

Kritieke materialen voor een duurzame toekomst?

Ester van der Voet

Grootouders voor het Klimaat webinar 17 september 2026



**Universiteit
Leiden**
The Netherlands

Inhoud

- De vraag naar metalen, en met name kritieke materialen
- Vragen en problemen in verband met beschikbaarheid en milieu-effecten
- Oplossingen: waar halen we de materialen vandaan? En wat zijn de consequenties daarvan?

De vraag naar metalen

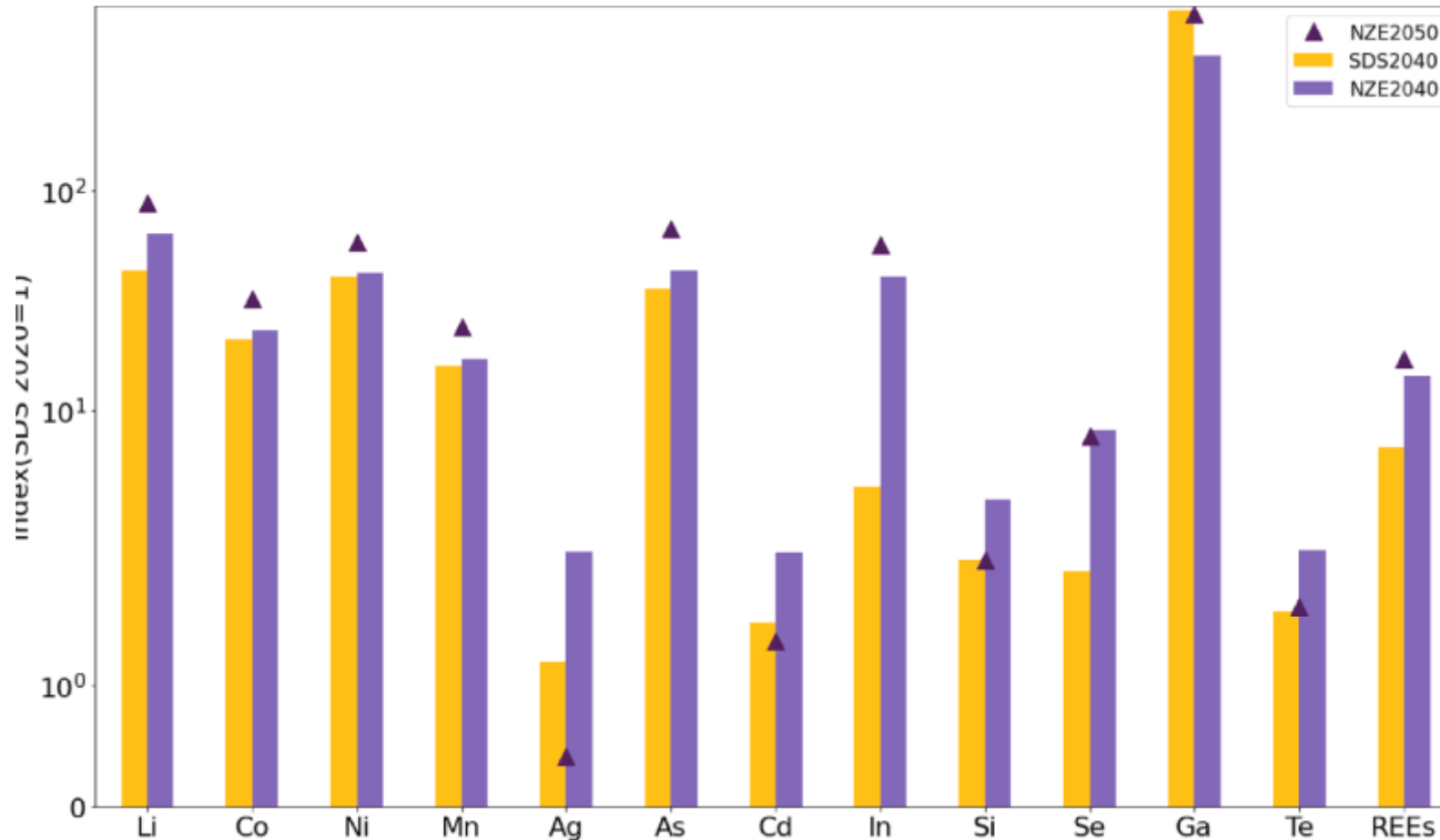
- Wereldwijde vraag naar grondstoffen is verdriedubbeld in de laatste 50 jaar
- Dat geldt ook voor metalen, deze groeien relatief nog iets sterker
- Voor de toekomst wordt een verdere groei van de vraag verwacht
 - Tot 2050: nogmaals een **verdubbeling** van de vraag naar grondstoffen
 - Voor metalen: groei met **factor 2-5** in die periode (IRP, 2024)
 - Vooral als gevolg van populatiegroei en welvaartsgroei

De vraag naar metalen

- Nieuwe ontwikkeling: de **energietransitie!**
 - Nieuw energiesysteem moet opgebouwd worden
 - vraagt “gewone” metalen zoals staal, aluminium, koper, ...
 - ... daarnaast **specialty metals** die gebruikt worden voor wind- en zonne-energie en voor batterijen, en die in kleine hoeveelheden worden geproduceerd: kobalt, neodymium, lithium, platina, zeldzame aardmetalen,
 - De vraag naar deze metalen zal **verveelvoudigen** in de komende decennia
- Onder deze specialty metals vinden we metalen die problematische supply chains (aanvoerketens) hebben, en waarover zorgen zijn over de (toekomstige) beschikbaarheid
- Die staan bekend als **Critical Raw Materials (CRM)** of kritieke materialen.

De vraag naar metalen

- Verwachte wereldwijde groei van de vraag naar CRM onder verschillende scenario's van de IEA (Liang et al., 2023)



Groeiproblemen 1, beschikbaarheid

Vraag 1: **kunnen we de productie wel zo snel en zo ver opvoeren?**

Beperkende factoren:

- ❑ Uitputting van ertsen?
- ❑ Opschalen van mijnbouw?
- ❑ Geopolitieke schaarste?
- ❑ Falende supply chains?

Groeiproblemen 1, beschikbaarheid

Uitputting van ertsen en Opschalen van mijnbouw

Geologische schaarste (uitputting) is (bijna) nooit een probleem

- Zeldzame aardmetalen zijn niet zeldzaam en zijn overal te vinden, ook in Europa

Er zijn wèl echt beperkingen aan de snelheid waarmee het aanbod kan worden vergroot. Zeker bij een snel stijgende vraag kan dit beschikbaarheidsproblemen opleveren.

- Het duurt 15-25 jaar om een nieuwe mijn productief te krijgen
- Het duurt ook jaren voordat een gestegen vraag zich vertaalt naar nieuwe investeringen in mijnbouw

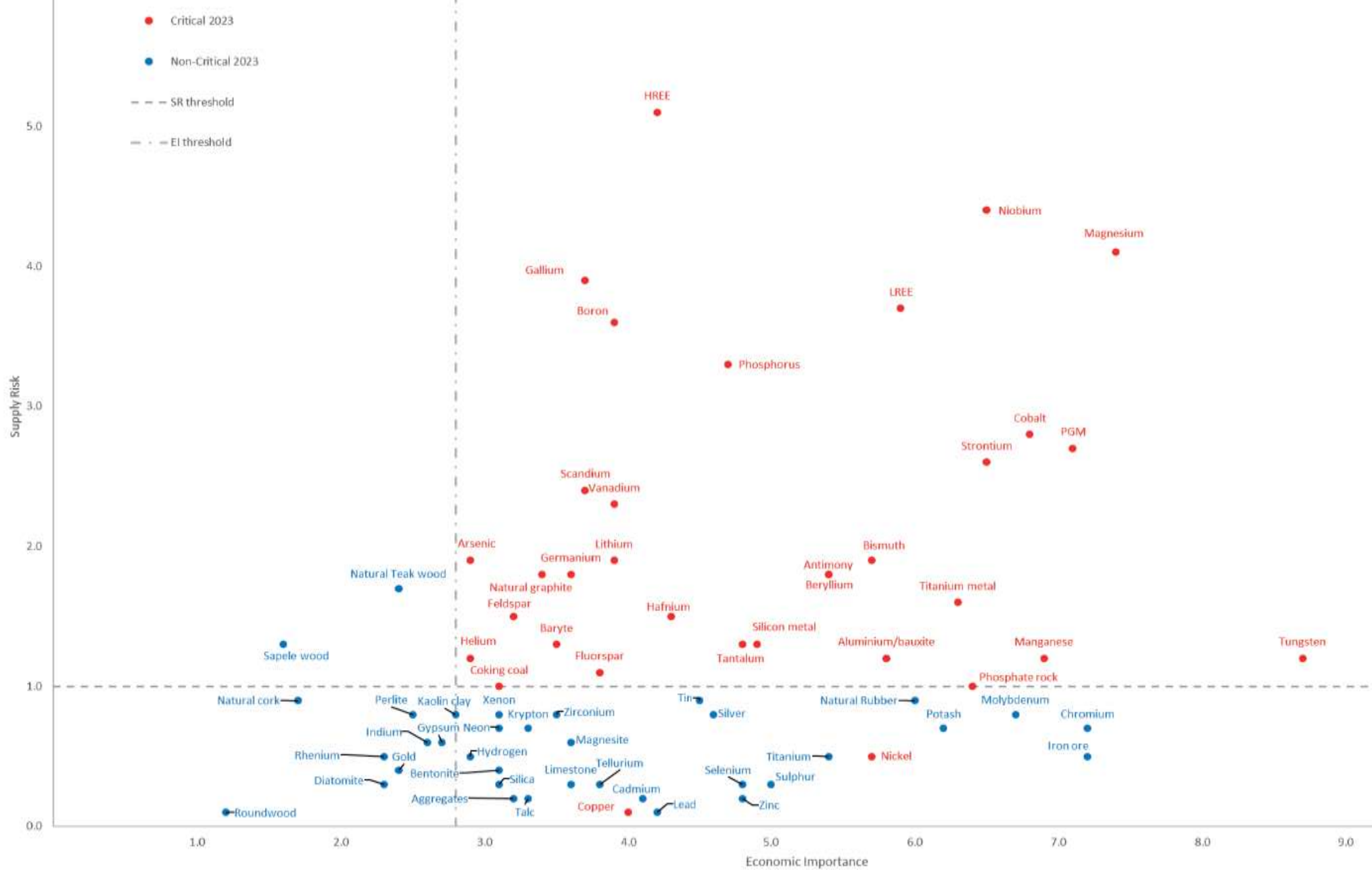
Groeiproblemen 1, beschikbaarheid

Geopolitieke schaarste en falende supply chains

- Dit is het probleem waar je nu zo veel over hoort
- Heeft dus niks te maken met opraken, maar is het gevolg van explosieve stijging van de vraag, van globalisering en van toenemend wantrouwen tussen landen
 - Door globalisering concentreert mijnbouw en raffinage zich in lage-lonen-landen
 - Efficiency op wereldschaal leidt tot steeds minder mijnen in steeds minder landen
 - Door snel stijgende vraag zijn er vaker “disruptions”: mismatch tussen vraag en aanbod
 - Door wantrouwen tussen landen zijn aanvoerketens steeds minder “resilient” (veerkrachtig)
- CRM vaak co- of bijproduct, lastig om stabiele markten te creëren
- Playing the blame game gebeurt veel, maar helpt niet

Groeiproblemen 1, beschikbaarheid

- Europa heeft speciaal te lijden van beschikbaarheidsproblemen
 - Mijnbouw grotendeels verdwenen, dus afhankelijk van import
 - Niet geïnvesteerd in raffinage
 - Niet goed opgewassen tegen handelsbeperkingen
- EU beleid rond critical raw materials:
 - Eerst maar eens probleem in kaart: “criticality assessments”
 - Risico-analyse gebaseerd op supply risk en economic importance
 - Resultaat: lijst van critical materials, die eens in de 3 jaar wordt herzien
 - Schat van informatie in RMIS <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/>
 - Daarop concentreert EU beleid zich (later verder)



Groeiproblemen 2, milieu-effecten

Vraag 2: hoe duurzaam is de productie van deze materialen?

Metaalproductie gaat gepaard met milieuproblemen

- Milieu-effecten van mijnbouw
 - Verstoring / vernietiging van ecosystemen ter plaatse
 - Gezondheidseffecten voor mijnbouwers en lokale bevolking
- Energiegebruik voor mijnbouw en raffinage
 - Metalen zijn zeer energie-intensieve materialen
 - Nu al is de bijdrage aan het wereldwijd energieverbruik 7-8%, en 5% aan broeikasgasemissies

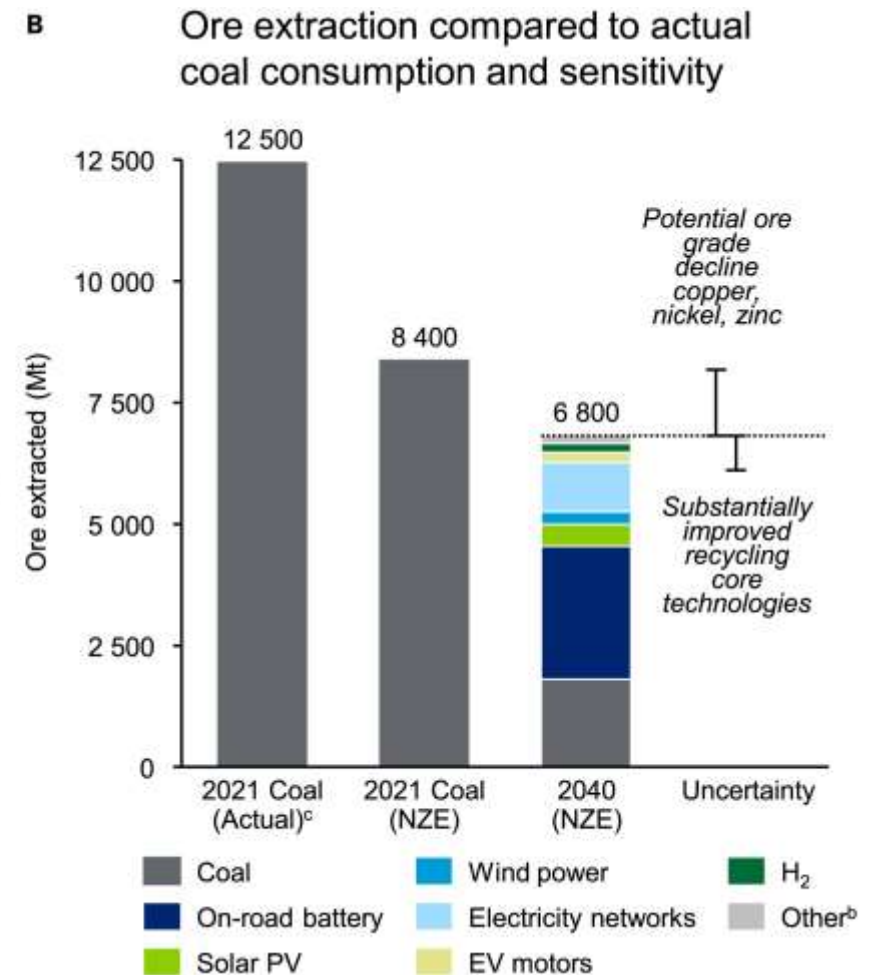
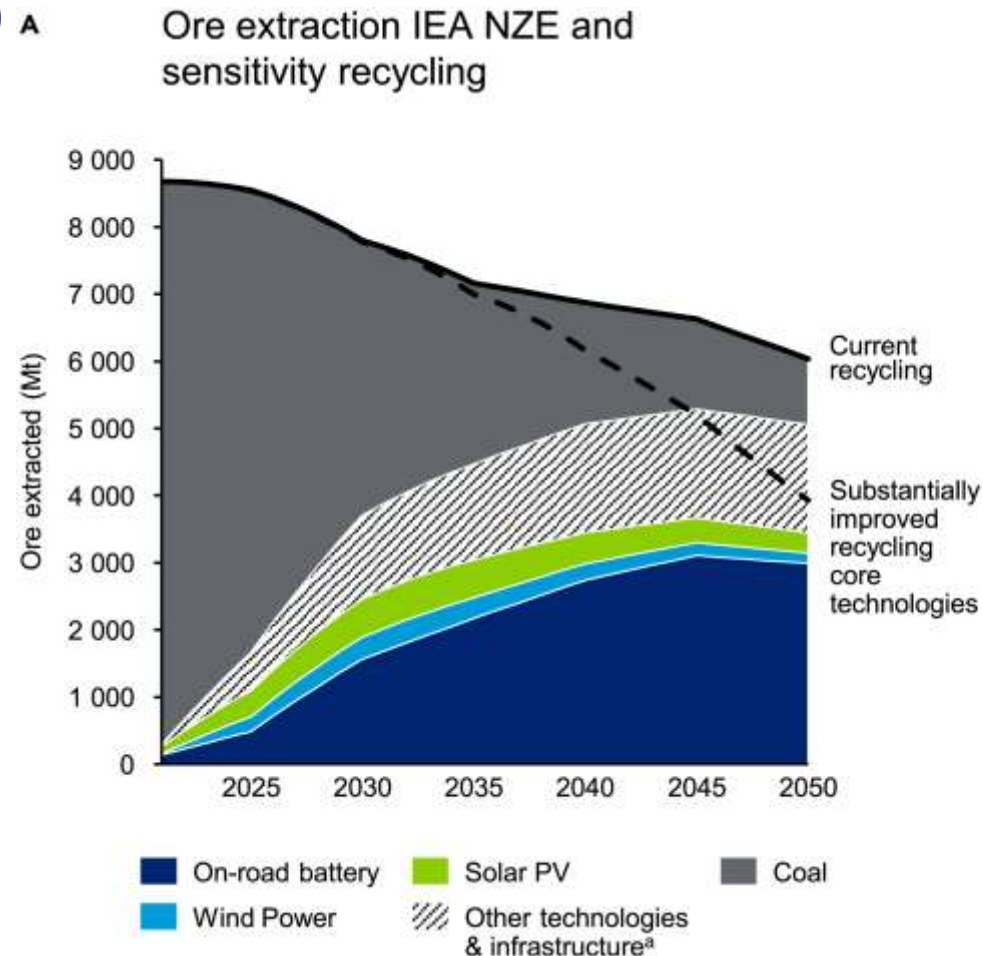
Groeiproblemen 2, milieu-effecten

Lokale problemen: metaalproductie is lomp en heftig



Groeiproblemen 2, milieu-effecten

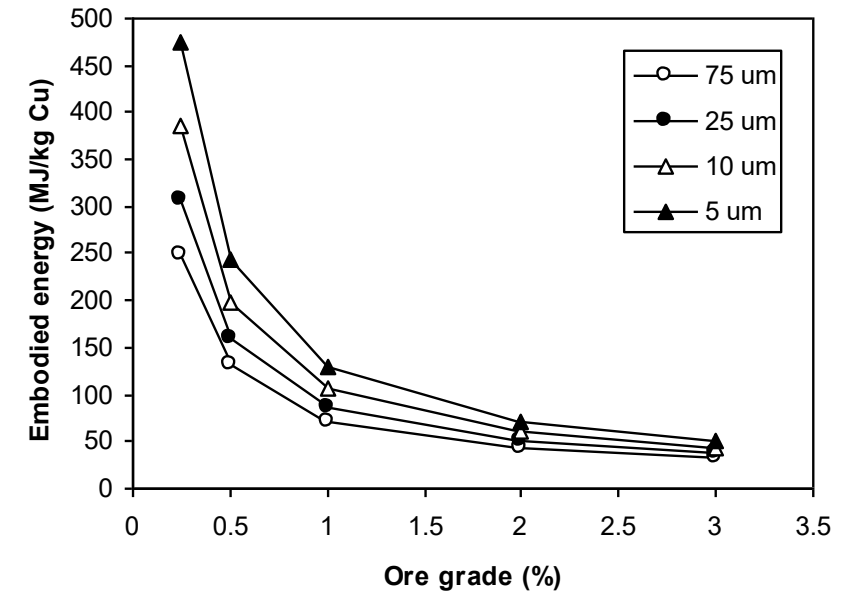
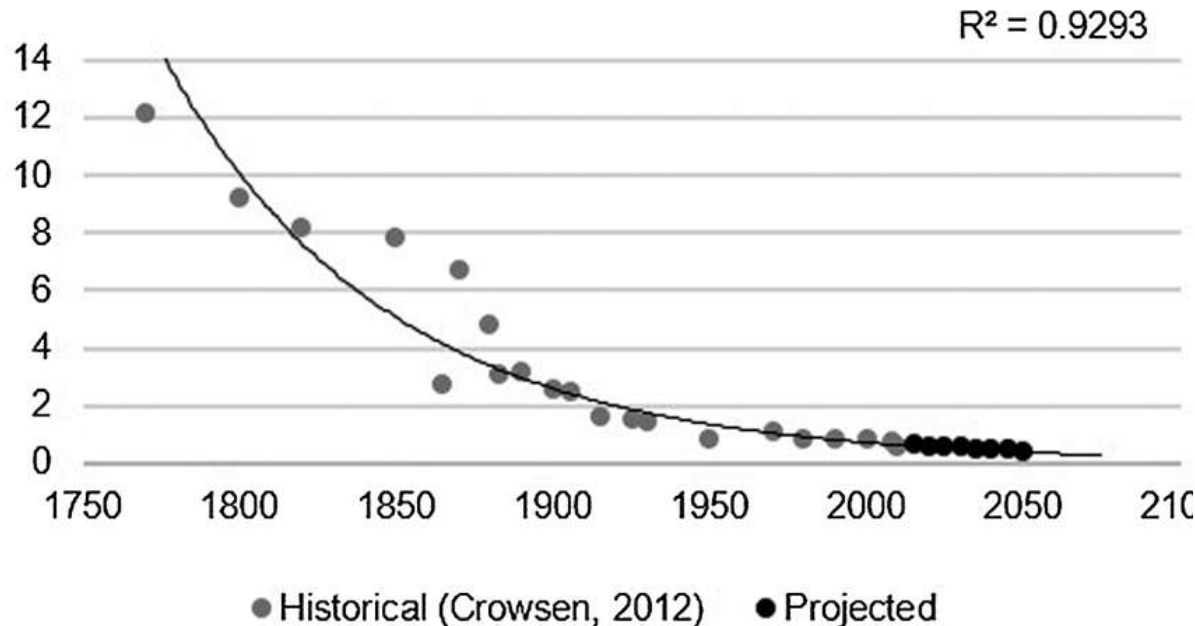
- Goed om te beseffen: door energietransitie neemt mijnbouw af, niet toe! (Nijmens et al, 2024)



Groeiproblemen 2, milieu-effecten

- Metaalproductie is energie-intensief: in de toekomst kan de bijdrage van metaalproductie aan CO₂-emissies oplopen tot 15%
- Door (sterker dan gemiddeld) groeiende vraag, maar ook door afnemende ertsgraden (Norgate et al., 2010; Kuipers et al., 2019)

a) Historical and projected global average copper ore grades



Oplossingen

Hoe verzekeren we ons van een voldoende aanbod van metalen op een duurzame manier?

Oplossingen

Hoe verzekeren we (in NL en Europa?) ons van een voldoende aanbod van metalen op een duurzame manier?

Opties, meeste onderdeel van EU beleid:

- ❑ Import diversificeren “friend-shoring” – nieuwe handelsstromen met bevriende naties
- ❑ Mijnbouw in Europa herstarten
- ❑ Nieuwe bronnen van metalen: diepzee (en ruimte) (hier is EU terughoudend)
- ❑ Urban mining: recycling en hergebruik
- ❑ Reductie van de vraag

- ❑ Wat zijn overwegingen bij elk van deze opties?

Oplossingen: import en nieuwe mijnen

Import diversificeren en mijnbouw/raffinage terug in Europa:

- ❑ Import diversificeren is speerpunt van EU beleid, maar is voor lang niet alle CRM mogelijk, althans niet snel
- ❑ Mijnbouw terug in EU zou een rechtvaardig idee zijn, maar gaat het gebeuren?
 - ❑ Vies (NIMBY)
 - ❑ Duur (hoge lonen en/of robotisering)
 - ❑ Moeizaam (vergunningsprocedures)
- Als we het willen, kan het wel!

Oplossingen: diepzee mijnbouw

- **Nieuwe bronnen van metalen: diepzee (en ruimte)**

- ❑ (Ruimte: techbro oplossing, voorlopig nog SF)
- ❑ Diepzee: serieuze optie, bedrijven staan in de startblokken

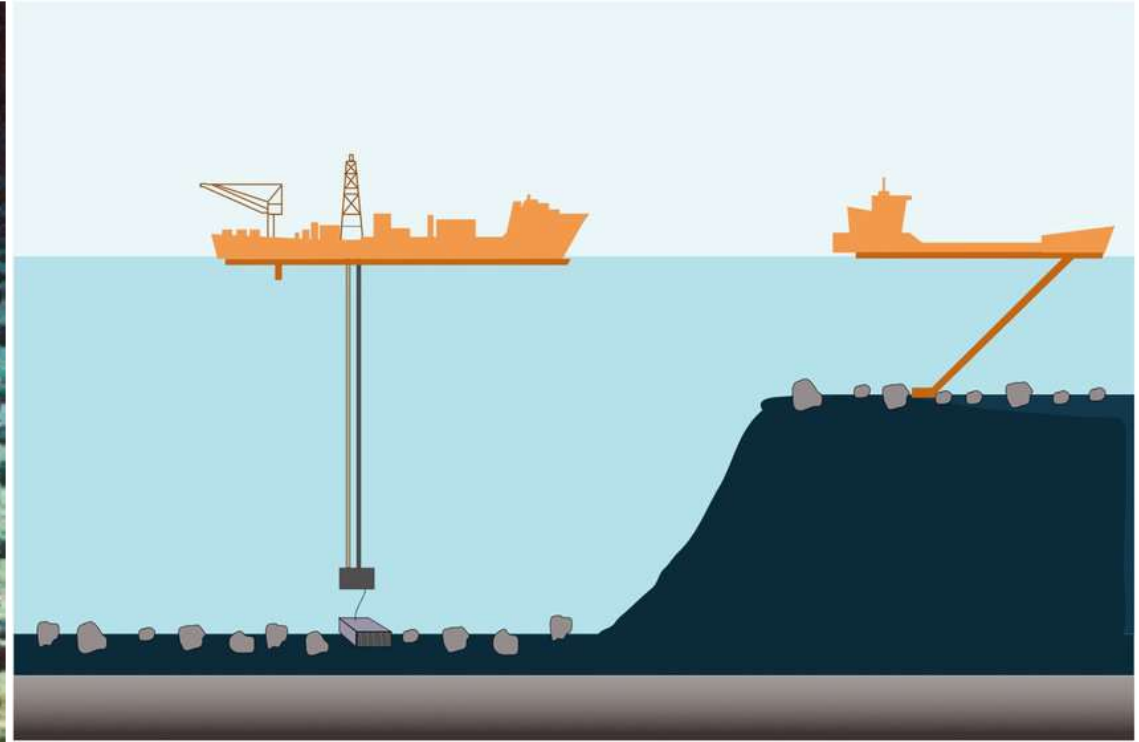
- **Diepzee mijnbouw:**

- ❑ Polymetallic nodules
- ❑ Manganese/cobalt crusts
- ❑ Sulfide deposits



Oplossingen: diepzee-mijnbouw

- ❑ Nodules worden beschouwd als meest serieuze optie: liggen voor het oprapen, hoge concentraties metalen (mangaan, nikkel, koper, kobalt, ...)
- ❑ <https://geoexpro.com/the-deep-sea-is-the-only-alternative/>



Oplossingen: diepzee-mijnbouw

- ❑ [No Deep Seabed Mining | WWF \(panda.org\)](https://www.panda.org/advocacy/deep-sea-mining/)



Diepzee mijnbouw: gepolariseerd debat

■ Argumenten voor diepzee-mijnbouw

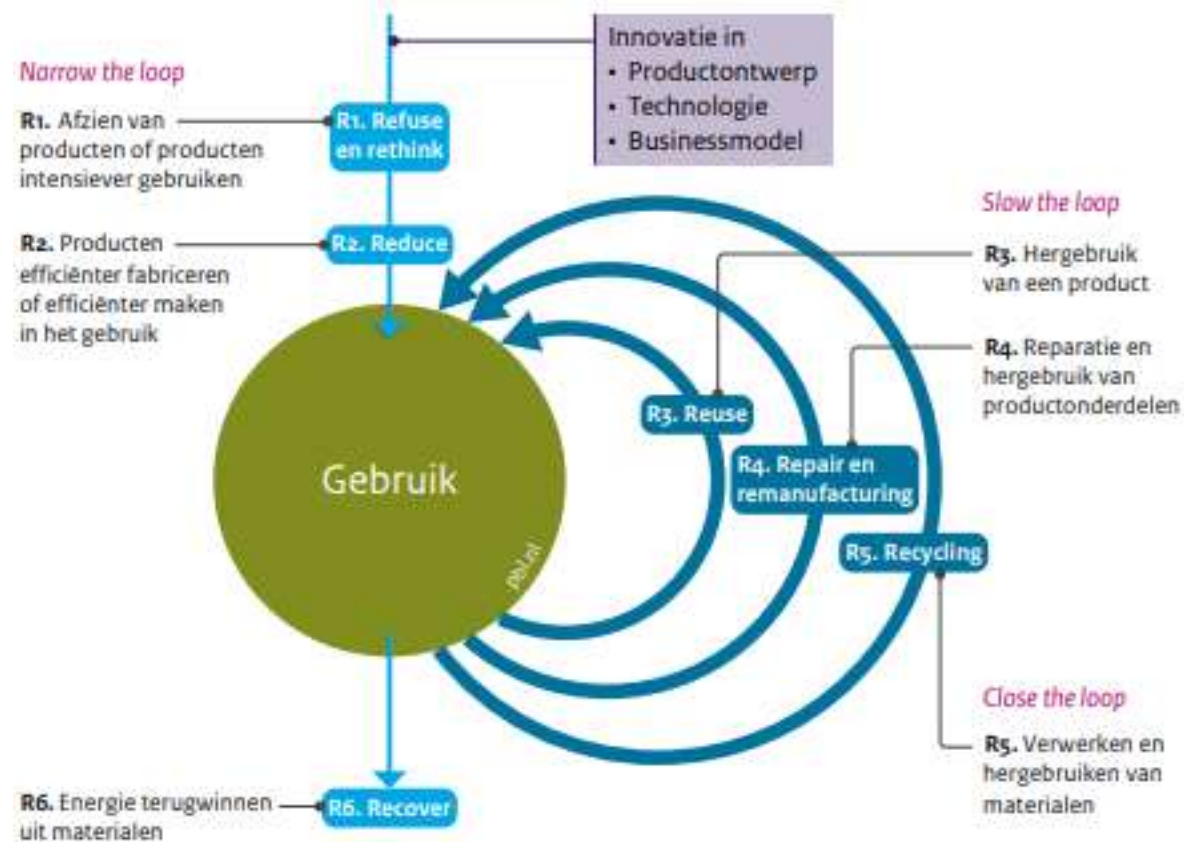
- ❑ Is de enige manier om op korte termijn aan voldoende metalen te komen voor de energietransitie
- ❑ Bekende milieu-effecten van diepzee-mijnbouw zijn minder dan van mijnen op land, zeker van de polymetallic nodules: zeer hoge ertsgraden
- ❑ Milieu-effecten worden gecompenseerd door schonere energie
- ❑ Diversificatie vermindert de afhankelijkheid van bepaalde landen en versterkt de supply chain resilience

■ Argumenten tegen diepzee-mijnbouw

- ❑ De diepzeebodem is het enige onverstoorde ecosysteem dat we nog hebben op aarde
- ❑ We weten erg weinig van dit ecosysteem dus kunnen we de effecten van diepzee mijnen nog niet vaststellen. Daarom: Voorzorgsprincipe
- ❑ Bedrijfsbelangen spelen (wederom) een hoofdrol, essentiële rol oceanen in het leefbaar houden van de aarde (wederom) als argument genegeerd
- ❑ Kleinere bedrijvigheid zoals visserij delft het onderspit

Oplossingen: Urban mining

- Past in breder idee van circulaire economie: grondstoffen zo lang mogelijk in gebruik houden (PBL, 2025)



***De urban mine* als bron van grondstoffen**

- De *urban mine* (stedelijke mijn): grondstoffen in allerlei materialen in voorraden van producten, gebouwen, infrastructuren die op dit moment in gebruik zijn
- **In een circulaire economie is de urban mine de belangrijkste leverancier van grondstoffen**
- Gaat over alle grondstoffen
- De urban mine is groot: in Nederland 447 ton per persoon
 - Voor koper: meer in de urban mine dan in geologische mijnen
 - Voor kobalt nog niet, maar snel groeiend
- CRM is klein bier

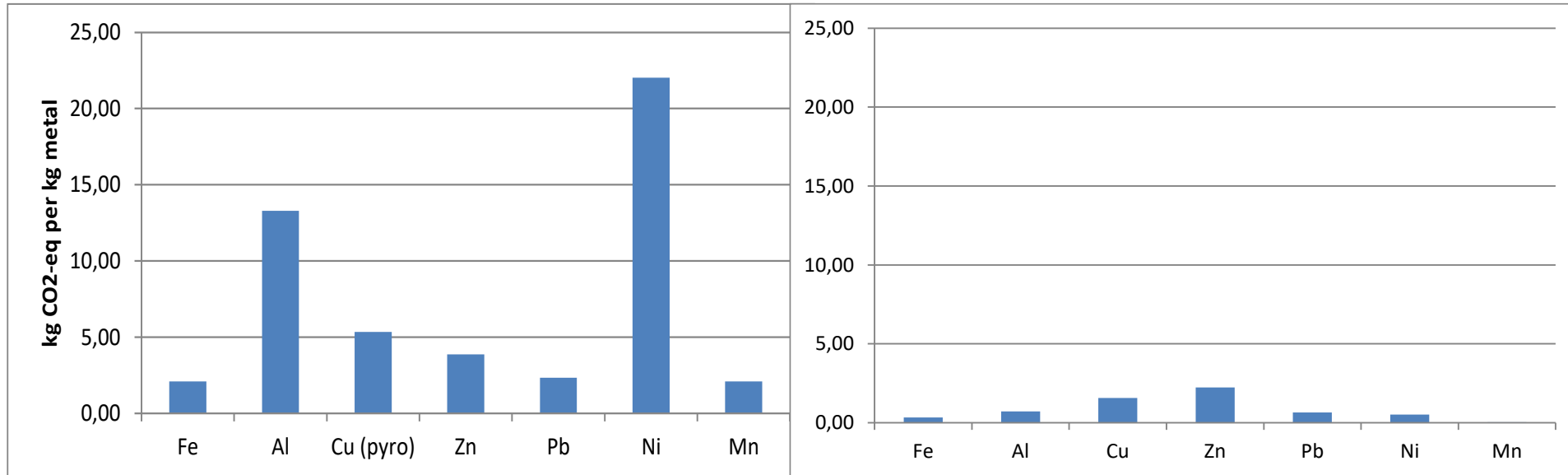
De *urban mine* als bron van grondstoffen

- Urban mining levert ook milieuwinst op:

CO₂ emissies per kg metaal (van der Voet et al., 2018)

Productie uit mijnbouw

Productie uit schroot



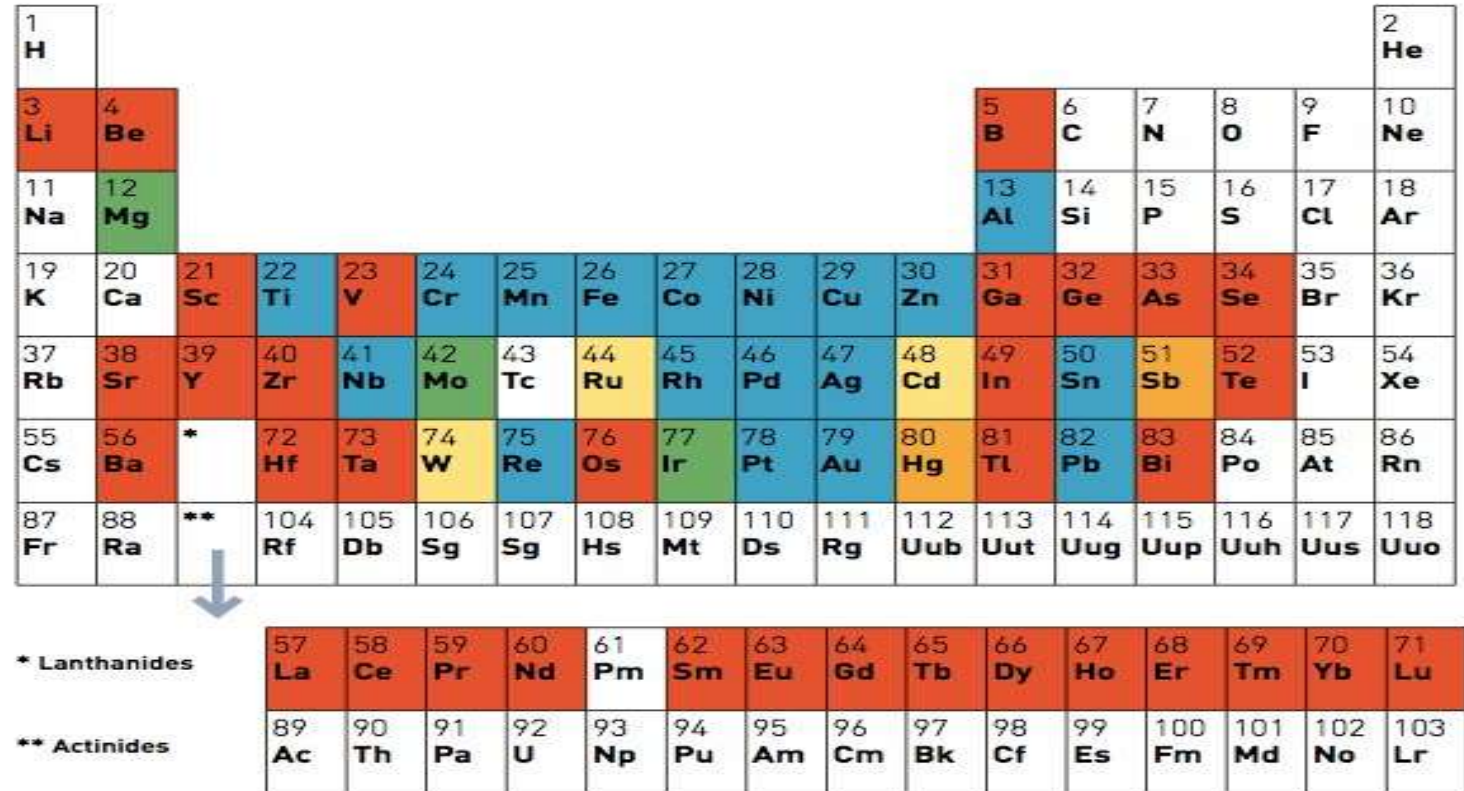
Urban mining: recycling rates van CRM

(UNEP, 2011)

- Recycling rates nu extreem laag
- Op korte termijn niet omhoog



Figure 4.



EOL-RR for sixty metals: The periodic table of global average end-of-life (post-consumer) functional recycling (EOL-RR) for sixty metals. Functional recycling is recycling in which the physical and chemical properties that made the material desirable in the first place are retained for subsequent use. Unfilled boxes indicate that no data or estimates are available, or that the element was not addressed as part of this study. These evaluations do not consider metal emissions from coal power plants.

De urban mine als bron van grondstoffen

- CRM zitten vooral in elektronica en nieuwe energietechnologieën
- 1. Vaak in hele lage concentraties – zijn de smaakmakers van de legeringen
 - Uit legering halen lastig en duur
 - Gebeurt nu wel hier en daar
- 2. Dit zijn snel groeiende toepassingen
 - Dat betekent dat de hoeveelheid die beschikbaar komt uit de urban mine voorlopig veel lager is dan de vraag
 - En dat maakt dat deze oplossing voor CRM pas op langere termijn echt effectief gaat worden

Oplossingen: Reductie van de vraag

- Minder is altijd beter
- “Sufficiency” nieuw modebegrip in duurzaamheidsdebat
- Opbouw duurzaam energiesysteem moet wèl gebeuren, en wel zo snel mogelijk
- Maar niet perse met CRM: technologieontwikkeling gaat nog snel
- CRM-vrije alternatieven worden ontwikkeld, komen op termijn op de markt
- Zou kunnen dat heel het gedoe van lieverlee vanzelf verdwijnt

Oplossingen – al met al

- Oplossingen zijn er zeker, **maar ze vragen allemaal tijd**
- Korte termijn beschikbaarheidsproblemen blijven dus nog
- Met de lange termijn oplossingen **moet wel NU gestart worden** anders hebben we ze straks ook niet
 - Lange termijn beeld van duurzaam energiesysteem moet leidend zijn
 - We zijn niet goed in lange termijn denken – overheden nog slechter dan bedrijven
- De **meest duurzame en de meest innovatieve** opties:
 - Urban mining
 - CRM-vrije technologieën

Referenties

- International Resource Panel, 2024. Global Resource Outlook: Bend the Trend <https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook-2024>
- Liang, Y., R. Kleijn & E. van der Voet, 2023. Increase in demand for critical materials under IEA Net-Zero emission by 2050 scenario. *Applied Energy*, June 2023, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121400>
- Sprecher, B., Daigo, I., Spekkink, W., Vos, M., Kleijn, R., Murakami, S., & Kramer, G. J., 2017. Novel indicators for the quantification of resilience in critical material supply chains, with a 2010 rare earth crisis case study. *Environmental Science & Technology*, 51(7), 3860-3870.
- REGULATION (EU) 2024/1252 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 April 2024, establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020
- Norgate, T. & N. Haque, 2010. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production* 18(3): 226–274
- Kuipers, K. J.J., LFCM van Oers, M Verboon, E van der Voet , 2018. Assessing environmental implications associated with global copper demand and supply scenarios from 2010 to 2050. *Global Environmental Change* 49, 106-115
- Nijnsens, J., P. Behrens, O. Kraan, B. Sprecher & R. Kleijn, 2023. Energy transition will require substantially less mining than the current fossil system. *Joule* 7, 2403–2413, November 15, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.10.005>
- PBL Planbureau voor de Leefomgeving, 2025. Integrale Circulaire Economie Rapportage, <https://www.pbl.nl/publicaties/integrale-circulaire-economie-rapportage-2025>
- Voet, E. van der, L. van Oers, M. Verboon & K. Kuipers (2019). Environmental Implications of Demand Scenarios for Metals, Methodology and Application to Seven Major Metals. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1) pp 141-155, DOI: 10.1111/jiec.12722
- UNEP (2011). Recycling Rates of Metals – A Status Report. A Report of the Working Group on Global Metal Flows to the International Resource Panel. Graedel, T.E., Allwood, J., Birat, J.-P., Reck, B.K., Sibley, S.F., Sonnemann, G., Buchert, M. and Hagelüken, C., 2011

Vragen?

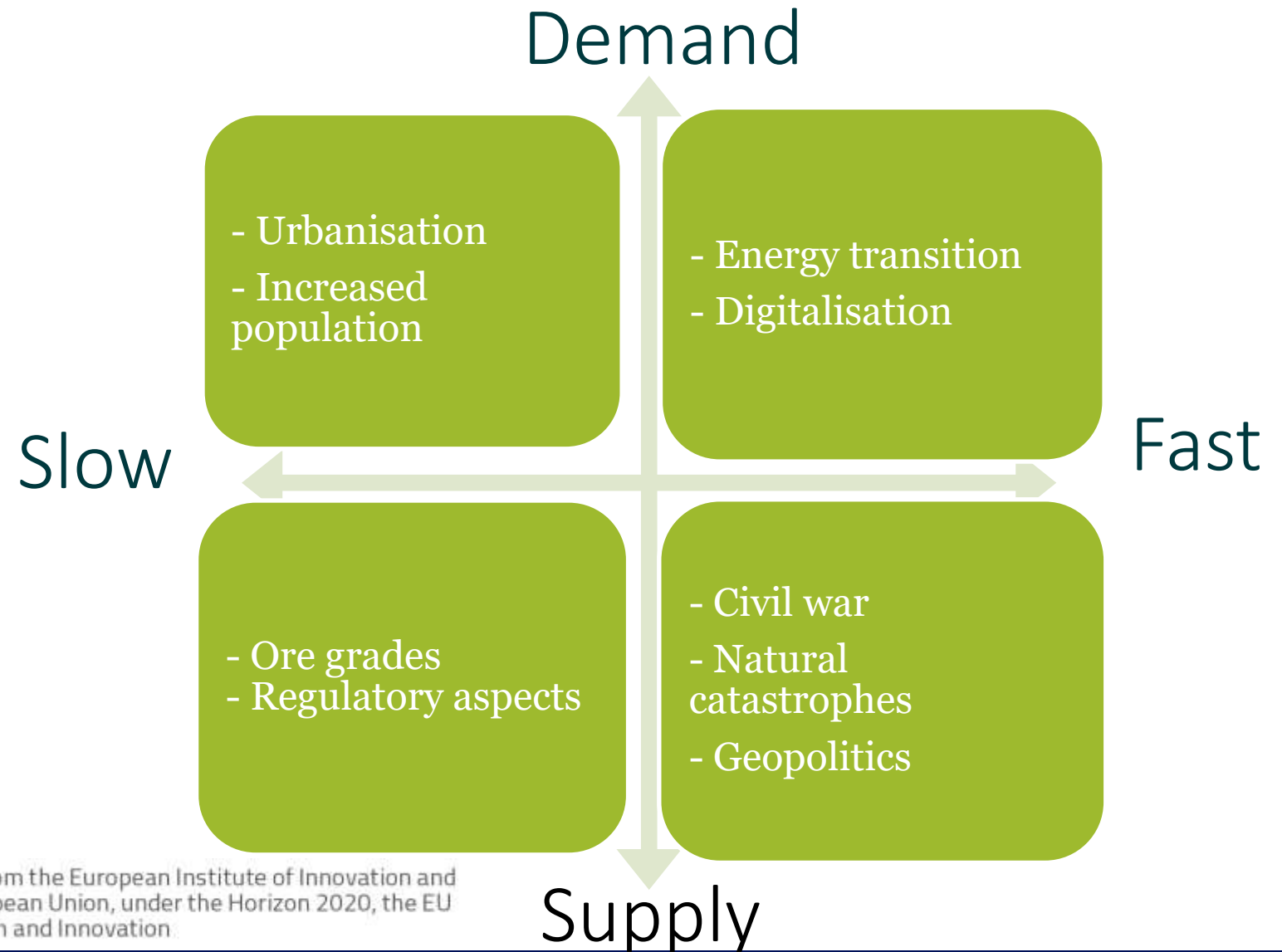
ester.vd.voet@gmail.com



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Conceptual description: four types of disruptions

- Source: Sprecher et al., 2017
- Not “how much is available in the mine”?
But “how quickly can we get our hands on it?”
- Disruption = mismatch between supply and demand



Geological mining vs urban mining

Opening a geological mine:

- exploration: is this site potentially interesting?
- prospecting: how much is in there and in what concentrations?
- mining plan: what is needed to start up the mine? (permits, workers, infrastructure, ..)
- business plan: what will it cost to produce the material out of the ore, and what will be revenues?
- prepare operations
- start operations

How would that work out for urban mining?

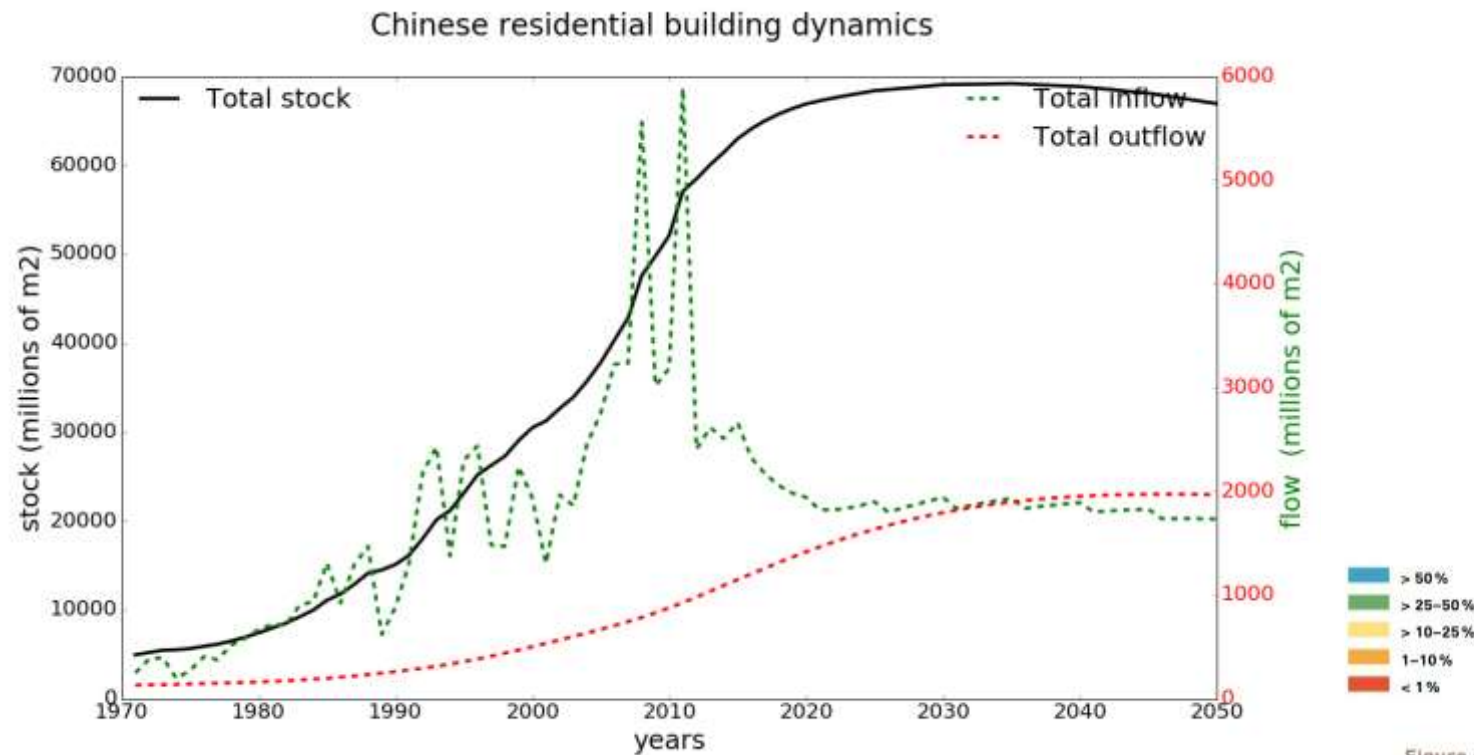
Geological mining vs urban mining

How would that work out for urban mining?

- exploration: the **urban environment** (where the people are)
- prospecting: inventory of most important stocks of **products** and their **dynamics** (products are the ores, when will they become available?)
- mining plan: also really different, set-up of collection and dismantling operations, identification of the “best” way of keeping the materials (out of ALL the re-options, not just recycling), creating markets; partly unclear yet which actors will be involved
- business plan: specification of costs and revenues: in addition to costs of operations, the quality of the secondary product, component or material is important
- prepare and start operations: so far, no large-scale urban mining sector available – maybe take lead from companies like New Horizon and Umicore?

Stock dynamics en recycling rates

- Of: waarom closing the loop in de komende jaren niet voldoende oplevert (maar we het voor de verdere toekomst vooral wel moeten doen)



1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uug	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo

Figure 4.

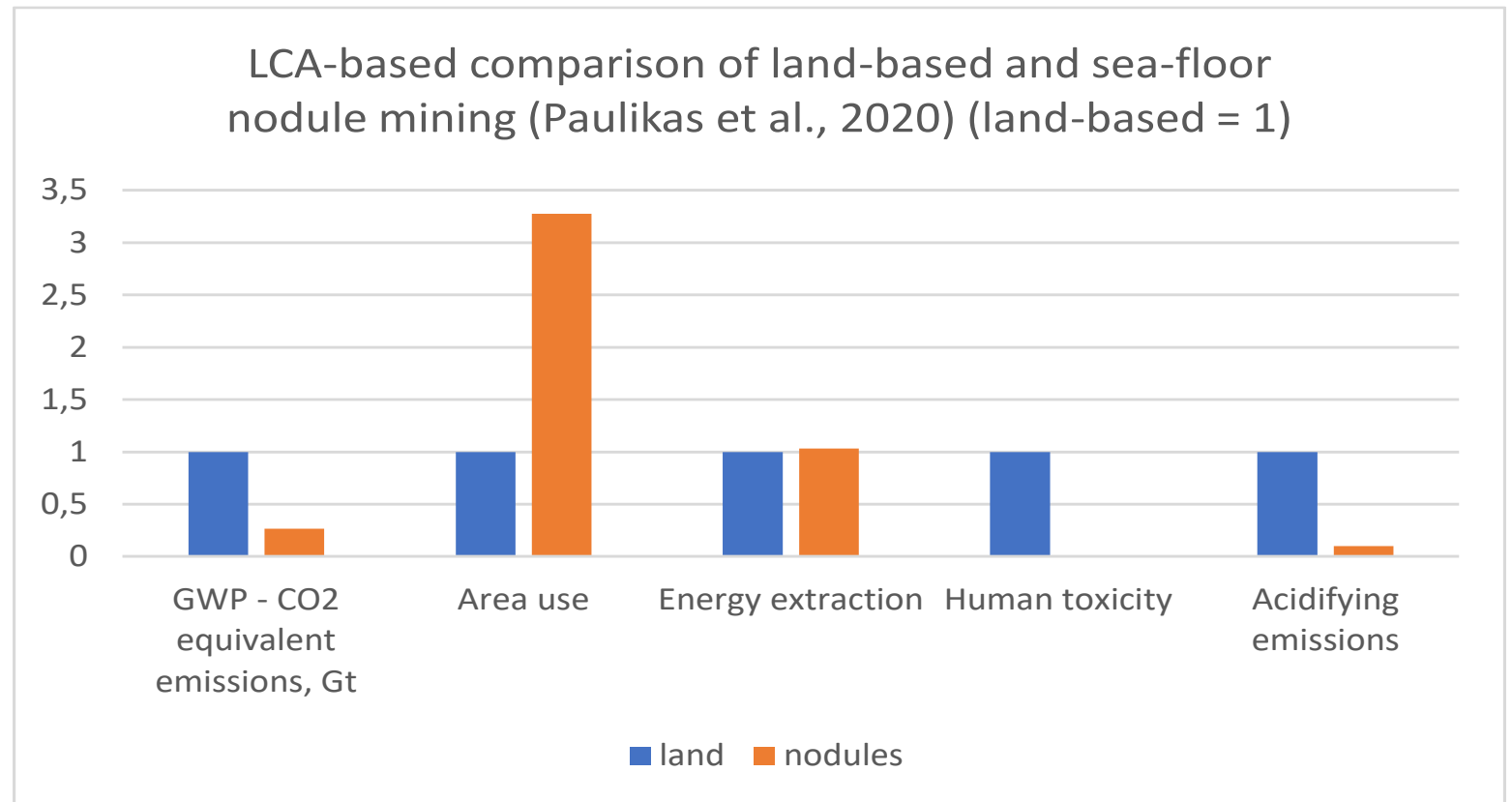
EOL-RR for sixty metals: The periodic table of global average end-of-life (post-consumer) functional recycling (EOL-RR) for sixty metals. Functional recycling is recycling in which the physical and chemical properties that made the material desirable in the first place are retained for subsequent use. Unfilled boxes indicate that no data or estimates are available, or that the element was not addressed as part of this study. These evaluations do not consider metal emissions from coal power plants.

Oplossingen: diepzee-mijnbouw

- Meningen zeer verdeeld, debat polariseert: tijd voor wat “objectieve” kennis?
- Eerste Environmental Life Cycle Assessment (LCA) studies beginnen beschikbaar te komen voor polymetallic nodules
- Vergelijking met mijnbouw op land kan gemaakt worden
- LCA: overzicht van milieu-effecten van de keten van-wieg-tot-graf (cradle to grave)
- Voor materialen / metalen: wieg-tot-poort (cradle-to-gate): geen verschillen in gebruiksfase verondersteld

Diepzee-mijnbouw vs mijnbouw op land

- Verschillende milieu-effecten in kaart, Paulikas et al., 2020 (white paper)
 - Diepzee mijnbouw scoort beter op de meeste impact categories
 - Maar niet op area use
 - Hoe af te wegen???



EU Regulation on CRM: Critical Materials Act

Article 1 Subject matter and objectives

1. The general objective of this Regulation is to improve the functioning of the internal market by establishing a framework to ensure the Union's access to a **secure, resilient and sustainable** supply of critical raw materials, including by fostering **efficiency and circularity** throughout the value chain.
2. To achieve the general objective referred to in paragraph 1, this Regulation lays down measures aiming to:
 - a) lower the risk of supply disruptions related to critical raw materials likely to distort competition and fragment the internal market, in particular by identifying and supporting strategic projects that contribute to lowering dependencies and **diversifying imports** and by undertaking efforts to incentivise **technological progress** and **resource efficiency** in order to moderate the expected increase in the Union consumption of critical raw materials;
 - b) improve the Union's ability to **monitor and mitigate the supply risk** related to critical raw materials;
 - c) ensure the free movement of critical raw materials and products containing critical raw materials placed on the Union market while ensuring a **high level of environmental protection** and sustainability, including by improving their **circularity**.

British Geological Survey

Quote:

“Geologically speaking, the Earth is not short of minerals. Scarcity is typically driven by a combination of factors, such as geopolitical access, the economic viability of extraction, and the technological constraints around our ability to refine and process them.

History suggests that restricted supply but increasing demand creates market opportunities and that supply chains eventually catch up with demand but, in the case of minerals, this can take decades.”

<https://www.bgs.ac.uk/news/demand-for-data-centres-presents-challenges-and-opportunities-for-uk-critical-mineral-supply-chains/>