

# Kritieke metalen voor de transitie naar een koolstofarme economie

Koen Binnemans en Peter Tom Jones

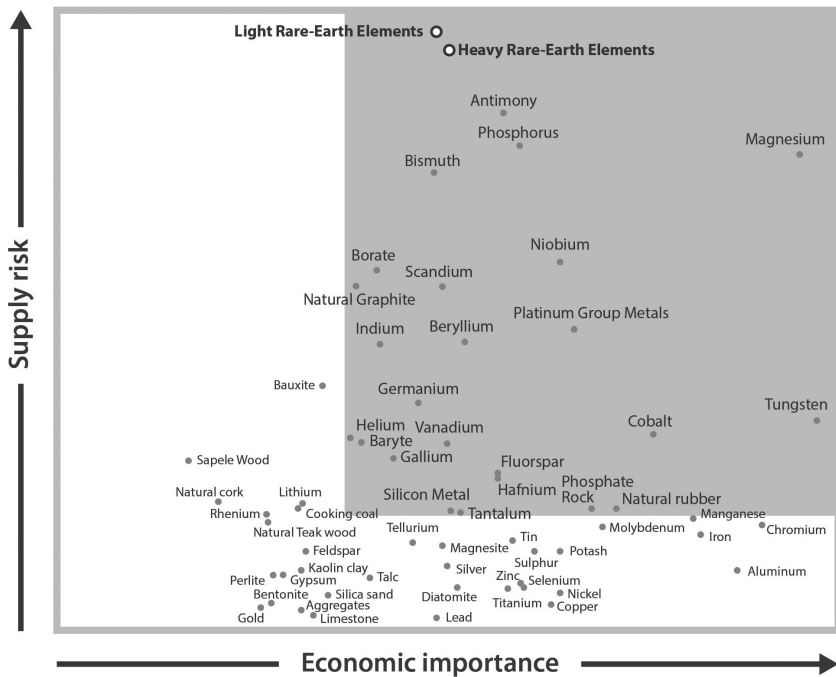
## INLEIDING

Een megatrend in onze huidige maatschappij is het afbouwen van het gebruik van fossiele brandstoffen (gas, olie en steenkool). Deze omschakeling van fossiele brandstoffen naar hernieuwbare bronnen wordt de *transitie naar een koolstofarme economie* genoemd. Voor deze transitie zijn elektriciteitsproductie (windturbines en zonnecellen), elektriciteitsopslag (batterijen) en elektrische mobiliteit van essentieel belang. Iedereen vindt deze evolutie vanzelfsprekend en de transitie krijgt steun vanuit alle geledingen van de maatschappij. Minder bekend is dat er voor de verwezenlijking van deze transitie veel minerale grondstoffen nodig zijn. Het betreft ook niet-klassieke metalen, zoals zeldzame aarden, indium, gallium, germanium en kobalt. Vele van deze grondstoffen hebben een groot bevoorradingsrisico en worden daarom als ‘kritieke grondstoffen’ omschreven. In deze bijdrage geven we een overzicht van deze kritieke grondstoffen, met een nadruk op de zeldzame aarden, en hoe ze worden gebruikt in de verschillende *cleantech*-toepassingen. We staan stil bij de vraag of onze natuurlijke rijkdommen binnenkort uitgeput raken en of er nog wel voldoende minerale grondstoffen beschikbaar zullen zijn voor de toekomstige generaties.

We zullen aantonen dat er nauwelijks een verband bestaat tussen de term ‘kritieke grondstof’ en de zeldzaamheid van het element in de aardkorst. Veeleer heeft het kritieke gehalte van een grondstof te maken met geopolitieke factoren. Vele elementen die voor cleantech-toepassingen worden gebruikt, kunnen echter alleen worden verkregen als nevenproducten bij de winning van basismetalen, zoals koper en zink, wat problemen meebrengt als de vraag naar deze nevenproductmetalen sterk stijgt. De grootste bedreiging voor de voldoende beschikbaarheid van minerale grondstoffen is niet de uitputting van de ertsvoorraden, maar de moeilijkheid om nieuwe mijnen te openen, onder andere door de (soms terechte) weerstand van lokale gemeenschappen die in de buurt van die mijnen wonen en bezorgd zijn over de potentiële impact op het milieu en de gezondheid. Vandaar dat de *Social License to Operate* zo belangrijk is.

## KRITIEKE METALEN

Grondstoffen zijn van cruciaal belang voor onze moderne maatschappij. Het verzekeren van een betrouwbare en ongehinderde toegang tot bepaalde grondstoffen is een grote zorg voor vele landen. Om dit probleem aan te pakken heeft de Europese Commissie in 2011 een lijst van zogenaamde *kritieke grondstoffen* (*Critical Raw Materials*) opgesteld, met geactualiseerde versies in 2014 en 2017 (Figuur 1). Kritieke grondstoffen zijn van groot economisch belang voor de Europese Unie, maar hun bevoorrading is onderhevig aan diverse risico's. Deze bevoorradingrisico's kunnen worden veroorzaakt door een monopolie van één land in de productie van een grondstof of door het feit dat de belangrijkste voorraden van deze grondstoffen gelegen zijn in politiek instabiele landen of in conflictzones. De volgende 27 grondstoffen staan op de nieuwe lijst van 2017: antimoon, bariet, beryllium, bismut, boraten, cokes, fluoriet, fosfaatgesteente, fosfor, gallium, germanium, grafiet, hafnium, helium, indium, kobalt, magnesium, niobium, platinagroepmetalen, rubber, scandium, silicium, tantaal, vanadium, wolfram, lichte en zware zeldzame aarden. De meeste grondstoffen op deze lijst zijn metalen (kritieke metalen), maar er staan op de lijst ook een aantal niet-metalen. De lijst omvat eveneens een aantal groeperingen van metalen: platinagroepmetalen (platina, palladium, rhodium, iridium, ruthenium, osmium), en de lichte en zware zeldzame aarden.



FIGUUR 1: Kritieke grondstoffen volgens het rapport van de Europese Commissie van 2017. De lichte en zware zeldzame aarden worden als de meest kritieke grondstoffen beschouwd (Credits figuur: Paul McGuiness).

Alhoewel de lijst met kritieke grondstoffen een belangrijk beleidsinstrument is, moet de lijst toch met de nodige voorzichtigheid worden behandeld. De positie van de grondstoffen in een grafiek zoals Figuur 1 is sterk afhankelijk van de methodologie die wordt gebruikt. Bovendien circuleren er verschillende andere lijsten van kritieke grondstoffen. Vergelijkend onderzoek tussen verschillende studies over het kritieke gehalte van grondstoffen toonde aan dat de gebruikte methoden zeer heterogeen zijn en dat sommige grondstoffen die over het algemeen als kritiek worden beschouwd, in werkelijk niet-kritiek zijn. Kritiekheid kan betrekking hebben op het globale of op het regionale niveau, maar de meeste studies zijn voor een regionaal niveau opgesteld, vooral dan voor de Europese Unie, de Verenigde Staten en Japan. Een beoordeling van de kritiekheid van grondstoffen heeft betrekking op de huidige situatie, met gebruik van gegevens uit het verleden. De lijst is bijgevolg geen prognose voor de situatie in de toekomst. Kritiekheid is een dynamische toestand en er moet regelmatig worden geëvalueerd. Een veelgehoorde opmerking is dat de lijst te veel

gericht is op het kortetermijnbelang van de industrie. Grondstoffen worden als kritiek beschouwd door hun geopolitieke schaarste en niet vanwege hun geologische schaarste. Zo wordt magnesium als een kritiek metaal beschouwd en zink niet, terwijl er op aarde veel meer magnesium dan zink beschikbaar is. Magnesium is een kritiek metaal voor de Europese Commissie omdat 94% van de bevoorrading van de Europese Unie uit China afkomstig is. De plaatsing van magnesium op de lijst kan leiden tot een foutieve reflex om zoveel mogelijk in toepassingen magnesium door zink te gaan vervangen. Dit is een slechte langetermijnvisie.

## ZELDZAME AARDEN

De *zeldzame aarden* vormen ongetwijfeld de bekendste groep kritieke metalen, vooral als gevolg van de persaadacht tijdens de zeldzame aardencrisis in 2011. In dat jaar legde China, de belangrijkste producent van deze elementen, strenge quota op voor de export van zeldzame aarden, waardoor de prijs van deze elementen in korte tijd naar ongekende hoogten steeg. Voor sommige elementen bedroeg de prijsstijging een factor 10 ten opzichte van de prijs vóór de crisisperiode. Momenteel zijn de prijzen van de zeldzame aarden weer sterk gedaald, maar waarschijnlijk is deze prijsdaling slechts tijdelijk. De zeldzame aarden tonen aan dat de kritiekheid van metalen vaak weinig te maken heeft met beschikbare voorraden, meer des te meer met geopolitiek. In tegenstelling tot wat hun naam doet vermoeden, zijn de meeste zeldzame aarden helemaal niet schaars. Het zeldzame aardmetaal cerium komt in de aardkorst bijna evenveel voor als koper. De zeldzame aarden komen echter meestal sterk verspreid in gesteenten voor en er zijn slechts weinig rijke ertsafzettingen van zeldzame aarden. Hoewel deze ertsafzettingen verspreid zijn over alle continenten, worden ze enkel in China op grote schaal ontgonnen. China produceert momenteel meer dan 95% van de wereldproductie van de zeldzame aarden. Het is door deze monopoliepositie dat de bevoorrading van de zeldzame aarden in Europa gevaar loopt, waardoor de zeldzame aarden als kritieke metalen gelden.

De *zeldzame aarden* (*rare earths* of *rare-earth elements*) zijn een groep van zeventien elementen: lanthaan (La), cerium (Ce), praseodymium (Pr), neodymium (Nd), promethium (Pm), samarium (Sm), europium (Eu), gadolinium (Gd), terbium (Tb), dysprosium (Dy), holmium (Ho), erbium (Er), thulium (Tm), ytterbium (Yb), lutetium (Lu), yttrium (Y) en scan-

dium (Sc). De groep van elementen van lanthaan tot lutetium zijn bekend onder de benaming *lanthaniden*. In de industrie worden de zeldzame aarden in twee groepen onderverdeeld: de *lichte zeldzame aarden* (*light rare-earth elements, LREEs*) en de *zware zeldzame aarden* (*heavy rare-earth elements, HREEs*). Meestal worden de LREEs gedefinieerd als de elementen van lanthaan tot en met neodymium, terwijl de HREEs de elementen van samarium tot lutetium, evenals yttrium omvatten. Het element scandium wordt meestal afzonderlijk van de andere zeldzame aarden beschouwd, door verschillen in chemisch gedrag. De zeldzame aarden komen in de natuur als mengsels in ertsen voor, en door de chemische gelijkenissen tussen deze elementen is een mengsel van zeldzame aarden zeer moeilijk in de zuivere elementen te scheiden. Deze moeilijke scheiding zorgt ervoor dat zuivere zeldzame aarden zo duur zijn.

De productie van zeldzame aarden wordt typisch uitgedrukt in tonnen zeldzame aarden oxiden. De jaarlijkse productie bedraagt tussen 130.000 en 140.000 ton. Nauwkeurige cijfers zijn zeer moeilijk of zelfs onmogelijk te verkrijgen, omdat China geen productiecijfers publiceert en omdat een aanzienlijk deel van de zeldzame aarden via illegale mijnbouw wordt ontgonnen. Deze getallen zeggen echter niets over de beschikbaarheid van de individuele zeldzame aarden. Alhoewel de zeldzame aarden samen in ertsen voorkomen, komt er van elk element geen gelijkaardige concentratie voor, door verschillen in natuurlijke overvloed (abundantie) van deze elementen. De algemene trend is dat deze elementen zeldzamer worden, naarmate hun atoomgetal  $Z$  stijgt, dus naarmate de elementen zwaarder worden. Bijgevolg komen de HREEs veel minder voor dan de LREEs. Een tweede trend is dat elementen met een even atoomgetal meer voorkomen dan elementen met een oneven atoomgetal. Cerium ( $Z = 58$ ) bijvoorbeeld komt meer voor dan de naburige elementen lanthaan ( $Z = 57$ ) en praseodymium ( $Z = 59$ ). Deze trend weerspiegelt de stabiliteit van atoomkernen. Alle zeldzame aarden komen samen voor in ertsafzettingen, maar sommige afzettingen zijn rijker aan LREEs, terwijl andere afzettingen rijker aan HREEs zijn. Het is niet mogelijk om een mijn te openen om slechts één enkel element van de zeldzame aarden te ontginnen, bijvoorbeeld een 'neodymiummijn' om enkel neodymium voor permanente magneten te produceren. Cerium is het meest voorkomende element in ertsen die rijk aan LREEs zijn (bastnäsiet en monaziet), terwijl yttrium het meest voorkomende element is in ertsen die rijk zijn aan HREEs (xenotiem en de ion-adsorptie-ertsen). De beschikbare hoeveelheden yttrium zijn echter veel kleiner dan die van cerium. Promethium komt niet in de natuur voor, omdat het een radioactief element is met slechts kortlevende isotopen. Het wordt in kerncentrales gevormd tijdens de splijting van uranium.

TABEL 1: Overzicht van de zeldzame aarden, hun belangrijkste toepassingen, hun kritiektheid (+ evolutie) en situatie van het Balansprobleem.

Element	Belangrijkste toepassingen	Kritiektheid (2014)	Kritiektheid (2017 en nabije toekomst)	Markt in evenwicht?
lanthaan (La)	NiMH batterijen, optisch glas, groen lampfosfor (LAP), katalysatoren, mengmetaal	Geen	Geen	Overproductie
cerium (Ce)	polijstmiddel voor glas, ontkleuringsmiddel voor glas, UV-absorberende glazen, katalysatoren, mengmetaal	Geen	Geen	Overproductie
praseodymium (Pr)	groene decoratieve glazen, geel pigment voor keramiek, gedeelte vervanging van Nd in magneten	Geen	Geen	In evenwicht
neodymium (Nd)	Nd-Fe-B permanente magneten	Hoogste	Hoogste (Nd zal waarschijnlijk het meest kritieke metaal worden)	In evenwicht, aangezien Nd de productie van LREE aandrijft
samarium (Sm)	Sm-Co permanente magneten	Geen	Geen	In evenwicht
europium (Eu)	$Y_2O_3:Eu^{3+}$ rode lampfosfor	Hoog	Geen	Kleine overproductie, aangezien markt van lampfosforen krimpt
gadolinium (Gd)	Contraststof voor magnetische resonantie beeldvorming (MRI), groene lampfosfor ( $GdMgB_5O_{10}:Ce^{3+}, Tb^{3+}$ )	Geen	Geen	In evenwicht
terbium (Tb)	groene lampfosfor $LaPO_4:Ce^{3+}, Tb^{3+}$ (LAP))	Zeer hoog	Hoog, maar dalend	In evenwicht. Kleine overproductie verwacht, aangezien markt van lampfosforen krimpt
dysprosium (Dy)	additief in Nd-Fe-B permanente magneten	Hoogste	Hoog, maar dalend	In evenwicht

Element	Belangrijkste toepassingen	Kritiekheid (2014)	Kritiekheid (2017 en nabije toekomst)	Markt in evenwicht?
holmium (Ho) erbio (Er) thulium (Tm) ytterbium (Yb)	Geen toepassingen die grote volumes verbruiken	Geen	Geen	In evenwicht
lutetium (Lu)	Scintillatiefosforen in PET-scanners voor medische beeldvorming	Geen	Geen (maar kan kritiek worden in de toekomst)	In evenwicht, maar een mogelijk tekort in de toekomst
yttrium (Y)	Rode lampfosfor $Y_2O_3:Eu^{3+}$ , yttrium-gestabiliseerd zirconia (YSZ) en keramische materialen	Hoog	Laag	In evenwicht, maar een mogelijke overproductie aangezien de markt voor lampfosforen krimpt
scandium (Sc)	Geen toepassingen die grote volumes verbruiken (alhoewel vaste oxide brandstofcellen een snel groeiende markt vormen)	Geen	Laag	Grote voorraad kan beschikbaar worden door bauxietresidu

De beschikbaarheid van de individuele zeldzame aarden is van belang voor toepassingen die zuivere zeldzame aarden vereisen, zoals lampfosforen en permanente magneten. Als een specifiek zeldzaam aarde-element voor een bepaalde toepassing een relatief lage abundantie heeft, dan is de minimum hoeveelheid van ertsen van zeldzame aarden die moet worden ontgonnen, die hoeveelheid die de vereiste hoeveelheid van het element bevat die nodig is voor deze toepassing. Bijgevolg zullen bepaalde zeldzame aarden in grotere hoeveelheden worden geproduceerd dan er vraag naar is op de markt en dit overschot zal moeten worden opgeslagen. Het streven naar een evenwicht (balans) tussen de vraag naar de individuele elementen en de natuurlijke abundantie van de zeldzame aarden in ertsen is een grote zorg voor de producenten van zeldzame aarden. Dit is het zogenaamde *Balansprobleem*. Een ideale situatie is een markt in evenwicht, oftewel een perfecte match tussen de vraag en productie van de zeldzame aarden, zodat er geen overschotten van om het even welk zeldzame aarde worden geproduceerd, maar er ook geen tekorten zijn. Een markt in evenwicht resulteert in de laagste prijs voor alle zeldzame aarden, omdat de pro-

ductiekosten dan over alle elementen kunnen worden gespreid. In Tabel 1 wordt een overzicht gegeven van de zeldzame aarden, hun belangrijkste toepassingen, hun kritiektheid en de situatie van het Balansprobleem. De toepassing van zeldzame aarden in energietoepassingen wordt verderop meer in detail besproken.

Vanwege het unieke karakter van elk van de zeldzame aarden is het niet juist om te spreken over de kritiektheid van de groep van zeldzame aarden. Sommige van de zeldzame aarden, zoals neodymium en dysprosium, zijn inderdaad kritieke metalen, maar van andere, zoals cerium, is er een overschot. In de figuur met de kritieke metalen van de Europese Commissie wordt enkel een onderscheid gemaakt tussen LREEs en HREEs, waarbij de LREEs helemaal bovenaan in de grafiek staan door de grote vraag naar neodymium voor de productie van permanente magneten in duurzame mobiliteit- en energietoepassingen.

## KRITIEKE METALEN IN ENERGIETOEPASSINGEN

### *Permanente magneten*

Permanente magneten zijn essentiële componenten van de meeste typen van elektrische wagens en elektrische fietsen, en voor een aantal typen van windturbines. De sterkste commercieel beschikbare magneten zijn permanente magneten op basis van zeldzame aarden. Er zijn twee belangrijke soorten van zeldzame aardmagneten: samarium-kobalt (Sm-Co) en neodymium-ijzer-boor (Nd-Fe-B) magneten. De markt wordt momenteel gedomineerd door Nd-Fe-B-magneten (> 95%). Permanente magneten zijn de belangrijkste toepassing van zeldzame aarden. De markt van permanente magneten van zeldzame aarden groeit snel dankzij het gebruik van deze magneten in diverse cleantech-toepassingen.

De *samarium-kobalt magneten* zijn sinds de jaren zeventig van de twintigste eeuw op de markt. Tegenwoordig worden Sm-Co-magneten minder gebruikt dan Nd-Fe-B-magneten, omdat ze duurder zijn en een zwakker magneetveld creëren. Sm-Co-magneten hebben echter een hogere Curie-temperatuur (oftewel de temperatuur waarbij een magneet zijn ferromagnetisch gedrag verliest), waardoor er een nichemarkt is voor deze magneten in toepassingen waarbij een sterk magneetveld is vereist bij hogere gebruikstemperaturen. De maximale gebruikstemperaturen van Sm-Co-magneten liggen tussen 250 en 550 °C. Boven zijn maximale gebruikstemperatuur



verliest een magneet op een niet-omkeerbare wijze een deel van zijn magnetisatie, waardoor de kwaliteit van de magneet achteruitgaat. Sm-Co-magneten zijn relatief duur en onderhevig aan prijsfluctuaties, omdat de kobaltprijs sterk varieert. Kobalt is zelf ook een kritiek metaal.

De *neodymium-ijzer-boor-magneten* zijn sinds 1985 op de markt. Een Nd-Fe-B-magneet kan 1300 maal zijn eigen massa optillen. Als men naar het volume van de magneet kijkt, zijn Nd-Fe-B-magneten ongeveer achttien maal kleiner dan een magneet uit keramisch materiaal (ferrietmagneet) met een equivalente sterkte. Alhoewel Nd-Fe-B-magneten een sterkere magnetische veldsterkte hebben dan Sm-Co-magneten, zijn ze inferieur in termen van de Curie-temperatuur en weerstand tegen oxidatie. De beperkte weerstand tegen corrosie betekent dat het oppervlak van Nd-Fe-B-magneten moet worden behandeld met een beschermende coating van nikkel, zink, tin of een epoxyhars. Nd-Fe-B-magneten verliezen een groot gedeelte van hun magnetische sterkte wanneer ze worden verhit boven hun maximale gebruikstemperatuur, die slechts ongeveer 80 °C bedraagt. Magneten uit Nd-Fe-B-legeringen met ongeveer 10 gewichtsprocent dysprosium (Dy) kunnen een veel hogere maximale gebruikstemperatuur hebben, tot wel 200 °C in sommige gevallen.

**Elektrische wagens.** Hybride elektrische wagens (HEVs), plug-in hybride elektrische wagens (PHEVs) en zuivere elektrische wagens (EVs) maken gebruik van permanente magneten, en niet alleen voor de elektrische motor. Ook de stuurbekrachtiging, het start-stopsysteem en het systeem voor recuperatief remmen bevatten Nd-Fe-B-magneten, alhoewel ook (geavanceerde) wagens met brandstofmotoren deze drie laatste systemen kunnen bezitten. De elektrische motor voor de aandrijving bevatten tussen 1 en 1,5 kilogram aan Nd-Fe-B-magneten. Deze kunnen eventueel door Sm-Co-magneten worden vervangen. De stuurbekrachtiging bevat 30 tot 100 gram aan Nd-Fe-B-magneten, de motor van het start-stopsysteem 200 gram, en het systeem voor recuperatief remmen 0,7 kilogram. Daarnaast bevatten wagens nog verschillende kleinere Nd-Fe-B-magneten met een massa kleiner dan 30 gram. Een hoogperformante magneet voor motortoepassingen heeft als typische samenstelling 31% Nd – 4,5% Dy – 2% Co – 61,5% Fe – 1% B (gewichtsprocent). Het dysprosiumgehalte is van belang om een bedrijfstemperatuur van 160 °C mogelijk te maken. Opgemerkt dient te worden dat er een type elektrische motor zonder zeldzame aardmagneten bestaat, namelijk de inductiemotor. Deze motor maakt gebruik van elektromagneten en wisselstroom om een draaiend magneetveld te genereren, waardoor de aandrijf-as gaat draaien. Nadelen zijn dat deze motor minder compact is en minder efficiënt is dan elektromotoren

met permanente magneten. Het is veelzeggend dat Tesla voor zijn eerste modellen elektrische wagens een beroep deed op inductiemotoren (vooral onder invloed van de zeldzame aardencrisis van 2011), maar in 2017 aankondigde om voor zijn Model 3 RWD Long Range-reeks gebruik te maken van Nd-Fe-B-magnetten. Volgens consultingbedrijf Roskill werden er in 2016 wereldwijd 3,2 miljoen HEVs/PHEVs/EVs verkocht, met een markt-aandeel van 76% voor de HEVs/PHEVs. De schatting voor 2020 is dat er 9,4 miljoen HEVs/PHEVs/EVs zullen worden verkocht met een markt-aandeel van 42% voor de EVs. Alhoewel niet alle elektrische auto's gebruik zullen maken van motoren met permanente magneten, is de voorspelling dat de vraag naar zeldzame aarden die in permanente magneten worden gebruikt, met meer dan 10% per jaar zal stijgen.

**Elektrische fietsen.** Een snel groeiende markt voor Nd-Fe-B-magnetten zijn de elektrische fietsen, die gebruikmaken van compacte, lichtgewicht elektromotoren op basis van Nd-Fe-B-magnetten. Een elektrische fiets bevat gemiddeld 350 gram aan Nd-Fe-B-magnetten of 86 gram neodymium. Tot op heden zijn er geen alternatieven voor Nd-Fe-B-magnetten in deze toepassing vanwege ruimte- en gewichtsbeperkingen. Het Internationaal Energieagentschap (IEA) schat dat er momenteel 200 miljoen elektrische fietsen in gebruik zijn in China, en dit aantal stijgt snel. De gegevens van de *Confederation of the European Bicycle Industry* (CONEBI) tonen aan dat er in Europa in 2016 ongeveer 1,6 miljoen elektrische fietsen werden verkocht. *Bike Europe* rapporteerde dat de helft van de fietsen die in België worden verkocht, momenteel reeds elektrische fietsen zijn. De elektrische fietsen zijn hét succesverhaal van de elektrificatie van de mobiliteit.

**Windenergie.** De Europese Unie is steeds koploper geweest op het gebied van windenergie. In 2016 produceerde windenergie ongeveer 300 TWh, wat overeenkomst met 10,4% van het elektriciteitsverbruik in de Europese Unie, met behulp van een cumulatieve geïnstalleerde capaciteit van 153,7 GW (waarvan 12,6 GW *off-shore*). Tot de recentste generaties van wind-energietechnologie behoort de *permanente magneet synchrone generator* (PMSG), die gebruikmaakt van Nd-Fe-B permanent magneten. Ongeveer 23% van de wereldwijde geïnstalleerde capaciteit in 2015 aan windenergie waren windturbines die een beroep doen op deze PMSG-technologie. De overige 77% maakt gebruik van de conventionele generatoren met elektromagnetten, gebaseerd op magnetisch staal en koperen windingen. De windturbines met PMSG-technologie bevatten ongeveer 650 kilogram aan Nd-Fe-B-magnetten per MW vermogen, wat overeenkomt met ongeveer 185 kilogram neodymium. In tegenstelling tot de Nd-Fe-B-magnetten in

elektromotoren, bevatten de Nd-Fe-B-magneten weinig of geen dysprosium, omdat het veel gemakkelijker is om bij windturbines voor externe koeling te zorgen. De voordelen van de PMSG-windturbines zijn de hogere efficiëntie, het eenvoudigere onderhoud en het lagere gewicht van de generator. Het gemakkelijkere onderhoud is een belangrijke reden om voor deze technologie te kiezen voor *off-shore* windturbines. Door de Nd-Fe-B-magneten zijn deze windturbines veel duurder dan windturbines die gebruikmaken van alternatieve technologieën. De hoge kostprijs is waarschijnlijk een belangrijke reden waarom er in Vlaanderen weinig of geen windturbines met Nd-Fe-B-magneten te vinden zijn, ondanks de vele technologische voordelen. Wereldwijd wordt er veel onderzoek gedaan om het gebruik aan zeldzame aarden in windturbines te verminderen. Er zijn voor de windturbines veel meer alternatieve technologieën zonder zeldzame aarden beschikbaar dan voor de elektromotoren, zodat een sterke toename in het aantal windturbines niet noodzakelijk hoeft te leiden tot een tekort aan zeldzame aarden.

### Batterijen

**NiMH-batterijen.** Lange tijd waren de *nikkelmetaal-hydridebatterijen* (NiMH-batterijen) de geprefereerde oplaadbare batterijen voor hybride en elektrische wagens. Deze batterijen bevatten zeldzame aarden, en dan vooral legeringen van *lanthaan* (La). Het gebruik van legeringen van zeldzame aarden in oplaadbare is gebaseerd op hun vermogen om waterstof op te slaan.  $\text{LaNi}_5$  is een representatief voorbeeld van een materiaal voor waterstofopslag. Om de prijs te drukken kan het lanthaan worden vervangen door mischmetaal. Mengmetaal (of mischmetaal) is een mengsel van de lichte zeldzame aarden (La, Ce, Pr, Nd) in metaalvorm. De samenstelling van mengmetaal is sterk afhankelijk van het gebruikte erts van de zeldzame aarden en van de verwerking hiervan. In een NiMH-batterij is de negatieve elektrode gemaakt uit een waterstofopslaglegering, ter vervanging van cadmium in de oudere oplaadbare nikkel-cadmium-batterijen. Een NiMH-batterij heeft dezelfde celpotentialaals als de nikkel-cadmium-batterij (1,2 V), maar heeft een aantal voordelen. De capaciteit is anderhalve keer groter dan die van een standaard nikkel-cadmium-batterij, de batterij laadt snel op en kan snel worden ontladen. Ze heeft ook een goede performantie bij lagere temperaturen. Omdat het toxische cadmium afwezig is, is de NiMH-batterij milieuvriendelijker. NiMH-batterijen werken bij een lager voltage dan lithium-ionbatterijen, waardoor er bij gebruik van NiMH-batterijen meer cellen nodig zijn om hetzelfde voltage te verkrijgen.

gen. In vergelijking met lithium-ionbatterijen zijn NiMH-batterijen goedkoper, ondanks het feit dat ze zeldzame aarden bevatten. Ze hebben een lange levensduur. Ze zijn veel veiliger, omdat ze geen brandbare solventen bevatten, waardoor er geen gevaar bestaat dat ze ontbranden als ze oververhit geraken of overladen worden. Hierdoor kan de koeling en elektronische sturing eenvoudiger worden gemaakt. Gedurende een lange periode was de NiMH-batterij de te verkiezen batterij voor hybride en elektrische wagens, maar tegenwoordig worden lithium-ionbatterijen steeds populairder, omdat ze lichter en compacter zijn, waardoor het marktaandeel van de NiMH-batterij snel daalt. Slechts een beperkt aantal wagens maakt nog gebruik van de NiMH-batterij, zoals de Toyota Prius. Zo bevat elke Toyota Prius in zijn batterij 10 tot 15 kilogram zeldzame aarden, vooral lanthaan. De vraag is of de neerwaartse trend van de NiMH-batterijen zich verder zal blijven doorzetten, omdat sommige bedrijven zoals BASF werken aan de verbetering van NiMH-batterijen. Zo kondigden onderzoekers van BASF in 2015 aan dat ze door een aanpassing van de microstructuur van de elektrodematerialen in staat zijn om NiMH-batterijen te maken met een grotere energiedichtheid en een langere levensduur, zodat er minder elektrodemateriaal nodig is om een bepaald vermogen en opslagcapaciteit te bereiken. Ze konden in een laboratoriumomgeving een energiedichtheid van 140 Wh/kilogram bereiken, wat nog beduidend minder is dan de 230 tot 240 Wh/kilogram van sommige lithium-ionbatterijen, maar het verschil wordt kleiner als men ook het gewicht van de sturingselektronica en de veiligheidsvoorzieningen van de lithium-ionbatterijen meerekent.

**Li-ionbatterijen.** In toenemende mate ondervinden de NiMH-batterijen in elektrische mobiliteit de stevige concurrentie van de *lithium-ionbatterijen*. Tegenwoordig verkiezen de meeste autoconstructeurs zoals General Motors, Honda, Nissan, Ford, BMW en Mercedes-Benz Li-ionbatterijen voor hun hybride en elektrische wagens, boven NiMH-batterijen, vooral vanwege de hoge energiedichtheid en compactheid. Alhoewel lithium momenteel nog geen kritiek metaal is, kan deze situatie in de toekomst snel veranderen wanneer Li-ionbatterijen massaal voor elektrische wagens (en ook elektrische fietsen) zullen worden gebruikt. Alle Li-ionbatterijen bestaan uit een anode, typisch koolstof in de vorm van grafiet, en een kathode, gescheiden door een organisch elektrolyt. Niet-actieve componenten worden gevormd door een polymeerseparator, koperen en aluminium stroomcollectoren, evenals de materialen die worden gebruikt in het batterijomhulsel. De geschiktste kathodematerialen voor toepassingen in de elektrische mobiliteit zijn de gelaagde oxiden van de  $\text{LiMO}_2$  materiaal-familie, waarbij  $M$  een combinatie is van kobalt (Co, nu reeds een kritiek

metaal), nikkel (Ni), aluminium (Al) en mangaan (Mn), omdat deze verbindingen de hoogste energiedichtheden leveren. Lithium-nikkel-kobalt-aluminium-oxide (NCA), dat in de vroege jaren negentig van de twintigste eeuw is ontwikkeld, heeft een goede energiedichtheid en een hoge vermogenscapaciteit. Dit is het kathodemateriaal dat in de elektrische wagens van Tesla wordt gebruikt. De meeste andere autoconstructeurs daarentegen maken gebruik van een versie van lithium-nikkel-mangaan-kobalt-oxide (NMC). Een veelgebruikt NMC-materiaal bestaat voor een derde uit Ni, een derde uit Mn en een derde uit Co. Naarmate het nikkelgehalte in de NMC-materialen toeneemt, stijgt ook de energiedichtheid, maar dit gaat ten koste van de stabiliteit van het materiaal. Andere kathodematerialen die voor lithium-ionbatterijen worden gebruikt, zijn  $\text{LiCoO}_2$  (LCO), het fosfaat  $\text{LiFePO}_4$  (LFP) en  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  (LMO). NCA, NMC en LCO hebben samen meer dan 90% marktaandeel in de elektrische mobiliteitssector. LMO wordt steeds minder gebruikt vanwege de problemen met stabiliteit en te lage energiedichtheid. De problemen met LCO zijn de hoge kostprijs (vanwege het hoge kobaltgehalte) en de lage thermische stabiliteit die tot ontbranding van de batterij kan leiden.

### *Zonnecellen*

Een zonnepaneel is in een verzameling van een groot aantal zonnecellen. De belangrijkste technologieën van zonnecellen die momenteel door particulieren en bedrijven worden gebruikt voor de opwekking van elektriciteit via zonne-energie, zijn zonnecellen uit silicium (monokristallijn of polykristallijn silicium) en dunnefilm-zonnecellen. Deze dunne-filmzonnecellen kunnen uit verschillende materialen bestaan: amorf silicium, cadmiumtelluride ( $\text{CdTe}$ ) en koper-indium-gallium-selenide (CIGS). Voordelen van dunnefilm-zonnecellen, die maximaal slechts enkele micrometers dik zijn, is dat ze op een flexibel substraat kunnen worden gefabriceerd en dat ze veel minder materialen verbruiken en goedkoper te produceren zijn. Het nadeel van de dunnefilm-zonnecellen is dat ze een lager rendement hebben dan de zonnecellen uit kristallijn silicium. Zonnecellen uit kristallijn germanium worden vooral gebruikt in satellieten en andere ruimtetuigen, vanwege hun hoog rendement. Ze worden voor conventionele zonnecellen niet gebruikt, omdat ze zeer duur zijn. Germanium wordt wel toegepast in amorfe silicium-germanium-dunnefilm-zonnecellen en in multijunctie-zonnecellen die bestaan uit dunne lagen van germanium, galliumarsenide en gallium-indium-fosfide. Ook zilver is een belangrijk element in zonnecellen, omdat het voor de elektrische connecties wordt gebruikt. Van

de elementen die in zonnecellen worden gebruikt, worden vooral indium, gallium en germanium als kritieke grondstoffen beschouwd. Silicium staat weliswaar op de lijst van de kritieke grondstoffen, maar kritiekheid van dit element is veel lager. Cadmium, telluur, selenium en zilver worden niet tot de kritieke grondstoffen gerekend, alhoewel de meeste van deze elementen wel zeldzaam zijn. Indium, gallium en germanium worden 'zeldzame metalen' genoemd. Dit leidt tot verwarring en tot foute berichtgeving als zouden zonnecellen zeldzame aarden bevatten. In commerciële zonnecellen worden namelijk geen zeldzame aarden toegepast.

## GERAKEN DE GRONDSTOFVOORRADEN BINNENKORT UITGEPUT?

Alhoewel het jaarlijks verbruik van metalen en minerale grondstoffen per hoofd van de bevolking zich in de westerse landen heeft gestabiliseerd, zal de wereldwijde vraag naar grondstoffen blijven stijgen, vooral vanwege de groeiende noden in de ontwikkelingslanden en veranderingen in technologieën. De transitie naar een koolstofarme economie brengt een nieuwe vraag naar grondstoffen mee, vooral dan van de zeldzame aarden, kobalt, indium, gallium en germanium. Daarnaast wordt vaak over het hoofd gezien dat er door de omschakeling naar de elektrische mobiliteit een zeer sterke stijging zal zijn van de vraag naar koper, omdat er in een elektromotor heel wat koper aanwezig is in de vorm van draadwikkelingen. De vraag is waar al deze metalen vandaan moeten komen en of er wel voldoende ertsvoorraden op aarde beschikbaar zijn om aan de stijgende vraag aan grondstoffen te voldoen.

### *Minerale reserves versus minerale rijkdommen*

Sinds de publicatie in 1972 door de Club van Rome van het rapport *De grenzen aan de groei*, heerst er een zeker doemdenken dat de grondstofvoorraden binnen enkele decennia uitgeput zullen raken. Zo werd er voorspeld dat – in een pessimistisch scenario – koper tegen 1993 schaars zou worden; in een optimistisch scenario zou dit pas tegen 2020 zijn. Koper staat echter anno 2017 niet op de lijst van de kritieke grondstoffen van de Europese Commissie, en de geologische dienst van de Verenigde Staten voorspelde in 2013 dat koper pas na 2053 schaars zou worden. Deze grens

schuift steeds verder op. Volgens het rapport van de Club van Rome zouden de voorraden aan zilver en goud al lang uitgeput moeten zijn, maar ook deze metalen staan vandaag niet op de lijst van de kritieke grondstoffen. Alhoewel het rapport van de Club van Rome een zeer positieve invloed heeft gehad op een groeiend milieubewustzijn en de noodzaak om de transitie te maken naar een koolstofarme, circulaire economie, blijken de projecties over de uitputting van de grondstofvoorraden foutief te zijn. Ondanks de steeds toenemende productie en verbruik van metalen heeft de bevoorrading van deze metalen steeds aan de vraag kunnen voldoen en de levensduur van de reserves blijft constant in vergelijking met de waarden van dertig tot veertig jaar geleden. Hoe kan dit worden verklaard? De auteurs van het rapport van de Club van Rome lijken destijds het verschil tussen minerale reserves (*mineral reserves*) en minerale rijkdommen (*mineral resources*) niet goed begrepen te hebben. *Minerale reserves* zijn de hoeveelheden metaal die effectief zijn aangetoond en die vandaag economisch ontginbaar zijn met de bestaande technologieën in de mijnbouw. *Minerale rijkdommen* daarentegen zijn de hoeveelheden metaal die toegankelijk zijn in de bovenste kilometers van de aardkorst. Het gaat hier over zowel de ontdekte afzettingen (al dan niet economisch ontginbaar) als de nog niet ontdekte afzettingen. De minerale rijkdommen zijn uiteraard veel groter dan de minerale reserves, maar de auteurs van het rapport van de Club van Rome hebben gebruikgemaakt van de minerale reserves voor de voorspelling van de nakende tekorten in de bevoorrading van grondstoffen. Het heeft voor een mijnbedrijf weinig zin om geld uit te geven aan het vinden van ertsafzettingen die niet in de relatief nabije toekomst kunnen worden ontgonnen. Als een bedrijf dat actief is in de kopermijnbouw voldoende koper voor de volgende twintig of dertig jaren ter beschikking heeft in ertsafzettingen die zonder problemen kunnen worden ontgonnen met de huidige technologie, heeft het geen zin om geld te investeren in het vinden van nieuwe koperafzettingen. De auteurs van het rapport van de Club van Rome hebben alleen de goedgekende, conventionele afzettingen meegerekend, en niet de armere ertsen in gekende afzettingen, afzettingen die nog niet waren ontdekt of nieuwe typen van afzettingen. Ze hadden ook geen rekening gehouden met de mate waarin technologische ontwikkelingen in staat zijn geweest om de minerale reserves uit te breiden. Door schaalvergroting van de mijnbouw en door verbetering van de ertsverwerkingstechnieken kunnen armere ertsen op een economisch rendabele manier worden ontgonnen. Het resultaat hiervan is dat de voor inflatie gecorrigeerde prijzen voor de meeste metalen over de jaren heen zijn gedaald, parallel met de toename in productie.

Vele deskundigen voorspellen nu dat de voorraden van metalen en andere minerale grondstoffen voldoende zijn om te voldoen aan de economische vraag voor de volgende decennia en zelfs de volgende eeuwen. Zo schat men dat er tot op heden ongeveer 500 miljoen ton aan koper is geproduceerd. Als men dit vergelijkt met de geschatte hoeveelheid koper die in de bovenste 300 meter van de aardkorst aanwezig is, dan vindt men dat slecht  $10^{-5}$  deel van het beschikbare koper is ontgonnen, zodat men kan besluiten dat de kopervoorraden nog lang niet uitgeput zijn. Hierbij moet men toch een aantal kanttekeningen plaatsen. Ten eerste moeten nieuwe ertsafzettingen worden ontdekt en nieuwe mijnen worden geopend vooraleer de metalen die hierin aanwezig zijn, kunnen worden gebruikt. De (soms terechte) weerstand tegen de opstart van nieuwe mijnbouwprojecten (*vide infra*) kan evenwel een belemmering vormen. Bovendien zal heel wat onderzoek vereist zijn om nieuwe milieuvriendelijke methoden te ontwikkelen om nieuwe ertsafzettingen op te sporen en te ontginnen, zeker als deze afzettingen zich diep onder het aardoppervlak of zelfs in de diepzee bevinden. Daarnaast is het totale aantal ertsafzettingen op aarde een eindig getal. Recente schattingen van het aantal conventionele koperafzettingen tonen aan dat deze voldoen voor enkele eeuwen of zelfs voor een paar duizend jaren tegen het huidige kopergebruik. Deze getallen lijken indrukwekkend, maar moeten in het juiste perspectief worden geplaatst. Hoe kunnen we immers weten welke metalen de maatschappij in de tweeëntwintigste eeuw nodig zal hebben? In de voorbije eeuw is het verbruik van metalen sterk gestegen en er worden ook veel meer verschillende metalen toegepast. Zo was er einde negentiende eeuw, begin twintigste eeuw een zeer grote stijging in het koperverbruik door het steeds algemener gebruik van elektriciteit. Door opkomst van de elektrische mobiliteit kunnen we een nieuwe stijging in het koperverbruik verwachten. Aan het begin van de twintigste eeuw vonden elementen, zoals indium, gallium en germanium, geen technologische toepassingen. Neodymium wordt pas sinds 1985 op grote schaal gebruikt, na de marktintroductie van de Nd-Fe-B-magneten.

Alle mijnbouwactiviteiten richten zich op ertsafzettingen die metaalconcentraties bevatten die veel hoger zijn dan de gemiddelde natuurlijke abundantie van deze metalen in de aardkorst. Over de jaren heen ziet men wel dat de gemiddelde concentratie van metalen in ertsen sterk daalt, omdat de rijke en gemakkelijk ontginbare ertsafzettingen stilaan afgebouwd geraken. Hierdoor zullen de conventionele ertsafzettingen in de toekomst schaarser worden en moeten we hopen op verbeteringen in (milieuvriendelijke) mijnbouw- en ertsverwerkingstechnologie, de ontginning van nieuwe typen van ertsafzettingen en – even belangrijk in de context van de transitie



van een lineaire naar een circulaire economie – efficiëntere recyclageprocessen om te voldoen aan de vereisten van de toekomstige generaties.

### *Recyclage van metalen*

Recyclage van metalen zorgt voor een efficiënter gebruik van de natuurlijke grondstoffen, omdat metalen die door recyclage worden verkregen niet door mijnbouw moeten worden ontgonnen. Hierdoor raken de gekende reserves minder snel uitgeput. Het produceren van metalen uit gerecycleerde oude metalen vereist, door de band genomen, veel minder energie dan het produceren van dezelfde metalen uit primaire ertsen. Dit heeft vooral te maken met het feit dat vele metalen, en zeker de edelmetalen, in lage tot zeer lage concentraties in ertsen voorkomen, waardoor veel energie nodig is om grote volumes aan ertsen fijn te maken om de metalen te kunnen extraheren. Voor koper is deze energiewinst in de orde grootte van 50%, maar voor edelmetalen is deze energiewinst meer dan 95%. Het recycleren van zeldzame aarden biedt bijkomende voordelen. Men heeft geen problemen met radioactiviteit, terwijl veel ertsen van zeldzame aarden vanwege hun thoriumgehalte wel licht radioactief zijn. Recycleren van Nd-Fe-B-magneten is heel nuttig om de markt van zeldzame aarden in evenwicht te houden: neodymium dat uit oude magneten kan worden gerecycleerd, hoeft niet uit primaire ertsen onttrokken te worden, met minder overproductie van elementen zoals lanthaan en cerium als gevolg.

Basismetalen zoals ijzer, aluminium, koper, zink, lood, evenals de edelmetalen (goud, zilver, platinagroepmetalen) worden vandaag veel meer gerecycleerd dan vele van de kritieke metalen. Dit heeft enerzijds te maken met de hoge financiële waarde van de edelmetalen, waardoor recycleren economisch voordelig is. Anderzijds komen de basismetalen in veel grotere volumes voor en zijn zij gemakkelijker in te zamelen. Vele van de kritieke metalen zijn in kleine hoeveelheden aanwezig in elektronisch afval, maar in tegenstelling tot de edelmetalen, is hun kiloprijs te laag om recyclage economisch rendabel te maken. Bovendien zijn de processen die ontwikkeld zijn om edelmetalen te herwinnen uit elektronisch afval, ongeschikt om de zeldzame aarden te recycleren, vanwege de sterk verschillende chemische eigenschappen van zeldzame aarden in vergelijking met de edelmetalen. Alhoewel recyclage zeer vele voordelen biedt, kan recyclage de primaire mijnbouw nooit helemaal vervangen, zeker niet voor die metalen die pas sinds kort massaal worden gebruikt in nieuwe (cleantech-)toepassingen (zoals bijvoorbeeld neodymium). Recyclageprocessen zijn nooit voor 100% efficiënt; een deel van het metaal gaat steeds verloren (alhoewel

voor veel metalen de efficiënte heel hoog kan zijn). Efficiënte recyclage houdt in dat het selectief inzamelen van de *end-of-life* producten (zoals de batterijen en elektrische motoren van elektrische fietsen) ook efficiënt verloopt, maar al te vaak is dit (nog) niet het geval.

### *Het voorbeeld van neodymium*

In tegenstelling tot wat berichten in de media doen geloven, is er helemaal geen gebrek aan zeldzame aarden, en zeker niet aan het meest kritieke van allemaal, neodymium. De gekende reserves bedragen ongeveer 120 miljoen ton, waarvan 40 miljoen ton voor de Bayan Obo-mijn in Binnen-Mongolië in China, de grootste mijn van zeldzame aarden ter wereld. Deze reserves zijn voldoende om voor de rest van de eenentwintigste eeuw te voldoen aan de vraag aan zeldzame aarden, zelfs al zou de vraag nog sterk stijgen. In Groenland zijn er nog gigantische afzettingen van zeldzame aarden bekend, zoals de afzettingen van Kringlerne en Kvanefield, die nog gedurende eeuwen zeldzame aarden zouden kunnen produceren. Bij de bespreking van de zeldzame aarden is het Balansprobleem genoemd. Er zijn weliswaar ruim voldoende ontginbare ertsen van zeldzame aarden, maar slechts een gedeelte van het gehalte aan zeldzame aarden in het erts bestaat uit neodymium. In de toekomst zal er meer en meer vraag zijn naar neodymium, terwijl de vraag naar de andere zeldzame aarden veel kleiner is. Het is veel efficiënter om het gebruik van praseodymium in andere low-tech-toepassingen (zoals gele pigmenten en groen glas) te verminderen, zodat dit praseodymium ter beschikking komt voor productie van magneten. Een mengsel van praseodymium en neodymium (i.e. didymium) kan dan voor de productie van permanente magneten worden gebruikt, zonder dat de zeer moeilijke scheiding praseodymium/neodymium moet worden uitgevoerd. Dit reduceert sterk het verbruik van chemicaliën bij dit scheidingsproces en bespaart heel wat energie.

### *Over gastheermetalen en begeleidende metalen*

Vele kritieke metalen, zoals gallium, indium en germanium, worden in tegenstelling tot de basismetalen typisch in ertsen aangetroffen in concentraties die lager zijn dan 0,1%. Deze elementen vormen zelden of nooit eigen ertsafzettingen en komen in de plaats als onzuiverheid voor in de ertsen van basismetalen met gelijkaardige chemische eigenschappen. Deze kritieke metalen worden bijgevolg meestal alleen verkregen als nevenproduct

tijdens de verwerking van de basismetalen, die als hun gastheer optreden (Tabel 2). Zo is gallium een nevenproduct van de verwerking van aluminium- en zinkertsen, terwijl indium en germanium vooral worden verkregen uit zinkertsen. De beschikbaarheid van deze nevenproductmetalen (of ‘begeleidende metalen’) is niet enkel afhankelijk van de mijnproductie van hun gastheermetalen, maar ook van het feit of deze begeleidende metalen al dan niet worden gerecupeerd. Vaak zijn de kosten voor de zuivering van de kritieke metalen hoog in vergelijking met hun economische waarde en is het de facto goedkoper om deze metalen met de industriële procesresidu’s naar stortplaatsen af te voeren. Op deze manier worden spijtig genoeg heel wat kritieke metalen verspild. Dit geeft aanleiding tot bezorgdheid over de beschikbaarheid van kritieke metalen die enkel enkel als nevenproduct worden ontgonnen (bijvoorbeeld indium) en waarvan het verbruik sterk stijgt vanwege hun toepassing in cleantech-applicaties.

TABEL 2: Metalen die worden verkregen als nevenproducten van de productie van de belangrijkste basismetalen.\*

koper	zink	nikkel	platina	aluminium	ijzer	lood
<i>kobalt</i>	indium	<i>kobalt</i>	palladium	gallium	<i>REE</i>	<i>antimoon</i>
<i>molybdeen</i>	germanium	<i>PGM</i>	rhodium		<i>niobium</i>	bismut
<i>PGM</i>	cadmium	scandium	iridium		vanadium	thallium
renium	<i>zilver</i>		ruthenium			<i>zilver</i>
telluur	gallium		osmium			
seleen						
arseen						
<i>antimoon</i>						
<i>zilver</i>						
<i>goud</i>						
indium						

\* De metalen die in het cursief staan kunnen ook geproduceerd worden uit hun eigen ertsen. PGM = platinagroep-elementen, REE = zeldzame aarden.

Wanneer een metaal grotendeels of volledig wordt verkregen als bijproduct van een basismetaal, dan is het vaak moeilijk om de productie snel op te drijven om te voldoen aan een snelle toename in vraag, waardoor de prijzen sterk kunnen fluctueren. De reden is dat de productie van deze metalen sterk wordt beïnvloed door de productie van de gastheermetalen. Zo is de prijs van ruthenium zeer sterk afhankelijk van de productie van

zijn gastheermetaal platina. Als de vraag naar ruthenium meer stijgt dan de vraag naar platina, dan schiet de prijs van ruthenium de hoogte in. Dit is een cyclisch proces. Toxiciteit kan ook de beschikbaarheid van een begeleidend metaal beïnvloeden. Het beste voorbeeld hiervan is lood. Lange tijd werd zeer veel lood gebruikt in loodaccu's. Lood wordt echter meer en meer vervangen door andere batterijtypen, naarmate hybride en elektrische wagens aan populariteit winnen. Minder loodmijnbouw heeft echter een invloed op de beschikbaarheid van antimoon en bismut, waarvoor lood een belangrijk gastheermetaal is. Een gelijkaardige situatie doet zich voor met thallium, dat een giftig begeleidend metaal van zink is. Vanwege de strenge regelgeving rond de verwerking van toxische metalen kan een zinkverwerkend bedrijf ervoor kiezen om niet te investeren in de recuperatie van thallium, waardoor de beschikbaarheid van thallium in gevaar kan komen. De situatie is verschillend voor cadmium, waarvan de meeste toepassingen worden afgebouwd vanwege de toxiciteit van dit metaal. Cadmium is een begeleidend metaal van zink. De vraag naar zink en cadmium zal uit ertsen beschikbaar worden onafhankelijk van de vraag. Het gevolg is dat er grote overschotten aan cadmium beschikbaar worden die moeten worden opgeslagen en regelmatig gecontroleerd. Een gelijkaardige situatie doet zich voor met thorium, dat een begeleidend element van de zeldzame aarden is.

Recyclage van basismetalen heeft een negatief effect op de beschikbaarheid van de begeleidende metalen. Begeleidende metalen komen alleen ter beschikking bij de verwerking van primaire ertsen. Als bijvoorbeeld koper wordt gerecycleerd, dan is dit meestal zuiver koper waarin geen nevenproductmetalen meer aanwezig zijn. Daarom is het van groot belang dat men moeite doet om niet alleen de basismetalen te recyclen, maar eveneens de kritieke metalen. De meest veelbelovende manier om de beschikbaarheid van de begeleidende metalen te behouden is om de recuperatie van de begeleidende metalen van de gastheermetalen te verbeteren. Voor sommige metalen zijn de huidige processen slechts in staat om 10% van de begeleidende metalen te recupereren. Hier is bijgevolg nog veel ruimte voor technische verbeteringen. Dit vereist echter investeringen die vaak onvoldoende snel kunnen worden terugverdiend.

Zonder twijfel hebben de beschikbaarheid van metalen, zoals indium en gallium, die alleen ontgonnen kunnen worden als nevenproduct bij de ontginning van basismetalen, geleid tot materialen met een superieure performantie in vergelijking met materialen waarin deze metalen ontbreken. Ingenieurs materiaalkunde of chemici die deze materialen ontwerpen voor gebruik in allerlei cleantech- of elektronicatoeepassingen, staan echter onvoldoende stil bij de beschikbaarheid van deze metalen. Als vele van deze toepassingen een zeer groot marktaandeel verwerven, kan de pro-

ductie van deze metalen niet voldoen aan de vraag of er treden andere onverwachte effecten op. Een treffend voorbeeld hiervan is de markt van dunnefilm-zonnepanelen, waarbij men de begeleidende metalen (en half-metalen) indium, germanium, cadmium, telluur, seleen en arseen nodig heeft, die koper of zink als gastheermetalen hebben. Een grotere vraag naar indium, germanium en telluur kan leiden tot het ontginnen van meer koper en zink dan nodig is. Meer mijnbouw van zink en koper leidt tot extractie van grotere hoeveelheden van de toxische metalen cadmium en arseen dan men nodig heeft. Het overaanbod aan koper en zink kan leiden tot een prijsdaling, waardoor het recycleren van deze metalen wordt ontmoedigd. Een raadgeving is dat men zeker niet doelgericht moet zoeken naar nieuwe toepassingen van de nevenproductmetalen, waarvan de beschikbaarheid onzeker is. Vaak is het veel beter om te kiezen voor materialen die een iets lagere performantie hebben, maar die alleen opgebouwd zijn uit metalen die veel voorkomen en gemakkelijk beschikbaar zijn.

## INDUSTRIËLE PROCESRESIDU'S ALS BRON VAN KRITIEKE METALEN?

Hierboven bespraken we reeds dat recyclage van *end-of-life* producten zoals afgedankte elektrische fietsen een parallelle stroom aan kritieke metalen kan opleveren, naast de primaire ontginning (mijnbouw) van die metalen. Een derde, maar minder bekende potentiële bron van kritieke metalen betreft de recuperatie (*recovery*) van deze metalen uit industriële procesresidu's die – in tegenstelling tot gemakkelijk toegankelijke, rijke (primaire) ertsafzettingen van waardevolle metalen – in Europa wél overvloedig aanwezig zijn. Het betreft zowel residu's die vandaag (*flows*) in Europa worden geproduceerd als de residu's die de afgelopen honderd tot honderdvijftig jaar (*stocks*) gestort werden in stortplaatsen (*landfills*) of bezinkingsbekkens (*tailing ponds*). In termen van beschikbaarheid, volumes en metaalconcentraties zijn de interessantste industriële procesresidu's: (1) bauxietresidue van de aluminiumindustrie; (2) fosfogips van de fosfaatverwerkende industrie; (3) ijzerrijk slib van de zinkindustrie; (4) metallurgische slakken; (5) bodemassen en vliegassen van verbrandingsinstallaties. Hiervan zullen de eerste drie afvalstromen kort worden besproken. In Tekstblok 1 geven we aan hoe het concept *Enhanced Landfill Mining* (ELFM) kan bijdragen tot de recuperatie van grondstoffen, inclusief kritieke metalen, uit de meer dan 500.000 stortplaatsen in Europa.

### ***Enhanced Landfill Mining: een nieuwe visie op stortplaatsen***

Een probleem is dat de huidige EU-richtlijn betreffende het storten van afvalstoffen (1999/31/EG) stortplaatsen nog steeds beschouwt als statische 'eindstations' van gestorte afvalstoffen. In deze lineaire economische visie worden stortplaatsen gezien als een potentiële bron van verontreiniging die moet worden ingekapseld en gecontroleerd, teneinde milieu- en gezondheidsschade te voorkomen. Het feit dat de Europese stortplaatsen enorme hoeveelheden onbenutte grondstoffen bevatten, wordt evenwel op die manier genegeerd. Het is duidelijk dat we dringend een meer dynamische visie nodig hebben, een visie die stortplaatsen integreert in de bredere context van de transitie naar een circulaire economie. Deze visie, die inmiddels mee uitgedragen wordt door het *European Enhanced Landfill Mining Consortium* (EURELCO), houdt in dat we stortplaatsen, zowel de huishoudelijke stortplaatsen als de industriële varianten, beschouwen als 'dynamische reservoirs van grondstoffen die opnieuw geïnjecteerd kunnen worden in de circulaire economie'. Volgens de algemene definitie zorgt *Enhanced Landfill Mining* (ELFM) voor de geïntegreerde valorisatie van stortplaatsen waarbij materialen en/of energie alsook landoppervlakte gerecycleerd en gerecupereerd worden, met behulp van schone technologieën én met aandacht voor de lokale omwonenden. ELFM van industriële stortplaatsen refereert dan aan de (bijna)-afvalloze valorisatie van de gestorte industriële procesresidus, resulterend in zowel de recuperatie van de kritieke metalen en basismetalen als de valorisatie van de residuele minerale matrices in groene bouwtoepassingen.

Ondanks de vele potentiële voordelen van ELFM stellen we vast dat de reële commercialisatie van ELFM in Vlaanderen en Europa maar traag op gang komt. Hier is een aantal redenen voor. Juridische onduidelijkheid is één cruciaal aspect. Vandaag de dag is er nog geen expliciet regelgevingskader voor ELFM in de EU-wetgeving (ook al loopt er momenteel een herziening van de EU-Richtlijn betreffende het storten van afvalstoffen (1999/31/EG)). Dit stelt zowel publieke als private actoren die ELFM-projecten willen uitvoeren, voor vele uitdagingen en onzekerheden. Zo is er de onzekerheid met betrekking tot de stortbelasting voor (niet-valoriseerbare) restfracties die na voltooiing van ELFM opnieuw moeten worden gestort, of de onzekerheid over het vinden van een potentiële afzetmarkt voor de producten en de recyclaten die dankzij ELFM geproduceerd kunnen worden. Daarnaast stelt men ook vast dat in dichtbevolkte gebieden als Vlaanderen lokaal protest en juridische procedureslagen ELFM-projecten vertragen (cf. Closing the Circle ELFM-project in Houthalen-Helchteren, waar het bedrijf Group Machiels de Remo-stortplaats wil ontginnen en omvormen tot nieuw natuurgebied) of finaal zelfs blokkeren, zoals dat ook vaak het geval is voor windturbines of primaire mijnbouwprojecten (*vide infra*).

### *Bauxietresidu*

*Bauxiet* is het belangrijkste aluminiumerts. Het is een mengsel van onzuivere gehydrateerde aluminiumoxiden en bevat naast 30% en 50% alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ook silica, verschillende ijzeroxiden, titaniumdioxide, calcium, natrium en kleine hoeveelheden van zink, gallium, nikkel, vanadium, zirconium, niobium, thorium, uranium en zeldzame aarden. De alumina moet eerst worden gezuiverd voor het in aluminiummetaal kan worden omgezet. Dit gebeurt in het *Bayer-proces*, waarbij bauxiet bij hoge temperatuur en druk met een geconcentreerde natriumhydroxide-oplossing wordt behandeld. Hierbij reageert alumina tot aluminiumhydroxide, dat oplost in de natriumhydroxide-oplossing. De andere componenten in de bauxiet lossen niet op. De vaste onzuiverheden worden afgefilterd. Deze vaste onzuiverheden worden '*bauxietresidu*' genoemd (of '*rode modder*' als het nog in slurrievorm is). De samenstelling van bauxietresidu is afhankelijk van het bauxiettype en van de procesparameters van het Bayer-proces. Met een jaarlijkse, wereldwijde productie van 120 miljoen ton en een totale voorraad van 2,7 miljard ton, die worden opgeslagen in enorme bezinkingsbekkens, vormt bauxietresidu een aanzienlijk en gevaarlijk probleem. Dat bauxietresidu voor problemen zorgt, werd duidelijk bij de dambreuk van het bezinkingsbekken van de aluminafabriek van Ajka in Hongarije in 2010, waarbij verscheidene mensenlevens verloren gingen en een milieucatastrofe werd veroorzaakt. In Europa zijn er naast Hongarije aluminafabrieken in Bosnië-Herzegovina, Duitsland, Frankrijk, Griekenland, Ierland, Italië, Roemenië, Slovakije en Spanje. Bauxietresidu wordt nog niet in industriële toepassingen gebruikt, behalve een beperkt gebruik in cement en voor productie van keramische materialen. Bauxietresidu heeft een hoog metaalgehalte, en de extractie van metalen uit bauxietresidu kan eventueel economisch haalbaar zijn.

Ijzer is het belangrijkste bestanddeel van bauxietresidu en het kan tot 60% van de massa van het bauxietresidu vormen. Vanwege het hoge ijzergehalte heeft men vele pogingen ondernomen om bauxietresidu als een secundair ijzererts te gebruiken. Tot op heden is de winning van ijzer uit bauxietresidu nog geen commercieel succes geweest, door specifieke technische problemen. Bauxietresidu kan vanwege zijn hoge gehalte aan natrium niet in een hoogoven worden verwerkt, omdat het de vuurvaste bekleding aantast. Naast de winning van ijzer uit bauxietresidu, hebben onderzoekers geprobeerd om andere elementen, zoals aluminium, titanium en vooral de zeldzame aarden, te recupereren. Tijdens de verwerking van bauxiet in het Bayer-proces, accumuleren alle zeldzame aarden zich in het bauxietresidu. Bauxietresidu uit Griekenland bevat ongeveer 1000

gram/ton aan zeldzame aarden, waarvan 130 gram/ton scandium. Dit is veel hoger dan de gemiddelde scandiumconcentratie in de aardkorst. Er bestaan scandiummineralen (e.g. thortveitiet en kolbeckiet), maar hiervan komen geen grote afzettingen voor. Vanwege de beperkte beschikbaarheid vindt scandium weinig toepassingen, alhoewel het veelbelovend is voor gebruik in brandstofcellen. De winning van scandium uit bauxietresidu kan van economisch belang zijn. Het scandiumgehalte in bauxietresidu vertegenwoordigt maar liefst 95% van de economische waarde van de zeldzame aarden in dit materiaal.

### *Fosfogips*

*Fosfogips* is het belangrijkste afvalproduct van de productie van fosforzuur ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) en het wordt gevormd door behandeling van *fosfaatgesteente* met zwavelzuur ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). De belangrijkste mineralogische component van fosfaatgesteente (ook fosforiet genoemd) is apatiet,  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$ . De hoeveelheid fosfogips die gevormd wordt tijdens de productie van fosforzuur is zeer groot: 4,5 tot 5,5 ton fosfogips per ton  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Het fosfogips wordt gestort of in afvalbergen opgestapeld. Het fosfogips in de storthopen bestaat grotendeels uit calciumsulfaatdihydraat,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (gips). Het bevat ook spoorhoeveelheden van andere elementen, waaronder de zeldzame aarden, die oorspronkelijk in het fosfaatgesteente aanwezig waren. Ongeveer 80% hiervan bestaat uit de elementen lanthaan, cerium en neodymium. De zeldzame aarden worden geconcentreerd in fosfogips tijdens de productie van fosforzuur. De gemiddelde concentratie van zeldzame aarden in fosfogips is 0,4 gewichtsprocent. Dit lijkt een laag getal te zijn, maar gelet op de grote schaal waarop fosfogips wordt geproduceerd, zitten er grote hoeveelheden aan zeldzame aarden in fosfogips opgesloten. Een probleem dat zich echter met fosfogips voordoet, is dat het licht radioactief is door een laag gehalte aan radium in het materiaal. Hierbij moet rekening worden gehouden tijdens de eventuele verwerking van fosfogips.

### *Ijzerrijk slib van de zinkindustrie*

Grote volumes aan ijzerrijk slib worden geproduceerd door het roost-uitloog-elektrowinningsproces van de zinkindustrie, waarbij ijzer dat samen met het zink door zuur in oplossing wordt gebracht, terug uit de oplossing wordt neergeslagen. Er bestaan twee concurrerende processen voor het verwijderen van zink uit oplossing: het '*jarosietproces*' en het '*goethiet-*



*proces*, die beide een ijzerrijk slib vormen, maar met een verschillende chemische samenstelling: basisch ijzer(III)sulfaat,  $M(\text{SO}_4)_2\text{Fe}_3(\text{OH})_6$  ( $M = \text{Na}, \text{NH}_4$ ) in het jarosietproces en goethiet ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ) in het goethietproces. Het goethietproces is ontwikkeld in België door de Société de la Vieille Montagne (Union Minière, nu Nyrstar). In Europa zijn er in de buurt van zinkfabrieken grote goethietstorten te vinden in België, Frankrijk, Nederland, Finland, Duitsland, Spanje, Italië en Bulgarije. Ongeveer 10.000 kiloton aan goethiet is te vinden in deze stortplaatsen, terwijl de zinkindustrie jaarlijks ongeveer 500 kiloton vers goethiet produceert. Deze jarosiet en goethiet bevatten aanzienlijke hoeveelheden kritieke metalen, vooral indium, germanium, gallium en antimoon. Goethiet in de stortplaatsen bijvoorbeeld bevat tot 500 gram/ton aan indium en 180 gram/ton aan antimoon. Umicore heeft een pyrometallurgisch proces ontwikkeld om de indium en germanium uit goethiet te recupereren door het materiaal in een oven op te smelten, waarna er met behulp van een plasmatoorts ondergedompeld in het gesmolten materiaal een oxiderend gasmengsel wordt gecreëerd en een vast reducerende stof (bijvoorbeeld cokes) aan de smelt wordt toegevoegd. Indium en germanium worden samen met zink verdampt en in de vliegassen verzameld. Het vaste ijzerrijke residu kan dan verder worden verwerkt, bijvoorbeeld als bouwmetaal.

### *Concept van afvalloze valorisatie*

De term ‘valorisatie’ wordt hier gebruikt om te verwijzen naar een economisch rendabel gebruik van een materiaalstroom die tot dan toe werd beschouwd als een waardeloze afvalstroom. Wanneer men de valorisatie van afvalstromen die kritieke metalen bevatten beschouwt, dan kan men voor de ‘metaalcentrische’ benadering kiezen waarbij enkel de kritieke metalen uit de afvalstroom worden geëxtraheerd. Aangezien deze metalen slechts een kleine fractie (vaak minder dan 1 gewichtsprocent) van deze afvalstroom vormen, is een metaalcentrische verwerkingsmethode een suboptimale oplossing, omdat het grootste gedeelte van de afvalstroom blijft bestaan, die teruggestort of opgeslagen moet worden. Een afvalloze valorisatie van gestorte industriële procesresidu's en afvalstromen van deze materialen houdt in dat een metaalcentrische benadering wordt vervangen door een productcentrische benadering, waarbij (bijna) alle componenten in het residu worden gevaloriseerd. Voor elke afvalstroom moet een specifiek proces worden ontwikkeld om zowel de kritieke metalen als de basismetalen te recupereren, terwijl er gelijktijdig een oplossing gevonden moet worden voor de vaste matrix die overblijft na extractie van de meta-

len. Bijvoorbeeld, een afvalloze benadering toegepast op bauxietresidu betekent dat alle waardevolle metalen (zeldzame aarden, ijzer, titanium) moeten worden gerecupereerd, waarna de overblijvende minerale matrix verwerkt kan worden in bouwmaterialen. Een nog betere benadering is ervoor te zorgen dat de waardevolle metalen aan de industriële procesresidu's kunnen worden onttrokken tijdens het productieproces, dus nog voor het materiaal wordt gestort. In dit ideale scenario kan zelfs worden vermeden dat er nog stortplaatsen met dit soort van vast afval worden gevormd.

## ■ SOCIALE DIMENSIE VAN MIJNBOUW EN NIMBY

Vreemd genoeg is de grootste bedreiging voor voldoende bevoorrading aan kritieke metalen voor cleantech-toepassingen niet de uitputting van de natuurlijke rijkdommen van de aarde, maar wel de moeilijkheden om nieuwe mijnen te openen. Lange tijd hebben we ons geen zorgen gemaakt over waar de metalen die we voor onze economie nodig hebben, vandaan komen. Vele kritieke metalen komen uit conflictgebieden zoals DR Congo, waar de opbrengst van de mijnbouw wordt gebruikt voor het onderhouden van rebellenlegers en milities. Andere mijnbouw vindt plaats in ecologisch kwetsbare gebieden, zoals in het Amazonegebied of gebieden boven de poolcirkel. Regelmatig komen berichten in de media van milieurampen, veroorzaakt door lozing van cyaniden van goudmijnbouw in rivieren, met massale vissterfte tot gevolg. Ook de ontginning van zeldzame aarden in China is erg milieubelastend, al zijn er de laatste jaren wel maatregelen in de goede richting genomen. De streek rond Baotou in China, waar zich de meeste fabrieken voor extractie en zuivering van zeldzame aarden bevinden, zijn sterk vervuild door de vele chemicaliën die voor het extractieproces worden gebruikt, maar ook door het radioactieve, thoriumhoudend afval in de bezinkingsbekkens van de industriële procesresidu's.

De Europese mijnindustrie is aan een heropleving bezig. Tot in het begin van de twintigste eeuw werden de meesten ertsen in Europa ontgonnen, meestal door kleinere mijnbouwbedrijven. Daarna heeft de mijnbouw zich over de hele wereld verspreid, naar landen zoals Canada en Australië, maar ook naar landen die minder politiek stabiel zijn. Veel mijnbedrijven willen in Europa investeren om nieuwe mijnen te openen, aangetrokken door de goede infrastructuur, de goedgeschoolde werkkrachten, en de meestal stabiele regeringen. Vooral in Spanje en Portugal zijn er plannen om nieuwe

mijnen te openen of oude mijnen te heropenen, maar eveneens in landen zoals Slovaakije, Roemenië, Finland en Frankrijk.

Een goed voorbeeld van hoe publiek protest vanwege lokale gemeenschappen zelfs de meest veelbelovende mijnbouwprojecten kan fnuiken, is het Norra Kärr-project van het mijnbouwbedrijf Tasman Metals in het zuiden van Zweden, nabij het stadje Jönköping. Dit is een kleine, maar rijke afzetting van het mineraal eudialiet, dat naast metalen als zirconium en niobium ook zeldzame aarden bevat. Wat Norra Kärr bijzonder maakt, is dat het erts zeer rijk is aan de gegeerde zware zeldzame aardmetalen (HREEs). Dit is een van de grootste en rijkste afzettingen van HREEs buiten China, de enige van zijn soort in Europa. De Norra Kärr-afzetting zou in staat zijn om te voldoen aan de noden van Europa voor de meeste zeldzame aarden voor meer dan vijftig jaar. Tasman Metals heeft meer dan 15 miljoen euro geïnvesteerd in de exploratie van de afzetting. Een groot voordeel van Norra Kärr is dat het slechts enkele honderden meters van de E4 autosnelweg is gelegen, zodat er weinig of geen logistieke problemen zijn om een mijn op te starten. Mijnbouw zou eenvoudig kunnen gebeuren door het mechanisch afgraven van het ertslichaam in een openlucht-mijn, de goedkoopste vorm van mijnbouw. Er werd echter door de lokale actievoerders een petitie gestart tegen het Norra Kärr-project, met slogans dat mijnbouw op zeldzame aarden de meest toxische en meest gevaarlijke vorm van mijnbouw is, dat een spoor van vernieling zal achterlaten niet alleen in de lokale gemeenschap, maar ook in de natuur. Het grondwater zou vergiftigd worden. In totaal werd de petitie getekend door 45.000 personen en overhandigd aan de Zweedse minister-president en aan de minister van milieu. In 2016 werd de mijnbouwlicentie van Tasman Metals voor het Norra Kärr-project door de Zweedse staat ingetrokken. Dit voorbeeld illustreert een zekere hypocrisie in het Westen. Enerzijds willen we allemaal genieten van schone technologieën zoals windturbines en elektrische fietsen en wagens; anderzijds willen we niet dat de (kritieke) metalen die hiervoor nodig zijn, ontgonnen worden in Europa. Het de facto gevolg is dat die metalen elders ter wereld worden ontgonnen met technologieën die vaak een negatieve milieu- en gezondheidsimpact hebben voor *andere* lokale gemeenschappen.

Dichter bij ons hebben we de protesten tegen de plannen van de Waalse firma Walzinc om boringen naar rijke zink- en loodertsen uit te voeren in het oosten van België, in de gemeenten Plombières (Bleyberg) en La Calamine (Kelmis). Dit gebied heeft een rijke mijngeschiedenis. Reeds vanaf de Romeinse tijd werd er op de Altenberg ('Vieille Montagne') in La Calamine het zinkerts 'galmei' afgebouwd: Galmei is een mijnwerkersterm voor niet-sulfidisch zinkerts. Oorspronkelijk werd dit zinkerts uitsluitend gebruikt

voor de productie van messing, en later ook voor de productie van zinkmetaal. Op de Altenberg werd zinkerts ontgonnen tot 1884, toen de mijn uitgeput was. Mijnbouw ging daarna nog verder in de buurt, in Plombières tot 1922 en in de mijn Schmalgraf tot 1933. Dit gebied in de buurt van Aken was lange tijd de grootste zinkproducent ter wereld. Het belang van de zinkmijnbouw wordt geïllustreerd door het bestaan van het dwergstaatje Neutraal Moresnet tussen 1816 en 1920 in het gebied van de zinkmijnen. Na de sluiting van de mijnen zijn de oude mijnsites gerecultiveerd en zijn er nog maar weinig relictten die herinneren aan het mijnverleden. Er zijn echter nog aanzienlijke ertsvoorraden in de ondergrond, die niet alleen zink en lood, maar ook kritieke metalen, zoals indium, gallium en germanium, kunnen leveren. In eerste instantie hebben de plannen betrekking op exploratieactiviteiten om de grootte en het metaalgehalte van ertslichamen in kaart te brengen. Later is een ondergronds mijnbouwproject gepland, waarbij het erts bij Stolberg in de buurt van Aachen verder zou worden verwerkt. Zodra de plannen van het onderzoek bekend werden, werd door inwoners van de gemeenten in dit gebied een petitie gestart om dit onderzoek te hinderen, uit bezorgdheid over milieueffecten en hinder.

Deze twee voorbeelden tonen aan dat de toekomst van de primaire mijnbouw in Europa heel sterk afhankelijk is van het verkrijgen en behouden van een *Social License to Operate*. Het is daarom van cruciaal belang om niet alleen de lokale gemeenschappen, maar ook alle andere stakeholders bij de start van elk mijnbouwproject te betrekken in een open en transparante dialoog. Mijnbouwbedrijven zullen moeten kunnen aantonen dat hun mijnbouwprojecten gebruik zullen maken van milieuvriendelijke mijnbouw- en ertsverwerkingstechnieken. Tegelijkertijd zullen zij duidelijk moeten maken wat de voordelen zijn van deze mijnbouwprojecten voor de lokale gemeenschappen die in de buurt van zulke mijnen wonen. In dichtbewoonde gebieden, waar de civiele samenleving vaak sterk is georganiseerd, is het essentieel om tot een win-winsituatie te komen. Dit is de enige mogelijkheid om het zo gekende NIMBY-syndroom (NIMBY = *not in my back yard*, in Vlaanderen ook wel genoemd NIVEA = 'niet in voor- en achtertuin') te overstijgen. Positief is dat heel wat nieuwe, grootschalige onderzoeksprojecten over de winning van kritieke metalen, zoals NEMO en CROCODILE (beide gefinancierd door het Horizon 2020 onderzoeksprogramma van de Europese Commissie), dit *Social License to Operate*-aspect integraal hebben opgenomen.

## BESLUIT

Voor de transitie naar een koolstofarme economie zijn er heel wat minerale grondstoffen nodig. Het gaat hier vaak om niet-conventionele elementen, zoals de zeldzame aarden, indium, gallium, germanium en kobalt. Vele van deze elementen worden door de Europese Commissie als kritiek beschouwd, omdat ze onderhevig zijn aan bevoorradingsrisico's. We toonden aan dat het kritieke gehalte van grondstoffen weinig te maken heeft met de zeldzaamheid van deze grondstoffen in de aardkorst, maar alles met geopolitieke factoren. We hoeven geen vrees te hebben dat onze grondstofvoorraden snel uitgeput zullen raken, al moeten we natuurlijk wel goed beseffen dat minerale grondstoffen niet-hernieuwbare grondstoffen zijn, waarmee zuinig moet worden omgesprongen. De transitie naar een koolstofarme economie moet dan ook hand in hand gaan met de transitie naar een circulaire economie, waar maximaal wordt ingezet op recuperatie en recyclage. Voor kritieke metalen die nu pas in grote volumes nodig zijn in nieuwe toepassingen, vormt recyclage geen panacee, omdat er nog te weinig van die metalen in omloop zijn en in de nabije toekomst in aanmerking komen voor recyclage. In dat geval is er nog steeds behoefte aan de primaire ontginning van die metalen. Het grote gevaar voor de voldoende bevoorrading van kritieke metalen is echter dat het zeer moeilijk is om nieuwe mijnen te openen, zeker in Europa. Het is een paradox dat juist degenen die erg milieubewust zijn en streven naar een snelle transitie naar een koolstofarme economie door hun protesten tegen de opening van nieuwe mijnen de bevoorrading van de grondstoffen die nodig zijn voor deze transitie net in gevaar kunnen brengen. Een open, transparante dialoog over deze paradox dringt zich op, zodat de transitie naar een klimaatvriendelijke economie, en de cruciale rol hierin van de toevoer van kritieke metalen, bespoedigd wordt.

## LITERATUUR

- N. Arndt, S. Kesler & C. Ganino, *Metals and Society: An Introduction to Economic Geology* (2nd edition), Springer Verlag, Cham, 2015. ISBN 978-3-319-17231-6
- K. Binnemans, 'Rare earths: essential elements for the transition to a low-carbon economy', *Proceedings of the Bauxite Residue Valorisation and Best Practices Conference 2015*, Leuven (Belgium), 5-7 October 2015, 291-299. <https://lirias.kuleuven.be/handle/123456789/516225>
- K. Binnemans & P.T. Jones, 'Rare Earths and the Balance Problem', *Journal of Sustainable Metallurgy* 1, 2015, 29-38. DOI: 10.1007/s40831-014-0005-1

- K. Binnemans, P.T. Jones, T. Müller, L. Yurramendi, Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets?, *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2018, <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0162-8>
- K. Binnemans, P.T. Jones, B. Blanpain, T. Van Gerven & Y. Pontikes, 'Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: a critical review', *Journal of Cleaner Production* **99**, 2015, 17-38. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.089
- D.I. Bleiwas, 'Byproduct mineral commodities used for the production of photovoltaic cells', U.S. Geological Survey Circular 1365, 10 p., 2010, <http://pubs.usgs.gov/circ/1365/>
- S. Davidsson & M. Höök, 'Material requirements and availability for multi-terawatt deployment of photovoltaics', *Energy Policy* **108**, 2017, 574-582. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.06.028
- A. Elshkaki & T.E. Graedel, 'Solar cell metals and their hosts: A tale of oversupply and undersupply', *Applied Energy* **158**, 2015, 167-177. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.08.066
- European Commission, 'Study on the review of the list of Critical Raw Materials: Criticality Assessments', Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017. <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/08fdab5f-9766-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en>
- European Commission, 'Study on the review of the list of Critical Raw Materials: Critical Raw Materials Factsheets', Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017. <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en>
- T.E. Graedel, E.M. Harper, N.T. Nassar & B.K. Reck, 'On the materials basis of modern society', *PNAS* **112**, 2015, 6295-6300. DOI: 10.1073/pnas.1312752110
- G. Gunn (Eds.), *Critical Metals Handbook*, New York: Wiley, 2014. ISBN: 978-0-470-67171-9
- N.T. Nassar, T.E. Graedel & E.M. Harper, 'By-product metals are technologically essential but have problematic supply', *Science Advances* **1**, 2015, e1400180. DOI: 10.1126/sciadv.1400180
- N. Nitta, F.X. Wu, J.T. Lee & G. Yushin, 'Li-ion battery materials: present and future', *Materials Today* **18**, 2015, 252-264. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.10.040
- E.A. Olivetti, G. Ceder, G.G. Gaustad & X.K. Fu, 'Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals', *Joule* **1**, 2017, 229-243. DOI: 10.1016/j.joule.2017.08.019
- W.J. Rankin, *Minerals, Metals and Sustainability: Meeting Future Material Needs*, Leiden: CRC Press, 2011. ISBN 978-0-415-68459-0
- P.C.K. Vesborg & T.F. Jaramillo, 'Addressing the terawatt challenge: scalability in the supply of chemical elements for renewable energy', *RSC Advances* **2**, 2012, 7933-7947. DOI: 10.1039/c2ra20839c

### Websites

- Critical Raw Materials – European Commission: [https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en) (geraadpleegd op 2 januari 2018).
- European Enhanced Landfill Mining Consortium (EURELCO): <http://www.eurelco.org> (geraadpleegd op 14 februari 2018)
- KU Leuven Sustainable Inorganic Materials Management (SIM<sup>2</sup> KU Leuven): <http://kuleuven.sim2.be/> (geraadpleegd op 2 januari 2018).