

# Metalen en mineralen voor de energietransitie

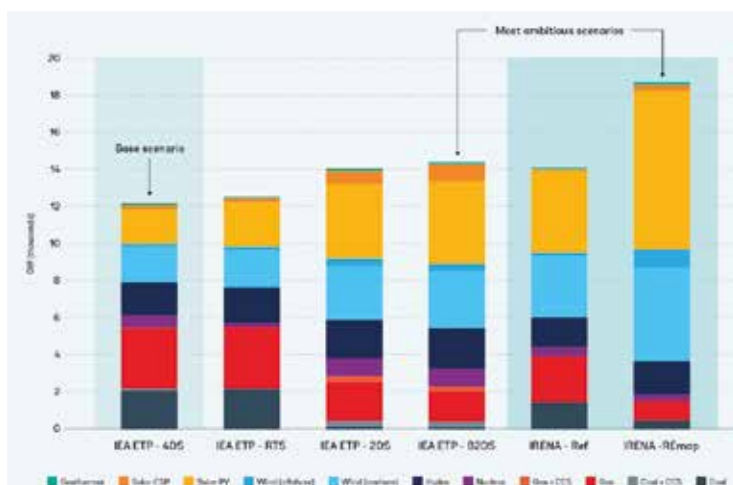
## Deel II: Prognoses van de Wereldbank (2020)

door Frank F. Beunk (Aardwetenschappen VU) en A.B. Phil Westerhof (Westcourt GeoConsult)

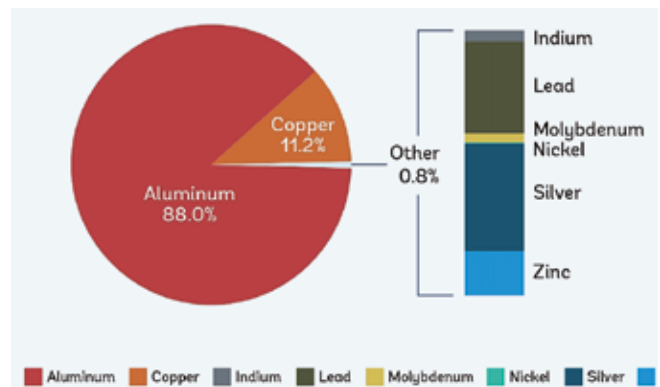
f.f.beunk@vu.nl  
westcourtgeo@hotmail.es

In het klimaatverdrag van Parijs (2015) verbinden 195 landen zich ertoe om de wereldwijde opwarming te beperken tot 2 graden Celsius, of liever nog tot 1,5 graad. Dit betekent het uitfaseren van fossiele brandstoffen en vervanging door alternatieve, koolstofarme energiedragers. Nederland heeft een eigen Klimaatwet, die stelt dat we in 2030 onze CO<sub>2</sub>-uitstoot met 49 procent moeten hebben verlaagd ten opzichte van het jaar 1990; in 2050 moet de afname 95 procent bedragen. Tegelijkertijd beoogt de regering het aandeel 'duurzame energie' op te schroeven tot 100 procent in 2050. Naar aanleiding van een rapport van de Wereldbank uit 2020 bespreken we in dit artikel de vooruitzichten m.b.t. de toekomstige beschikbaarheid van mineralen en metalen die als 'kritiek' gelden voor de energietransitie.

In de huidige wereld wordt 84% van de energie uit kolen, olie en gas gehaald. Ook de Nederlandse cijfers zijn niet veel beter. Uit de laatste Klimaat- en Energieverken-



▲ Afb. 1. Schatting van het wereldwijd geïnstalleerd elektrisch opwekkingsvermogen (in duizenden gigawatt, verticale schaal) in het jaar 2050, voor de zes verschillende scenario's van tabel 2. Let op het overwegende belang van zon, wind en waterkracht (oranje-geel-blauw-zwart) in de meeste scenario's, en ook op het relatief geringe belang van geothermische energie (groen). Bron: Rapport Wereldbank (2020).



▲ Afb. 2. Metaalgebruik voor zonnecellen in 2050, in percentages, voor het '2-gradenscenario' (tabel 2). Aluminium en koper domineren. Voor de geologie van een belangrijk type kopererts, zie Beunk, 2016.

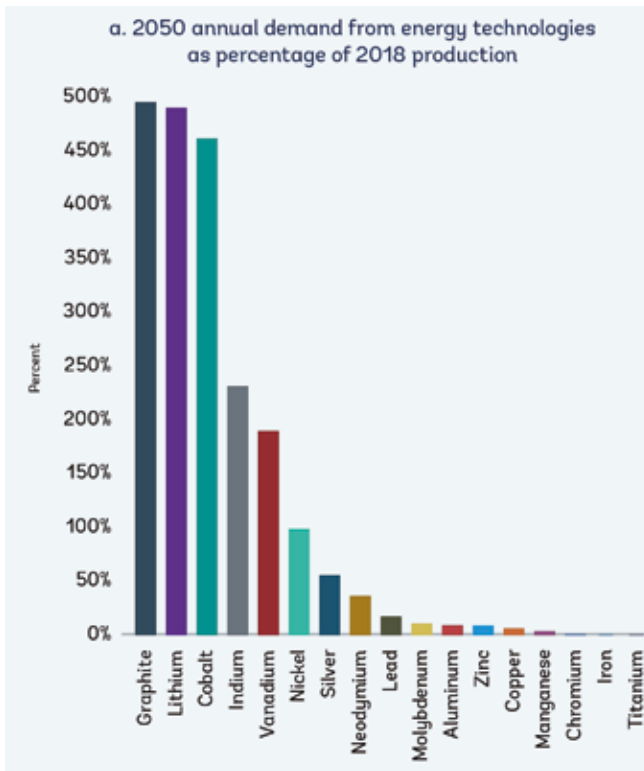


▲ Afb. 3. Gebruik van aluminium (linksboven) en indium (rechtsboven) in de verschillende technologieën t/m 2050 en verwachte toename in gebruik voor zonnecellen in het '2-gradenscenario' (2DS) t.o.v. het 'business-as-usual'-(base)scenario (onder). Indium - 'the everyday metal you never see' - zit o.a. in coatings van indium-tin-oxide op het silicium van de zonnecel; de coating dient als elektrische (foto)kathode, de negatieve pool van de cel. Indium wordt gewonnen als bijproduct van zink uit sfaleriet (ZnS) in basismetaleen-sulfide-ertsen. de negatieve pool van de cel. Indium wordt gewonnen als bijproduct van zink uit sfaleriet (ZnS) in basismetaleen-sulfide-ertsen. Bron: Rapport Wereldbank (2020).

ning van het Planbureau voor de Leefomgeving (2021) blijkt dat Nederland in 2020 44,6% van zijn energie uit aardgas haalde, 36,6% uit aardolie, 5,8% uit kolen, 4,1% uit biomassa, 1,7% uit windenergie en 1% uit zonne-energie. Er is dus nog een hoop werk te doen om een energietransitie te bewerkstelligen (afb. 1).

### Mijnbouw en economische cycli

De prijs van metalen is altijd cyclisch geweest. Op zeven vette jaren volgen vaak zeven magere. Stijgende metaalprices leiden tot meer exploratie, de heropening van oude mijnen en het op stoom brengen van nieuwe mijnen. Overproductie doet de prijzen kelderen en marginale mijnen worden vervroegd gesloten of er wordt tijdelijk – indien mogelijk – een rijker deel van het ertslichaam gemijnd. De mineraalindustrie heeft dan ook als vuistregel dat de levensduur van een mijnbouwproject niet minder dan vijftien tot twintig jaar mag zijn. Af en toe komen er 'supercycles' voor in de mineraalindustrie, d.w.z. langdurige perioden – van meerdere decennia – van reële prijsstijgingen, meestal gedreven door urbanisatie en industrialisatie van een



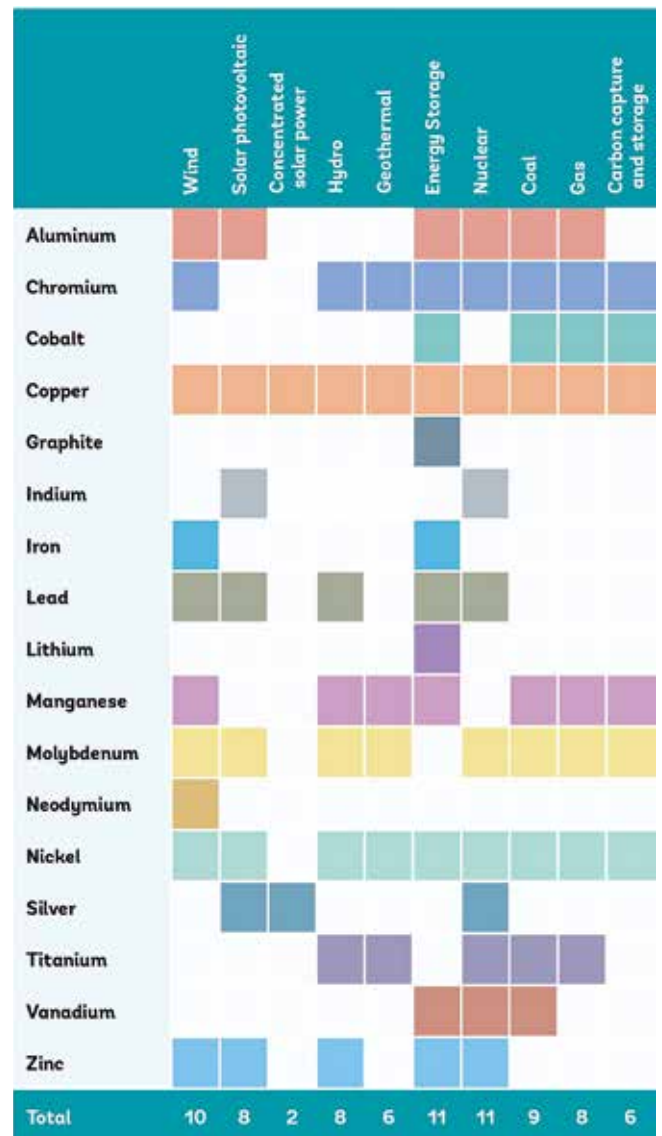
▲ Afb. 4. Procentuele toename van de vraag in 2050 t.o.v. de productie in 2018 van een aantal metalen en grafiet voor de energiesector. Voor grafiet, lithium en kobalt verwacht de Wereldbank bijna een vervijfvoudiging van de vraag. Bron: Rapport Wereldbank (2020).

belangrijke economie. Belangrijke supercycli gedurende de afgelopen 150 jaar vallen samen met de industrialisatie van de VS van eind 19<sup>e</sup> en begin 20<sup>e</sup> eeuw en vervolgens de periode 1945–1975, samenvallend met herstel en opbouw van Europa en de renaissance van Japan na de Tweede Wereldoorlog en, ten slotte, de periode 2000–2015, veroorzaakt door de snelle industriële groei en verstedelijking van China, nadat dit land in 2001 lid van de WTO was geworden.

### ‘Duurzame’ mijnbouw?

Minerale hulpbronnen zijn eindig. Het zijn niet-hernieuwbare hulpbronnen en als zodanig is de term ‘duurzame mijnbouw’ een ‘contradictio in terminis’. Aan iedere mijn komt een einde. Het begrip ‘duurzame mijnbouw’ verwijst dan ook naar ‘best practice’, dat wil zeggen een optimale exploitatie van een ertsafzetting waarbij de milieuschade aanvaardbaar en zo laag mogelijk is. Niettemin heeft het delven en transporteren en de bewerking en verwerking van metallische erts een impact op de natuurlijke omgeving, net als landbouw, industrie en menselijke activiteiten in het algemeen. Gebaseerd op ervaringen in het verleden, en zelfs heden ten dage, heeft de mijnbouw een slechte naam. Zo komt er bijvoorbeeld bij het ontzwellen (‘roasten’) van sulfide-erts gasvormig zwavelzuur vrij. In landen zonder strikte milieuvorschriften slaat dat in de directe omgeving neer, die daardoor verandert in een ontbladerde woestijn, zoals op Tasmanië en, misschien niet bij toeval, rond Russische mijnen op het Kola schiereiland (NO-Scandinavië) en bij Norilsk, in het Oeralgebergte, de meest vervuilde stad ter wereld.

Maar de tijden zijn veranderd. Mijnbouwprojecten in de meeste landen krijgen alleen een winningsvergunning na het verkrijgen van een gunstige milieueffectrapportage (MER; in het Engels: Environmental Impact Assessment, EIA). Rehabilitatie van de mijnlocatie na afloop van het actieve leven van een mijnbouwproject is tegenwoordig een vast onderdeel van de haalbaarheidsstudie voorafgaand aan het op stoom komen van een mijnbouwproject. Alleen op deze manier kan de mijnbouw zijn slechte imago afschudden dat, tot nu toe, het beste kan worden omschreven als “Guilty, untill proven innocent”. Voorsnog ontsnapt de wijdverbreide ambachtelijke (‘artisanale’) mijnbouw (zie deel 1 van dit tweeluik) aan deze regulering.



▲ Tabel 1. Een selectie van kritieke metalen en mineralen voor de energietransitie en hun belangrijkste veld van toepassing, geadresseerd in het rapport van de Wereldbank (2020). Neodymium is het meest gezochte, maar niet het enige strategische Zeldzame-Aarde (ZA) metaal. ‘Concentrated solar power’ = ‘zonnepanelen’ in zonnrijke woestijnen; ‘Solar photovoltaic’ = zonnecellen. Deze lijst is nog niet uitputtend. Niet opgenomen zijn metalen waarvoor kwantitatieve gegevens ontbreken: dysprosium (een ZA) voor windturbines, cadmium, tellurium, selenium en gallium voor verschillende soorten zonnecellen, platina als katalysator in brandstofcellen. Deze brandstofcellen, die waterstofgas oxideren tot water, worden in het Rapport wel besproken, maar buiten de analyses gehouden. Bron: Rapport Wereldbank (2020).



▲ Afb. 5. Dwarsdoorsnede van een onderzeese stroomkabel voor een windpark, die ca. 50 kg koper per meter bevat. De energietransitie vereist enorme hoeveelheden koper, waarvan het leeuwendeel moet komen uit landen als Indonesië, Chili en Peru, 's werelds grootste koperproducenten. Koper heeft de voorkeur vanwege zijn flexibiliteit en vermogen vibraties te doorstaan bij extreem weer. Aluminium is soms een goedkopere en betrouwbare vervanger. Bron: Energinet.

### Vereisten en problemen energietransitie

Het Rapport van de Wereldbank (WB) uit 2020 (hierna: het Rapport) zet de vereisten en bijkomende problemen van de wereldwijde energietransitie op een rij. Het rapport gaat in op bestaande en toekomstige technologieën en de daarvoor benodigde 'kritieke' metallische en minerale grondstoffen (afb. 2 en 3 en tabel 1). Onder 'kritieke metalen' wordt in Amerikaanse wetgeving uit 2020 verstaan: *“a non-fuel mineral or mineral material essential to the economic or national security of the U.S., as well as the supply chain, which is vulnerable to disruption”*. De EU definieerde zijn kritieke metalen al eerder op vergelijkbare wijze, als *“de grondstoffen met een groot economisch belang waarvan de voorziening aan grote risico's is blootgesteld, en waartoe betrouwbare, ongehinderde toegang een zorg vormt voor de Europese industrie en waardeketens”* (Europese Commissie, 2017a). Er zijn ook maatschappelijke problemen, maar daar gaat het Rapport niet over – denk aan

de plaatsing van windturbineparken, de vervuiling door grootschalige mijnbouw, of het opbergen van radioactief afval in de ondergrond, alle liefst 'Not In My BackYard' (NIMBY).

Illustratief voor NIMBY zijn de lokale protesten die de voortgang verhinderen van het San José-lithiumproject in Spanje (prov. Caceres). Hetzelfde overkomt de voorgenomen winning van lithium in Jadar in Servië, een in 2004 ontdekte lithiumafzetting met een reserve van 16,6 Mt met gemiddeld 1,82% Li<sub>2</sub>O en 13,4% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, een 2,4 miljard US\$ project van Rio Tinto (balkaninsight.com/2021/07/29/rio-tintos-planned-jadarite-mine-sparks-protest-in-western-serbia/). Onvermijdelijk zijn er bredere, geopolitieke problemen verbonden aan deze grondstoffen, met name de afhankelijkheid van China, vergelijkbaar met de huidige afhankelijkheid van de landen van de EU van Russische olie en gas.

### Mineralen voor klimaatactie

Het traditionele beeld van de mineraalindustrie dat wij in deel 1 van dit tweeluik in Gea schetsten (Westerhof & Beunk, 2022), moet sinds een jaar of tien sterk bijgesteld worden als gevolg van de energietransitie. Metalen en mineralen die tot voor kort geen of nauwelijks aandacht trokken, zullen in de nabije toekomst een hoofdrol gaan spelen. Denk bijv. aan lithium en indium (zie afb. 3 en deel 1 van dit tweeluik). In het rapport is een tabel opgenomen van minerale grondstoffen, met als titel: *“Minerals for Climate Action ...”*. Zie tabel 1. De verwachting is dat de vraag naar deze stoffen in de toekomst snel zal toenemen, zelfs tot vijf keer het niveau van de huidige productie (afb. 4). Voor de koperproductie verwacht de WB slechts een geringe stijging voor opwekking en opslag van energie, maar het Rapport wijst wel op de hoognodige verbetering van de nationale en internationale elektriciteitsnetwerken, voor het transport van de energie (afb. 5).

	Scenario (afkorting)	Bron	Beschrijving
1	4DS (basisscenario)	4-gradenscenario in IEA-ETP-rapport 2016	Basisscenario; 'business-as-usual', met kleine aanpassingen t.b.v. vermindering aandeel fossiele brandstoffen
2	RTS	Referentie-technologie-scenario uit IEA-ETP-rapport (2017)	Alle landen implementeren hun nationale doelstellingen vlg. het Verdrag van Parijs, leidend tot een gemiddelde wereldwijde temperatuurstijging van 2,7°C in 2100
3	2DS	2-gradenscenario uit IEA-ETP-rapport 2017	Ten minste 50% kans op beperking van een gemiddelde wereldwijde temperatuurstijging tot 2°C in 2100
4	B2DS (meest ambitieuze scenario in IEA-rapport)	Voorbij-2-gradenscenario uit IEA-ETP-rapport 2017	50% kans op beperking gemiddelde temperatuurstijging van 1,75°C in 2100
5	Ref	Referentiescenario van IRENA	Temperatuurstijging minstens 2,6°C in 2100
6	REmap (meest ambitieuze scenario van IRENA)	Hernieuwbare energie 'roadmap' van IRENA (2019)	Beperkt de temperatuurstijging tot ruim onder 2°C in 2100, t.o.v. pre-industrieel niveau

▲ Tabel 2. Zes scenario's van de Wereldbank voor matiging van de klimaatopwarming. Het eerste (4DS) is 'business as usual', met slechts minimale aanpassingen, leidend tot ten minste 4 graden opwarming in 2100. Het zesde (REmap) is het meest ambitieuze (ruim onder 2 graden). IEA = International Energy Agency, IRENA = International Renewable Energy Agency, ETP = Energy Technology Perspectives.





▲ Afb. 6. Cerro Matoso Ni-laterietmijn, prov. Córdoba, Colombia. A. Ni-lateriet in open groeve. B. Ni-Fe broodjes klaar voor transport naar Barranquilla en vandaar naar de VS. Foto's: A.B. Westerhof.

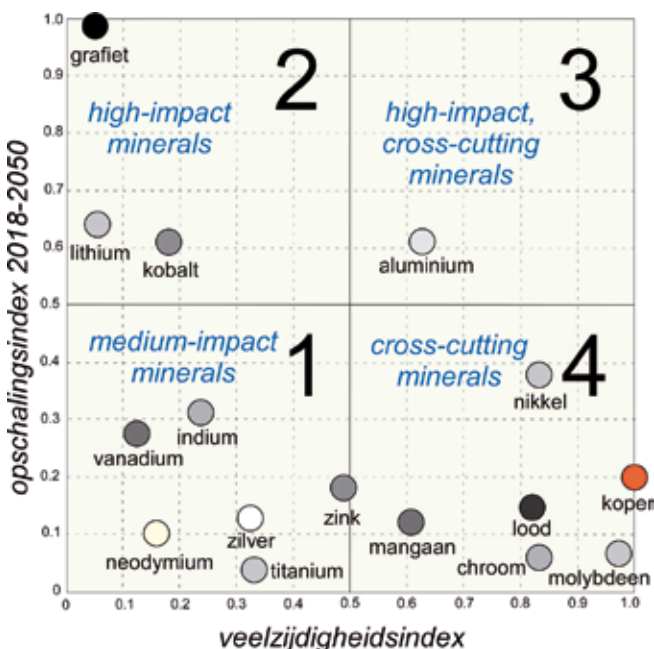
### CO<sub>2</sub>-uitstoot

Winning, verwerking en transport van de metalen heeft een keerzijde die in het rapport is verdisconteerd: de benodigde energie zal voornamelijk uit fossiele brandstoffen komen en dus bijdragen aan de wereldwijde CO<sub>2</sub>-belasting. Met name de productie van aluminiummetaal uit de grondstof bauxiet is energie-intensief. Om 1 ton aluminiummetaal te produceren via de elektrochemische Bayer- en Hall-Herault-processen is 4 tot 5 ton bauxiet nodig en 93,5 GJ elektrische energie. Dat is genoeg stroom om 3000 apparaten met een vermogen van 1000 W een jaar lang continu te laten draaien, en komt voornamelijk uit

aardgas, cokes en diesel. Ook de productie van nikkel en bijproduct kobalt uit (nikkel-)laterieten is een energie-intensief proces (afb. 6).

### Vooruitzicht 2050

Voor het '2-gradenscenario' komt het Rapport met een indeling van de kritieke metalen en grafiet in tabel 1 in vier groepen. Het berekende daartoe voor elk afzonderlijk metaal en grafiet twee verschillende indices, die wij hier vertalen als de 'opschalingsindex 2018-2050' en de 'veelzijdigheidsindex'. De opschalingsindex, langs de verticale as van afb. 7, verdisconteert zowel de relatieve als de absolute toename van de vereiste productie ('demand') in 2050 t.o.v. 2018. Grafiet heeft de hoogste *relatieve* toename (een vervijfvoudiging, zie afb. 4) en krijgt hiervoor de waarde 1. Voor elk ander metaal is de relatieve toename vergeleken met die van grafiet, resulterend in een waarde tussen 0 en 1. Daarnaast is er berekend hoeveel de productie tot 2050 moet toenemen in absolute hoeveelheden. Daarin gaat aluminium aan kop, dat voor dit deel van de index de waarde '1' is toegekend. Alle andere metalen kregen een waarde tussen 0 en 1, in verhouding tot aluminium. De relatieve en absolute scores zijn ten slotte één op één bij elkaar opgeteld en genormaliseerd tot een index tussen 0 en 1.



▲ Afb. 7. De 'demand-risc matrix' van zestien kritieke metalen en grafiet (tabel 1), voor het 'twee-gradenscenario'. Het Rapport onderscheidt vier groepen (kwadranten), op grond van de vereiste productietoename t/m 2050, langs de verticale as, en hun veelzijdigheid, langs de horizontale as. Grafiet, lithium en kobalt, in kwadrant 2, staan te boek als 'high-impact minerals'. De term impact slaat hier op de vraag- en productietoename. 'Cross-cutting' staat voor veelzijdigheid, d.w.z. toepassing in veel verschillende energietechnologieën, bijv. aluminium. In kwadrant 4 staan veelzijdige metalen met een relatief lage verwachte toename van de vraag; niettemin kan de absolute vraag hoog blijven (koper!). De afbeelding is getekend naar het origineel in het WB-rapport.

De meest veelzijdige metaal is koper, dat daarom als index de waarde '1' kreeg. Voor de overige metalen is een waarde berekend in verhouding tot die van koper en uitgedrukt in een index tussen 0 en 1. De resulterende 'demand-risc matrix', in afb. 7, laat zien dat lithium, kobalt en grafiet, in kwadrant 2, een hoge verwachte toename van de vraag hebben, voor een beperkt aantal toepassingen, lithium bijv. uitsluitend voor energieopslag.

De kwadranten 2 en 4 van afb. 7 representeren de uitersten, nl. maximale verwachte toename van de vraag voor een gering aantal toepassingen (kwadrant 2) of de meest veelzijdige metalen met de kleinste vereiste productietoename (kwadrant 4).

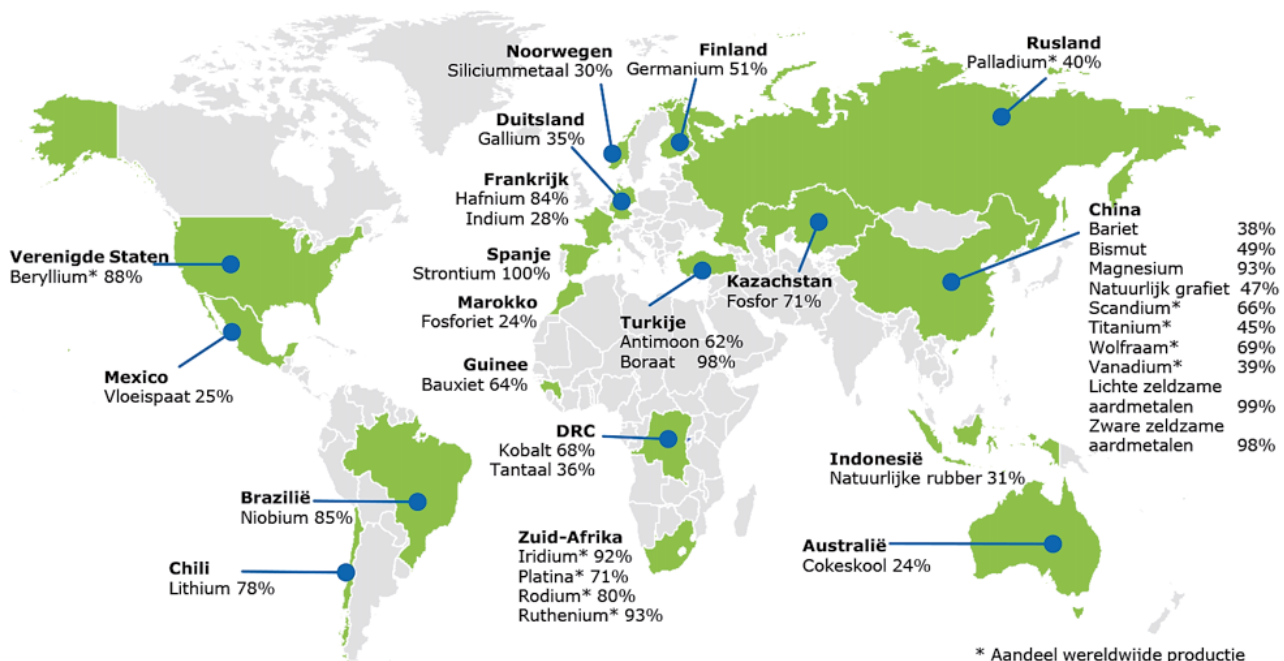
## Waar de schoen wringt

De EU is voor olie en gas sterk afhankelijk van Rusland, voor 'zeldzame aarden' zijn we dat vooralsnog van China (afb. 8). Voor de productiecijfers verwijzen we naar afb. 11 in deel 1 van dit tweeluik (Westerhof & Beunk 2022). De voormalige Chinese leider Deng Xiaoping heeft dertig jaar geleden al gezegd: "Het Midden-Oosten heeft olie, wij hebben Zeldzame Aarden", en China gebruikt zijn dominantie op de ZA-markt zo nodig als geopolitiek wapen, bijv. door instelling van een exportverbod tijdens een visserijconflict met Japan in 2010. Ook voor kobalt, waarvan de primaire bronnen voornamelijk in Zambia en Congo liggen (Westerhof & Beunk, Deel 1, 2022), vindt de raffinage in China plaats.

De oorlog in Oekraïne benadrukt de kwetsbaarheid van westerse democratieën m.b.t. essentiële grondstoffen, vooral vanwege de afhankelijkheid van Rusland en China (bijv. afb. 8). De westerse landen moeten opnieuw bedenken waar ze deze strategische grondstoffen in de toekomst kunnen verkrijgen. Naast toename van hergebruik (recycling) zal dit leiden tot verhoging van het exploratiebudget in landen met economisch exploitabele metaalafzettingen, en in gebieden met een politiek stabiel en vriendelijk regiem (bijv. Scandinavië, N. Amerika, Australië). Het wordt een uitdagende opgave, gegeven het beperkte kwalitatieve en kwantitatieve voorkomen van strategische mineralen in 'vriendelijke' landen. De mijnbouw moet er nieuwe exploratieconcepten voor ontwikkelen. Wie worden de winnaars en verliezers, geopolitiek en commercieel? Welke rol zullen de milieuaspecten spelen? Er lijkt volgens energiedeskundigen in elk geval een eind te zijn gekomen aan de wereldwijde vrije handel in strategische mineralen en koolwaterstoffen, althans voor de komende tien jaar.

## Literatuur

- Beunk, F., 2016. Vulkanisme, water en ertsen. Grondboor & Hamer 70 (4), p. 104-112.
- Europese Commissie, 2017a. Mededeling van de Commissie aan het Europees parlement, de Raad, het Europees economisch en sociaal comité en het comité van de regio's over de lijst van 2017 van voor de EU kritieke grondstoffen. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0490&from=NL>.
- Europese Commissie, 2017b. Research and development for the Rare Earth Element supply chain in Europe. [http://www.eurare.org/docs/EURAREbrochure\\_vfinal.pdf](http://www.eurare.org/docs/EURAREbrochure_vfinal.pdf).
- Europese Commissie, 2021. Veerkracht op het gebied van kritieke grondstoffen: de weg naar een grotere voorzieningszekerheid en duurzaamheid uitstippelen. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474>.
- Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), 2021. Klimaat- en Energieverkenning 2021. PBL-publicatienummer: 4681; Den Haag, 2021.
- Westerhof, A.B., F.F. Beunk, 2022. Metalen en mineralen voor de energietransitie. Deel I: Geologie en mijnbouw. Lithium, kobalt, 'zeldzame aarden' en grafiet. Gea 2022/3.
- World Bank Group, 2020. Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition, 110 pp; <https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climature-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition>.



▲ Afb. 8. Belangrijkste aanbodlanden van kritieke minerale hulpbronnen aan de EU. Zie de dominante rol van China. LREEs: 'Light Rare Earth metals', HREEs: 'Heavy Rare Earth metals'. Bron: Europese Commissie, 2021.