan Obo mijn, die het grootste deel van de wereldproductie van zeldzame aardmetalen voor haar rekening neemt, was oorspronkelijk een ijzermijn die toevallig ook REE's produceerde. Door de combinatie van de sterk stijgende prijs van REE's en de dalende concentratie ijzer in het erts, veranderde Bayan Obo in een mijn die vooral winst uit de productie van REE's haalt, met ijzer als bijproduct.



Figuur 10 Relatie tussen major metals en companion metals bij de winning van ertsen (bron: Graedel et al.).³¹

MIJNBOW HEEFT MILIEU- EN SOCIALE IMPACT

Mijnbouw heeft per definitie negatieve impact op de omgeving van een mijn, zoals ontbossing of vervuiling. Impact vindt zowel plaats tijdens het gebruik van een mijn als na beëindiging van de productie, wanneer een mijnbouwlocatie niet netjes wordt achtergelaten. Ondanks afspraken ontduiken mijnbouwbedrijven deze verplichtingen regelmatig, bijvoorbeeld door de mijn een aantal jaar voor uitputting te verkopen aan een klein bedrijf, dat vervolgens failliet gaat voordat het aan de verplichtingen kan voldoen. Risico's voor schade aan de natuurlijke omgeving leiden er soms ook toe dat mijnen niet worden geopend, zoals het recentelijke besluit om in Groenland geen nieuwe mijn te openen.

Dilemma's op maatschappelijk en sociaal vlak

Ook op maatschappelijk en sociaal vlak leidt mijnbouw regelmatig tot dilemma's en conflicten. Denk bijvoorbeeld aan het vele watergebruik bij nikkelproductie in gebieden in Australië waar reeds grote watertekorten zijn of de schade aan natuurlijke landschappen bij lithiumproductie uit zoutmeren in Zuid-Amerika. Ook vindt bij mijnbouw sporadisch kinder- en dwangarbeid plaats, zoals bij kobaltmijnbouw in Congo of winning van zeldzame aardmetalen in het binnenland van China.

Anderzijds kan een mijn ook een positieve bijdrage leveren. Vaak is een mijnbouwbedrijf lokaal de grootste werkgever, en soms beter georganiseerd dan de lokale overheid. Dat maakt dat deze bedrijven een cruciale rol kunnen spelen in noodomstandigheden. Zo kwamen mijnbouwbedrijven in Guinea, Liberia en Sierra Leone tijdens de ebola-uitbraak van 2014/2015 snel in actie om medewerkers en nabije gemeenschappen te helpen met gezondheidszorg en veiligheidstraining. Daarmee konden de mijnen open blijven.

De negatieve effecten van mijnbouw van kritieke metalen vallen in het niet bij de schade die de winning en verbranding van fossiele brandstoffen met zich meebrengt.³² Toch zijn de milieu- en sociale impact van mijnbouw een risico voor de energietransitie, omdat negatieve berichtgeving maatschappelijk draagvlak kan verkleinen.

Dit wordt geïllustreerd door de vele verontwaardigde en kritische reacties op recente artikelen in onder meer Trouw (kinderarbeid in Congo)³³, het Financieel Dagblad (Oeigoerse dwangarbeid in China)³⁴ en de Volkskrant (milieu-impact van mijnbouw in Groenland)³⁵. Daarbij speelt ook een moreel vraagstuk: in hoeverre mag een duurzame energievoorziening ten koste gaan van mensen en milieu? Aandacht voor verantwoorde mijnbouw en productieketens wereldwijd is daarom cruciaal.

In Bijlage II is een overzicht opgenomen van enkele belangrijke metalen voor de energietransitie, hun belangrijkste eigenschappen en de impact in de keten.

AANDACHT VOOR DUURZAME MIJNBOW IS BEPERKT, MAAR GROEIT

Wereldwijd wordt nog steeds nauwelijks aandacht besteed aan meer duurzame mijnbouw. Ondanks dat veel mijnbouwbedrijven aangeven dat de meerkosten relatief beperkt zijn, is werken aan duurzaamheid lastig als gevolg van concurrentie, corruptie en druk van aandeelhouders op korte-termijnrendement. Vaak concurreren Westerse mijnbouwbedrijven met partijen die niet naar sociale omstandigheden kijken, met als gevolg dat nadruk op duurzame mijnbouw en het uitsluiten van corruptie kan leiden tot verlies van een concessie.

Om bij te dragen aan het verlagen van de impact van mijnbouw, heeft de Wereldbank - mede met Nederlandse financiering - het *Climate Smart Mining* programma opgezet. Daarnaast wordt Europees het CERA-project ontwikkeld, een universeel certificeringsschema speciaal ontwikkeld voor metalen³⁶, met als doel standaardisering aan te brengen in de 32 certificeringsschema's die al voor metalen in omloop zijn. Dit soort vrijblijvende initiatieven zijn echter niet voldoende om de negatieve impact terug te dringen.



04

METAALVRAAG NEDERLANDSE ENERGIE- TRANSITIE





















Voor het toekomstige, duurzame energiesysteem zijn grote hoeveelheden duurzame opwek-, opslag- en transportcapaciteit nodig. Voor de productie daarvan zijn kritieke metalen nodig. In dit hoofdstuk is met behulp van scenario's gemodelleerd hoe groot de metaalvraag van de Nederlandse energietransitie is. Daaruit volgt dat de toekomstige vraag naar sommige metalen voor Nederland groeit naar 10% tot 25% van de huidige wereldwijde productie.



VIER SCENARIO'S VOOR EEN KLIMAATNEUTRAAL ENERGIESYSTEEM

Een energiesysteem in lijn met het Klimaatakkoord van Parijs vraagt grote aanpassing van het huidige energiesysteem. Er zijn verschillende routes mogelijk om Nederland in 2050 klimaatneutraal van energie te voorzien. Daarbij zijn er verschillende afwegingen te maken: zelfvoorzienend zijn of energie importeren? Centrale of decentrale elektriciteitsproductie? Elektrificatie of duurzame brandstoffen?

Om de consequenties van deze keuzes inzichtelijk te maken, zijn en worden er scenario-studies gedaan. Dit gebeurt zowel op nationaal als op regionaal niveau. Deze studie gaat uit van de scenario's die Netbeheer Nederland heeft opgesteld (april 2021).³⁷ De belangrijkste kenmerken van deze scenario's zijn per scenario samengevat in tabel 1. Deze vier scenario's zijn het uitgangspunt voor het berekenen van de metaalvraag van de Nederlandse energietransitie.

Tabel 1: Kenmerken van de vier klimaatneutrale energiescenario's (bron: Netbeheer Nederland)³⁵

SCENARIO	ENERGIE- GEBRUIK ¹⁾	HERNIEUW- BAARHEID	ZELFVOOR- ZIENING	INDUSTRIE	OPWEK	FLEXIBILITEIT
Regionale sturing	Reductie: 40%	95%	73%	Krimp: 1% per jaar (naar 73% huidige omvang)	 125 GWh	 400 GWh
					 20 GWh	
					 31 GWh	 42 GW
Nationale sturing	Reductie: 25%	95%	71%	Stabiel (gelijk aan huidige omvang)	 107 GWh	 400 GWh
					 20 GWh	
					 52 GWh	 51 GW
Europese CO ₂ -sturing	Reductie: 0%	69%	33%	Groei: 1% per jaar (naar 136% huidige omvang)	 59 GWh	 200 GWh
					 10 GWh	
					 30 GWh	 19 GW
Internationale sturing	Groei: 2%	59%	32%	Groei: 1% per jaar (naar 136% huidige omvang)	 58 GWh	 200 GWh
					 10 GWh	
					 28 GWh	 16 GW

 Zon-PV  Wind op land  Wind op zee  Batterijen  Elektrolyzers

¹⁾ Ten opzichte van 2015, en inclusief het gebruik van energie als industriële grondstof.

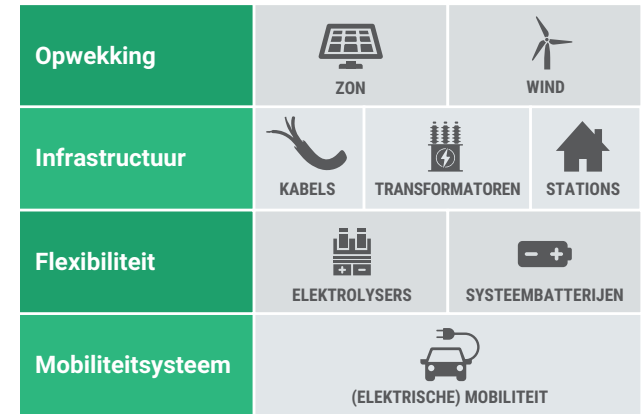
De vier scenario's zijn 'realistische extremen', die ontwikkelingsrichtingen voor het energiesysteem laten zien. Het doel van de scenario's is om inzicht te geven in de bandbreedte van de behoeften aan flexibiliteitsmiddelen (energie-opslag, afstemming vraag-aanbod) en infrastructuur. Ze variëren van focus op zelfvoorziening tot een meer import-georiënteerd perspectief. Ze variëren tevens van aanzienlijke krimp tot aanzienlijke groei van de energie-intensieve industrie. Daarnaast variëren binnen de scenario's de technologieën, energiebronnen en -dragers.

Een meer uitgebreide omschrijving van deze scenario's is opgenomen in Bijlage III.

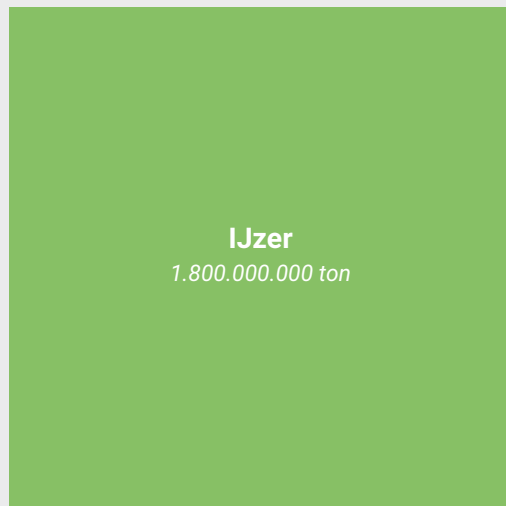
Afbakening van het systeem

Deze studie richt zich op de elementen van het energiesysteem die kritieke metalen (kunnen) bevatten. Dat zijn vooral technologieën voor de opwekking, het transport en de opslag van elektriciteit. Ook de metaalvraag van elektrische auto's is meegenomen. Omdat voor de productie, het transport en de opslag van warmte en gas nauwelijks kritieke metalen nodig zijn, zijn deze buiten beschouwing gelaten.

Ook zijn materiaalverliezen in de productieketen niet meegenomen, vooral omdat deze lastig te kwantificeren zijn. De totale metaalvraag kan als gevolg daarvan nog hoger uitvallen.

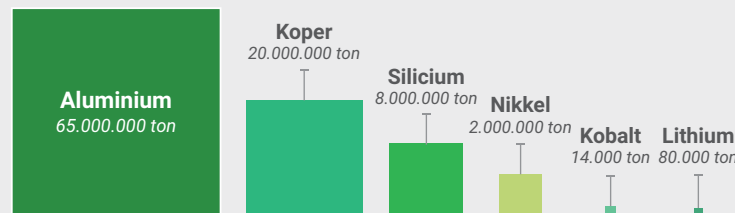


Absolute versus relatieve vraag



De absolute vraag naar metalen (kritiek of niet kritiek) geeft een beeld van hoeveel van deze metalen nodig is. Omdat het productievolume van deze metalen echter enorm verschilt, zegt dit niet heel veel. Ter illustratie: wereldwijd in 2020 is er circa 1.800.000.000 ton ijzer geproduceerd tegenover slechts 120 ton platina.

Om een beter beeld te krijgen hoe significant de vraag naar verschillende metalen kritiek is, wordt de jaarlijks benodigde hoeveelheid metalen voor Nederland uitgezet als percentage van de wereldwijde jaarproductie. Omdat de toekomstige mijnbouwproductie moeilijk te voorspellen is, gaan deze berekeningen uit van de productie van 2020 als referentiegetal.



Bij het bepalen van deze relatieve vraag is het belangrijk om Nederland in perspectief van de wereld te plaatsen:

Het BNP van Nederland is zo'n 1,0% van het globale BNP



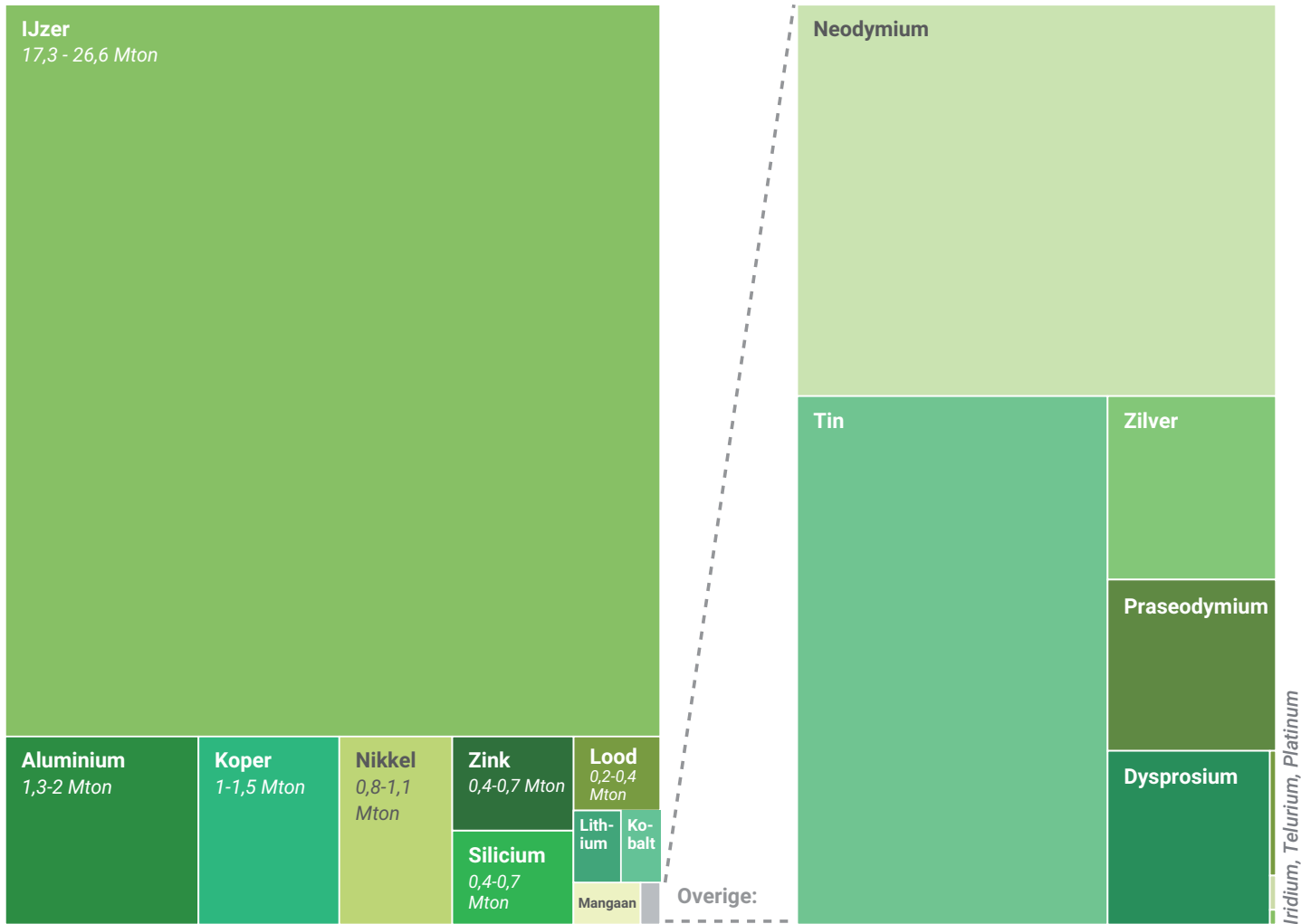
Het Nederlandse finale energieverbruik is zo'n 0,5% van het wereldwijde energieverbruik



Het Nederlandse inwoneraantal is zo'n 0,2% van de wereldwijde populatie



Figuur 11 Wereldwijde productie (2020) van een aantal belangrijke metalen voor het energiesysteem (bron: USGS).⁵⁴



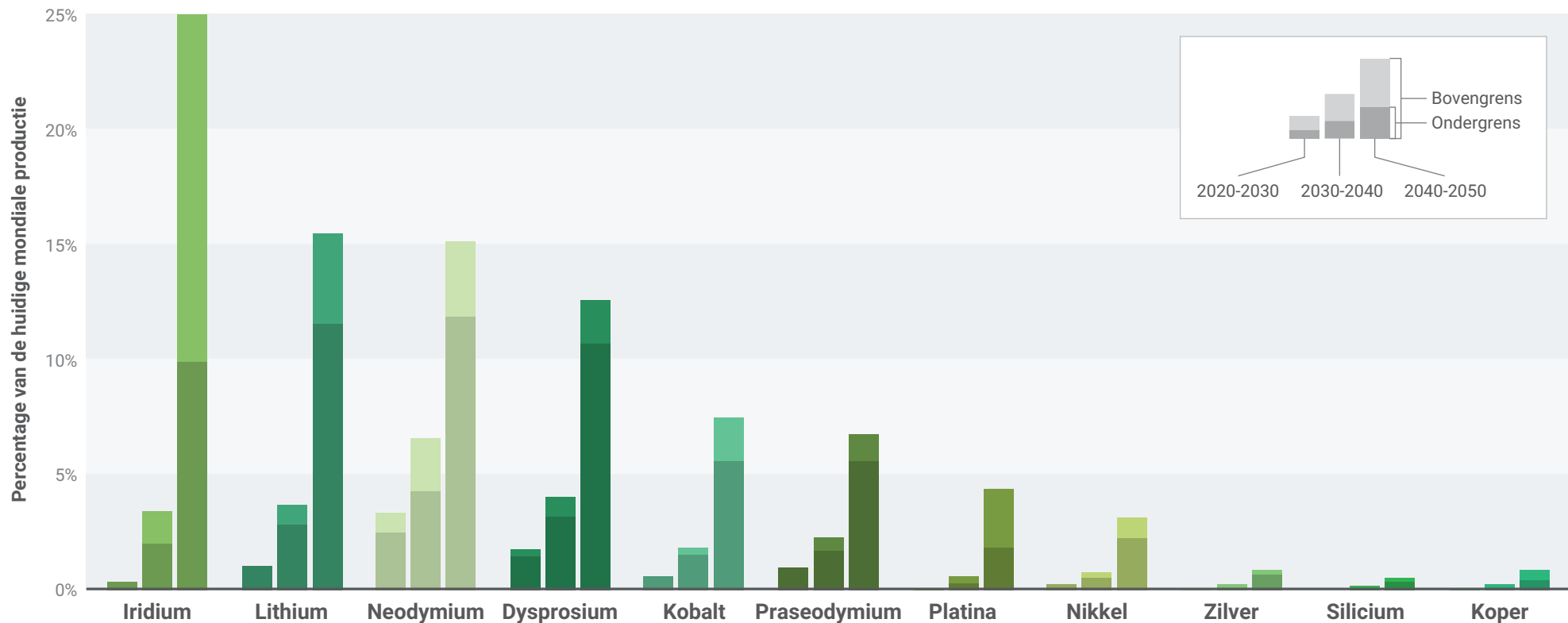
METAALVRAAG NEDERLANDS ENERGIESYSTEEM

Absolute vraag naar metalen bedraagt miljoenen tonnen

Voor de Nederlandse energietransitie zijn, afhankelijk van het energiescenario, voor de periode 2020-2050 22 tot 33 miljoen ton metalen nodig. 94% van de totale hoeveelheid komt voor rekening van ijzer (verwerkt tot staal), aluminium, koper en nikkel.

De meeste metalen zijn nodig voor het produceren van zonnepanelen en windturbines. Ter illustratie: de nieuwe Haliade-windturbines van General Electric, die in Rotterdam zijn geplaatst, hebben per turbine een vermogen van 12 MW en een gewicht van meer dan 1.500 ton. In de scenario's staat er in 2050 tussen de 38 en 72 GW (38.000 - 72.000 MW) aan windturbinecapaciteit. Omdat in de scenario's *Regionale sturing* en *Nationale sturing* er meer zonnepanelen en windmolens staan opgesteld in 2050, is de metaalvraag in die scenario's ook beduidend hoger.

Figuur 12 Hoeveelheid benodigde metalen tussen 2020 en 2050 (in Mton) om het duurzaam energiesysteem op te bouwen, op basis van een gemiddelde van de vier scenario's.



Figuur 13 Verwachte jaarlijkse vraag naar een aantal kritieke metalen als percentage van de huidige wereldproductie, voor de periodes 2020-2030, 2030-2040 en 2040-2050.

Relatieve vraag overstijgt het aanbod met factoren in komende dertig jaar

Wanneer we de Nederlandse vraag naar kritieke metalen voor de energietransitie vergelijken met de huidige wereldwijde productie, blijkt deze veel hoger dan op basis van de omvang van Nederland realistisch is. De vraag naar iridium, lithium, kobalt, platina, nikkel en zeldzame aardmetalen is het grootst, ten opzichte van de huidige productie. De metaalvraag van de Nederlandse energietransitie voor de periode 2020-2050 is in figuur 13 gevisualiseerd.

De vraag naar de meeste metalen neemt gestaag toe tussen 2020 en 2050. Dat komt omdat de grootste groei van opgestelde vermogens in de scenario's verwacht wordt tussen 2030 en 2050. Voor iridium, lithium, neodymium en dysprosium stijgt de gemiddelde verwachte vraag zelfs in het laagste scenario tot boven de 10% van de huidige mondiale productie. Het verschil tussen de vraag vanuit de transitie naar een duurzaam energiesysteem en het aanbod (vanuit mijnbouwproductie) ligt daarmee niet in de orde van grootte van procenten, maar van factoren.

- Voor iridium stijgt de jaarlijkse Nederlandse vraag in de toekomst tot 10-25% van de huidige productie wanneer er naast alkaline-elektrolyzers ook gebruik wordt gemaakt van PEM-techniek, waar platina in verwerkt zit. TNO heeft onlangs berekend dat in 2050 de totale Nederlandse iridiumvraag voor elektrolyzers 122% van de huidige mondiale productie bedraagt.⁸
- De jaarlijkse vraag naar lithium stijgt tot 12-15% per jaar als gevolg van het gebruik van systeembatterijen om het elektriciteitsnet te bufferen en van overstap op elektrisch vervoer.

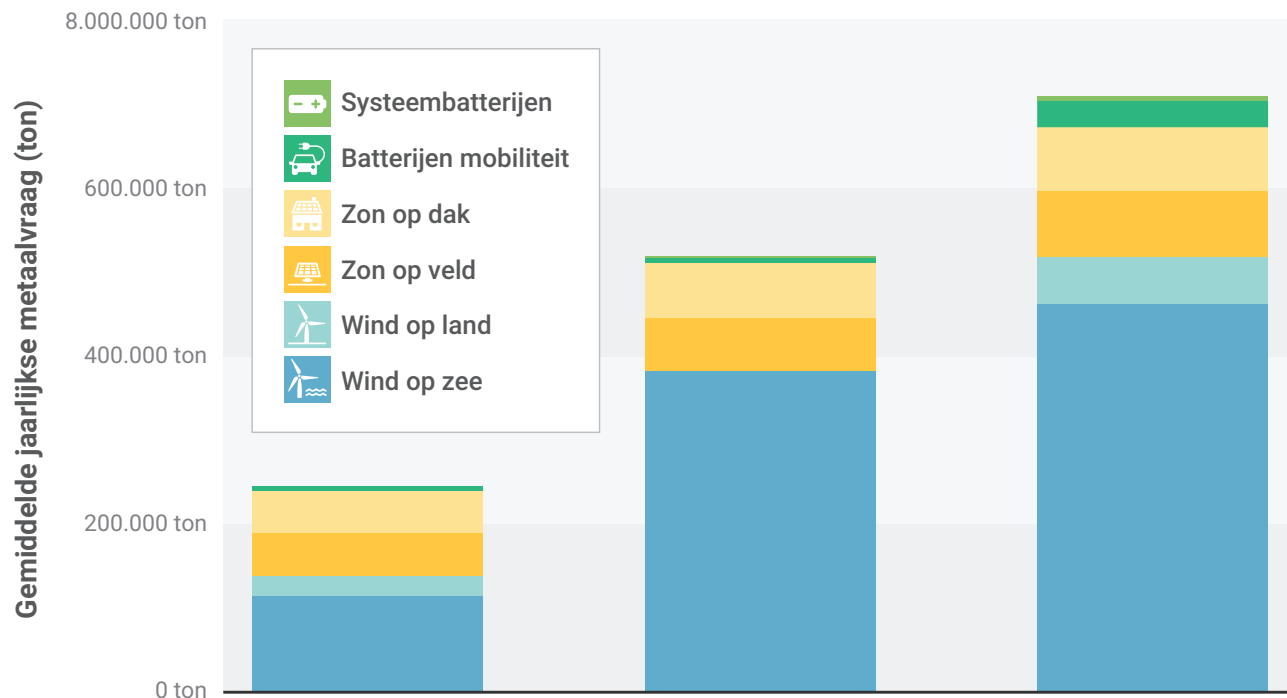
- De vraag naar zeldzame aardmetalen stijgt: neodymium naar 12-15% en dysprosium naar 10-12% van de huidige wereldwijde jaarproductie voor de periode 2040-2050. Deze metalen worden toegepast in permanente magneten in onder meer windturbines en elektrische auto's.

Grote verschillen tussen scenario's door mate van zelfvoorzienendheid en aandeel hernieuwbare energie

Daarbij verschilt de metaalvraag sterk per scenario. In het *Nationale sturing* scenario is de metaalvraag in Nederland het hoogste, in het *Internationale sturing* scenario zijn de kleinste hoeveelheden kritieke metalen nodig. De lagere primaire energievraag in de scenario's *Nationale sturing* en *Regionale sturing* wordt teniet gedaan door het feit dat Nederland ook in grotere mate zelfvoorzienend is, waarmee het percentage hernieuwbare energie veel hoger ligt dan in de scenario's Europese sturing en Internationale sturing. In het scenario *Internationale sturing* wordt er een aanzienlijke hoeveelheid waterstof geïmporteerd (235 -291 TWh in 2050), die elders geproduceerd zal moeten worden met elektrolyzers en via (duurzame) elektriciteit. Daarmee is er dus sprake van een hogere metaalvraag elders voor de productie van de Nederlandse energievraag.

METAALVRAAG REGIONAAL ENERGIESYSTEEM: CASUS ZUID-HOLLAND

De metaalvraag speelt niet alleen nationaal, maar ook regionaal. Uit een analyse voor Zuid-Holland blijkt dat een aanzienlijk deel van de Nederlandse metaalvraag nodig gaat zijn voor de energietransitie in die provincie. Dit is het gevolg van de hoge energievraag, die zowel wordt veroorzaakt door de vele industrie als de hoge bevolkingsdichtheid.



Figuur 14 Gemiddelde jaarlijkse metaalvraag (in ton, incl. niet-kritieke metalen) tussen 2020 en 2050 voor het Zuid-Hollandse energiesysteem, op basis van het scenario Nationale sturing. De grootste hoeveelheid metaal is nodig voor wind op zee.

In 2050 zal naar verwachting 45 - 49% van de geplande offshore-wind en 18 - 22% van de voorziene zonnepanelen op daken in Zuid-Holland zijn geïnstalleerd. Omdat juist deze technologieën een grote hoeveelheid metalen per MW bevatten, is de totale hoeveelheid benodigde metalen voor de binnen Zuid-Holland geïnstalleerde opwek-, transport- en opslagcapaciteit aanzienlijk. Afhankelijk van het gekozen energiescenario ligt de totale metaalvraag voor de periode 2020-2050 tussen de 4,2 en 7,2 miljoen ton. Ook staat er in de scenario's relatief veel waterstof-elektrolyzers in de provincie opgesteld, waardoor er

veel iridium nodig zal zijn bij de toepassing van PEM-technologie.

Wel is het opgestelde vermogen aan systeembatterijen in de provincie relatief beperkt ten opzichte van de rest van Nederland. Daardoor zal er ook minder lithium en kobalt nodig zijn voor het energiesysteem in Zuid-Holland. Tegelijkertijd is voor het goed functioneren van het energiesysteem een sterke interconnectiviteit met omliggende provincies en regio's van belang.

GROEIENDE RISICO'S RONDOM BESCHIKBAARHEID

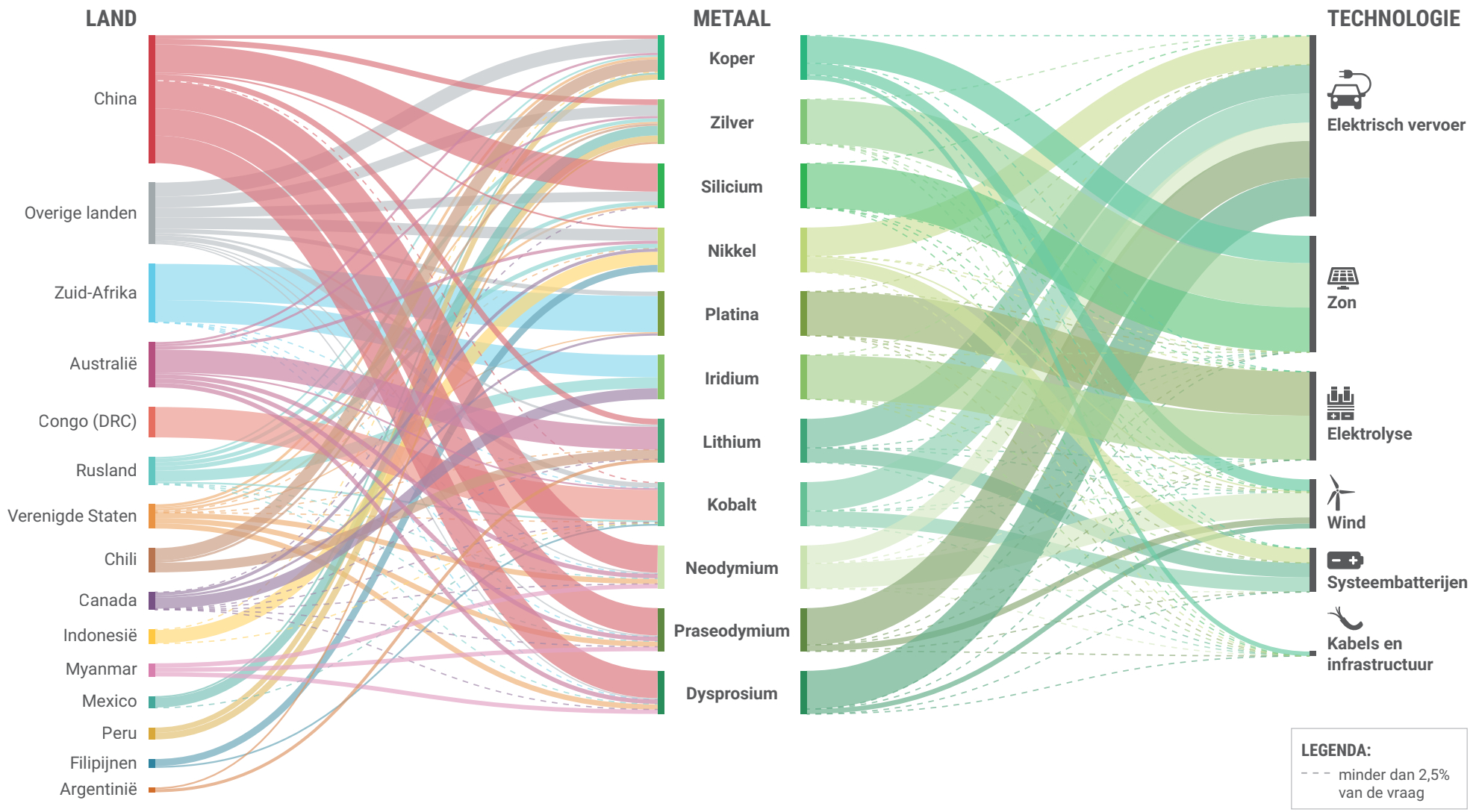
Hoewel de relatieve vraag in de scenario's pas sterk groeit tussen 2030 en 2040, ontstaan er ook op korte termijn al aanzienlijke risico's. Van neodymium, lithium en dysprosium is de gemiddelde Nederlandse vraag in de komende tien jaar al meer dan 1% van de huidige mondiale productie. Bovendien versnellen veel landen, waaronder de Verenigde Staten, hun klimaatambities. Daarmee zal naar verwachting ook de vraag van andere landen flink toenemen.

Gezien het feit dat het openen van een nieuwe mijn tussen de 10 en 15 jaar kost en ook het opschalen van raffinagecapaciteit een flinke doorlooptijd heeft, is er een reëel risico dat de vraag op korte termijn sneller groeit dan het aanbod. Bovendien groeit met een sterkere afhankelijkheid van enkele landen het risico op verstoringen in de beschikbaarheid van grondstoffen, waardoor fabricage van producten vertraging op kan lopen. Als hier niet op tijd wordt op ingespeeld, kan de energietransitie vertragen of duurder worden.

Winning vindt plaats in beperkt aantal landen

De winning van de kritieke metalen die nodig zijn voor de energietransitie, vindt plaats in een beperkt aantal landen. Daarmee is de wereldmarkt voor het overgrote deel van haar vraag afhankelijk van de productie in die landen. Bij zeldzame aardmetalen is de voornaamste producent China (62%), voor lithium zijn dit Australië (52%), Chili (22%) en China (13%), voor nikkel Indonesië (30%) en de Filipijnen (16.%), voor kobalt is dit Congo (69%) en voor platina Zuid-Afrika (82%). De winning van de benodigde metalen per technologie is weergegeven in figuur 15.





Figuur 15 → Winning van kritieke metalen die nodig zijn voor een duurzaam energiesysteem.

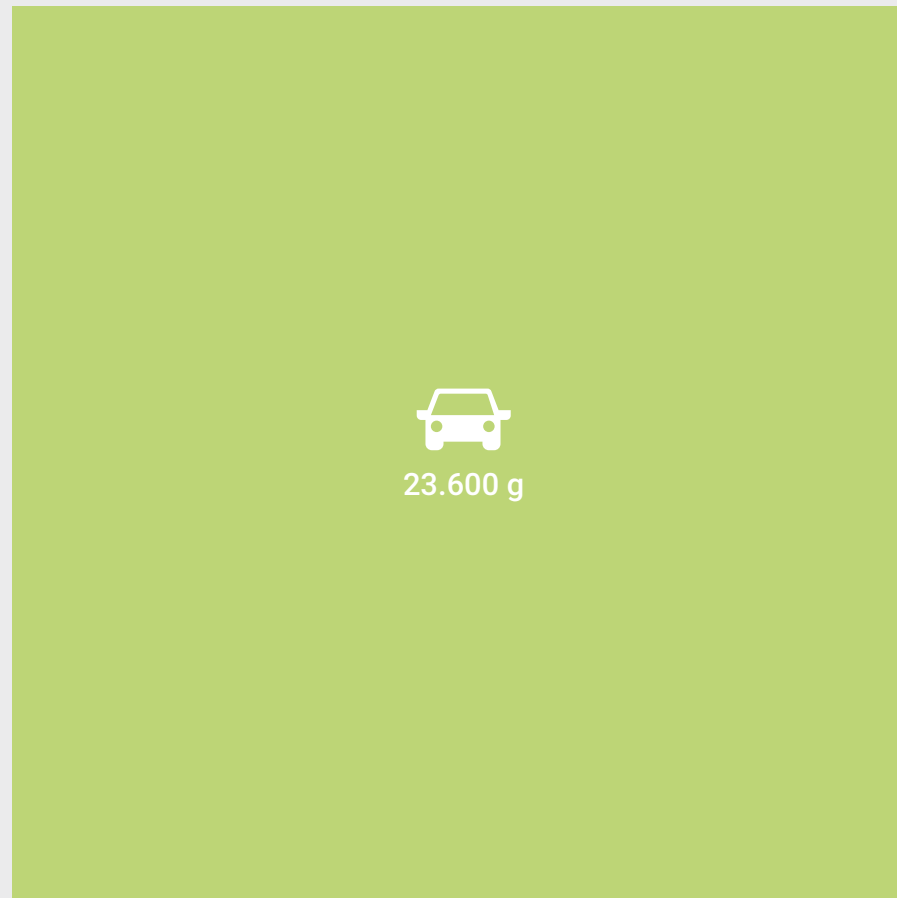
Metaalvraag energietransitie in relatie tot andere technologieën

Kritieke metalen zijn daarbij niet alleen nodig voor de energietransitie, maar ook voor andere technologieën. Er zijn al miljarden elektronische apparaten geproduceerd met batterijen die ook lithium, kobalt en nikkel bevatten. Ook worden er neodymium-magneten gebruikt in koptelefoons en in harde schijven (HDD). In absolute zin is de vraag voor duurzame energietechnologieën echter vele malen hoger dan de vraag voor bijvoorbeeld elektronica, zoals mobiele telefoons, laptops en sensoren. Dit is geïllustreerd in onderstaand kader.

De hoeveelheden kritieke metalen die er nodig zijn voor de energietransitie is vele malen groter dan huidige toepassingen. Zo bevat een iPhone 6 ongeveer 7 gram kobalt en 0,9 gram lithium. De batterij (NMC111 60 kWh) van een elektrische auto bevat 23.600 gram kobalt en 8.300 gram lithium.³⁸ De kobaltvraag van één elektrische auto staat dus gelijk aan die van 3.300 iPhones.

Zelfs in het energiescenario met de laagste metaalvraag - het scenario Internationale sturing - is de verwachte lithiumvraag tussen 2020 en 2050 (130-178 kton). Dat staat gelijk aan 144.000.000 iPhones, bijna 8.500 per persoon.

Figuur 16 → Hoeveelheid kobalt in een elektrische auto, een laptop en een iPhone.



05

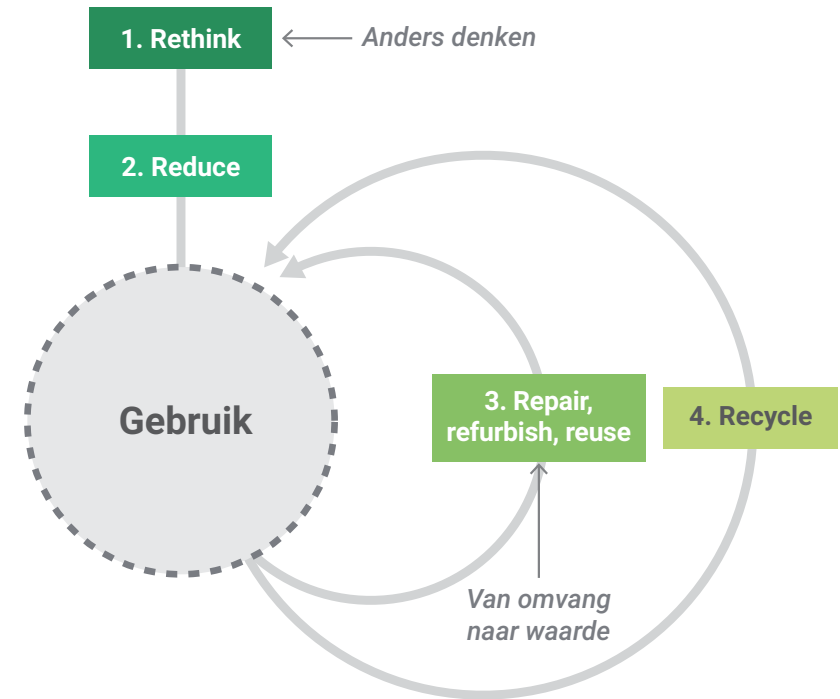
OPLOSSINGS- RICHTINGEN

Een wereldwijd klimaatneutrale energievoorziening in 2050 is niet haalbaar vanuit een materiaalperspectief, wanneer we uitgaan van de huidige mijnbouwproductie (aanbod) en duurzame energietechnologieën (vraag). Wereldwijd zal er gewerkt moeten worden aan zowel het verhogen van de mijnbouwproductie als het verlagen van de metaalvraag van duurzame energietechnologieën. Omdat mijnbouw in Nederland geen mogelijkheid is en de Nederlandse invloed op mijnbouwbedrijven beperkt is, richt dit hoofdstuk zich op vier circulaire strategieën om de vraag naar kritieke metalen te verminderen: *Rethink, Reduce, Repair* en *Recycle*

VIER CIRCULAIRE STRATEGIEËN OM METAALVRAAG TE BEPERKEN

Een manier om onze vraag naar kritieke metalen te beperken is door principes van de circulaire economie toe te passen. De circulaire economie is gericht op het behoud van waarde in ons economisch systeem, waarmee we de vraag naar (primaire) grondstoffen beperken en de bijbehorende negatieve effecten op mens en milieu verminderen.

Na het besparen van zo veel mogelijk energie zijn er verschillende circulaire strategieën waarmee de waarde van producten, onderdelen en materialen zo lang mogelijk wordt behouden. Daarmee wordt de vraag naar nieuwe opwek-, transport- en opslagcapaciteit beperkt, waarmee ook de hoeveelheid daarvoor benodigde kritieke metalen afneemt. Er zijn vier circulaire strategieën uitgewerkt, die ook zijn weergegeven in figuur 17.



Figuur 17 → Circulaire strategieën voor het verlagen van de metaalvraag.



Rethink: aansturen op energiebesparing en herontwerpen van het systeem zodat er minder producten nodig zijn;



Reduce: verhogen van de materiaalefficiëntie van een product en het vervangen van kritieke door minder kritieke metalen (substitutie);



Repair (+ refurbish & repurpose): verlengen van de levensduur van producten of componenten;



Recycle: terugwinnen van materialen

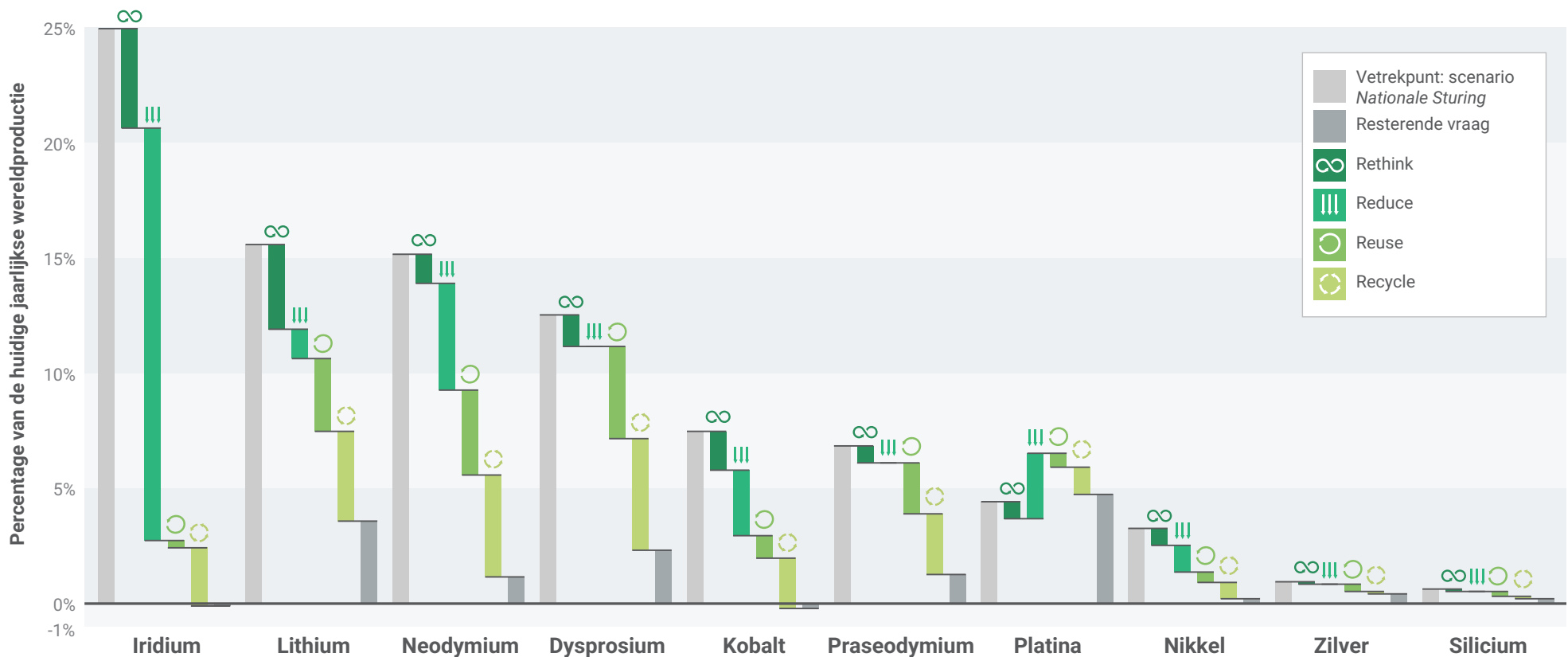
Vertrekpunt: scenario *nationale sturing*

Om de potentie van de circulaire strategieën op een goede manier inzichtelijk te maken, is één van de vier energiestrategieën als referentie gebruikt. Daarbij is het nationale sturing scenario gekozen, omdat hier zo min mogelijk energie wordt opgewekt buiten de landsgrenzen. Daarmee zijn de weglekeffecten van metalen die in het buitenland nodig zijn voor de opwek van Nederlandse energievraag zo beperkt mogelijk. Tabel 2 geeft een overzicht van de uitwerking en de aannames van de vier circulaire strategieën.

Deze aannames zijn gedaan om te laten zien wat de potentie is van de verschillende strategieën. Sommige aannames vragen om verdere uitwerking rondom de technische en maatschappelijke haalbaarheid. Vooral rond *Rethink* zou een geïntegreerde systeemstudie uitgevoerd moeten worden om te onderzoeken of en met welke consequenties deze circulaire strategie haalbaar is.

Tabel 2: Uitwerking & aannames van de vier circulaire strategieën

STRATEGIE	TOELICHTING	AANNAMES
Rethink	<ul style="list-style-type: none"> • Beperken van de opwek-, transport- en opslagcapaciteit van elektriciteit • Beperken van aantal elektrische auto's 	<ul style="list-style-type: none"> • 50% reductie capaciteit systeembatterijen • 25% reductie aantal personenauto's • 20% reductie opgesteld vermogen zon en wind. • 20% reductie infrastructuur (kabels, transformatoren) • 20% reductie elektrolyzers
Reduce	<ul style="list-style-type: none"> • Verbeteren van efficiëntie van technologieën • Toepassen van technologieën met minder kritieke metalen (substitutie) 	<ul style="list-style-type: none"> • 100% batterijtechnologie zonder kobalt of nikkel (zoals LFP). • 100% windturbinetechnologie met minder neodymium (gearbox) • 100% waterstoftechnologie zonder Iridium
Repair	Verlengen van de levensduur van technologieën	<ul style="list-style-type: none"> • 25% verlenging van gemiddelde levensduur van opwek- en opslagtechnologieën en elektrisch vervoer.
Recycle	Terugwinnen en hergebruiken van materialen aan einde levensduur	<ul style="list-style-type: none"> • 95% terugwinning van materialen bij einde levensduur



Figuur 18 Potentieel effect van de vier circulaire strategieën op de jaarlijkse metaalvraag (periode: 2040-2050) voor de tien metalen met de grootste relatieve vraag.

CIRCULAIRE POTENTIE VAN GECOMBINEERDE STRATEGIEËN

Door de combinatie van de verschillende circulaire strategieën kan de vraag naar kritieke metalen in de periode 2040-2050, wanneer de vraag het hoogste is, significant dalen. Voor Iridium en kobalt zou er zelfs helemaal geen primaire vraag meer hoeven te zijn.

Verder zijn de grootste besparingen te zien bij zeldzame aardmetalen: neodymium (-93%), dysprosium (-82%) en praseodymium (-81%). Ook de gemiddelde jaarlijkse vraag naar lithium in 2040 en 2050 kan met 77% afnemen.

Deze combinatie van strategieën leidt volgens deze scenario's voor de gemiddelde vraag in de periode 2040-2050 tot de volgende resultaten:

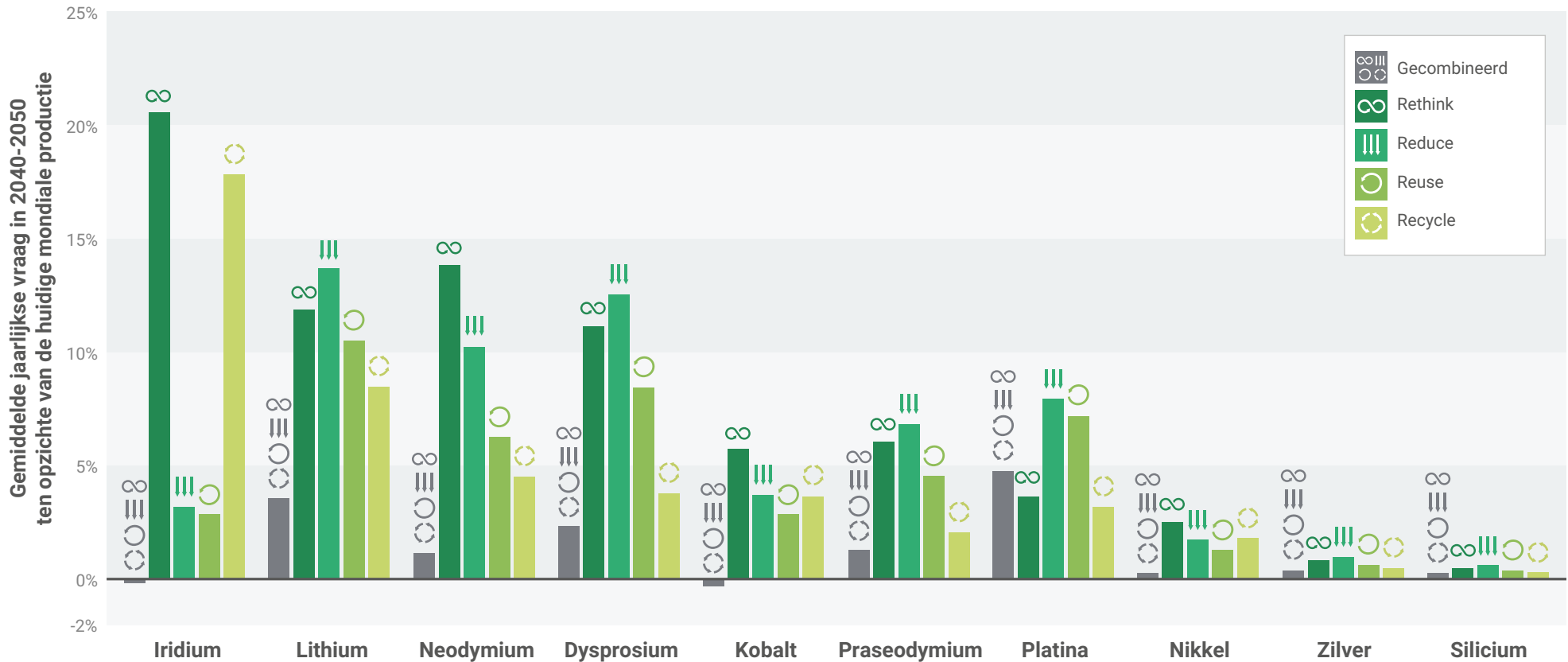
- De lithiumvraag daalt van 25% tot circa 3,5% van de huidige wereldwijde jaarproductie, die nodig is voor accu's van elektrische auto's en systeembatterijen.
- De neodymiumvraag daalt van 15% tot 1,1% van de huidige wereldwijde jaarproductie, vooral voor toepassing in permanente magneten van windturbines en elektromotoren van auto's.

- De platinavraag stijgt van 4,5% naar 6% van de huidige wereldwijde jaarproductie, waarbij deze nodig is voor de productie van waterstof. De stijgende platinavraag als gevolg van de circulaire strategieën komt door de vervanging van iridium bij de productie van waterstof, waarbij voor de elektrolyse geen PEM meer wordt gebruikt maar alleen maar alkaline.

- Voor iridium en kobalt kan vanuit Nederland richting 2050 in theorie meer aanbod ontstaan dan vraag, doordat nieuwe technologieën minder kritieke metalen bevatten (Reduce) en metalen uit vrijkomende technologieën worden teruggewonnen.

Inzetten op één circulaire strategie levert onvoldoende effect op

Om deze reductie te realiseren is het nodig om in te zetten op een combinatie van *Rethink* (een ander energiesysteem), *Redesign* (een ander ontwerp van technologieën), *Repair*



Figuur 19 Gemiddelde jaarlijkse metaalvraag voor de individuele strategieën (periode: 2040-2050).

(verlengen van de levensduur) en *Recycle* (terugwinnen van materialen aan het einde van de levensduur). Inzet op één of enkele van deze vier strategieën is onvoldoende omdat zowel de vraag gereduceerd moet worden, maar ook het aanbod uit recycling omhoog moet. Figuur 19 laat zien wat de jaarlijkse gemiddelde vraag in 2040-2050 is van de individuele strategieën. De metaalvraag is in veel gevallen nog steeds aanzienlijk ten opzichte van de huidige productie.

Inzetten op circulaire strategieën is nu nodig voor toekomstige baten

Veel van deze strategieën kunnen niet van de ene op de andere dag worden gerealiseerd en vragen om een goede voorbereidingstijd. Om de toekomstige potentie van de circulaire strategieën te realiseren, is het daarom belangrijk om op korte termijn al stappen te zetten. Daarbij gaat het bijvoorbeeld om het meenemen van het materiaalperspectief in het ontwerp van het energiesysteem (*Rethink*), het investeren in ontwikkeling van technologieën met minder kritieke metalen (*Reduce*), het vormgeven van wetgeving en fiscale regelingen voor levensduurverlenging en reparatie (*Repair, refurbish & repurpose*) en het investeren in de opbouw van voldoende recyclingcapaciteit (*Recycle*).

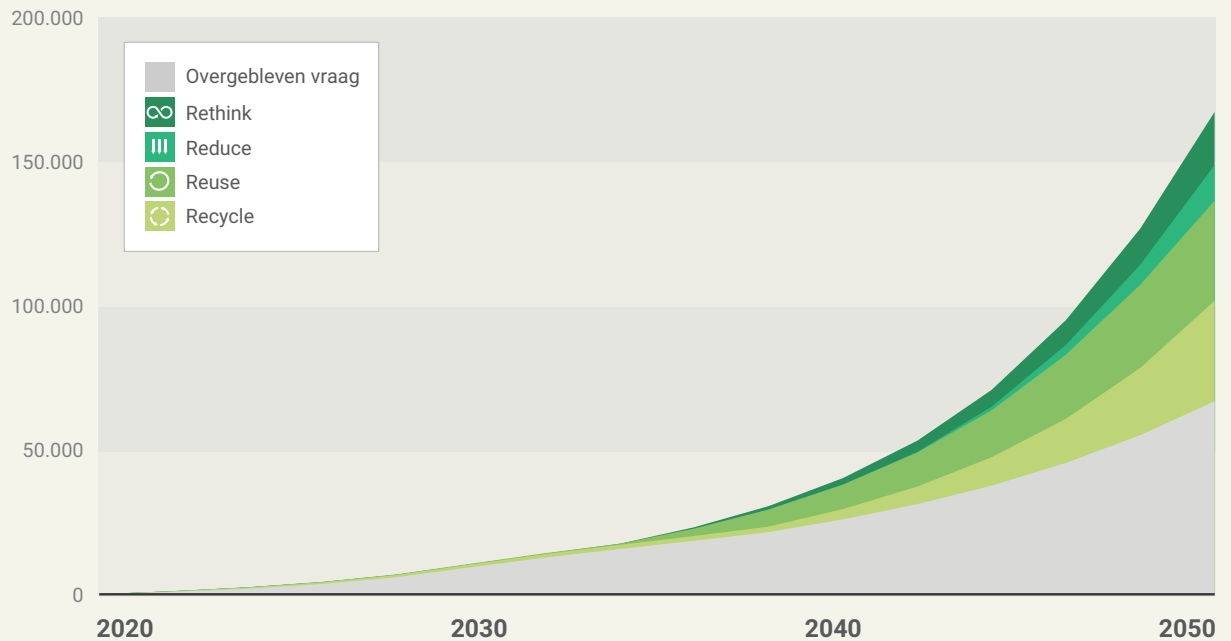
Ook opschaling mijnbouwproductie blijft nodig

Ook bij toepassing van alle circulaire strategieën blijft er een resterende metaalvraag die hoger is dan het Nederlands aandeel in het wereldwijde BNP (1,0%), het energieverbruik (0,5%) en de bevolking (0,2%). Een verantwoorde opschaling van de wereldwijde mijnbouwproductie blijft daarmee nodig om de transitie naar een duurzaam energiesysteem wereldwijd te kunnen maken en daarmee ernstige klimaatverandering te voorkomen.

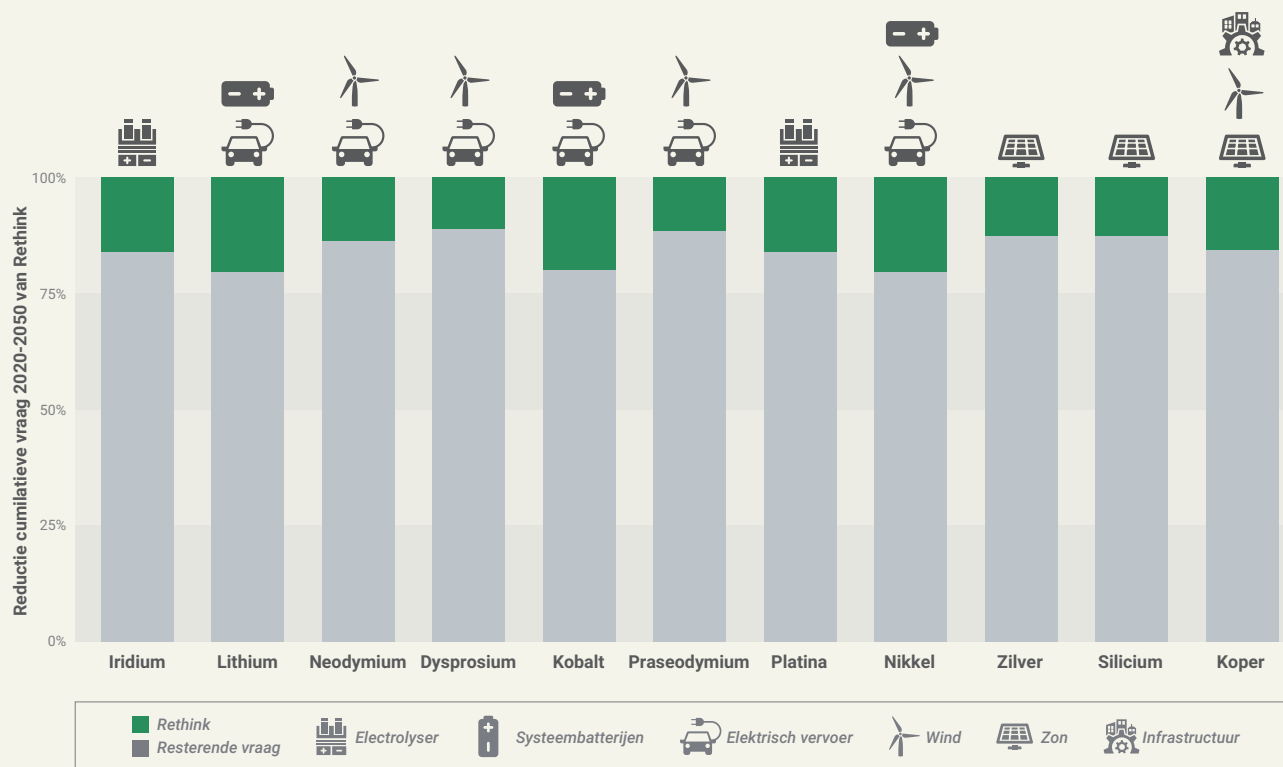
Illustratie: Lithiumreductie 2020-2050

De reductie van de kritieke metaalvraag vindt niet alleen op één moment plaats, maar groeit over de tijd. Daarbij is er een onderscheid tussen de reductie in vraag op één moment (bijvoorbeeld in 2050) of de cumulatieve reductie in vraag (over de periode 2020-2050). De grafiek in figuur 20 laat zien hoe de reductie van de lithiumvraag over de tijd plaatsvindt

vanuit de verschillende circulaire strategieën. Daarbij zijn de effecten van levensduurverlenging (*Repair, refurbish & repurpose*) vanaf 2035 al zichtbaar. De effecten van een ander ontwerp van het energiesysteem (*Rethink*) volgen pas later, omdat systeembatterijen naar verwachting pas vanaf 2040 een grotere rol gaan spelen.



Figuur 20 Cumulatieve lithiumvraag tussen 2020 en 2050, inclusief het reductiepotentieel van de verschillende circulaire strategieën.



Figuur 21 Reductiepotentieel van *Rethink*-strategie voor de tien metalen die relatief het meest gebruikt worden, per technologie waarin deze metalen zijn verwerkt.

Rethink richt zich op het verminderen van de benodigde opwek-, transport- en opslagcapaciteit. Dat kan onder meer bereikt worden door energiebesparing en inzet op een sterkere interconnectiviteit binnen het energiesysteem. Daarnaast gaat deze strategie uit van een mobiliteitssysteem met minder voertuigen, waardoor er ook minder batterijcapaciteit nodig is. Figuur 21 illustreert het reductiepotentieel voor de tien relatief meest gebruikte metalen.

Aannames

∞ Rethink

- 50% reductie van capaciteit systeembatterijen
- 25% reductie van het aantal personenauto's
- 20% reductie van opgesteld vermogen zon en wind
- 20% reductie netcapaciteit
- 20% reductie elektrolyzers

Potentiële effecten

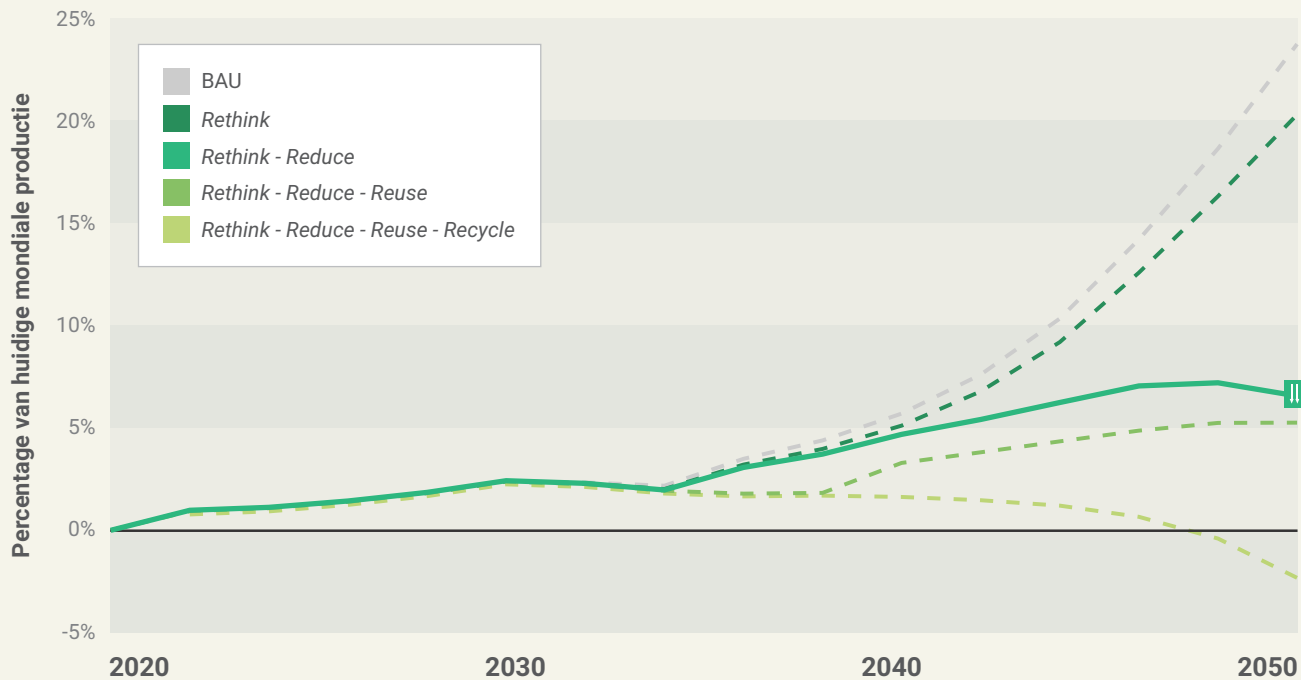
- De gemiddelde jaarlijkse vraag (periode: 2045-2050) van de tien relatief meest gebruikte metalen kan met 9%-18% worden verlaagd. Deze reductie is gelijkmatig verdeeld over de verschillende metaalsoorten.
- Verdergaande reductiemaatregelen lijken mogelijk, onder meer door in te zetten op een mobiliteitssysteem met (nog) minder voertuigen. Daarvoor is het nodig om het huidige aantal van 8,7 miljoen auto's verder terug te dringen dan 25%. Door meer in te zetten op deelauto's zou in de Nederlandse vervoervraag kunnen worden voorzien met 5,7 miljoen personenauto's en 240.000 deelauto's: een reductie van ruim 30%.³⁹⁻⁴²

Benodigde inzet

- Grootschalige energiebesparing om de totale vraag naar opwek-, transport- en opslagcapaciteit te verlagen
- Meer flexibiliteit in elektriciteitsvraag van (groot-)verbruikers waardoor minder opslagcapaciteit nodig is, vooral tijdens piekmomenten
- Efficiënter gebruik van voertuigen door het mobiliteitssysteem in te richten op basis van meer deelmobiliteit, waardoor minder elektrische voertuigen nodig zijn.
- Optimaal gebruik van batterijcapaciteit door accu's in personenauto's zoveel mogelijk in te zetten als systeembatterijen.
- Ontwerp van het energiesysteem waarbij de metaalvraag één van de afwegingen is, naast onder meer betaalbaarheid, draagvlak en ruimtelijke inbedding.



REDUCE: STIMULEER TECHNOLOGIEËN MET MINDER KRITIEKE METALEN



Figuur 22 Ontwikkeling van de jaarlijkse kobaltvraag als percentage van de huidige wereldproductie.

De circulaire strategie **Reduce** gaat uit van technologieën die minder of geen kritieke metalen bevatten, maar wel al voldoende bewezen zijn en op commerciële schaal kunnen worden geproduceerd. Deze technologieën hebben op dit moment echter niet altijd de overhand als gevolg van hogere kosten of lagere prestaties (voorbeeld: de energiedichtheid van een LFP-batterij is 30-40% lager dan van een NMC-batterij).

Aannames

- Rethink** +
- Reduce** -

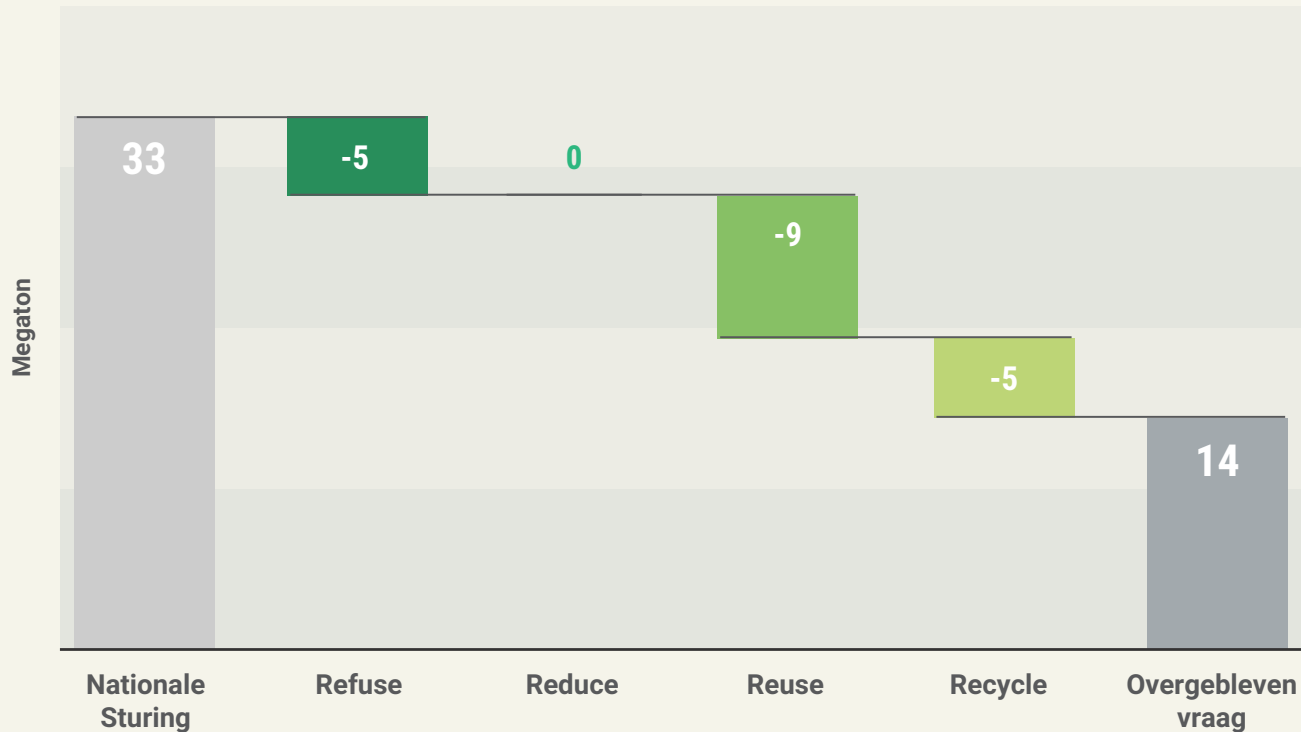
- 100% batterijtechnologie zonder kobalt of nikkel (wel: LFP-batterijen).
- 100% windturbinetechnologie met minder neodymium (wel: turbines met gearbox)
- 100% waterstoftechnologie zonder iridium (wel: Alkaline technologie, met platina)

Potentiële effecten

- De vraag naar de meest kritieke metalen daalt aanzienlijk: voor de periode 2045-2050 is er tot 60% minder kobalt en nikkel nodig en zelfs tot 90% minder iridium ten opzichte van Rethink. Ook de vraag naar neodymium kan met ruim 30% worden teruggebracht.
- De totale hoeveelheid metalen die nodig is voor de energietransitie neemt nauwelijks af (-0.7%). Dat komt omdat er vooral een verschuiving plaatsvindt naar metalen die minder kritiek zijn. Zo worden met een LFP-batterij kobalt en nikkel vervangen, maar is hiervoor wel meer ijzer nodig.
- Omdat kritieke metalen vaak kostbaar zijn, verlaagt deze strategie de potentiële vrijkomende waarde bij recycling. Daardoor kan de businesscase voor het terugwinnen van metalen minder goed uitvallen.

Benodigde inzet

- **Investerings in de opschaling van opwek- en opslagtechnologieën** die minder kritieke metalen bevatten (substitutie) maar wel al marktklaar zijn (TRL-9).
- **Stimuleren van technologieën met minder kritieke metalen**, bijvoorbeeld door hierop te sturen met innovatiesubsidies en in tenders voor wind- en zonneparken.



Figuur 23 Reductie van de verschillende circulaire strategieën op de totale hoeveelheid grondstoffen die er tussen 2030 en 2050 nodig zijn voor de onderdelen die in dit onderzoek zijn meegenomen.

De circulaire strategie **Repair** richt zich op het verlengen van de levensduur van technologieën. Doordat windmolens, elektrische auto's of zonnepanelen langer meegaan hoeven deze minder vaak vervangen te worden. Door in te zetten op reparatie en onderhoud wordt zowel de economische waarde van producten en onderdelen behouden als de vraag naar producten met kritieke metalen verlaagd. Figuur 23 laat zien dat deze strategie het grootste effect heeft van de vier strategieën op het reduceren van de totale primaire metaalvraag.

Aannames

∞ Rethink	+
III Reduce	+
○ Repair	-

- Verlengen van de gemiddelde levensduur van technologieën met 25%.

Potentiële effecten

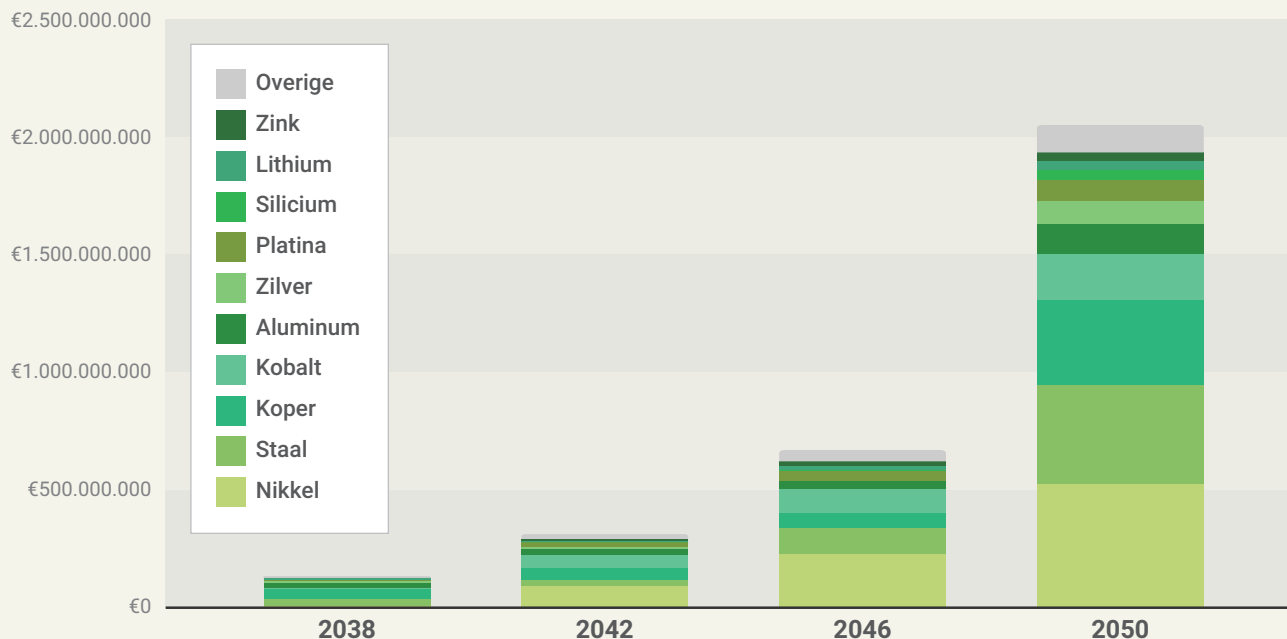
- Er zijn minder kritieke metalen nodig, omdat technologie minder snel vervangen hoeft te worden. Door levensduurverlenging wordt de vraag vooral vanaf 2030 gedempt, omdat rond dat moment de grootschalige vervanging van technologieën start die vanaf 2010 toegevoegd zijn.
- De cumulatieve metaalvraag kan tussen 2020 en 2050 met bijna een kwart dalen. De grootste reductie van de materiaalvraag is te danken aan het verlengen van de levensduur van zonnepanelen en windmolens.
- Als gevolg van de langzamere opbouw van het duurzaam energiesysteem stijgt het aanbod metalen voor recycling minder snel.

Benodigde inzet

- **Aanscherping wet- en regelgeving** over de minimale levensduur van producten (o.a. vanuit Ecodesign-richtlijnen), afspraken over verlengde producentenverantwoordelijkheid tijdens de levensduur en juridische borging van verantwoordelijkheid bij herinzet van producten.
- **Meer technisch- en servicepersoneel** dat onderhoud en reparatie van installaties kan verzorgen.
- **Belastingverschuiving** van arbeid naar grondstoffen en vervuiling om een businesscase te creëren voor reparatie en herinzet.
- **Onderzoek** naar technische barrières voor herinzet (repurpose) van producten of onderdelen, bijvoorbeeld van autobatterijen als statische energieopslag in de gebouwde omgeving.



RECYCLE: HERGEBRUIK MATERIALEN UIT ENERGIETECHNOLOGIEËN



Figuur 24 Potentiële theoretische waarde van vrijkomende materialen uit de Nederlandse energie-infrastructuur.

De circulaire strategie **Recycle** richt zich op het terugwinnen van de metalen aan het einde van de levensduur van duurzame energietechnologieën. Dit is de meest laagwaardige circulaire strategie, die geschikt wordt als de andere strategieën zijn doorlopen of niet meer mogelijk zijn. Maar goede recycling met zo min mogelijk verliezen is wel een vereiste. Vroeg of laat zullen producten op materiaalniveau teruggebracht moeten worden in het systeem. Figuur 24 laat de waarde van de vrijkomende materialen zien, tegen de huidige nieuwe materiaalprijs.

Aannames

∞	Rethink	+
	Reduce	+
○	Repair	+
♻️	Recycle	-

- **Recyclingpercentage van 95% van alle metalen, aan het einde van productlevensduur**

Potentiële effecten

- Vanaf 2040 nemen de vrijkomende volumes significant toe, omdat rond die tijd veel technologieën het einde van hun levensduur hebben bereikt en vervangen dienen te worden. Tegelijkertijd is er ver voor 2040 al voldoende volume dat vrijkomt om recycling-technologie op te zetten. Vooral voor batterijen van auto's, zonnepanelen en windmolens zijn er al eerder aanzienlijke volumes die vrijkomen.
- Voor de periode 2040-2050 kan recycling leiden tot een vraagreductie van 20-80% van de tien metalen die, ten opzichte van de huidige productie, het meest worden gebruikt, bovenop de effecten die er behaald worden met *Reuse, Repair, Reduce* en *Rethink*.
- Theoretisch gezien kan Nederland rond 2050 netto exporteur van kobalt worden. Dit komt doordat kobalt verdwijnt uit nieuwe batterijtechnologie, terwijl er wel kobalt vrijkomt uit recycling van oude batterijen.
- De waarde van jaarlijkse vrijkomende metalen stijgt tot ruim €2 miljard in 2050 (op basis van de huidige materiaalprijzen) en neemt verder toe na 2050.

Benodigde inzet

- **Design for recycling** om producten zo te ontwerpen, dat kritieke metalen eenvoudiger teruggewonnen kunnen worden
- **Verbetering recyclingtechnologie** om de zuiverheid van het gerecyclede metaal te verhogen
- **Investeren in recyclingcapaciteit en -infrastructuur** om te zorgen voor voldoende schaal grootte voor het ontmantelen, vervoeren en verwerken van duurzame technologieën
- **Verhogen kennisniveau** rondom recycling, waarbij het vooral gaat om specialistische technische kennis binnen de industrie



06

NEDERLANDSE METAAL- INDUSTRIE

De Nederlandse industrie kan een belangrijke rol spelen bij het realiseren van de vier circulaire strategieën. Het aantal Nederlandse bedrijven dat een positie heeft in de toevoerketen van kritieke metalen is echter beperkt. Ook specifiek rondom de productie van duurzame energietechnologieën zijn er nauwelijks Nederlandse partijen actief. Een heldere strategie en sterk industriebeleid zijn nodig om zowel een circulaire als minder afhankelijke energietransitie te bewerkstelligen.

Nederland is voor de productie van het overgrote deel van haar opwek- en opslagcapaciteit afhankelijk van buitenlandse producenten en leveranciers. Zoals in H3 beschreven staat is geopolitieke afhankelijkheid een probleem dat vooral op EU niveau moet worden opgelost. Toch hebben ook enkele Nederlandse partijen een rol in de toevoerketen van kritieke metalen. Daarin liggen er kansen om in de toekomst een grotere rol te spelen, wanneer industriële partijen en de overheid de juiste investeringen doen.

De gehouden interviews (zie Bijlage I) bevestigen dat afhankelijkheid van grondstoffen een serieus risico begint te vormen voor de Nederlandse industrie. Dit wordt geïllustreerd door het recente nieuws dat één op de vijf fabrieken in Nederland productieproblemen heeft wegens groeiende wereldwijde schaarste aan productiemiddelen en materialen.⁴³ Om de industrie toekomstbestendig in te richten, is dus een andere aanpak nodig.

Goede inschatting kritieke materiaalstromen lastig

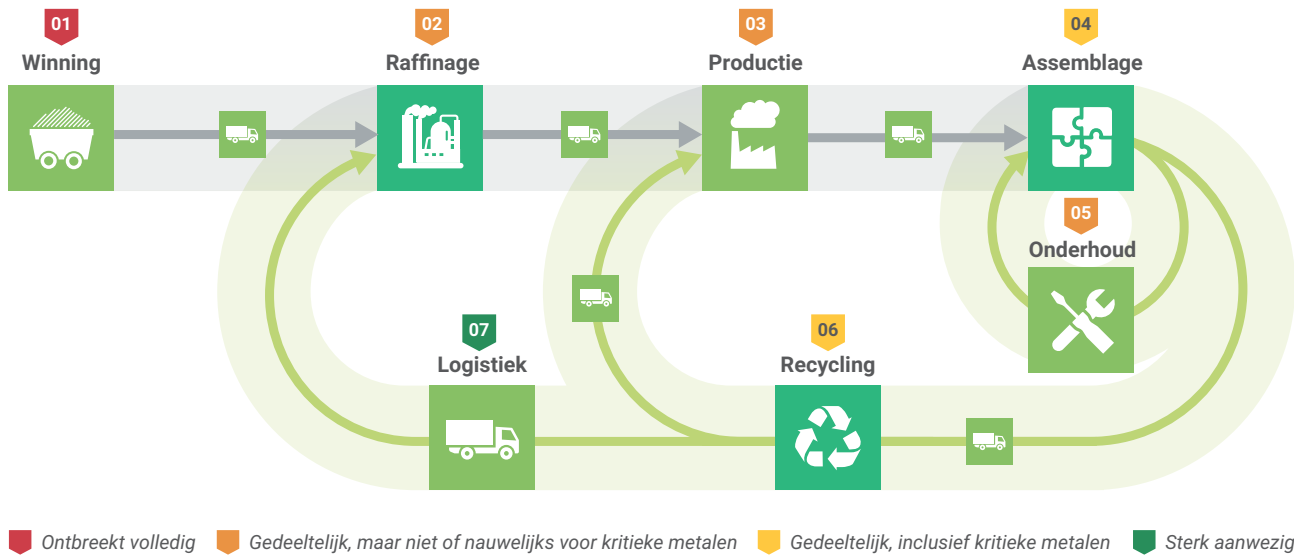
Het is lastig om accurate inschattingen te geven voor de volumes kritieke metalen die binnen de Nederlandse economie circuleren. Enerzijds komt dit doordat deze metalen in complexe producten zijn verwerkt, waarbij de precieze voorraad en samenstelling van deze producten niet bekend is. Daarnaast was er historisch eenvoudigweg geen aanleiding om deze data vast te leggen, waarmee er geen databases bestaan.

Voor bulkmaterialen geeft de materialenmonitor van CBS een inschatting. Onder leiding van het RIVM werkt een consortium aan de ontwikkeling van een centraal Grondstoffen Informatie Systeem (GRIS), waarmee deze informatie in de toekomst ook voor kritieke metalen beschikbaar zou moeten komen. De verwachting is dat een eerste versie eind 2022 gereed is.

ANALYSE: NEDERLANDSE BEDRIJVEN IN TOEVOERKETENS KRITIEKE METALEN

De Nederlandse metaalsector heeft in veel fasen van de toevoerketen van kritieke metalen een beperkte positie. Hier worden zes fasen onderscheiden, met logistiek als belangrijke aanvullende activiteit die bij elke fase nodig is. Per fase wordt een schets gegeven de belangrijkste activiteiten die binnen Nederland plaatsvinden.





Figuur 25 Schematische weergave van aanwezigheid van bedrijvigheid rondom kritieke metalen en de energietransitie in Nederland.

Uit onze eerste verkenning blijkt dat de Nederlandse industrie in verschillende delen van de keten een beperkte positie heeft. Dit beeld is niet compleet, en is gemaakt middels een inventarisatie op basis van een set interviews (zie Bijlage I).

Vooral in de eerste twee stappen van de keten, mijnbouw en raffinage, is er geen bedrijvigheid rond de verwerking van kritieke metalen. Er is wel bedrijvigheid rond het vervaardigen van componenten en eindproducten waar kritieke metalen in zitten. Hoeveel bedrijvigheid er exact is, is echter onbekend. Om dit in kaart te brengen is verder onderzoek nodig zijn. Verder heeft Nederland wel een sterke positie in logistiek.

Kenmerken Nederlandse metaalsector

De Nederlandse metaalsector bestaat voor het overgrote deel uit midden- en kleinbedrijf, met daarnaast nog enkele grotere bedrijven. Het MKB wordt vertegenwoordigd door de Metaalunie, waar zo'n 14.000 bedrijven op aangesloten zijn met zo'n 170.000 medewerkers. Grotere bedrijven – zoals Tata Steel en Philips – zijn aangesloten bij de ondernemersorganisatie FME, die ongeveer 2.200 leden met 220.000 medewerkers vertegenwoordigt. De werkgelegenheid in de Nederlandse basismetaal- en metaalproductenindustrie is daarmee groter dan in de chemische sector.⁴⁴

1. Winning

Nederland wint geen ertsen op haar eigen grondgebied. Nederland heeft wel een koloniale geschiedenis van mijnbouw, maar de Nederlandse rol is op dit moment beperkt tot het huisvesten van enkele brievenbusfirma's.⁴⁵ Nederland is dus afhankelijk van andere landen, veelal buiten Europa, voor de aanvoer van ertsen.

De geopolitiek, ketencomplexiteit en milieu-impact van mijnbouw is verder uitgewerkt in hoofdstuk 3.

2. Raffinage

Nederland kent een beperkt aantal bedrijven dat geconcentreerde ertsen raffineert tot metalen. De meest bekende is staalproductie door Tata Steel Europe (IJmuiden, 7 Mton productie). Daarnaast produceert Aldel - Damco aluminium (Delfzijl, 180 kton productie) en maakt Nyrstar zink (Budel, 290 kton productiecapaciteit). Deze bedrijven produceren overigens grotendeels voor de buitenlandse markt, bijvoorbeeld voor Duitse autofabrikanten.

Als onderdeel van de toevoerketens van kritieke metalen is Nederland bijna geheel afhankelijk van buitenlandse partijen. Nederland heeft geen capaciteit voor de raffinage van kritieke metalen zoals zeldzame aardmetalen, lithium of kobalt. Het merendeel van die metalen wordt buiten Europa geraffineerd, met name in China.

Bij raffinage speelt naast schaarste ook afnemende kwaliteit van grondstoffen een rol. Nyrstar (Budel) ondervindt bijvoorbeeld een afnemende kwaliteit van zinkerts-concentraten. Hoewel er wereldwijd nog voldoende zinkerts aanwezig is in de bodem, zijn de ertsen die gewonnen worden van steeds lagere kwaliteit.

3. Productie van componenten

In Nederland lijken er op dit moment weinig toeleveranciers te zijn van belangrijke componenten voor opwek- of opslagcapaciteit. Daarentegen wordt in omliggende landen momenteel juist volop geïnvesteerd in productie hiervan. Zo staat er in 2021 ongeveer 40 GW aan productiecapaciteit van lithium-ion batterijen in Europa en is er nog bijna 600 GWh in de pijplijn (zie figuur 26). Dat is circa 50% van de vraag in 2040.⁴⁷ Er zijn nog geen fabrieken publiekelijk aangekondigd binnen Nederland.



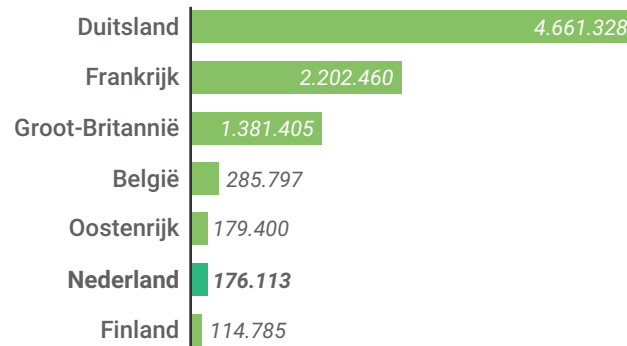
Figuur 26 Locaties van grote batterijfabrieken in Europa (bron: CIC energiGUNE).⁴⁷

4. Assemblage van eindproducten

Nederland heeft een bescheiden rol ten aanzien van productiebedrijven voor de energietransitie. In Nederland zelf worden geen windmolens geproduceerd (groter dan 1 MW), maar wel elektrische voertuigen en in beperkte mate ook zonnepanelen.

Voor de productie van eindproducten zijn zogenoemde 'ontwerpbedrijven' van belang. Een voorbeeld is Lagerwey: een Nederlandse 'producent' van windturbines. Lagerwey ontwerpt zelf haar product, maar laat de productie plaatsvinden in Duitsland. Het bedrijf Exasun heeft een eigen productielijn voor hoogwaardige zonnepanelen in Den Haag. Exasun heeft een capaciteit van 50 megawattpiek en wil binnen enkele jaren groeien naar 150 megawattpiek.⁴⁸ Dat is circa 5% van de totale hoeveelheid zonnepanelen die in Nederland in 2019 zijn geplaatst. Deze ontwerpbedrijven hebben relatief veel invloed op de vraag naar kritieke metalen, aangezien ze effect kunnen hebben op de hele toevoerketen.

Er is in Nederland bedrijvigheid rond elektrische mobiliteit. Zo ontwikkelt en produceert VDL Bus & Coach elektrische bussen in het zuiden van het land. Binnenkort opent VDL een nieuwe fabriek voor elektrische bussen in België.⁴⁹ Ook bouwt VDL samen met DAF elektrische vrachtwagens. Ten slotte werd bekendgemaakt dat VDL Nedcar - de enige onafhankelijke autoproducent in Nederland - vanaf 2022 ook elektrische auto's gaat produceren voor de Amerikaanse startup Canoo.



Figuur 27 Europese productie van passagiersvoertuigen (2019).⁵⁰

5. Reparatie en refurbishing

Er zijn op dit moment weinig partijen die zich bezighouden met het verlengen van de levensduur van duurzame energietechnologie na het eerste gebruik. Dit kan echter wel veel effect hebben op het verminderen van de benodigde hoeveelheid kritieke metalen. Denk daarbij aan activiteiten als *reparatie* en *refurbishment*: door het herstellen van oude energietechnologie hoeven er minder nieuwe zonnepanelen, windturbines en batterijen geproduceerd te worden.

Ter illustratie: er zijn in Nederland weinig partijen die zonnepanelen refurbishen, in tegenstelling tot bijvoorbeeld Duitsland en Italië waar dit al gebruikelijker is. Nederlandse marktpartijen zoals Boldz zijn nog kleinschalig. Een voorbeeld is het Duitse bedrijf Rinovasol dat al sinds 2014 op grote schaal gebruikte zonnepanelen koopt, repareert en vervolgens weer op de markt zet. Het refurbishen van een zonnepaneel komt vaak neer op het vervangen van lasdozen, het oplossen van verbogen frames of simpelweg schoonmaken en reviseren. Uitdagendere reparaties, zoals het repareren van glasschade, zijn in opkomst.

In Nederland komt dit nog niet goed van de grond omdat de zonne-energiesector minder ver ontwikkeld is dan in andere landen, en er relatief weinig aanbod is van zonnepanelen aan het einde van hun levenscyclus. Dit aanbod zal naar verwachting groeien. Voor refurbishment van zonnepanelen zijn er een aantal barrières:

- Het is duur om een zonnepaneel te refurbishen of te repareren, omdat dit arbeidsintensief is en daarmee aanschaf van nieuwe panelen vaak goedkoper is.
- Partijen kunnen vaak geen garantie geven op prestaties van hergebruikte panelen.
- Er is niet ontworpen voor reparatie en refurbishment. Bijvoorbeeld doordat componenten samengesmolten of -gelijmd zijn.

6. Recycling

Het recyclingproces bestaat uit meerdere stappen. Het materiaal moet worden ingezameld, dan gesorteerd en uiteindelijk wordt het omgesmolten. Tussen de stappen wordt er ook volop gehandeld met metalen. Nederland is vooral sterk in inzameling, sorteren en de handel. Een paar metalen kunnen ook in Nederland omgesmolten worden. Zo zijn er een aantal bedrijven uit de basismetaleindustrie die secundaire metalen van hoge kwaliteit produceren, zoals E-Max (Kerkrade, aluminium), Uzimet (Rijswijk, recycling van lood tot bladlood) en de Nederlandse Onttinningsfabriek (Leeuwarden, tin). Tata Steel (IJmuiden, staal) en Nyrstar (Budel, zink) gebruiken relatief grote hoeveelheden schroot in de productie maar kunnen beiden niet zonder metaalertsen. Er zijn binnen Nederland echter nauwelijks smelters of raffinaderijen waar recycleert van kritieke metalen tot kwalitatief hoogwaardige metalen of legeringen kan worden opgewerkt. Voorbeelden in buurlanden zijn Umicore (België) en de Aurubis Group (verspreid over Europa), die beide een grote variatie aan metalen verwerken.

Daarnaast kent Nederland zo'n 130 bedrijven waarbij over het algemeen kleinere handelingen verricht die metaalafval met behulp van grove scheidingsmethoden, zoals sorteren en shredderen, opwerken tot recycleert. Denk bijvoorbeeld aan HKS (o.a. Tiel) en Van Peperzeel (Lelystad). De sector - verenigd in de Metaal Recycling Federatie - investeert zelf in betere scheidingstechnologieën zoals laser- en röntgenidentificatie, waarmee verschillende metalen nauwkeuriger kunnen worden gescheiden. Deze technologieën zijn vaak echter niet geschikt om kritieke metalen uit duurzame energietechnologieën terug te winnen.

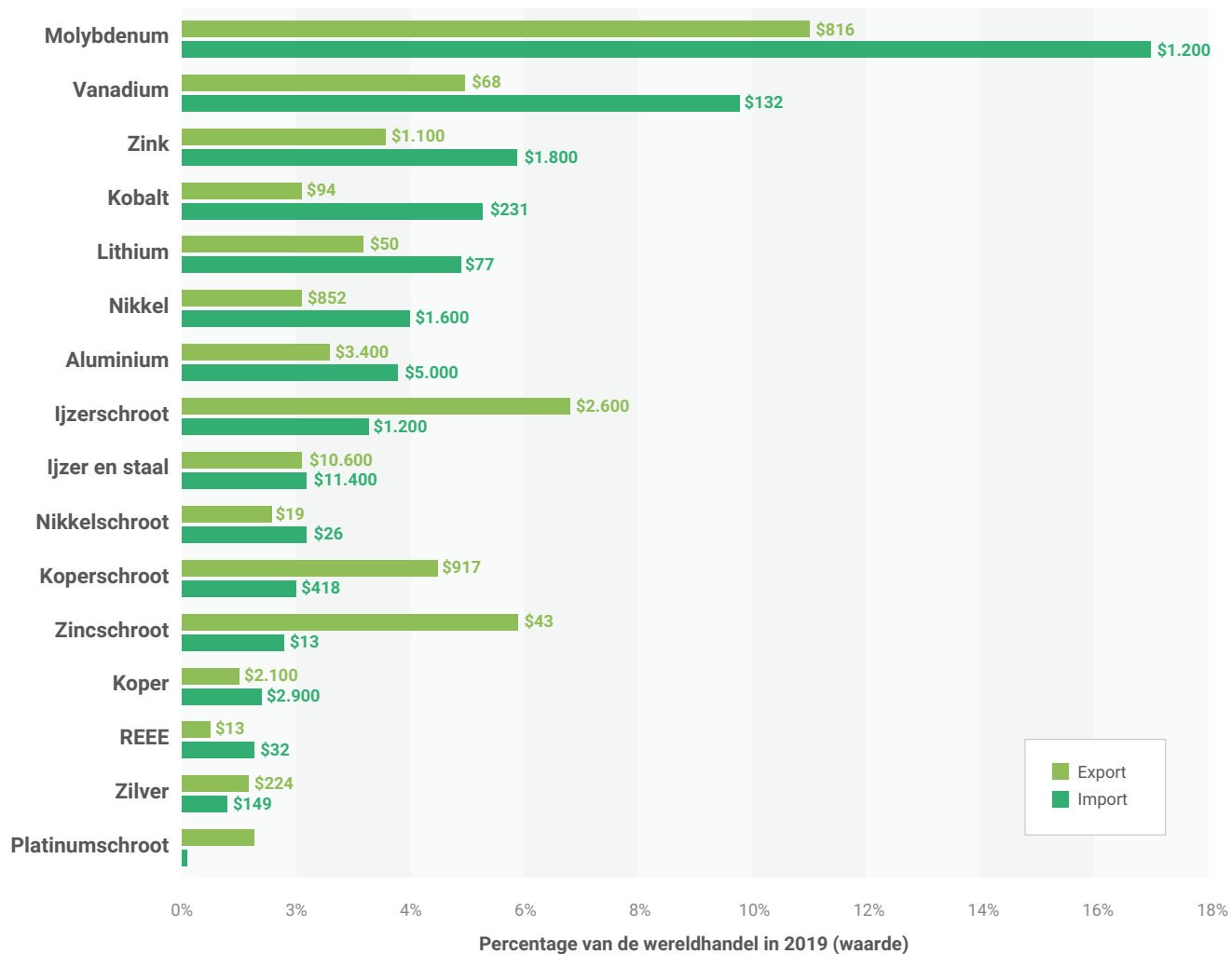
In Nederland ontbreekt capaciteit rondom het demonteren (het zo ver mogelijk uit elkaar halen van een product aan het einde van de levensduur tot de oorspronkelijke componenten zonder gebruik van destructieve methoden als shredderen) en de recyclingprocessen om hier kritieke metalen uit terug te winnen. Dit geldt voornamelijk voor elektronische producten. Nederland kent overigens wel relatief grote recyclingbedrijven (sorteren) voor elektronica, zoals Mirec (Remondis), Coolrec (Renewi) en SIMS Lifecycle Services. Deze bedrijven verzamelen elektronica-afval, ontmantelen apparatuur en verhandelen waar mogelijk onderdelen of verschroten deze voor verdere verkoop.

Door in te zetten op verregaande demontage kan vermenging van metalen bij recycling tot een minimum beperkt worden. Dit is cruciaal voor het verhogen van de circulariteit van de metaalindustrie. Bij TATA Steel Europe is bijvoorbeeld de aanwezigheid van koperhoudende componenten in staalschroot een beperkende factor voor recycling. Als dit niet voorkomen kan worden door middel van productontwerp zal er hydro- of pyrometallurgische recycling moeten worden toegepast. Het kennisniveau op deze gebieden is in Nederland de afgelopen decennia afgenomen, deels wegens bezuinigingen op universiteiten.

7. Logistiek

De logistieke sector heeft een belangrijke rol te spelen, zowel in de klassieke toevoerketen (van erts tot eindgebruiker) als omgekeerd via reverse logistics. Nederland is met een aantal mainports een logistieke speler van wereldformaat (Delfzijl, Moerdijk, Groningen, Rotterdam, Schiphol). Nederland is bijvoorbeeld de op vier na grootste exporteur van ijzerschroot wereldwijd (met 7% van de wereldhandel), en staat ook voor veel andere typen schroot in de top-10. In 2019 importeerde Nederland voor \$27 miljard aan metalen en bedroeg de totale exportwaarde ruim \$21 miljard. Belangrijkste handelspartners zijn vaak onze buurlanden België en Duitsland.⁵¹

Ook speelt Nederland een logistieke rol in het importeren en exporteren van metalen die nodig zijn voor de energietransitie, waaronder kritieke metalen. Ter illustratie: Mitsubishi Materials Corporation opende in 2017 een centraal Europees inzamelings- en sorteer centrum in Moerdijk, waar het elektronica-afval (PCB's) uit Europa verzamelt, sorteert en vervolgens vervoert naar haar centrale recyclingfabrieken in Naoshima en Onahama in Japan. Deze fabrieken hebben een jaarlijkse verwerkingscapaciteit van 140.000 ton. Figuur 28 geeft een overzicht van de import en export van metalen in 2019 door Nederland. Daaruit blijkt dat Nederland een relatief groot percentage van geïmporteerde metalen weer exporteert naar andere landen. Ook is Nederland een belangrijke exporteur van ijzer-, zink- en koperschroot.⁵¹



Voor de groep *Specialty metals*, waaronder ook zeldzame aardmetalen, kobalt, lithium en veel andere transitie-metalen vallen, speelt Nederland een sterke rol als doorvoerhaven naar Europa. De top-5 landen (qua economische waarde) waarvandaan Nederland deze metalen importeert liggen alle vijf buiten Europa: de Verenigde Staten, China, Brazilië, Chili en Zuid-Korea. De belangrijkste landen waar Nederland deze metalen naar exporteert liggen binnen Europa: België, Duitsland, Zweden, Italië, en het Verenigd Koninkrijk.⁵¹

Figuur 28 Import en export van verschillende metalen door Nederland als percentage van de wereldhandel in 2019. Deze data gaat uit van economische activiteit in miljoenen dollars. Dit biedt een indicatie van de bijbehorende materiaalstromen, maar is geen exacte weergave.

INVESTERINGSKANSEN VOOR EEN CIRCULAIRE INDUSTRIE

De geopolitieke afhankelijkheid van de levering van kritieke metalen wordt een grote uitdaging voor de energietransitie. Deze geopolitieke vraagstukken zullen voornamelijk vanuit Europees perspectief moeten worden benaderd; Nederland is te klein om dit zelf op te lossen. Dit betekent echter niet dat Nederland zelf niets kan doen.

Nederland is een open economie, die goed is geïntegreerd met de rest van de wereld. Investeren in een circulaire economie is niet hetzelfde als proberen alle posities van een toevokerketen binnen Nederland te organiseren. Wel heeft Nederland een aantal sterke punten, waardoor het een strategische positie kan opbouwen op enkele posities in de keten, en opportunistisch kan handelen naar kansen.

Voor een circulaire economie moet in verschillende fasen van de toevokerketen anders omgegaan worden met materialen. Zo moet in de productiefase nagedacht worden over het ontwerp, in de gebruiksfase over levensduurverlenging, en bij het einde van de levensduur over de verwerking. Daarbij ligt het meest voor de hand om verder te investeren in de posities waar Nederland nu al gedeeltelijk positie heeft.



Raffinage

De drie raffinagebedrijven in Nederland (Tata Steel Europe, Nyrstar en Adel-Damco) spelen nu al een grote rol in het sluiten van de metaalkringloop, en zijn dan ook de aangewezen partij om te onderzoeken in hoeverre deze rol kan worden uitgebreid. Bovendien ontstaan er bij raffinage van metalen veel afvalstromen waar nog kritieke metalen uit te winnen zijn. Deze afvalstromen worden nu nog vaak gedumpt of naar het buitenland verscheept.



Productie van eindproducten en componenten

Kritieke metalen zitten in een enorm scala van producten, zowel binnen de energietransitie als daarbuiten. Vanuit de problematiek van kritieke metalen is het minder relevant om te investeren in meer productiecapaciteit van componenten en eindproducten. Het is vooral zinvol om te investeren in het creëren van alternatieven en substituten, of andere strategieën die de veerkracht van toevokerketens verbeterd. Hiermee wordt voorkomen dat eventuele leveringsproblemen direct tot onoverkomelijke verstoringen in de productie leiden.

Het Nederlandse bedrijfsleven kan zich vooral onderscheiden op het circulaire gedachtegoed en innovatiepotentie, niet zozeer op prijs. Een voorbeeld is Exasun, een zonnepaneelproducent die inzet op circulaire principes en kwaliteit in plaats van concurreert op prijs. Zo ontwerpt Exasun demontabele panelen die onder meer geïntegreerd kunnen worden in een dak of gevel. .



Verlengen van levensduur

Ondanks dat er in Nederland veel reparatiewerkzaamheden plaatsvinden, gebeurt dit nog nauwelijks bij technologieën voor de energietransitie, zoals zonnepanelen en batterijen. Dit is hard nodig, omdat met deze strategie veel winst te behalen is en er géén aanvullende milieu-impact plaatsvindt, wat bijvoorbeeld bij recycling wel het geval is.

Aangezien er binnen Nederland nog geen sterke activiteiten zijn op het gebied van reparatie en levensduurverlenging, zijn er investeringen nodig om het verder op te bouwen. Deze zouden zich hoofdzakelijk moeten richten op starten scale-ups die zich bezighouden met het verlengen van de levensduur van duurzame energietechnologieën (middels *reparatie*, *refurbishment* of *repurpose*).



Recycling

Nederland heeft een relatief sterke positie in de verwerkingsfase. Zo is er sterke handel in het verwerken van schroot (zie figuur 28) en hebben we een goed systeem voor WEEE-inzameling. Echter, hoewel er veel verwerkingscapaciteit aanwezig is, is dit niet gericht op kritieke metalen. Dit kan een aantal redenen hebben:

- Er verdwijnen veel afvalstromen naar het buitenland om deze stromen verder te verwerken, aangezien de laatste scheidingsstappen en raffinage elders plaatsvinden. Dat is qua afhankelijkheid niet per se een probleem zolang deze verwerking binnen Europa plaats vindt. Op dit moment vindt dit echter vaak ook buiten Europa plaats, zoals in China.
- Kritieke metalen worden niet als zodanig uit de stromen gewonnen, omdat er geen business case is. Dit komt door een combinatie van factoren zoals kleine volumes, zeer kleine concentraties van kritieke metalen in de grotere metaalstromen, en productontwerp dat het arbeidsintensief maakt om op hoog niveau te recyclen. De volumes zullen richting 2050 steeds groter worden.

Er zijn wel kansen voor het opbouwen van recyclingcapaciteit in Nederland. Hiervoor kan vooral gekeken worden naar sectoren waar op dit moment grote investeringen in worden gedaan. Zo kan Nederland een geschikte hub zijn voor demontage en verwerking van vrijkomende windturbines vanaf de Noordzee.

BENODIGDE RANDVOORWAARDEN VOOR INDUSTRIËLE ONTWIKKELING

Er zijn technisch mogelijkheden voor de Nederlandse metaalindustrie om een rol te gaan spelen in een circulaire economie rondom kritieke metalen. De voor deze studie gesproken bedrijven geven echter aan dat er voor hen drie randvoorwaarden zijn om hier daadwerkelijk de bijbehorende investeringen in te kunnen doen:

1. Lange-termijn industriebeleid
2. Aanscherping wet- en regelgeving
3. Continue kennisontwikkeling

1. Lange-termijn industriebeleid

Risiko's rondom grondstoffen komen mede voort uit afwezigheid van een consistente visie en heldere strategie rondom grondstoffen, het ontbreken van lange-termijn beleid en beperkte betrokkenheid of actieve sturing door de overheid. Nederland en de Nederlandse industrie concurreren immers met sterke spelers zoals China, die de grondstoffenmarkt gebruiken om geopolitieke doelstellingen na te streven.

Tot op heden heeft de Nederlandse (en ook Europese) overheid ingezet op marktwerking, met enkele kleine wettelijke ingrepen rondom bijvoorbeeld recycling en productontwerp. Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld China, Japan en de VS, waar de overheid - zeker in het geval van China - sterker stuurt. Voor de toekomst is de Nederlandse, op marktwerking gebaseerde aanpak echter onvoldoende.

Een sterk industriebeleid is nodig om specifieke industriële activiteiten te stimuleren en ondersteunen. Binnen Nederland kan industriebeleid plaatsvinden in drie fasen in de toevoerketen: de ontwerpfase, de gebruiksfase en bij de verwerking (recycling):

- In de ontwerpfase gaat het om het mogelijk maken van toekomstig hergebruik van kritieke metalen, bijvoorbeeld door de inzet op *design-for-disassembly* en *design-for-recycling*. Zo wordt er aan de voorkant gezorgd dat er aan het einde van productlevenscycli verwerkbaar stromen vrijkomen.
- In de gebruiksfase gaat het om inzetten op activiteiten die de levensduur van producenten en onderdelen verlengen. Daarmee ontstaat nieuwe economische activiteit en wordt tegelijkertijd de metaalvraag verminderd.
- In de recyclingfase is het zaak om de metaalstromen goed te kunnen verwerken en daarmee een zo zuiver mogelijk eindproduct te laten ontstaan. Hiervoor is ook sterke logistieke ondersteuning nodig om producten en onderdelen te sorteren en naar recyclinglocaties te transporteren.

Bij inzet op recycling is het belangrijk om investeringen de komende jaren te richten op grootschalige, 'omnivore' processen. Deze kunnen verschillende stromen verwerken en ook een breed scala aan materialen als output hebben. Er zijn twee redenen waarom dit van belang is:

1. Tot 2030 zijn er naar verwachting nog geen grote vrijkomende volumes per kritieke metaal. Het inzetten op specifieke stromen heeft daarom tot 2030 vaak geen goede business case.
2. De verwachting is dat het aanbod van kritieke metalen voor recycling voorlopig divers blijft, omdat kritieke metalen uit verschillende bronnen komen. Recyclingprocessen die kunnen omgaan met deze diversiteit hebben dus een voordeel. Denk bijvoorbeeld aan een recyclingproces dat verschillende soorten batterijen kan verwerken, in plaats van uitsluitend 811-NMC-batterijen.

Wanneer volumes vervolgens na 2030 groter worden en de technologische onzekerheid kleiner is, kan de focus worden verlegd naar meer specialistische - en meer efficiënte - processen.

2. Aanscherping wet- en regelgeving

Wet- en regelgeving is momenteel voornamelijk gericht op het stimuleren van recycling. Er is nauwelijks aandacht voor hergebruik en reparatie, terwijl juist deze strategieën enorme impact kunnen hebben. Door aanscherping van Europese Ecodesign-richtlijnen begint hier langzaam verandering in te komen. Momenteel worden er voor veel nieuwe producten richtlijnen ontwikkeld, waaronder voor accu's en elektronica.¹⁵

Aanvullend op wet- en regelgeving rondom productontwerp kan deze sturen op het productieproces. Denk hierbij aan instrumenten als minimale materiaalefficiënties en regels omtrent het prioriteren van kritieke metalen voor maatschappelijk belangrijke functies, zoals duurzame energietechnologieën. Een voorbeeld van vergelijkbare efficiëntiewetgeving is de energiebesparingsverplichting in industriële processen bij een terugverdientijd van minder dan vijf jaar. Een voorbeeld van prioriteren is het verbieden van het uitermate schaarse helium voor feestballonnen.

Daarnaast zijn er enkele fiscale regels waarvan de aanpassing een circulaire businesscases eenvoudiger maakt. Dit gaat om twee ook elders veelgenoemde aanscherpingen⁵²:

- Beprijzen van externe kosten - zoals CO₂-uitstoot en milieuvuiling, waarmee partijen financieel worden gestuurd op duurzame processen. Dit stimuleert de industrie voornamelijk om kritieke materialen te hergebruiken, omdat het winnen van nieuwe grondstoffen gepaard gaat met aanzienlijke externe kosten in vergelijking met het terugwinnen uit een recycleproces.

- Verlagen van belasting op arbeid, om de businesscase van direct hergebruik, reparatie en refurbishment te verbeteren. Een combinatie met een hogere belasting op (primaire) grondstoffen geeft een financiële prikkel voor het verlengen van de levensduur, wat vervolgens de toekomstige vraag naar kritieke metalen verlaagt.

Daarnaast wordt regelmatig een zekere mate van wet- en regelgeving overwogen om vrijkomende materialen binnen Europa te verwerken. Denk aan een exportverbod van producten met bepaalde kritieke metalen, in lijn met het huidige exportverbod op afval. Dit kan echter ook averechtse effecten kan hebben - zoals een exportverbod van andere landen richting Europa.

3. Continue kennisontwikkeling

Innovaties binnen de industrie zijn onder meer mogelijk omdat Nederland een sterke R&D-infrastructuur heeft, vaak geclusterd rondom grote industriële spelers en technische universiteiten. Denk aan de combinatie M2i en Tata Steel Europe, of Metalot met o.a. de TU Eindhoven en Nyrstar. Nederlandse kennis beperkt zich over het algemeen echter tot de metalen waar de Nederlandse industrie zich historisch op heeft gericht: staal, zink, tin en in mindere mate aluminium.

Rondom alle andere metalen is de hoeveelheid kennis relatief beperkt. Ook ontbreekt er kennis over de toevoerketen en bijbehorende afhankelijkheden en risico's. Daardoor is de bestaande kennisinfrastructuur tot op heden onvoldoende gebleken om de problemen rondom kritieke metalen op tijd te ondervangen.

Diverse andere landen hebben eigen onderzoeksinstituten en denktanks die zich specifiek bezighouden met kritieke metalen. Voorbeelden zijn het *Critical Materials Institute* (CMI, VS), JOGMEC (Japan) en de *Deutsche Rohstoffagentur* (Duitsland). Deze instituten treden coördinerend op, en zorgen ervoor dat het kennisniveau rondom grondstoffen op peil blijft, ook als de aandacht verzwakt door een gebrek aan incidenten.

Organisaties als CMI en JOGMEC zijn niet alleen actief als denktank, maar hebben expertise en budget om gerichte investeringen te doen. Deze aanvullende expertise is nodig omdat er veel innovatieve ideeën zijn rondom productontwerp en recycling, maar risicodragende financiering achterblijft. Dit geldt vooral voor nieuwe en relatief risicovolle technologieën die zich al in het lab bewezen hebben (*Technology Readiness Level 5-6*), maar financiering nodig hebben voor opschaling naar pilotniveau (TRL 7-8).

Omdat Nederlandse partijen momenteel onvoldoende kennis hebben op het gebied van kritieke metalen, is structurele kennisontwikkeling nodig. Daarbij gaat het zowel om kennis rondom risico's en afhankelijkheden als ook om technische kennis ten behoeve van de industrie. Idealiter is deze kennisontwikkeling gekoppeld aan investeringsmogelijkheden voor onderzoek en innovatie, bijvoorbeeld in samenwerking met Europese programma's als *EIT Raw Materials*. Twee voorbeelden van kansen in de metaalindustrie die verzilverd kunnen worden door betere kennisontwikkeling, zijn opgenomen in bijgaande kader.

Voorbeeld: kansen metaalindustrie

Het bedrijf Nyrstar (vestiging in Budel) produceert zink. Bij de productie van zink ontstaan restproducten met kobalt, lood en koper, die nu niet in Nederland of zelfs helemaal niet verwerkt worden. Door grondstofstromen van industrieën beter in kaart te brengen wordt het mogelijk om industrieën beter op elkaar af te stemmen. Zo moet de specifieke manier waarop vlieggas wordt afgevangen, aansluiten op de manier waarop zink wordt gewonnen. Een voorbeeld is Elemetal, die verwerken bodemassen en brengen weer zink terug naar Nyrstar.

Ook heeft Nederland met de Nederlandse Onttinningsfabriek (NOF, Leeuwarden) een van de grootste onttinningsfabrieken van Europa. Hier wordt alleen maar fabrieksafval verwerkt, en geen post-consumer afval. Technisch zou het mogelijk moeten zijn *post-consumer* afval te verwerken, waarmee de tin cyclus veel beter gesloten kan worden.

07

AANBEVELINGEN

Met de huidige metaalproductie en metaalvraag per technologie zijn er onvoldoende kritieke metalen voor de wereldwijde transitie naar een schoon energiesysteem. Om ernstige klimaatverandering te voorkomen is een klimaatneutrale energievoorziening in uiterlijk 2050 echter cruciaal. Om Nederlandse risico's te beperken en een toekomstbestendige industrie op te bouwen moet aan vijf randvoorwaarden worden voldaan. Daarnaast is er aanvullende inzet nodig om de vier circulaire strategieën in de praktijk te brengen. Dit hoofdstuk schetst deze randvoorwaarden, circulaire strategieën en de aanbevelingen om daar invulling aan te geven.

Om de energietransitie mogelijk te maken is het zaak om structurele aandacht te geven aan de materialen die hiervoor nodig zijn. De beschikbaarheid van deze materialen moet een van de aspecten worden op basis waarvan keuzes in het energiesysteem worden gemaakt. Private partijen zijn daarbij niet in staat om dit materiaalvraagstuk alleen op te lossen: dit is een voorbeeld van marktfalen.

Interventies van de overheid zijn dus nodig, zowel nationaal als Europees. Op basis van de analyse in deze studie zien we daarvoor vier randvoorwaarden - op het gebied van voorzieningszekerheid en het verder ontwikkelen van industriële activiteiten - en een verdere inzet op de vier circulaire strategieën.

Randvoorwaarden voor voorzieningszekerheid en ontwikkeling van de industrie

De groeiende vraag naar kritieke metalen leidt tot geopolitieke afhankelijkheid van een beperkt aantal landen voor mijnbouw en raffinage en tot milieu- en sociale impact in de keten. Om een klimaatneutrale energievoorziening te kunnen realiseren is het nodig om voorzieningszekerheid te borgen. Daarvoor zien wij twee randvoorwaarden:

A A. Opzetten van **permanente monitoring en continue kennisontwikkeling** om meer actuele kennis en inzichten te ontwikkelen rondom kritieke metalen en andere grondstoffen, bijvoorbeeld via een aan de overheid verbonden kennisinstituut. Daarmee kan beter worden ingespeeld op toekomstige ontwikkelingen;

B B. Vergroten van **ketentransparantie** van internationale toevoerketens, om beter inzicht te creëren in de milieu- en sociale impact van kritieke metalen in de keten en daarmee te kunnen sturen op het verlagen van die impact.

Nederland heeft op dit moment nauwelijks industriële activiteiten in de toevoerketens van kritieke metalen. Wel liggen er kansen om deze voor de toekomst op te zetten, vooral op het gebied van levensduurverlenging en recycling. Om te zorgen dat de industrie hierin gaat investeren en dat businesscases mogelijk worden, zien wij twee aanvullende randvoorwaarden:

C C. Ontwikkelen van een **lange-termijn industriebeleid** als basis voor investeringsbeslissingen. In het opstellen van dat beleid is intensieve samenwerking tussen de overheid en industriële spelers essentieel, net als de relatie tussen activiteiten in Nederland en elders in Europa.

D D. Aanscherpen van **wet- en regelgeving** om hoogwaardig hergebruik mogelijk te maken en te stimuleren, waaronder aanscherping van productwetgeving als Ecodesign-richtlijnen en versterking van de verlengde producentenverantwoordelijkheid.

Daarnaast is permanente kennisontwikkeling (randvoorwaarde A) tevens nodig voor het kunnen doen van gerichte investeringen in de industrie en daarmee het verzilveren van economische kansen.

Circulaire strategieën voor verlagen metaalvraag

Om te zorgen dat een klimaatneutrale energievoorziening mogelijk wordt, is het nodig om de hoeveelheid daarvoor benodigde kritieke metalen te verlagen. Energiebesparing is een belangrijke eerste stap, omdat daarmee de behoefte aan opwek-, transport- en opslagcapaciteit direct wordt verlaagd. Vervolgens zien we vier circulaire strategieën:



1. Rethink: ontwerpen van het energiesysteem vanuit materiaalperspectief, om dezelfde functies mogelijk te maken met minder opwek-, transport- en opslagcapaciteit. Daarbij gaat het onder meer om het sturen op sterke interconnectiviteit, het combineren van productie en gebruik op dezelfde tijd en plaats en het actief op- en afregelen van industriële processen bij een overschot of tekort aan elektriciteit.



2. Reduce: stimuleren van technologieën met minder kritieke metalen, om de metaalvraag per technologie te verminderen. Denk bijvoorbeeld aan het stimuleren van innovatie en substitutie.



3. Repair, refurbish & repurpose: verlengen van de levensduur van producten en onderdelen om de hoeveelheid nieuwe materialen te verminderen. Daarbij gaat het onder meer om het stimuleren van initiatieven voor hoogwaardig hergebruik en het verschuiven van belasting van arbeid naar vervuiling om businesscases te helpen sluiten.



4. Recycle: terugwinnen van materialen uit energieproducten om een secundaire materiaalstroom te creëren. Daarbij gaat het specifiek om het investeren in recyclingcapaciteit, waar nodig regionaal om te zorgen voor een optimale logistiek.




AANBEVELINGEN INVULLING RANDVOORWAARDEN

RANDVOORWAARDE A	AANBEVELINGEN	PARTIJEN
<p>A</p> <p>Opzetten van permanente monitoring en continue kennisontwikkeling rondom kritieke metalen</p> <p>Ontwikkelingen rondom kritieke metalen volgen elkaar snel op en zijn soms onvoorspelbaar. Permanente monitoring van risico's en verstoringen in wereldwijde toevoerketens en actuele kennis over ontwikkelingen is nodig om tijdig te kunnen bijsturen wanneer risico's te groot worden. Daarnaast is gedegen kennis van industriële processen nodig om goede investeringen te kunnen doen in innovaties en opschaling van industriële processen. Aanvullend op Europese programma's is het belangrijk om dit ook nationaal op te pakken.</p>	<p>Investeer structureel in Nederlandse expertise op het vlak van kritieke metalen. Borg dit binnen een kennisinstituut dat zich expliciet richt op dit onderwerp. Kijk hierbij naar succesvolle voorbeelden van dergelijke organisaties in het buitenland. Dit instituut zou ook een verbindende factor moeten zijn tussen koepels als de Metaalunie en FME, universiteiten, kennisinstellingen als TNO, Clingendael en HCSS en de Rijksoverheid, in samenwerking met R&D-afdelingen van industriële spelers.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rijksoverheid • Wetenschap • Bedrijfsleven
	<p>Investeer in versnelde doorontwikkeling van technische innovaties voor energieopwekking en -opslag, met een focus op praktijkgerichte toepassing. Stuur daarbij expliciet op een laag gebruik van kritieke metalen om de toekomstbestendigheid van productie van deze opwek- en opslagtechnologieën te borgen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rijksoverheid • Wetenschap • Bedrijfsleven
	<p>Neem de benodigde kritieke metalen voor de verschillende energiescenario's mee bij de verdere ontwikkeling van deze scenario's. Denk daarbij aan vervolgtrajecten van de Integrale Infrastructuurverkenning en de doorontwikkeling van het Energie Transitie Model.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Netbeheerders • Kennisinstellingen
RANDVOORWAARDE B	AANBEVELINGEN	PARTIJEN
<p>B</p> <p>Vergroten van ketentransparantie van internationale toevoerketens</p> <p>De sociale en milieu-impacts van mijnbouw en raffinage is significant. Toch kunnen we niet zonder nieuwe metalen om een duurzaam energiesysteem te realiseren. Ketentransparantie is een belangrijke eerste stap om te kunnen sturen op reductie van deze impact.</p>	<p>Neem ketentransparantie van gebruikte materialen en producten mee in publieke tenders voor duurzame energietechnologieën, zoals windparken, zonnenvelden en eventuele systeemopslag. Creëer volume door te werken met een koploperaanpak, eventueel binnen Europa.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rijksoverheid • Provincies • Gemeenten
	<p>Steun de ontwikkeling van effectieve en eenduidige certificeringsschema's voor materialen waar deze nog niet bestaan. Maak hierbij zo veel mogelijk gebruik van het in ontwikkeling zijnde Europese CERA certificeringssysteem.³⁶</p>	<ul style="list-style-type: none"> • EU • Rijksoverheid • Producenten
	<p>Neem duurzaamheidsaspecten van mijnbouwactiviteiten mee in handelsverdragen tussen de EU en derde landen waar mijnbouw plaatsvindt. Hier worden al eerste stappen op gezet. Versterk de inzet hierop vanuit Nederland.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • EU

RANDVOORWAARDE C	AANBEVELINGEN	PARTIJEN
<p>C</p> <p>Ontwikkelen van een sterk industriebeleid om toekomstbestendige keuzes te maken</p> <p>Een goede en langjarige strategie op de rol van Nederland in de kritieke metaalketen is belangrijk als basis voor beleids- en investeringskeuzes. Een intensieve samenwerking tussen overheid en industrie is cruciaal in het opstellen daarvan. Immers: de overheid kan industrieën ondersteunen met de juiste infrastructuur en eventuele financiering, waar de industrie de overheid kan ondersteunen bij het realiseren van toekomstig verdienpotentieel voor Nederland en het realiseren van beleidsdoelstellingen.</p>	<p>Ontwikkel een gezamenlijke investeringsagenda voor een industrie rondom kritieke metalen. De locatie van Nederland is daarbij een onderscheidende factor ten opzichte van andere landen, vooral i.r.t. recycling van windturbines vanaf de Noordzee. Bij het opstellen van deze agenda is het belangrijk om Nederland in relatie te zien tot Europa. Neem mee welke ontwikkelingen al in andere Europese landen plaatsvinden. Kijk daarnaast naar de beschikbaarheid van EU-financiering voor investeringen.</p> <p>Neem bij het in voorraad brengen van de huidige voorraad kritieke metalen ook de metalen uit industrie-afval mee. Bouw daarbij voort op de huidige ontwikkeling van het Grondstoffen Informatie Systeem (GRIS). Voorbeelden zijn reststromen vanuit TATA Steel en Nyrstar. Ook zijn er diverse 'afvalbergen' als gevolg van vroegere reststromen uit industriële processen, waar relatief veel kritieke metalen in zitten, zoals de Slufter op de Maasvlakte.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rijksoverheid</i> • <i>Invest-NL</i> • <i>Industrie</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Invest-NL</i> • <i>Industrie</i> • <i>Kennisinstituten</i>

RANDVOORWAARDE D	AANBEVELINGEN	PARTIJEN
<p>D</p> <p>Aanscherpen van wet- en regelgeving om hoogwaardig hergebruik mogelijk te maken</p> <p>Wet- en regelgeving bepaalt de ruimte die partijen hebben in hun bedrijfsvoering. Daarbij gaat het zowel over hun energie- en grondstoffengebruik als over het ontwerpen en fabriceren van hun producten. Aanscherping van wetgeving is nodig, zowel om te zorgen voor energiebesparing als circulaire producten.</p>	<p>Versterk wetgeving op energiebesparing en vergroot de handhaving capaciteit. Een voorbeeld is de huidige wet dat energiebesparende maatregelen moeten worden genomen wanneer deze zich binnen vijf jaar terugverdienen, waar beperkt op gehandhaafd wordt.</p> <p>Scherp Europese en nationale productstandaarden aan om efficiënt materiaalgebruik te borgen. Denk bij aanscherping aan Europese EcoDesign-richtlijnen en sectorbrede productstandaarden. Houd daarnaast bestaande standaarden kritisch tegen het licht om onnodig (verplicht) gebruik van kritieke metalen te voorkomen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rijksoverheid</i> • <i>Omgevingsdiensten</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>EU</i> • <i>Certificeringsorganisaties</i>

AANBEVELINGEN CIRCULAIRE STRATEGIEËN

1. RETHINK	AANBEVELINGEN	PARTIJEN
 <p>Ontwerpen energiesysteem vanuit materiaalperspectief Op dit moment worden keuzes in de energietransitie gemaakt op basis van betaalbaarheid, draagvlak en ruimtelijke inbedding. Om te komen tot daadwerkelijk toekomstbestendige keuzes, is het nodig om de benodigde kritieke metalen als vierde perspectief mee te nemen. Daardoor kan de totale opwek-, transport- en opslagcapaciteit worden beperkt.</p>	<p>Maak een strategische keuze voor sterke interconnectiviteit met andere landen binnen Europa. Daarmee worden vraag en aanbod gebalanceerd en wordt de hoeveelheid opslagcapaciteit beperkt. Onderzoek wat er nodig is om deze interconnectiviteit vorm te geven, mogelijk met een coalition of the willing rondom de Noordzee. Inzet op de North Sea Wind Power Hub is hier een voorbeeld van.⁵³</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rijksoverheid</i> • <i>Landelijke netbeheerder</i>
	<p>Stuur op het combineren van vraag en productie van elektriciteit op dezelfde locatie en/of hetzelfde moment. Daarmee wordt de benodigde hoeveelheid opslag- en transportcapaciteit beperkt. Dit kan bijvoorbeeld door het stellen van aanvullende eisen in de SDE++-subsidieregeling voor duurzame energieproductie.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rijksoverheid,</i> • <i>Ontwikkelaars wind- en zonprojecten</i>
	<p>Stimuleer het gebruik van een flexibel energietarief, bijvoorbeeld op uurbasis. Daarmee wordt energiegebruik ontmoedigd bij weinig aanbod en gestimuleerd bij overproductie.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rijksoverheid</i> • <i>Energieleveranciers</i> • <i>Netbeheerders</i>
	<p>Maak mogelijk dat grote energieverbruikers, zoals industriële processen, tijdelijk op- of afregelen bij dreigende congestie op het elektriciteitsnet. Bied hiervoor eventueel financiële compensatie. Hierdoor is er minder transport- en opslagcapaciteit nodig om aan de elektriciteitsvraag te kunnen blijven voldoen. Dit kan een alternatief zijn voor netverzwaring. Kijk daarbij goed voor welke industriële toepassingen dit mogelijk is: bij sommige processen kan dit relatief eenvoudig, bij andere nauwelijks.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rijksoverheid</i> • <i>Provincies</i> • <i>Regionale netbeheerders</i>
	<p>Stuur op deelmobiliteit en andere vormen van collectief vervoer om de totale vraag naar auto's - en daarmee naar elektrische auto's en de daarvoor benodigde batterijen - te verminderen. Dit kan onder meer met fiscale maatregelen (Rijk), het versterken van hoogwaardig openbaar vervoer (Provincies, vervoerregio's) en met het terugdringen van het aantal parkeerplekken in steden (Gemeenten).</p> <p>■ <i>Zie voor verdere uitwerking de studie Metaalvraag van Elektrisch Vervoer⁷</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rijksoverheid</i> • <i>Provincies</i> • <i>Vervoerregio's</i> • <i>Gemeenten</i>
	<p>Zet elektrische auto's als opslagcapaciteit, waarmee bij dreigende ondercapaciteit - als gevolg van hoge vraag of laag aanbod - extra elektriciteit beschikbaar is. Elektrische auto's leveren daarmee elektriciteit uit de batterij terug aan het net. Het eerste grootschalige experiment binnen Nederland wordt momenteel gerealiseerd in de Cartesiusdriehoek (Utrecht).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Gemeenten</i> • <i>Netbeheerders</i> • <i>Energie- en flexibilitateitsleveranciers</i>

2. REDUCE	AANBEVELINGEN	PARTIJEN
 <p>Stimuleren technologieën met minder kritieke metalen</p> <p>De hoeveelheid benodigde kritieke metalen verschilt per technologie. Door te sturen op technologieën met een lagere metaalvraag kan de totale vraag worden verminderd. Een belangrijke kanttekening is dat bij deze 'substitutie' vaak andere metalen worden gebruikt, die mede als gevolg van de verschuiving ook kritiek kunnen worden.</p>	<p>Investeer in alternatieve vormen van energieopslag die een significant lage vraag naar kritieke metalen hebben. Denk daarbij bijvoorbeeld aan het gebruik van ondergrondse waterreservoirs (voorbeeld: Nederlandse OPAC-concept), opslag met lucht (<i>Compressed Air Energy Storage</i>) en batterijtypes met een lagere kritieke metaalvraag (zoals flow-batterijen).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rijksoverheid</i> • <i>Provincies</i>
	<p>Stimuleer relevante partijen om deel te nemen in Europese werkgroepen ten behoeve van aanscherping van Europese richtlijnen, waaronder Ecodesign-richtlijnen voor batterijen. Deze aanscherping is enerzijds nodig om een gelijk speelveld te creëren rondom <i>design-for-disassembly</i>, <i>design-for-repair</i> en <i>design-for-recycling</i>. Anderzijds vereenvoudigt dit toekomstige recycling.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Industrie</i> • <i>Koepel-organisaties</i>
	<p>Stuur in publieke tenders expliciet op circulair productontwerp en mogelijkheden voor levensduurverlenging, en niet alleen op prijs. Creëer volume door te werken met koplopers, eventueel binnen Europa. Stel waar mogelijk eisen rondom (lange) levensduur en demontage in vergunningverlening van duurzame energieprojecten.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rijksoverheid</i> • <i>Provincies</i> • <i>Gemeenten</i>
	<p>Stuur in innovatiebeleid niet alleen op technische prestaties en kosten, maar ook op opschaalbaarheid vanuit de beschikbaarheid van materialen en de milieu- en sociale impact als gevolg van productkeuzes. Toets hier op bij het toekennen van innovatiesubsidies.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rijksoverheid</i> • <i>Onderzoeksinstellingen</i>

3. REPAIR	AANBEVELINGEN	PARTIJEN
 <p>Verlengen levensduur van producten en onderdelen Veel duurzame energietechnologieën hebben nog geen duidelijke bestemming aan het einde van hun levenscyclus. Door de levensduur te verlengen en producten in andere functies opnieuw te gebruiken, neemt het aantal benodigde nieuwe producten af.</p>	<p>Stimuleer initiatieven voor hoogwaardig hergebruik van duurzame energietechnologieën financieel. Dit is de komende jaren nog nodig omdat op dit moment een businesscase ontbreekt. Denk bijvoorbeeld aan het opknappen en hergebruiken van oude zonnepanelen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rijksoverheid</i> • <i>Industrie</i>
	<p>Stimuleer het ontwerp van nieuwe producten en installaties met een lange levensduur, en pas fiscale en juridische spelregels aan waar nodig om dit mogelijk te maken. Denk bijvoorbeeld aan het verlengen van afschrijftermijnen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>EU</i> • <i>Rijksoverheid</i> • <i>Bedrijfsleven</i>
	<p>Onderzoek hoe batterijen uit elektrische auto's na hun levenscyclus hergebruikt kunnen worden als systeembatterij, zowel technisch als juridisch. Daarmee wordt de levensduur significant verlengd en wordt milieu-impact als gevolg van recycling en nieuwe batterijproductie voorkomen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rijksoverheid</i> • <i>Provincies</i>

4. RECYCLE	AANBEVELINGEN	PARTIJEN
 <p>Terugwinnen materialen uit energieproducten Wanneer duurzame energieproducten zoals zonnepanelen, windturbines of batterijen niet meer gebruikt kunnen worden, is het belangrijk om deze te recyclen en de kritieke materialen zo hoogwaardig mogelijk terug te winnen. De vrijkomende volumes gaan de komende jaren enorm groeien. Tijdig investeren kan leiden tot een nieuwe industriële activiteit, werkgelegenheid en een lange-termijn economisch verdienmodel.</p>	<p>Investeer op korte termijn reeds in nieuwe verwerkings- en recyclingcapaciteit om te anticiperen op toekomstige volumes. Binnen enkele jaren komen er aanzienlijke hoeveelheden oude batterijen en zonnepanelen op de markt. Kies daarbij de eerste jaren voor omnivore recyclingprocessen, om de diversiteit aan vrijkomende producten te kunnen verwerken.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rijksoverheid</i> • <i>Investeerders</i>



08

BIJLAGEN

BIJLAGE I. TOTSTANDKOMING

Dit rapport is tot stand gekomen in samenwerking tussen Metabolic, Copper8, Quintel Intelligence en Polaris Sustainability. Daarbij is gebruik gemaakt van data die is geïnventariseerd door het Centrum voor Milieuwetenschappen (CML) van de Universiteit Leiden, in opdracht van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

Dit onderzoek is uitgevoerd in gezamenlijke opdracht van Invest-NL, de Provincie Zuid-Holland, de Provincie Flevoland, Alliander, Stedin, Enpuls en Rijkswaterstaat.

Tijdens het onderzoek zijn er vijf overleggen geweest met een stuurgroep vanuit de opdrachtgevers. Hier zijn de hoofdlijnen en afbakening bepaald. Ook zijn er interviews gehouden met diverse experts om achtergrondinformatie op te halen betrokken en een perspectief te creëren op de mogelijkheden voor de Nederlandse industrie. Tot slot is het conceptrapport door een aantal experts gereviewd. Deze reviews zijn meegenomen in deze definitieve rapportage.

Stuurgroep

- Guy de Sevaux (Invest-NL)
- Joey ten Cate (Provincie Zuid-Holland)
- Koen Eising (Alliander)
- Dirk Bijl de Vroe (Stedin)
- Alexander Savelkoul (Enpuls)
- Anne Gerdien Prins (PBL)
- Ester van der Voet (Universiteit Leiden - CML)

Interviews

- Robert van Beek (FME)
- Jan Bessebinders (VNO-NCW)
- Siemen Brinksma (Biosphere Solar)
- Roderick Eggert (Critical Materials Institute)
- Sander Everstein (Tata Steel Europe)
- Dirk Heuker of Hoek (TKF)
- Bert van Haastrecht (M2i)
- John Heynen (RVO)
- Dennis Kemperman (Nyrstar)
- Arti Klaasen & Jochem de Winter (Nederlandse Onttinningsfabriek)
- Gert Jan Kramer (Universiteit Utrecht)
- Jan-Jaap van Os (Exasun)
- Johan van Peperzeel (Van Peperzeel)
- Janneke Pors & Monique de Moel (Port of Rotterdam)
- Jo van de Put (Metaalunie)
- Mathijs Tas (Boldz)
- Jan Tytgat (Umicore)
- Gerard Wyfker (Metaalunie)
- Yongxiang Yang (TU Delft)

Externe review

- Ilse van Andel (Eneco)
- Ton Bastein & Elmer Rietveld (TNO)
- René Kleijn (Universiteit Leiden - CML)
- Marthe van Laarhoven (Ministerie Buitenlandse Zaken)
- Jan-Paul van Soest (De Gemeeynt)
- Mark Spetter (Provincie Flevoland)
- Marieke Spijkerboer (Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat)
- Mattheüs van de Pol (Ministerie van Economische Zaken & Klimaat)
- Alexander van der Vooren (SER)

BIJLAGE II. EIGENSCHAPPEN KRITIEKE METALEN


Ketens van kritieke metalen zijn lang en complex. Ter illustratie licht deze bijlage de belangrijkste kenmerken van enkele kritieke metalen toe.

Voor het opstellen van deze bijlage is gebruik gemaakt van onder meer de USGS voor de productiecijfers⁵⁴ en rapportages van het IEA¹ en de Wereldbank² voor de dynamieken in de keten en een rapportage van TNO over de koperketen.⁵⁵

REE METAAL Zeldzame aard- metalen (REE)	TOEPASSING Windturbines + EV	VOORNAAMSTE PRODUCTIE China (58%)	JAARPRODUCTIE (2020) 240.000 ton
<p>Winning & raffinage</p> <p>China is grotendeels verantwoordelijke voor de winning van de zeldzame aardmetalen - waaronder neodymium, dysprosium en praseodymium. Daarnaast vindt er productie plaats in de VS, Myanmar en Australië. China controleert daarnaast het grootste deel van de raffinage (~70%) en in toenemende mate de productie van onderdelen waar deze metalen in zitten. Het Australische Lynas, de grootste Westerse producent, wordt vanuit Japan gefinancierd, onder voorwaarde dat de Japanse industrie bij schaarste voorrang krijgt voor levering.</p>	<p>Milieu- en sociale impact</p> <p>In het verleden waren er veel problemen met extreme milieuvuiling bij productie van zeldzame aardmetalen door het gebruik van waterstoffluoride bij de elektrolyse stap van het productieproces. De laatste jaren lijkt deze vervuiling onder druk van de Chinese overheid te zijn verbeterd. Wel zijn er berichten over Chinese dwangarbeid bij productie van deze metalen.</p>	<p>Recycling</p> <p>Er wordt veel onderzoek gedaan naar recycling van REEs, onder meer vanuit de EU. Dit komt tot op heden echter nog niet voldoende van de grond omdat nieuw geproduceerde REEs - ondanks de geopolitieke afhankelijkheden - vooralsnog te goedkoop zijn om recycling commercieel haalbaar te maken. Bij recycling van REE magneten is productontwerp cruciaal, omdat deze magneten snel vervuild raken, wat recycling veel moeilijker maakt.</p>	

 METAAL Lithium	TOEPASSING EV + opslag	VOORNAAMSTE PRODUCTIE Australië (55%), Chili, Argentinië	JAARPRODUCTIE (2020) 82.000 ton
<p>Winning & raffinage</p> <p>Ongeveer de helft van de wereldproductie is afkomstig uit Australië, op basis van traditionele mijnbouw van het mineraal spodumeen. Van de resterende productie komt het grootste deel uit zoutmeren in Chili en Argentinië. Bijna de helft van de wereldwijde lithiumconcentraten worden naar China verscheept, waar er een chemische verbinding uit wordt gemaakt (hydroxide of carbonaat). De lithiumindustrie is financieel zwak door een lange periode van zeer lage prijzen, en heeft daardoor moeite om snel op te schalen.</p>	<p>Milieu- en sociale impact</p> <p>In Zuid-Amerika vindt de productie plaats in zoutmeren, wat veel water kost en leidt tot conflicten tussen de lokale bevolking en mijnbouwbedrijven. Daarnaast leiden de verdampingsbaden waarin het lithium wordt gewonnen tot grote aantasting van het landschap.⁵⁶ Australië kan haar productie nog aanzienlijk uitbreiden, wat ook veel water kost maar vermoedelijk tot minder conflicten met de bevolking zal leiden.</p>	<p>Recycling</p> <p>Lithium kan worden gerecycled uit bestaande Li-ion batterijen, maar recyclingpercentages zijn zeer onzeker (5 - 50%). Snelle veranderingen in batterijchemie en -ontwerp en concurrentie van relatief goedkope primaire productie van lithium hebben vooralsnog geleid tot een afwezigheid van grootschalige lithiumrecyclinginstallaties.</p>	

 METAAL Nikkel	TOEPASSING EV + opslag + roestvrij staal	VOORNAAMSTE PRODUCTIE Indonesië (30%), Filipijnen	JAARPRODUCTIE (2020) 2.500.000 ton
<p>Mijnbouw & raffinage</p> <p>Nikkel wordt grootschalig gewonnen en toegepast. Het is onder meer nodig voor roestvrij staal en een van de grootste bestanddelen van lithiumbatterijen. Voor batterijen is hoge kwaliteit nikkel nodig (class 1), waarvan een tekort wordt verwacht. Bij de winning van nikkel komen relatief veel waardevolle bijproducten vrij zoals kobalt, koper en PGM's. Indonesië, 's werelds grootste nikkelproducent, heeft recentelijk exportrestricties ingesteld in een poging om raffinaderijen naar Indonesië te halen en zo meer van de waardeketen te behouden.</p>	<p>Milieu- en sociale impact</p> <p>Nikkel is vooral problematisch vanwege de milieuschade bij productie en raffinage. Ter illustratie: in 2017 in de Filipijnen 23 mijnen, waar overwegend nikkel werd geproduceerd, gesloten als gevolg van hun milieuschade.⁵⁸ De Russische stad Norilsk, de thuisbasis van een van 's werelds grootste nikkelproducenten (Norilsk Nickel), is tevens een van de meest vervuilde steden ter wereld, waar ook in 2020 nog een grote natuurramp plaatsvond na een lekkage van afvalmateriaal.⁵⁷</p>	<p>Recycling</p> <p>Recycling van nikkel is met 17% relatief beperkt¹⁷, omdat het in een grote verscheidenheid aan materialen verwerkt zit, vaak als legeringselement. Legeringen zijn ingewikkeld om op gelijkwaardig niveau te recyclen omdat ze vaak moeilijk uit elkaar te houden zijn, en hele kleine variaties al grote gevolgen kunnen hebben voor de kwaliteit van een legering.</p>	

 METAAL Kobalt	TOEPASSING EV + opslag	VOORNAAMSTE PRODUCTIE Democratische Republiek Congo (70%)	JAARPRODUCTIE (2020) 140.000 ton
--	---	--	---

Mijnbouw & raffinage

Kobaltmijnbouw is voor 90% een bijproduct bij de productie van koper en nikkel, zowel in de Democratische Republiek Congo (DRC) als daarbuiten. Dit is risicovol, omdat de opschaling in productie van kobalt daarmee afhankelijk is van de opschaling in productie van deze andere metalen.

Milieu- en sociale impact

Hoewel het grootste deel van de kobaltproductie uit DCR met industriële mijnbouw plaatsvindt, waarbij minimale arbeidsomstandigheden in acht worden gehouden, is het land berucht om slechte arbeidsomstandigheden, kinderarbeid en corruptie. Dat dit lastig te voorkomen is blijkt uit dat zelfs FairPhone, die alleen kobalt zonder conflict- en kinderarbeid wil gebruiken, moeite heeft deze keten transparant te krijgen.⁵⁹ Ambachtelijke mijnbouw door individuen (zowel in DRC als elders) is een complex fenomeen en niet alleen maar negatief. Het geeft ook inkomsten aan lokale gemeenschappen. Vanuit de optiek van leveringszekerheid treden ambachtelijke mijnbouwers op als swing producers die helpen om extreme prijsspieken te dempen.

Investerings in aanvullende productie elders is moeilijk omdat deze qua productiekosten vaak moeilijk kunnen concurreren met Afrikaanse kobalt. Grote bedrijven die direct aan consumenten leveren zijn huiverig voor de negatieve associaties met kobalt uit de DRC. Als gevolg daarvan sluiten ze soms contracten om bijvoorbeeld alleen Australische kobalt geleverd krijgen, of kiezen ze ervoor om kobaltvrije technologieën te gebruiken.

Recycling

Kobalt is technisch goed recyclebaar. In de praktijk wordt dit echter nauwelijks gedaan omdat het vooralsnog niet economisch aantrekkelijk is.

 METAAL Koper	TOEPASSING Kabels	VOORNAAMSTE PRODUCTIE Chili (30%), Peru	JAARPRODUCTIE (2020) 20.000.000 ton
<p>Mijnbouw & raffinage</p> <p>Koper wordt voornamelijk gewonnen in Zuid-Amerika, waar zo'n 40% van de mijnbouw plaatsvindt. China neemt een relatief beperkte 8% van de mijnbouw voor haar rekening, maar 39% van de raffinage. Ook de EU heeft ook een aantal kopermijnen, vooral in Polen en Scandinavië, die bij elkaar ~4.4% van de wereldproductie vormen. Daarbij bevat kopererts vaak relatief weinig koper: de ertsgraden zijn de afgelopen eeuw ruwweg gehalveerd.</p>	<p>Milieu- en sociale impact</p> <p>Als gevolg van de steeds lager wordende ertsgraden is er steeds meer energie en water nodig voor de winning van koper. Ook bevat kopererts veel zwavel, wat tot mijnbouwafval leidt met een hoog risico op zogeheten <i>acid mine drainage</i>, waarbij regenwater sterk verzuurd voordat het de natuur in stroomt.</p>	<p>Recycling</p> <p>Koper is technisch goed recyclebaar. Daarbij is het voorkomen van vermenging tussen koper en andere metalen is essentieel: enerzijds om de geleidende eigenschappen te behouden en anderzijds omdat kopervervuiling schadelijk is voor de kwaliteit van staal. Momenteel komt bijna de helft van het kopergebruik in de EU uit recycling.</p>	

 METAAL Platina	TOEPASSING Waterstofproductie, katalysatoren in Dieselauto's	VOORNAAMSTE PRODUCTIE Zuid-Afrika (70%), Rusland	JAARPRODUCTIE (2020) 170.000 ton
<p>Mijnbouw & raffinage</p> <p>Platina is een van de platinum-groep metalen (PGM's), die gezamenlijk gewonnen worden in platina-houdend erts. Naast platina omvat deze groep ook osmium, iridium, ruthenium, rhodium en palladium. Vooral de laatste twee (Rh + Pa) worden veel toegepast in onder andere autokatalysatoren. De voornaamste winning van platina vindt plaats in Zuid-Afrika (70%), gevolgd door Rusland (12%); voor enkele andere elementen liggen de verhoudingen iets anders. De productie in Zuid-Afrika ligt regelmatig stil vanwege stakingen, waardoor de toevokerketen heeft leren omgaan met verstoringen en bij iedere stap buffercapaciteit aanhoudt.</p>	<p>Milieu- en sociale impact</p> <p>PGMs zijn berucht om de langdurige en gewelddadige stakingen in de Zuid-Afrikaanse mijnen.</p>	<p>Recycling</p> <p>Recycling van edelmetalen in het algemeen is op een hoog niveau, vanwege de relatief zeer hoge prijzen, en doordat PGM-houdende componenten zoals katalysatoren relatief eenvoudig uit producten te halen zijn tijdens het recyclingproces. Hoogwaardig recycling is belangrijk omdat PGMs zeer moeilijk te vervangen zijn door andere metalen, al kan er wel relatief makkelijk binnen de groep worden gewisseld van metaal.</p>	

BIJLAGE III. TOELICHTING ENERGIESCENARIO'S

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van energiescenario's, die zijn opgesteld door de samenwerkende netbeheerders en diverse andere betrokkenen. Daarbij zijn de scenario's gebaseerd op vier 'realistische extremen'. Deze bijlage licht de energiescenario's en achterliggende aannames verder toe.

Deze methode licht vier zaken verder toe:

- 1.Scenario's Energiesysteem van de toekomst
- 2.Systeemstudie Zuid-Holland
- 3.Gebruikte cijfers scenario's & systeemstudies
- 4.Aannames systeembatterijen

1. Scenario's *Energiesysteem van de toekomst*

Om toe te kunnen werken naar een klimaatneutraal energiesysteem hebben de samenwerkende netbeheerders energiescenario's opgesteld. Deze scenario's doen aannames voor onder meer de ontwikkeling van de industrie, de opgestelde opwek- en opslagcapaciteit en de wijze van sturing op emissiereductie en duurzame energieproductie. Deze zijn uitgebreid toegelicht in het rapport *Energiesysteem van de toekomst*.³⁷ Tabel 3 geeft een korte samenvatting van deze scenario's. Figuur 29 biedt een illustratie van de energiestromen in één van de scenario's.

Tabel 3: Omschrijving van de vier scenario's voor het toekomstig energiesysteem (bron: Netbeheer Nederland)³⁵

Regionale sturing



Nadruk op sturing vanuit lokale gemeenschappen en burgers, een hoge mate van autonomie en circulariteit als speerpunt. Zonne- en windenergie op land zijn stevig gegroeid. De industrie krimpt en verduurzaamt door elektrificatie en groene waterstof. Nederland is vrijwel geheel zelfvoorzienend qua energie. Groene waterstof speelt verder een rol voor backup centrales. Groen gas uit lokale biomassa is van belang voor de piekvoorziening van warmtenetten.

Nationale sturing



In dit scenario heeft de nationale overheid een krachtige sturing richting (bijna) zelfvoorziening. Er komen grootschalige nationale projecten tot stand, met name wind op zee. Er is minder groei in warmtenetten, de nadruk ligt op elektrificatie. De omvang van de industrie blijft gelijk aan de huidige omvang en verduurzaamt door elektrificatie en groene waterstof. Groene waterstof speelt verder een rol voor back-up centrales en de industrie, in de vorm van groen gas en groene waterstof.

Europese CO₂-sturing

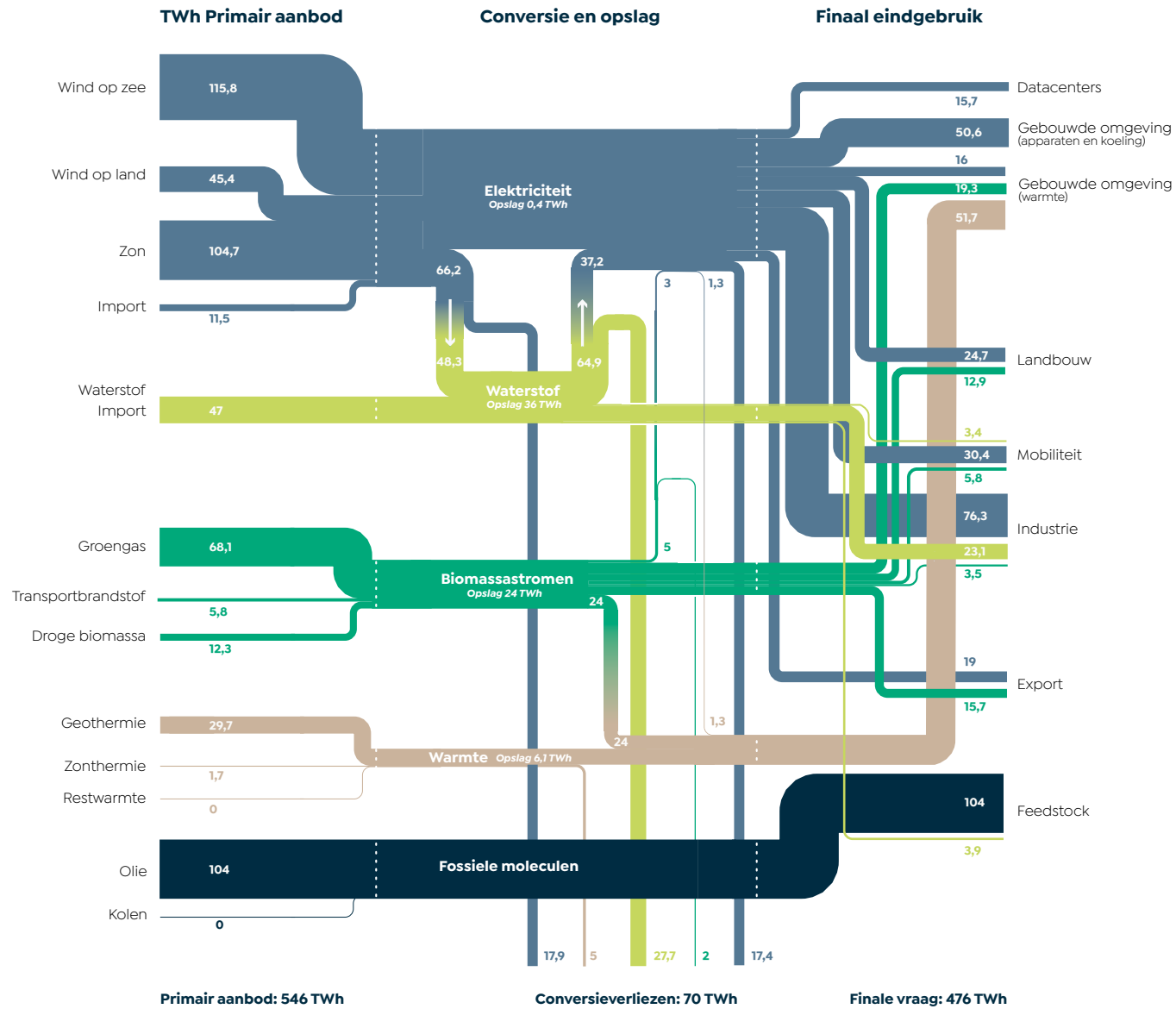


In dit scenario vindt de sturing vooral plaats door een Europese CO₂-heffing, die leidt tot een grotere nadruk op groen gas in verschillende sectoren. Er is een stevige groei van zonne- en windenergie. De industrie groeit en verduurzaamt dankzij elektrificatie en inzet van waterstof (ook deels als grondstof). CCS wordt grootschalig toegepast, onder meer voor de productie van blauwe waterstof. Hybride warmtevoorziening in gebouwen geeft dit scenario een gematigd elektriciteitspiekvraag. Er is redelijk veel import van energie. Gas houdt een rol in de wijken en andere sectoren, in de vorm van groen gas en een mix van blauwe en geïmporteerde groene waterstof.

Internationale sturing



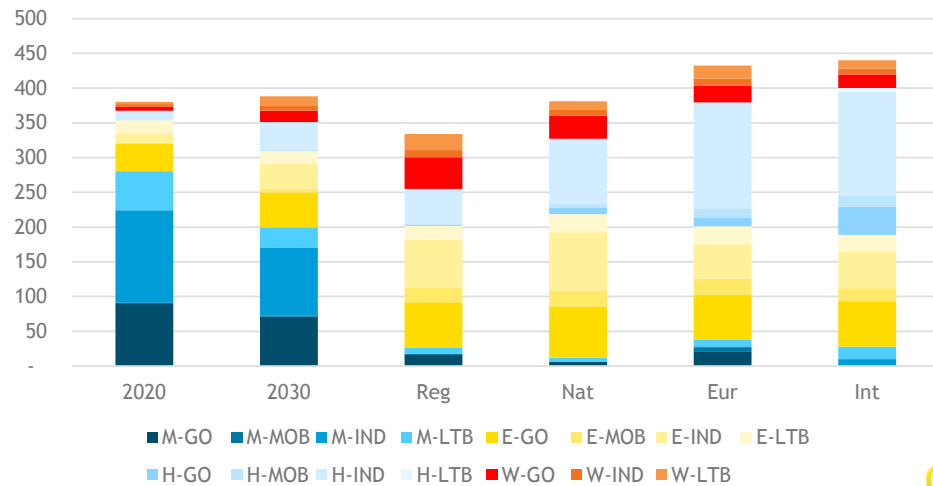
In dit scenario is de markt bepalend en zoekt Nederland internationaal naar opties met de laagste kosten. Veel waterstof wordt geïmporteerd uit landen met veel zonneschijn, waar dit makkelijker te produceren is. Er is minder inzet van groen gas, maar veel hybride warmtevoorziening in gebouwen – vooral in combinatie met waterstof. De industrie groeit dankzij elektrificatie en inzet van waterstof (ook als grondstof). Door de waterstofimport heeft Nederland minder windvermogen nodig om zelf via elektrolyse waterstof te produceren. Dit scenario heeft dus de laagste nationale elektriciteitsproductie - al is die productie in 2050 stevig gegroeid ten opzichte van 2030.



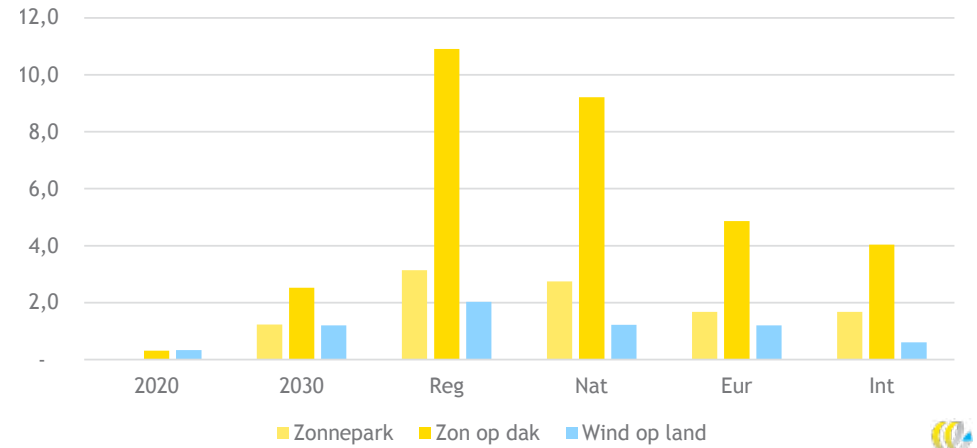
Figuur 29 Visuele weergave van de Nederlandse energiehuishouding, in het scenario nationale sturing (bron: Het energiesysteem van de toekomst).³⁷

2. Stroomstudie Zuid-Holland

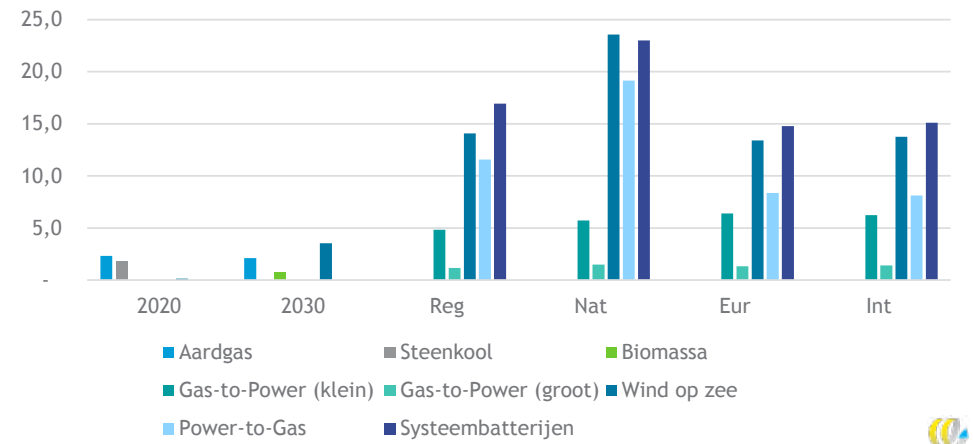
Naast de nationale scenario's zijn op regionaal niveau stroomstudies uitgevoerd, vaak per provincie. Deze stroomstudies vertalen de vier nationale scenario's naar benodigde opwek-, opslag- en infrastructuurcapaciteit in een specifieke regio. Ook geven deze stroomstudies een uitgebreide toelichting op de aannames en uitkomsten van de scenario's. Omdat Zuid-Holland als casus in deze studie is opgenomen, zijn onderstaand ter illustratie de energievraag (figuur 30), het vermogen aan duurzame energie-opwekking (figuur 31) en vermogen aan opslag en flexcapaciteit (figuur 32) opgenomen.



Figuur 30 Energievraag op basis van het Klimaatakkoord (2030) en de vier klimaatneutrale energiescenario's (2050), uitgesplitst per sector en per energiedrager (PJ/jaar)ⁱⁱⁱ (bron: stroomstudie Zuid-Holland)⁶⁰



Figuur 31 Duurzame energieopwekking op land op basis van het Klimaatakkoord (2030) en de vier klimaatneutrale energiescenario's (2050) (bron: stroomstudie Zuid-Holland)⁶⁰



Figuur 32 Centrales, wind op zee, power-to-gas en systeembatterijen op basis van het Klimaatakkoord (2030) en de vier klimaatneutrale energiescenario's (2050) (bron: stroomstudie Zuid-Holland)⁶⁰

ⁱⁱⁱ Dit is warmte die aangevoerd wordt via warmtenetten. Warmte die door een warmtepomp onttrokken wordt van de omgeving of de bodem, is in deze weergave niet meegenomen.

3. Gebruikte cijfers scenario's & systeemstudies

Hoofdstukken 4 en 5 tonen de metaalvraag en mogelijke reductie van de metaalvraag in de verschillende energiescenario's. Daarvoor zijn de cijfers uit de vier energiescenario's uit Het energiesysteem van de toekomst³⁷ en de regionale systeemstudie voor Zuid-Holland⁶⁰ gebruikt, die zijn toegelicht in II.1 en II.2. Deze cijfers zijn samengevat in onderstaande tabellen. Twee zaken ter toelichting:

- De cijfers voor Nederlandse infrastructuur tonen de benodigde aanvullende infrastructuur. Omdat deze alleen voor 2050 is bepaald, is voor 2030 een interpolatie gemaakt op basis van 2020 en 2050. Omdat voor Zuid-Holland geen data gegeven worden over de hoeveelheid elektriciteitskabels, zijn die in de berekeningen voor Zuid-Holland niet meegenomen.
- De cijfers voor Zuid-Holland geven het aantal laag-, midden- en hoogspanningstations weer in de benodigde ruimte. Op basis van kentallen over energie-infrastructuur zijn deze omgerekend naar MVA en vervolgens naar het aantal stations.⁶¹

Tabel 4: opgestelde vermogens en aantallen voor Nederland in de verschillende scenario's.

NEDERLAND							
Onderwerp	Onderdeel	Eenheid	2030	2050 – REG	2050 – NAT	2050 – EUR	2050 – INT
Opwek	Wind op zee	GW	13	31	52	30	28
Opwek	Wind op land	GW	6	20	20	10	10
Opwek	Zon op dak	GW	9	59	49	24	18
Opwek	Zon op veld	GW	18	66	58	35	35
Opwek	Zonthermie	GW	1	15	7	6	5
Flexibiliteit	Systeem-batterijen	GWh	12	400	400	200	200
Flexibiliteit	Elektrolyzers (P2G)	GW	0	42	51	19	16
Flexibiliteit	Elektriciteitscentrales	GW	24	33	35	37	35
Infrastructuur	HS-MS, HS-TS stations	#	11700	42600	40500	29400	27300
Infrastructuur	MS, MS-MS, TS-MS stations	#	35000	117000	114000	99000	90000
Infrastructuur	MS-LS station	#	2100	7200	7140	5940	4500
Infrastructuur	220/380 kV	km	200	400	700	500	450
Infrastructuur	110/150 kV	km	300	900	1090	880	960
Infrastructuur	MS-kabel	km	13100	44400	44100	35200	33600
Infrastructuur	LS-kabel	km	11000	33800	38800	32000	27900
EV	Batterijen	GWh	117	540	444	396	300

Tabel 5: opgestelde vermogens en aantallen voor Zuid-Holland in de verschillende scenario's.

ZUID-HOLLAND							
Onderwerp	Onderdeel	Eenheid	2030	2050 – REG	2050 – NAT	2050 – EUR	2050 – INT
Opwek	Wind op zee (aanlanding in Zuid-Holland)	GW	3,5	14,1	23,6	13,4	13,7
Opwek	Wind op land	GW	1.2	2	1,2	1,2	0,6
Opwek	Zon op dak	GW	2.5	10,9	9,2	4,9	4
Opwek	Zon op veld	GW	1.2	3,1	2,7	1,7	1,7
Opwek	Zonthermie	GW	0.0	0	0	0	0
Flexibiliteit	Systeembatterijen	GWh	0.0	16,9	23	14,8	15,1
Flexibiliteit	Elektrolyzers (P2G)	GW	0.0	11,6	19.2	8,4	8,1
Flexibiliteit	Elektriciteitscentrales	GW	0.0	6	7,2	7,7	7,7
Infrastructuur	HV station	#	300	4500	6400	5400	6200
Infrastructuur	MV station	#	850	2950	3450	2550	2100
Infrastructuur	LV station	#	250	1000	1100	1000	1000
EV	Batterijen	GWh	23	91	86	44	63

4. Aannames systeembatterijen

Een belangrijk onderdeel van de metaalvraag komt voort uit systeembatterijen. Hieronder vallen alle batterijen die beschikbaar zijn voor balanshandhaving: thuisbatterijen, buurtbatterijen en een deel van de batterijen van elektrische auto's³⁷. Daarbij is niet gedefinieerd welke deel van de batterijen van elektrische auto's beschikbaar is voor systeembatterijen. Om een beeld te kunnen vormen van de benodigde aanvullende systeembatterijen is de aanname dat 10% van de autobatterijen beschikbaar is voor systeemopslag. Hier moet echter meer onderzoek naar gedaan worden. De totale hoeveelheid autobatterijen is gebaseerd op de scenario's in het Energietransitiemodel die zijn gebruikt voor "Het energiesysteem van de toekomst".

Voor de ontwikkeling van marktaandeel van batterijtechnologie in het basisscenario is uitgegaan van data van IEA (2021).¹

BIJLAGE IV. OVERZICHT ENERGIETECHNOLOGIEËN

Er zijn verschillende duurzame energietechnologieën, ieder met hun eigen metaalvraag en hun eigen kenmerken. Deze bijlage licht de belangrijkste technologieën en innovaties toe voor zonnepanelen en windturbines, energieopslag en kabels.

LEGENDA

Technology Readiness Level (TRL)

- in ontwikkeling
- potentie voor toepassing in het energiesysteem
- grootschalig toepasbaar in het energiesysteem

Toepasbaarheid

- toepasbaar
- ✗ niet toepasbaar
- ✱ wordt bestudeerd
- ↑ in opkomst
- ? onbekend

Opwekking

De belangrijkste technologieën voor de opwekking van duurzame elektriciteit zijn windturbines en zonnepanelen. Beide hebben verschillende subtechnologieën, die zijn toegelicht in onderstaande tabellen.

Wind

Windturbines kunnen worden geplaatst op land (onshore) of op zee (offshore). Voordelen van wind op land zijn een lagere metaalvraag voor de infrastructuur en eenvoudiger onderhoud. Voordelen van wind op zee zijn de vaak hogere windsnelheden en grotere hoeveelheid beschikbare ruimte. Bij wind op zee is de vraag naar koper hoger, omdat er langere kabels gelegd moeten worden.

TECHNOLOGIE	TRL	METALEN	VOORDELEN	NADELEN
Doubly-Fed Induction (DFIG) (gearbox)	●●●	Boron Chroom Koper Dysprosium Mangaan Molybdenum Neodymium Nickel	<ul style="list-style-type: none"> • Weinig zeldzame aardmetalen nodig • Goedkoop • Lichtgewicht 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoge slijtage, veel onderhoud. Daardoor minder geschikt voor wind op zee.
Permanent Magnet Synchronous (PMSG) (gearbox + direct drive)	●●●	Boron Chroom Koper Dysprosium Mangaan Molybdenum Neodymium Nickel Praseodymium Terbium	<ul style="list-style-type: none"> • Hogere efficiëntie • Direct drive-variant heeft weinig slijtage en onderhoud, en daarmee erg geschikt voor offshore. 	<ul style="list-style-type: none"> • Grote vraag naar zeldzame aardmetalen • Direct drive-variant heeft een erg grote vraag naar zeldzame aardmetalen, zoals neodymium.
Electrically Excited Synchronous (EESG) (direct drive)	●●○	Boron Chroom Koper Dysprosium Mangaan Molybdenum Neodymium Nickel Praseodymium Terbium	<ul style="list-style-type: none"> • Grote metaalvraag, maar minder zeldzame aardmetalen 	<ul style="list-style-type: none"> • Marktaandeel nog erg laag. • Niet geschikt voor wind op zee.

Windturbines kennen daarbij twee 'hoofdstromingen' qua techniek: bij gearbox-windturbines wordt een kleine dynamo aangedreven via een versnellingsbak; bij direct drive is de generator direct gekoppeld aan de rotor. Beide soorten gebruiken permanente magneten met daarin

zeldzame aardmetalen, waarbij de direct drive-types veel meer van deze zeldzame aardmetalen gebruiken. Daarnaast zijn er verschillende types generatoren, die ook bijdragen aan de kritieke metaalvraag.^{1, 62}

Zon

Zonnepanelen kunnen worden geplaatst op daken (zon-op-dak) of op de grond (zon-op-veld). Een voordeel van zon-op-dak is de combinatie van opwek en gebruik op één locatie, wat de netbelasting verlaagt. Een nadeel van zon-op-veld is dat dit ten koste kan gaan van bijvoorbeeld landbouw of biodiversiteit. Tegelijkertijd is het met zon-op-veld mogelijk om sneller opwekcapaciteit te installeren.

Het overgrote deel van de geplaatste zonnepanelen zijn c-Si-panelen. Dit geldt niet alleen in Nederland, maar wereldwijd. De ontwikkeling van zonnepanelen gaat echter enorm hard, waarbij voor de toekomst ook andere types zoals CdTe, CIGS en perovskietpanelen een rol kunnen gaan spelen.

TECHNOLOGIE	TRL	METALEN	VOORDELEN	NADELEN
c-Si	●●●	Silicium Zilver (Lood) (Indium)	<ul style="list-style-type: none"> • Meest efficiënte commerciële technologie • Ontwikkeling lift mee op ontwikkeling elektronica, omdat dezelfde materialen nodig zijn 	<ul style="list-style-type: none"> • Ingewikkeld productieproces • Zeer puur silicium nodig
a-Si	●●○	Silicium Zilver	<ul style="list-style-type: none"> • Dun • Milieuvriendelijke productie, zonder cadmium of lood 	<ul style="list-style-type: none"> • Lage efficiëntie
CdTe	●●●	Cadmium Tellurium	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂- en waterarme productie • Korte terugverdiëntijd • Goede prestaties bij hoge temperaturen en weinig licht 	<ul style="list-style-type: none"> • Bevat cadmium (giftig) • Bevat kritieke metalen (tellurium)
CIGS	●●●	Koper Indium Gallium Selenium (Cadmium/ Lead)	<ul style="list-style-type: none"> • Dun en buigzaam • Meest efficiënte zonnepaneel op dun folie • Minder (of geen) cadmium t.o.v. CdTe 	<ul style="list-style-type: none"> • Modules hebben nog geen schaalvoordelen
Perovskietpanelen	●○○	Mineraal met metalen (CaTiO ₃)	<ul style="list-style-type: none"> • Potentieel zeer goedkoop • Te combineren met Si-panelen voor hogere efficiëntie 	<ul style="list-style-type: none"> • Gevoelig voor luchtvochtigheid • Panelen (vooralsnog) klein • Veel lood nodig bij productie (bij huidige techniek)

OPSLAG

Er zijn verschillende manieren om energie op te slaan, afhankelijk van het benodigde opslagvolume, de opslagtermijn en de benodigde laad- en ontlad-snelheid. Daarbij kunnen niet alle vormen van energieopslag elkaar vervangen, omdat sommige technieken bijvoorbeeld niet in een auto geplaatst kunnen worden of alleen kortstondig

energie kunnen opslaan. Voor de informatie in deze tabel zijn diverse bronnen gebruikt.⁶³⁻⁷⁰

Naast de technologische aspecten zijn ook de kosten van de opslagtechnologie over de hele levensduur een belangrijke factor in de beslissing voor deze infrastructuur. Naar verwachting zijn in 2030 lithiumbatterijen,

vliegwielen, gepompt water (PHES), luchtdruk (CAES) en waterstof internationaal de goedkoopste technologieën, afhankelijk van de toepassing.⁶³ Omdat Nederland echter een ongunstige geografie heeft voor gepompt water (PHES), zullen batterijen, luchtdruk en waterstof hier een grotere rol spelen.

TECHNOLOGIE	TRL	TOEPASSINGEN				METALEN	VOORDELEN	NADELEN
		SEC	DAG	SEIZ	EV			
Lithium-ionbatterijen								
LCO (Lithium-Cobalt oxide)	●●●			×		Kobalt Lithium	<ul style="list-style-type: none"> • Verst ontwikkelde batterij in zijn soort • Breed inzetbaar • Hoge energiedichtheid 	<ul style="list-style-type: none"> • Risico op verbranding • Afhankelijk van kobalt
LFP (Lithium-Iron Phosphate)	●●●			×	↑	Lithium IJzer Fosfaat	<ul style="list-style-type: none"> • Minder afhankelijk van kritieke metalen (t.o.v. andere Li-batterijen) • Gaat veel cycli mee • Relatief veilig 	<ul style="list-style-type: none"> • Lage energiedichtheid • Minder ver ontwikkeld (t.o.v. andere Li-batterijen)
NMC (Nickel-Manganees-Cadmium oxide)	●●●			×		Lithium Nikkel Mangaan Kobalt (minder dan LCO)	<ul style="list-style-type: none"> • Bevat minder kobalt dan LCO • Verhouding tussen metalen is te variëren • Hoge energiedichtheid • Wordt niet snel warm • Gaat veel cycli mee, dus goed geschikt voor EV 	<ul style="list-style-type: none"> • Afhankelijk van kobalt
NCA (Nickel-Manganees-Cadmium Oxide)	●●●			×		Lithium Nikkel Kobalt Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> • Hoge energiedichtheid • Redelijk hoog vermogen • Gaat veel cycli mee 	<ul style="list-style-type: none"> • Veiligheidsrisico's (ontbranding) • Relatief hoge kosten

TECHNOLOGIE	TRL	TOEPASSINGEN				METALEN	VOORDELEN	NADELEN
		SEC	DAG	SEIZ	EV			
LMO (Manganeese-Oxide)	●●●			×		Lithium Mangaan	<ul style="list-style-type: none"> • Snel op- en ontladen • Relatief goedkoop • Stabiel 	<ul style="list-style-type: none"> • Lagere energiedichtheid dan LCO • Te combineren met NMC-batterijen
LTO (Lithium-Titanaat)	●●●	↑	↑	×		Lithium Titanium	<ul style="list-style-type: none"> • Zeer veilig • Snel opladen 	<ul style="list-style-type: none"> • Lagere energiedichtheid (t.o.v. andere Li-ion batterijen) • Laag voltage
LiPo (Polymeer)	●●●	×	×	×		Lithium Andere metalen	<ul style="list-style-type: none"> • Hoge energiedichtheid • Veiliger dan andere lithiumbatterijen 	<ul style="list-style-type: none"> • Relatief duur (t.o.v. andere Li-ion batterijen)
Solid state (SSB)	●○○	?		×		Lithium Andere metalen, afhankelijk van ontwerp	<ul style="list-style-type: none"> • Hoge energiedichtheid • Veilig • Snel oplaadbaar • Lange levensduur 	<ul style="list-style-type: none"> • Ontwikkeling loopt ver achter (t.o.v. conventionele Li-ionbatterijen)
Andere chemische batterijen								
Li-sulfur	●○○			×		Lithium Zwavel	<ul style="list-style-type: none"> • Zeer hoge energiedichtheid 	<ul style="list-style-type: none"> • Vooral nog korte levensduur
Li-air	●○○			×		Lithium (Titanium) Andere metalen, afhankelijk van het ontwerp	<ul style="list-style-type: none"> • Potentieel hoge energiedichtheid 	<ul style="list-style-type: none"> • Nog niet toepasbaar • Nog niet stabiel • Lucht moet continu worden gezuiverd
Loodzuur-batterij	●●●			×	× ^{IV}	Lood	<ul style="list-style-type: none"> • Lage aanschafprijs • Groot vermogen t.o.v. gewicht 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeer lage energiedichtheid • Toxisch (lood) • Risico op explosie, vanwege knalgas

^{IV} Loodzuurbatterijen worden in auto's gebruikt als startbatterij, maar kunnen niet de auto zelfstandig voortbewegen.

TECHNOLOGIE	TRL	TOEPASSINGEN				METALEN	VOORDELEN	NADELEN
		SEC	DAG	SEIZ	EV			
Gesmolten zoutbatterijen								
Sodium sulfur	●○○			×	*	Natrium Zwavel	<ul style="list-style-type: none"> • Hoge energiedichtheid • Hoge efficiëntie • Lage zelfontlading • Lange levensduur • Goedkope materialen • Zeer geschikt voor stationaire energie-opslag 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoge productiekosten • Recycle-opties nodig voor natrium
Sodium-ion	●●○	?	*	×	*	Natrium	<ul style="list-style-type: none"> • Potentieel lagere kosten dan Li-ion • Afhankelijk van minder kritieke metalen dan Li-ion 	<ul style="list-style-type: none"> • Lage energiedichtheid • Korte levensduur • Vooral nog te duur om een realistische optie te zijn als systeem- of autobatterij
Flow-batterijen								
Vanadium	●●○			×	×	Vanadium	<ul style="list-style-type: none"> • Kan lang ontladen blijven • Goed herlaadbaar • Veilig • Kan diep ontladen worden • Lage kosten • Modulair uitbreidbaar • Goed alternatief voor Li-ion bij intensief gebruik 	<ul style="list-style-type: none"> • Alleen stationaire toepassingen (zeer lage energiedichtheid)
Zinc Bromide	●●○	*		×	×	Zinc Bromide	<ul style="list-style-type: none"> • Kan diep ontladen worden • Gaat lang mee • Modulair uitbreidbaar 	<ul style="list-style-type: none"> • Alleen stationaire toepassingen (zeer lage energiedichtheid) • Moet regelmatig (elke paar dagen) ontladen worden • Laag vermogen

TECHNOLOGIE	TRL	TOEPASSINGEN				METALEN	VOORDELEN	NADELEN
		SEC	DAG	SEIZ	EV			
Mechanische opslag								
Pumped hydro (PHES)	●●●	×			×	Staal voor constructie	<ul style="list-style-type: none"> • Hoge opslagcapaciteit • Lage kosten t.o.v. capaciteit • Weinig kritieke metalen nodig • Geschikt voor langdurige opslag 	<ul style="list-style-type: none"> • Verstoort de natuur, omwonenden en het waterpeil • Ongunstige geografie in Nederland, wel potentie voor ondergrondse reservoirs (O-PAC)
Luchtdruk (CAES), grote schaal	●●○	×			×	Staal voor constructie	<ul style="list-style-type: none"> • Hoge opslagcapaciteit • Lage kosten t.o.v. capaciteit • Waarschijnlijk geschikte geografie in Nederland (zoutcavernes + gasvelden) • Geschikt voor langdurige opslag • Modulair uitbreidbaar 	<ul style="list-style-type: none"> • Maatwerk nodig per installatie • Lage efficiëntie
Vliegwiel (FES)	●●○		×	×	×	Composiet	<ul style="list-style-type: none"> • Hoog vermogen • Hoge efficiëntie • Overall inzetbaar 	<ul style="list-style-type: none"> • Alleen geschikt voor zeer korte tijdsduur
Zwaartekrachtssystemen	●○○	?			×	Staal voor constructie	<ul style="list-style-type: none"> • Potentieel hoge efficiëntie • Weinig kritieke metalen nodig 	<ul style="list-style-type: none"> • Lage opslagcapaciteit
Brandstof								
Waterstof (H2)	●●●	×				Platina Iridium Nickel Cobalt	<ul style="list-style-type: none"> • Geschikt voor langdurige opslag • Breed inzetbaar • Geschikt voor industrie • Geschikte geografie in Nederland voor ondergrondse opslag 	<ul style="list-style-type: none"> • Lage efficiëntie • Afhankelijk van de toepassing, dure katalysator nodig
Overig								
Cryogene opslag (CES)	●●○	×			×	Staal voor constructie	<ul style="list-style-type: none"> • Hoge capaciteit • Lage investeringskosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Lage efficiëntie

KABELS

Bij stroomkabels kan er worden gekozen tussen koperen en aluminium kabels, elk met eigen voor- en nadelen.

TECHNOLOGIE	TRL	METALEN	VOORDELEN	NADELEN
Koperen kabels	●●●	Koper	<ul style="list-style-type: none">• Lage weerstand	<ul style="list-style-type: none">• Duur• Zwaar• Schaarser (t.o.v. aluminium)
Aluminium kabels	●●●	Aluminium	<ul style="list-style-type: none">• Goedkoop• Lichtgewicht• Minder schaars (t.o.v. koper)	<ul style="list-style-type: none">• Hogere weerstand (x1.6)

BIJLAGE V. BRONVERMELDING

1. **International Energy Agency** (2021) The role of critical minerals in clean energy transitions
2. **World Bank** (2020) Minerals for Climate Action
3. **Europese Commissie, Joint Research Centre** (2020) Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system
4. **TNO** (2015) Materialen in de Nederlandse economie - Een kwetsbaarheidsanalyse
5. **Metabolic, Universiteit Leiden & Copper8** (2018) Metaalvraag van de Nederlandse energietransitie
6. **TNO** (2018) Global Energy Transition and Metal Demand: an introduction and circular economy perspective
7. **Metabolic, Universiteit Leiden & Copper8** (2019) Metaalvraag van elektrisch vervoer
8. **TNO** (2021) Op weg naar een groene toekomst, deel 1
9. **HCSS** (2020) Securing critical materials for critical sectors
10. **SOMO** (2020) The Battery Paradox
11. **Action Aid & SOMO** (2018) Human rights in the wind turbine supply chain
12. **Ellen MacArthur Foundation** (2019) Completing the picture: how the circular economy tackles climate change
13. **Rijksoverheid** (2016) Rijksbrede Programma Circulaire Economie
14. **Europese Commissie** (2020) Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability
15. **Europese Commissie** (2020) A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe
16. **Europese Commissie** (2020) List of Critical Raw Materials
17. **TNO** (2021) Kritikaliteit van grondstoffen: ontwikkeling en operationalisatie
18. **Rijksoverheid** (2018) Transitie-agenda Circulaire Maakindustrie
19. **Rijksoverheid** (2020) Nationale Batterijenstrategie
20. **ECHT** (2021) The ideation process focused on circular strategies in the wind industry
21. **CE Delft** (2021) Kennisnotitie Zonnepanelen Circulair
22. **Materials Innovation Institute** (2021) Kansen en uitdagingen voor circulaire Zon PV, met focus op materiaal en technologie
23. **Europese Commissie** (2018) Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU: a Foresight Study
24. **Institute for the Analysis of Global Security** (2010) - China's Rare Earth Elements Industry: What Can The West Learn?
25. **Merics** (2016) Made in China 2025: The making of a high-tech superpower and consequences for industrial countries
26. **White House** (2020) Executive Order on Addressing the Threat to the Domestic Supply Chain from Reliance on Critical Minerals from Foreign Adversaries
27. **White House** (2021) Building resilient supply chains, revitalizing American manufacturing and fostering broad-based growth
28. **Rijksoverheid** (2019) Nederland-China: een nieuwe balans
29. **National Research Council** (2008) Managing Materials for a Twenty-first Century Military
30. **Nuss, Graedel, Alonso & Carroll** (2016) Mapping supply chain risk by network analysis of product platforms. Sustainable Materials and Technologies, 10, 14-22.
31. **Graedel, T.** (2010), op basis van Hageluku & Meskers (2010) Complex Life Cycles of Precious and Special Metals. Strüngmann Forum Report, Linkages of Sustainability
32. **New York Times** (16 juli 2020) Southern Iraq's Toxic Twilight: Burning Gas and Poisoning the Air - online beschikbaar op <https://www.nytimes.com/2020/07/16/world/middleeast/iraq-gas-flaring-cancer-environment.html>
33. **Trouw** (4 juni 2020) Congolezen betalen de prijs voor onze elektrische auto's - online beschikbaar op <https://www.trouw.nl/duurzaamheid-natuur/congolezen-betalen-de-prijs-voor-onze-elektrische-auto-s>
34. **Financieel Dagblad** (7 april 2021) Nederlandse zonnepanelen komen van Chinese bedrijven die worden verdacht van dwangarbeid - online beschikbaar op <https://fd.nl/ondernemen/1378683/nederlandse-zonnepanelen-komen-van-chinese-bedrijven-die-worden-verdacht-van-dwangarbeid>
35. **Volkskrant** (8 april 2021) Linkse verkiezingszege in Groenland zet omstreken mijnbouw op losse schroeven - online beschikbaar op <https://www.volkskrant.nl/nieuws-achtergrond/linkse-verkiezingszege-in-groenland-zet-omstreken-mijnbouw-op-losse-schroeven>
36. **CERA** (2021) CERA4in1.org
37. **Netbeheer Nederland** (2021) Het Energiesysteem van de Toekomst: Integrale Infrastructuurverkenning 2030 - 2050

38. **Althaf, S., Babbitt, C. W., & Chen, R.** (2020). The evolution of consumer electronic waste in the United States. *Journal of Industrial Ecology*.
39. **CBS** (2020) Hoeveel personenauto's zijn er in Nederland?
40. **PBL** (2015) Effecten van autodelen op mobiliteit en CO₂ uitstoot
41. **ING** (2018) Car sharing unlocked
42. **Rijksoverheid** (2018) Green Deal Autodelen II
43. **NOS** (7 juni 2021) Bijna een op de vijf fabrieken in Nederland heeft toeleveringsproblemen - online beschikbaar via <https://nos.nl/artikel/2383973-bijna-een-op-vijf-fabrieken-nederland-heeft-toeleveringsproblemen>
44. **CBS** (2018) Het Industriële landschap van Nederland
45. **NRC** (2021) Rusland zegt belastingverdrag met Nederland op - online beschikbaar via <https://www.nrc.nl/nieuws/2021/05/19/rusland-zegt-belastingverdrag-met-nederland-op-a4044242>
46. **Ziegler & Trancik** (2021) Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline. *Energy & Environmental Sciences*
47. **CIC energiGUNE** (2021) Overzicht van Europese Gigafactories. Laatste update op 07-04-2021
48. **Solar Magazine** (2019) Exasun <https://solarmagazine.nl/industry-register/i106/exasun>
49. **VDL** (2021) Nieuwe fabriek in Belgische Roeselare vdlbuscoach.com/nl/news/archief/nieuwe-fabriek-in-belgische-roeselare-vdl-bus-coach-zet-doelstelling-aiming-for-zero-kracht-bij
50. **OICA** (2021) 2019 production statistics <https://www.oica.net/category/production-statistics/2019-statistics/>
51. **ResourceTrade.Earth** (2021) <https://resourcetrade.earth/?year=2019&exporter=528&category=39&units=value&autozoom=1>
52. **Ex'tax** (2021) Deltaplan Belastingen voor een Circulaire en Sociale Economie
53. **North Sea Wind Power Hub Program** (2021) Towards the first hub-and-spoke project: progress of the North Sea Wind Power Hub Consortium
54. **US Geological Survey** (2021) Mineral Commodity Summaries 2020
55. **TNO** (2020) Koper: winning, verwerking en recycling - feiten en cijfers
56. **National Geographic** (februari 2019) This metal is powering today's technology—at what price?
57. **The Guardian** (24 augustus 2017) Nickel mining: the hidden environmental cost of electric cars - online beschikbaar op <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/aug/24/nickel-mining-hidden-environmental-cost-electric-cars-batteries>
58. **Reuters** (2 februari 2017) Philipines to shut half of mines, mostly nickel, in environmental clampdown
59. **Fairphone** (2017) Smartphone Material Profiles: Opportunities for improvement in ten supply chains
60. **Provincie Zuid-Holland** (2021) Systeemstudie energie-infrastructuur Zuid-Holland 2020-2030-2050
61. **Netbeheer Nederland** (2019) Basisinformatie over energie-infrastructuur
62. **Osmanbasic, E.** (2020) The Future of Wind Turbines: Comparing Direct Drive and Gearbox
63. **Schmidt, Melchior, Hawkes & Staffell** (2019) Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies *Joule*, 3(1), 81–100
64. **Das, Bass, Kothapalli, Mahmoud & Habibi** (2018) Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 1205–1230.
65. **Zubi, Dufo-López, Carvalho & Pasaoglu** (2018) The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 292–308.
66. **DNV** (2019) Technology Outlook 2030. Are solid-state batteries the holy grail for 2030?
67. **Qirion** (2020) Zoutcavernes en gasvelden voor duurzame energieopslag?
68. **Fu, Zheng, Wang, Sun & Wang** (2017) Flow-Rate Optimization and Economic Analysis of Vanadium Redox Flow Batteries in a Load-Shifting Application. *Journal of Energy Engineering*, 143(6), 04017064.
69. **Ong, S.** (2020) The Slog Continues for Lithium-Air Batteries. *IEEE Spectrum*
70. **Guarnieri, Mattavelli, Petrone & Spagnuolo** (2016) Vanadium Redox Flow Batteries: Potentials and Challenges of an Emerging Storage Technology. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 10(4), 20–31



Copper

