Analyse van kritieke materialen-gerelateerde risico's van een klimaatneutraal Nederlands energiesysteem

TNO rapport TNO 2025 R12622

December 2025

Auteur: Benjamin Schoemaker

Projectcoördinator: Roald Suurs

TNO

Nederlands Materialen Observatorium

Voorwoord

Deze studie is tot stand gekomen in samenwerking met het Ministerie van Klimaat & Groene Groei (Lieke van Essen en Erika van der Linden) en het Ministerie van Economische Zaken (Stijn Bouwhuis).

De auteur is de volgende personen erkentelijk voor hun bijdrage aan deze studie:

	Bijdrage
Martijn Kamps (TNO)	Opzetten materiaalintensiteit-database
Rebeka Beres (TNO)	Analyse van de resultaten van het OPERA-model om de data voor de geïnstalleerde capaciteit van energiesysteem-assets te leveren
Joost van Stralen (TNO)	Analyse van de resultaten van het OPERA-model om de data voor de geïnstalleerde capaciteit van energiesysteem-assets te leveren
Roald Suurs (TNO)	Review
Ton Bastein (TNO)	Review
Benjamin Sprecher (TU Delft)	Externe review
Sybren Bosch (Copper8)	Externe review

Inleiding

Het opschalen van energietechnologieën zoals windmolens, zonnepanelen en elektrolysers zal **aanzienlijke hoeveelheden kritieke grondstoffen en materialen** vergen. Dit brengt **risico's** met zich mee voor de transitie naar een duurzaam energiesysteem: kritieke materialen zijn schaars en de winning is vaak **geconcentreerd** in een klein aantal landen, wat de **toeleveringsketens kwetsbaar** maakt.

De **risico's verschillen per kritieke grondstof (Critical Raw Material, CRM).** Deze risico's zijn in kaart gebracht door de Europese Commissie. Aan de hand van de risico's geeft de Europese Commissie ruwe grondstoffen een score: de *supply risk* (SR). Hierin worden verschillende elementen meegenomen, zoals schaarste, concentratie, World Governance Index en exportbeperkingen. Daarnaast is een score voor het economisch belang van elk materiaal berekend: de *economic importance* (EI). Omdat we in deze analyse kijken naar een subset van de economie, namelijk het energiesysteem, nemen wij de EI niet mee. Materialen met een supply risk van minstens 1.0 en een economic importance van minstens 2.8 tellen als kritiek (CRM). Sommige materialen, zoals koper en nikkel, voldoen weliswaar niet aan deze grenswaarden maar zijn belangrijk voor de digitale en groene transitie, defensie of de lucht- en ruimtevaart. Deze materialen gelden als *Strategic Raw Materials* (SRM). Zie verder: Europese Commissie (2023).

Ontwerpkeuzes in het energiesysteem kunnen de algehele CRM-gerelateerde risico's beïnvloeden, omdat elke technologie zijn eigen specifieke CRM-gerelateerde risico's met zich meebrengt.

In 2026 wordt het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) geactualiseerd. Het Ministerie van KGG wil in dit kader graag weten hoe CRM-gerelateerde risico's verschillen per energiesysteemscenario, zodat deze risico's meegenomen kunnen worden in de te maken keuzes t.a.v. het energiesysteem in het NPE.

De TNO-studie *Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050* schetst twee scenario's voor het toekomstig energiesysteem: ADAPT en TRANSFORM. Met behulp van het OPERA-model wordt in beide scenario's het meest kostenoptimale energiesysteemontwerp gevonden, terwijl de klimaatdoelen worden gehaald. Deze scenario's gebruiken we als leidraad in deze studie.

De onderzoeksvraag van deze studie luidt: *Welke implicaties hebben de energiesysteemscenario's ADAPT en TRANSFORM voor de vraag naar kritieke materialen (CRM's) en CRM-gerelateerde risico's?*

Deze studie is een eerste aanzet om afhankelijkheden van CRM's te laten meewegen in beleidskeuzes rondom het ontwerp van het toekomstig energiesysteem.

Scenario's ADAPT & TRANSFORM in het kort

De TNO-studie *Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050* (Scheepers et al., 2024) schetst een kostenoptimaal ontwerp voor het toekomstige energiesysteem dat voldoet aan de gestelde klimaatdoelen met behulp van het optimalisatiemodel OPERA. Dit doet het op basis van twee scenario's, ADAPT en TRANSFORM, twee verschillende narratieven voor de ontwikkeling van de economische structuur en het gedrag van burgers in de toekomst. Hieronder volgt een korte beschrijving van beide narratieven. In deze twee scenario's ziet de ontwikkeling van capaciteiten van assets in het energiesysteem er anders uit; dit staat op de volgende slide.

ADAPT

- Geen aanpassing in levensstijl
- Behoud huidige economische structuur, beperkte verandering in industrie
- Energiebehoefte neemt toe
- Fossiele brandstoffen blijven gebruikt worden en fossiele grondstoffen worden niet verduurzaamd, grotere rol voor CCS

TRANSFORM

- Aanpassing in levensstijl (minder vliegen en vleesconsumptie) en veel energiebesparing. Lagere energiebehoefte dan in ADAPT
- Toepassing nieuwe en innovatieve technologieën in industrie
- Internationale lucht- en scheepvaart nemen vergaande emissiereductiemaatregelen, brandstoffen volledig duurzaam
- Grotere aanpassingen in het energiesysteem, grotere elektriciteitsvraag (en dus meer hernieuwbaar)
- Beperkt CCS
- Totale systeemkosten lager

Geïnstalleerde capaciteit assets energiesysteem OPERA

				ADAPT			TRANSFORM		
		Unit	2022	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Elektriciteits-productie	Kolen	GW	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Aardgas	GW	18.9	12.7	15.5	0.0	9.5	11.2	4.5
	Wind op land	GW	6.2	7.8	7.8	7.8	7.8	10.0	12.0
	Wind op zee	GW	2.6	16.0	36.0	40.0	16.0	45.0	70.0
	Zon PV	GW	19.6	36.6	68.6	109.0	42.9	83.6	132.1
	Kernenergie	GW	0.5	0.5	4.0	4.8	0.5	4.0	5.2
	Biomassa	GW	0.3	0.7	12.5	18.8	1.0	8.7	15.5
	Waterstofcentrales[1)]	GW	0	0	0.6	6.5	0	6.0	6.6
CO_2-afvang	CCS	$MtCO_2$/jaar	[4)]	12.7	31.1	40.0	12.0	12.7	15.0
	CCU[2)]	$MtCO_2$/jaar	[2)]	2.4	2.8	10.3	3.3	16.0	20.5
Batterijen	Pb-batterij	GWh	[4)]	0.3	0.4	0.0	0.3	0.4	0.0
	NiCd-batterij	GWh	[4)]	0.4	0.7	0.0	0.4	0.7	0.0
	NaS-batterij	GWh	[4)]	0.4	0.5	0.0	0.4	0.5	0.0
	Li-ion batterij	GWh	[4)]	0.9	31.0	97.6	0.7	34.0	99.2
	VRB-batterij	GWh	[4)]	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
	Li-ion-batterij elektrische voertuigen	GWh	[5)]	126.4	796.4	869.9	118.9	708.4	747.3
	Elektrolyse[3)]	GW	[4)]	2.2	9.0	14.4	2.0	17.9	20.4
	Warmtepompen	GW	[4)]	14.3	36.4	49.9	13.7	16.7	52.1
	Warmtekrachtkoppeling (WKK) gas	GW	[4)]	6.3	0.4	0.0	7.4	2.9	0.4
	Geothermie	GW	[4)]	0.8	4.0	7.0	0.7	4.2	7.9

Voor voetnoten: zie annex.

Multi-criteria analyseraamwerk

We beoordelen de CRM-gerelateerde risico's van twee verschillende energiesysteemscenario's (ADAPT en TRANSFORM) aan de hand van de volgende criteria:

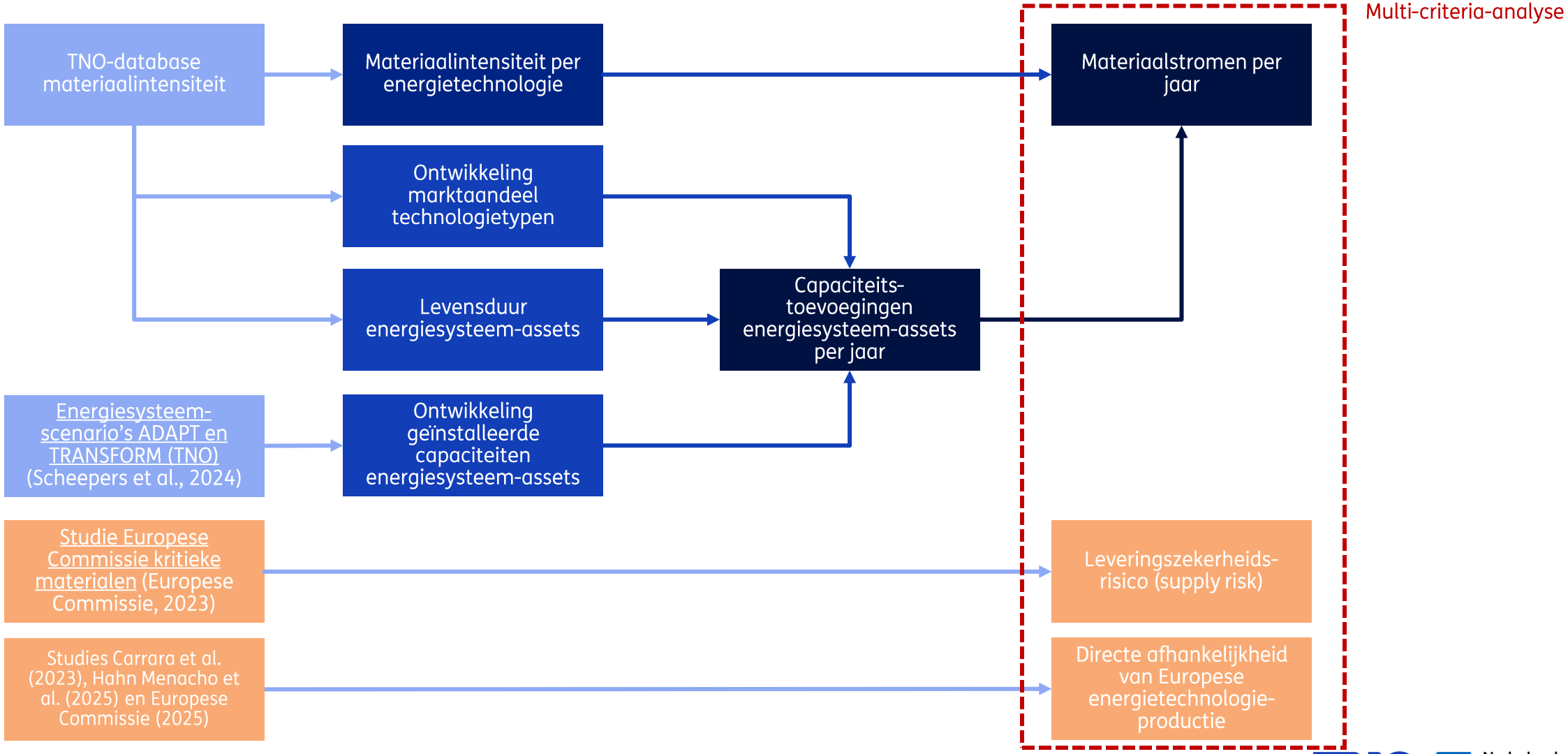
Criterium	Uitleg	Hoe beoordelen
Verhouding grondstoffenvraag t.o.v. mondiaal aanbod	Hoe verhouden de benodigde CRM-volumes zich tot de wereldwijde productie?	Jaarlijkse volumes gedeeld door de huidige jaarlijkse wereldwijde productie (materiaalstromen-analyse): kwantitatieve data-analyse/modellering
Leveringszekerheidsrisico	Wat is het risico op verstoring van de levering van een bepaald materiaal naar de EU?	Supply risk (Europese Commissie, 2023)
Directe afhankelijkheid van de Europese energietechnologie-productie	De mate waarin Europese producenten CRM's of SRM's als directe input nodig hebben, hangt af van in welke mate componenten voor energietechnologieën in Europa worden gemaakt of erbuiten. Als componenten die deze grondstoffen vereisen voor een belangrijk deel in Europa worden geproduceerd, is er een directe afhankelijkheid van ruwe grondstoffen. Worden componenten vooral geïmporteerd, dan verschuift de afhankelijkheid van Europese energietechnologie-productie van grondstoffen naar het niveau van componenten. In dat geval is er sprake van een indirecte afhankelijkheid in plaats van een directe.	Analyse op basis van Carrara et al. (2023), die voor elk onderdeel van de productieketens van energietechnologieën hebben geanalyseerd welk percentage van de productie in Europa plaatsvindt

Analyse grondstoffenvraag energiesysteem

De materiaalintensiteit van het energiesysteem kan op verschillende manieren beoordeeld worden. In deze analyse richten we ons op de kritieke-materialenstromen.

Indicator	Uitleg
Materiaalstromen	Hoeveelheden van (kritieke) materialen die jaarlijks nodig zijn voor de aanbouw/vervanging van energiesysteem-assets
Cumulatieve hoeveelheid kritieke materialen	Cumulatieve hoeveelheid kritieke materialen die over de duur van meerdere jaren nodig is voor de aanbouw/vervanging van energiesysteem-assets
Voorraad kritieke materialen	Hoeveelheid kritieke materialen die alle geïnstalleerde energiesysteem-assets gezamenlijk bevatten

Visualisatie methodologie



Toelichting op volgende slides.

Toelichting methodologie (1/5)

Materiaalstromen-analyse. Om tot een materiaalstromen-analyse van het energiesysteem te komen hebben we resultaten uit de TNO-scenariostudie*Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050* (Scheepers et al., 2024) van geïnstalleerde capaciteiten van windmolens, zonnepanelen, etc. gecombineerd met een (in ontwikkeling zijnde) TNO-database van materiaalintensiteit van een breed scala aan technologieën. Materiaalintensiteit zit momenteel niet in Integrated Assessment Models zoals het OPERA-model waarmee TNO haar energiesysteemstudies uitvoert. Deze analyse is een eerste stap tot het leggen van de koppeling tussen scenariogebaseerde geïnstalleerde capaciteit van energiesysteem-assets met materiaalintensiteit.

De berekening gaat als volgt. Voor meer details, zie de annex.

- Eerst worden de **capaciteitstoevoegingen voor de energiesysteem-assets per jaar** berekend voor de assets binnen de scope (zie volgende slide). Dit doen we op basis van de OPERA-scenarioprojecties van de **geïnstalleerde capaciteiten van energiesysteem-assets** en de **ontwikkeling van het marktaandeel per technologietype** en **levensduur per energiesysteem-assets**, data die afkomstig is uit de TNO-materiaalintensiteit-database.
- Vervolgens wordt de **jaarlijkse materiaalstroom** berekend voor elke CRM en SRM op basis van de **capaciteitstoevoegingen voor de energiesysteem-assets per jaar** en de **materiaalintensiteit per technologie** uit de database.
- Deze jaarlijkse materiaalstroom wordt gedeeld op de **huidige wereldwijde productie** per CRM en SRM (data afkomstig uit de SCRREEN factsheets). Dit levert de **jaarlijkse materiaalstroom als percentage van de huidige wereldwijde productie** op.

Voor deze berekening zijn de volgende aannames gemaakt (zie volgende slide voor de laatste bullet):

- **Gelijkblijvende materiaalintensiteit** per technologie; in werkelijkheid kan materiaalintensiteit natuurlijk veranderen door innovaties, zie bijv. recente ontwikkelingen rond iridium-intensiteit elektrolysers. Echter, dit soort data voor alle technologieën en materialen zijn op dit moment niet beschikbaar in de database.
- **Dynamisch marktaandeel**. De database bevat wel projecties van de ontwikkeling van het marktdeel van sub-technologieën over de tijd, gebaseerd op verschillende literatuurbronnen (met name Schlichenmaier & Naegler, 2022). Denk bijvoorbeeld aan een groeiend marktaandeel van PEM-elektrolysers, in verhouding tot de nu dominante alkaline-elektrolysers. Deze ontwikkelingen hebben we wel meegenomen in de materiaalstromen-analyse.
- **Simpele aanname vervangingsvraag**: assets aan het eind van hun levensduur worden allemaal tegelijk vervangen.

Toelichting methodologie (2/5)

- **Geïnstalleerde capaciteiten energiesysteem-assets**:
  - OPERA-data beslaat de jaren 2022, 2030, 2040 en 2050. Voor de jaren van 1998-2022 maken we gebruik van historische data (CBS, 2025). Voor de jaren 1990-1998 maken we gebruik van lineaire interpolatie. Dit is van belang voor de vervangingsvraag die in de toekomst zal optreden voor energietechnologieën die vóór 2022 geïnstalleerd zijn.
  - Voor de technologieën batterijopslag, elektrolysers, warmtepompen, geothermie, CCS zijn geen eenduidige historische data beschikbaar; we nemen aan dat deze technologieën pas ingroeien vanaf 2020. Voor elektrische voertuigen (EV's) nemen we aan dat deze ingroeien vanaf 2010 (zie ook de Annex *Voetnoten geïnstalleerde capaciteiten OPERA*).
  - OPERA werkt met 10-jaarlijkse intervallen: we nemen aan dat capaciteiten van energiesysteem-assets lineair toenemen in deze intervallen.

In het schema rechts wordt een overzicht gegeven van de energiesysteem-assets die binnen en buiten scope zijn. Groen betekent in scope, rood buiten scope en oranje voorlopig niet meegenomen.

- Energie-infrastructuur is niet meegenomen want de data tussen OPERA-resultaten en de materiaalintensiteit-database zijn niet consistent.
- Waterstofcentrales voor elektriciteitsproductie zijn niet opgenomen in de TNO-materiaalintensiteitdatabase.
- Hydropower & solar CSP: niet relevant voor Nederland.
- CV-ketels en fuel cells (brandstofcellen): voor nu niet meegenomen wegens prioritering.

Asset	
Battery | Stationary	Gas power plant
Battery | EVs	Gas infrastructure
Bioenergy plant	Geothermal
CCS	Heat pumps
Central heating boilers	Hydropower
CHP (warmtekrachtkoppeling)	Hydrogen plant
Coal power plant	Nuclear
Electricity grid	Solar PV panels
Electrolyser	Solar CSP
Fuel cell	Wind|Offshore
	Wind|Onshore

Toelichting methodologie (3/5)

Zoals aangegeven moet deze analyse gezien worden als een eerste stap tot het leggen van de koppeling tussen scenariogebaseerde geïnstalleerde capaciteit van energiesysteem-assets met materiaalintensiteit. Hierin liggen nog verschillende uitdagingen:

- De data uit de OPERA-resultaten zijn niet altijd eenduidig te combineren met de TNO-materiaalintensiteitdatabase. Dit vraagt om het doen van aannames. Zo worden de sub-technologieën (zoals bijvoorbeeld typen batterijen) anders onderverdeeld; daarom was het doen van een “mapping” van OPERA-gegevens op de materiaalintensiteitdatabase nodig.
- De TNO-materiaalintensiteitdatabase is nog volop in ontwikkeling en zal naar verwachting in Q1 2026 opgeleverd worden. De database bevat namelijk data uit een groot aantal databronnen, veelal wetenschappelijke artikelen. In deze analyse hebben we de database niet gevalideerd en hebben we niet in detail gekeken naar onderliggende databronnen voor materiaalintensiteit. Bovendien verschilt de omvang van de data per technologie: zo zijn er voor wind- en zonne-energie veel data beschikbaar, maar zijn data voor bijvoorbeeld kernenergie en CCS beperkter beschikbaar. Indien er grote variatie bestaat tussen de informatie uit verschillende databronnen voor dezelfde waarde (bijv. de hoeveelheid neodymium per GW windenergie) zijn outliers eruit gehaald en is het gemiddelde genomen van de materiaalintensiteit volgend uit de resterende bronnen.

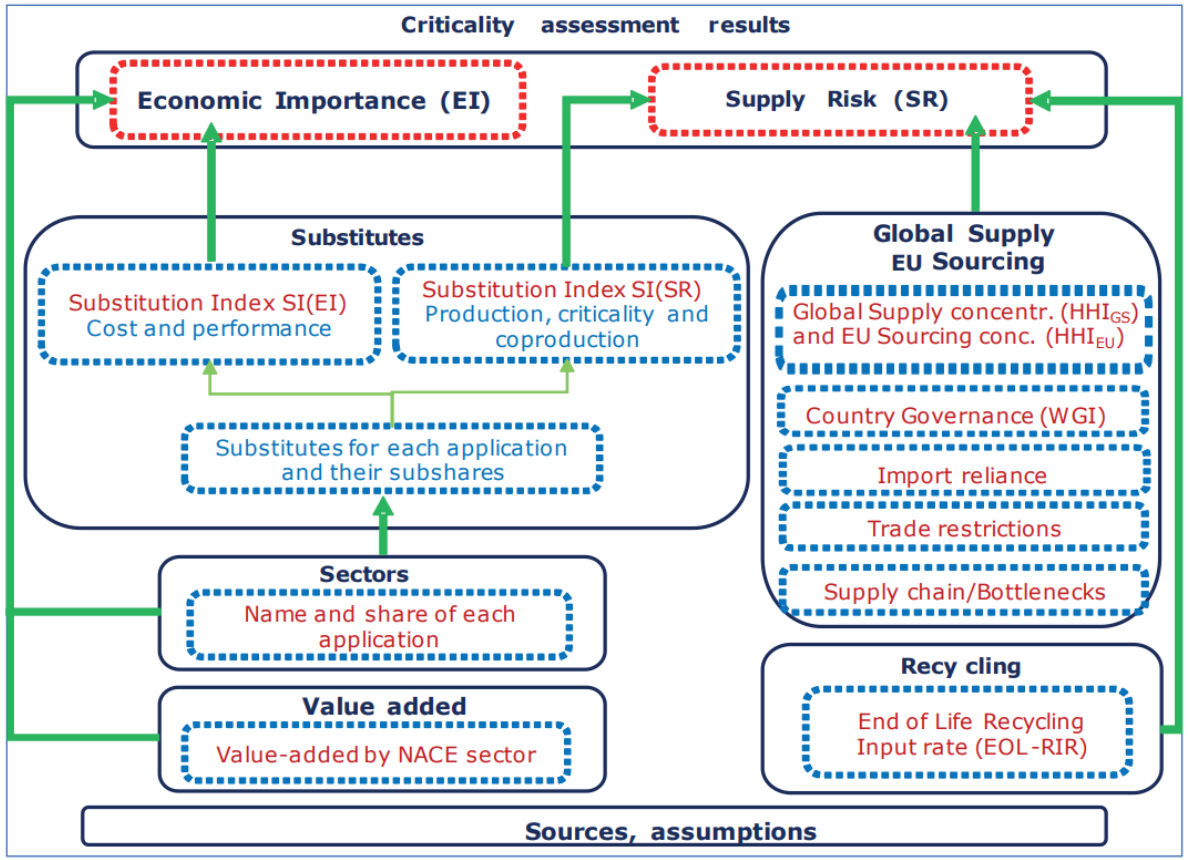
Toelichting methodologie (4/5)

Supply Risk (SR). *Supply Risk* (SR) en *Economic Importance* (EI) worden berekend door de Europese Commissie per materiaal en bepalen of een materiaal als *Critical Raw Material* (CRM) telt.

Indien de SR en EI voor een materiaal beide groter zijn dan 1, is het materiaal een CRM. Belangrijke uitzonderingen zijn koper en nikkel: deze materialen vallen onder de drempelwaardes voor CRM's maar worden toch van zulk groot belang geacht dat ze wel als *Strategic Raw Material* (SRM) tellen; SRM's zijn materialen die van belang zijn voor de digitale en groene transitie, defensie en lucht- en ruimtevaart. Sommige CRM's tellen ook als SRM's.

Zie de afbeelding rechts voor een illustratie van de factoren die in de SR en EI worden meegenomen. Zie Europese Commissie (2023) voor verdere toelichting.

In deze analyse maken we gebruik van de Supply Risk (SR) om het leveringszekerheidsrisco te beoordelen. Deze scores nemen we rechtstreeks over van de JRC. De Economic Importance (EI) nemen we niet mee in onze analyse omdat we immers naar een subset van de economie kijken, namelijk het energiesysteem.



Bron afbeelding: Europese Commissie (2023)

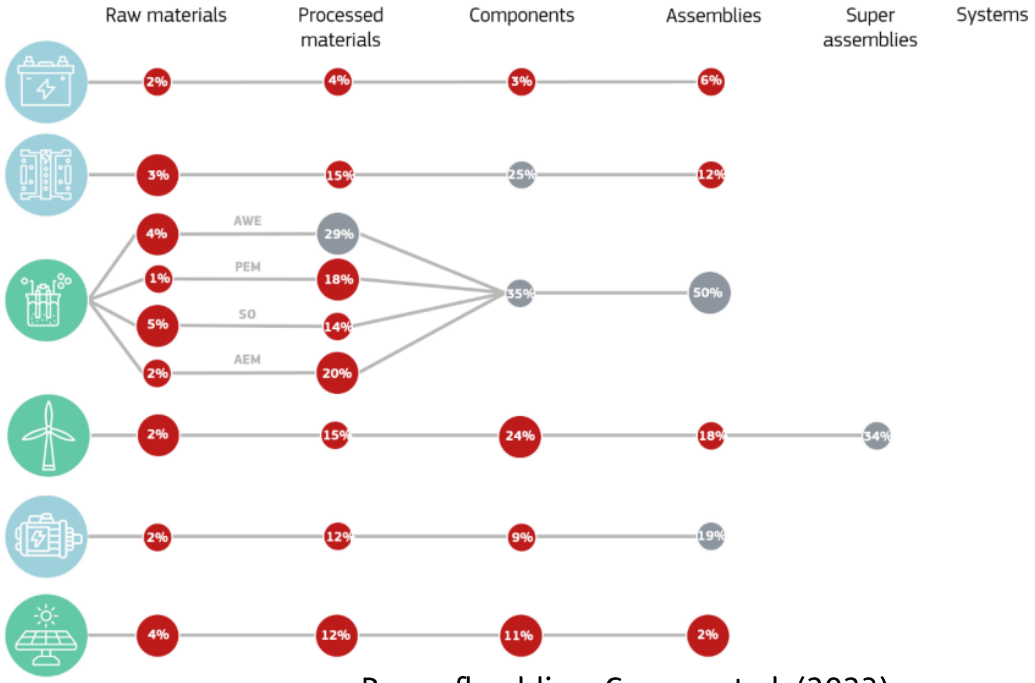
Toelichting methodologie (5/5)

Directe afhankelijkheid van de Europese energietechnologieproductie. De materiaalstromen-analyse houdt alleen rekening met de geïnstalleerde capaciteit van energietechnologieën in Nederland en houdt geen rekening met de vraag of een technologie in Nederland, in Europa of elders ter wereld wordt geproduceerd. In dit deel van de analyse plaatsen we de materiaalstromen in perspectief van hoe de wereldwijde toeleveringsketens voor energietechnologieën opgebouwd en geografisch verdeeld zijn.

Of een zonnepaneel nou in Nederland of elders wordt geproduceerd, levert in de materiaalstromenanalyse dezelfde stromen op voor de benodigde ruwe grondstoffen. Waar de productie van technologieën plaatsvindt bepaalt of Nederland en Europa CRM's of SRM's nodig heeft als directe input voor productie op eigen grondgebied. We beoordelen de directe afhankelijkheid van de Europese productie van een kritieke grondstof op een vijfpuntsschaal: zeer hoog - hoog – enige mate – laag – zeer laag.

Deze analyse doen we op basis van de studies van Carrara et al. (2023), Hahn Menacho et al. (2025) en Europese Commissie (2025), waarin is onderzocht welk deel van de wereldwijde productie van bepaalde technologieën plaatsvindt in Europa, per onderdeel van de toeleveringsketen. Zie de afbeelding rechts. Vergelijk bijvoorbeeld de productieketens voor windmolens versus zonnepanelen. Voor windturbines worden 24% van de componenten in Europa geproduceerd en een nog groter deel van de (super)assemblages; de directe afhankelijkheid van de Europese energietechnologie-productie is dus *zeer hoog*. Voor zonnepanelen vindt de productie 11% van de componenten plaats in Europa. Echter, maar 2% van de productie van assemblages vindt in Europa plaats. De Europese energietechnologie-productie is dus *laag*.

Figure 3. Identified supply risks for the EU and EU share of global production volumes



Bron afbeelding: Carrara et al. (2023)

We voeren deze analyse expliciet uit op het niveau van ruwe grondstoffen. Deze scope heeft implicaties voor de beoordeling. Ter illustratie: NdFeB-magneten die nodig zijn voor bijvoorbeeld windmolens en warmtepompen vereisen zeldzame aardmetalen zoals neodymium en dysprosium. Echter, deze magneten worden voor 98% geïmporteerd uit China. De afhankelijkheid van de Europese energietechnologie-productie zit hem dus niet in de ruwe grondstoffen zelf, als wel in de componenten. Er is dus weliswaar een hoge *indirecte* afhankelijkheid van de Europese energietechnologie-productie van neodymium en dysprosium. De *directe* afhankelijkheid wordt daarentegen beoordeeld als laag. Deze grondstoffen worden immers ook alleen voor NdFeB-magneten gebruikt en niet voor andere toepassingen. Echter, indien de EU besluit haar eigen productiecapaciteit voor NdFeB-magneten op te bouwen, zijn deze ruwe grondstoffen wel essentieel als directe input. Weistra (2025) heeft de afhankelijkheid van Europese productieketens breder onderzocht dan alleen de ruwe grondstoffen en bijvoorbeeld ook naar verwerkte materialen en componenten gekeken.

Resultaten multi-criteria-analyse

In de volgende slides presenteren we de resultaten van de multi-criteria-analyse. Eerst laten we zien welke materialen we in de analyse meenemen (op basis van beschikbaarheid in de database en relevantie voor het energiesysteem). We beschouwen alleen materialen die door de JRC als CRM of SRM zijn geclassificeerd. Vanwege het grote aantal materialen hebben we de resultaten voor de materialen uitgespreid over meerdere grafieken; de materialen zijn gegroepeerd op basis van de ordegrootte van de relatieve volumestromen.

Voor de subsets aan materialen presenteren we telkens eerst de grafieken met de materialenstromen. Daarna volgt een slide met nadere informatie en een analyse van de directe afhankelijkheid van de Europese energietechnologie-productie. Hieronder zijn de bronnen weergegeven die voor de verschillende elementen van de tabel zijn gebruikt.

Wereldwijde productie [ton]	Supply risk	Toepassing in energiesysteem	Directe afhankelijkheid van de Europese energietechnologie-productie
SCRREEN factsheets. Factsheets van 2025 indien beschikbaar, anders 2023.	Europese Commissie (2023)	Materiaalintensiteit-database (TNO), Carrara et al. (2023)	Analyse op basis van Carrara et al. (2023), Hahn Menacho et al. (2025) en Europese Commissie (2025) (voor kernenergie)

CRM's en SRM's in het energiesysteem

Niet alle CRM's en SRM's zoals vastgesteld door de Europese Commissie zijn meegenomen. Sommige zijn niet relevant voor het energiesysteem (volgens zowel de TNO-materiaalintensiteidatabase als Carrara et al., 2023). Daarnaast zijn sommige materialen niet in de TNO-materiaalintensiteitdatabase opgenomen. Volgens Carrara et al. (2023) worden magnesium, gadolinium, rhodium en bariet gebruikt in elektrolysers en arseen in zonnepanelen; echter, dit komt niet naar voren uit de TNO-materiaalintensiteitdatabase. De hoeveelheden van andere materialen zijn dan weer zeer klein; deze zijn uit de analyse gelaten ten behoeve van de overzichtelijkheid en bondigheid. Hieronder een overzicht op basis van de lijst CRM's en SRM's van de JRC (we hanteren hier de Engelse benamingen).

Aluminium	Europium (HREE)	Lutetium (HREE)*	Samarium (LREE)
Antimony	Feldspar*	Magnesium	Scandium
Arsenic	Fluorspar**	Manganese	Silicon Metal
Baryt	Gadolinium (HREE)	Neodymium (LREE)	Strontium
Beryllium	Gallium	Nickel	Tantalum
Bismuth	Germanium	Niobium	Terbium (HREE)
Boron/borate	Natural graphite	Palladium (PGM)	Thulium (HREE)*
Cerium (LREE)	Hafnium	Phosphate rock	Titanium Metal
Cobalt	Helium	Phosphorus	Tungsten
Coking coal*	Holmium (HREE)	Platinum (PGM)	Vanadium
Copper	Iridium (PGM)	Praseodymium (LREE)	Ytterbium (HREE)
Dysprosium (HREE)	Lanthanum (LREE)	Rhodium (PGM)	Yttrium (HREE)
Erbium (HREE)	Lithium	Ruthenium (PGM)	

Legenda

- Relevant voor het energiesysteem
- Niet relevant voor het energiesysteem
- Volgens Carrara et al. (2023) wel relevant, maar volgens database niet gebruikt in energiesysteem
- Relevant, maar (relatieve) hoeveelheden zijn zeer klein
- Niet opgenomen in de database
- *I* Strategic raw material (SRM)

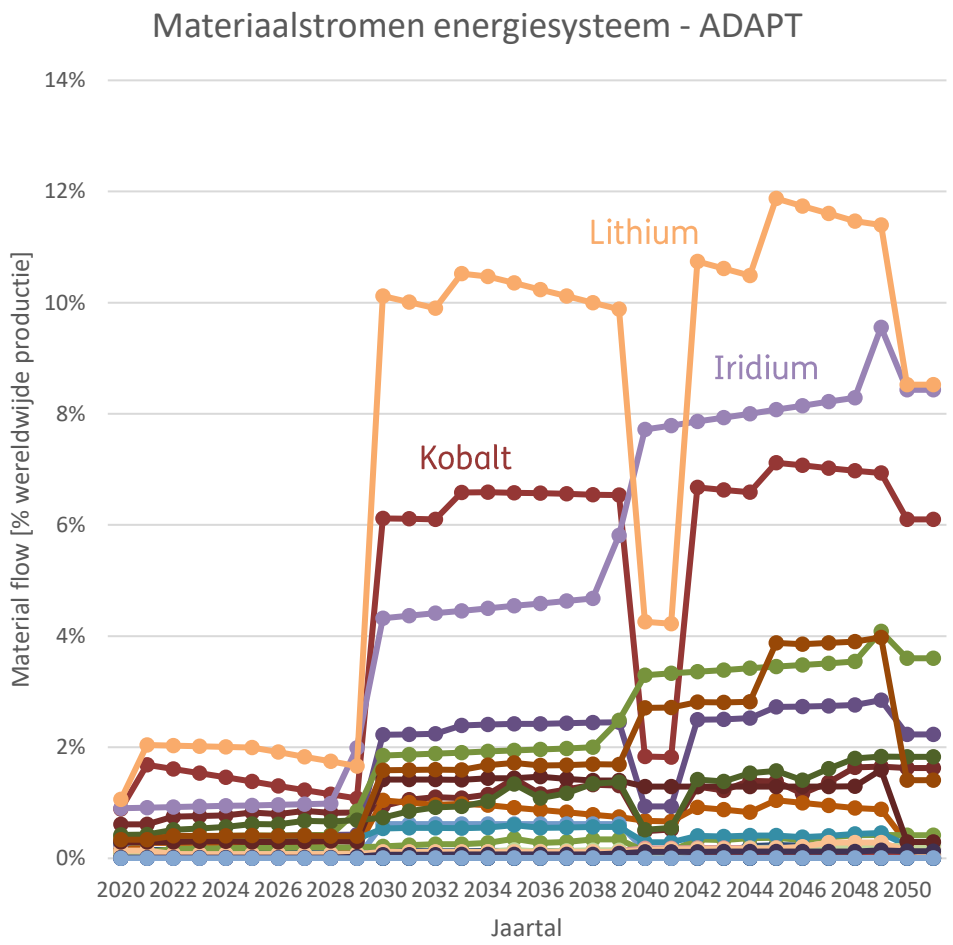
* Volgens Carrara et al. (2023) worden deze materialen niet gebruikt in energietechnologieën.

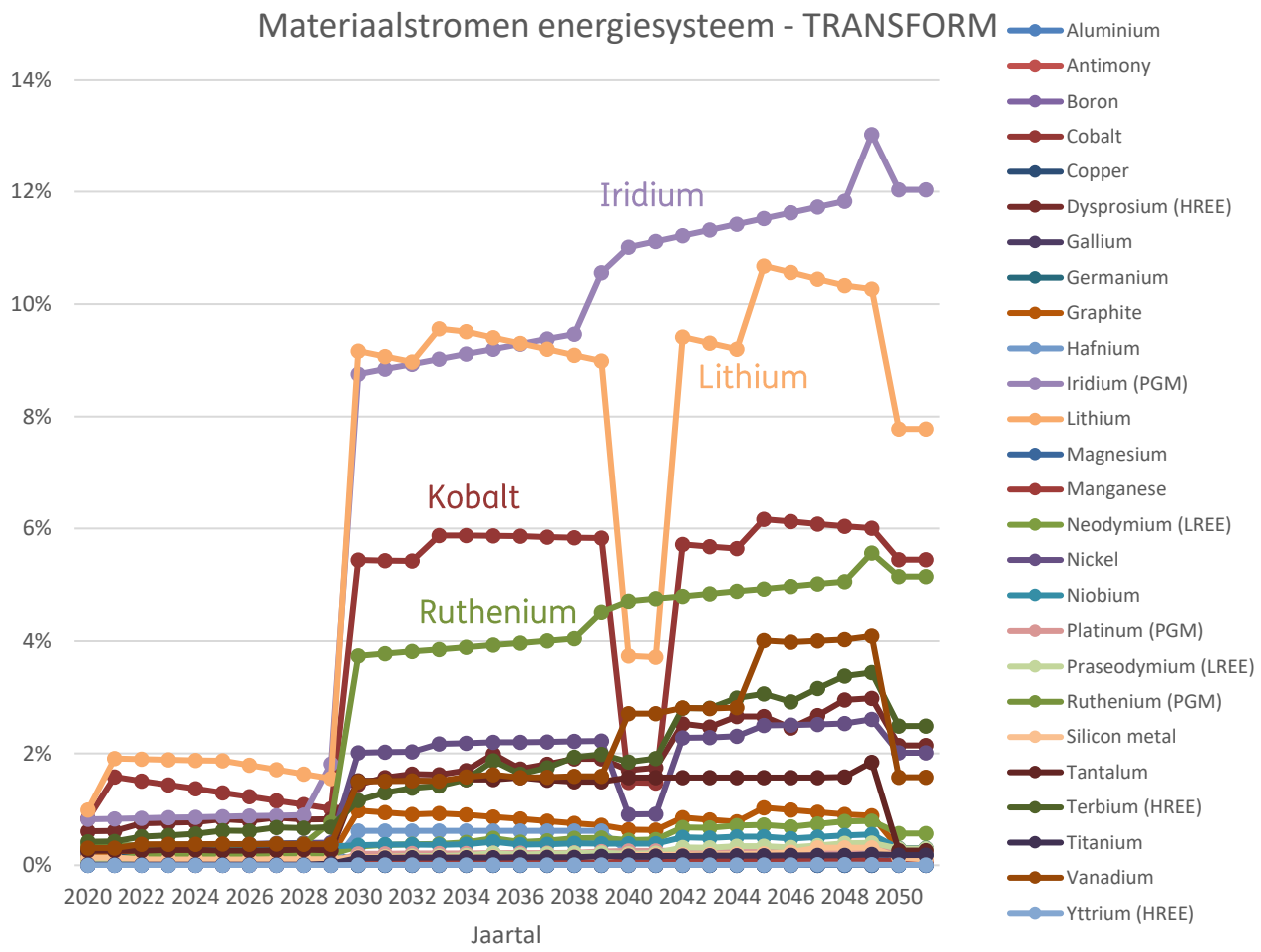
** Volgens Carrara et al. (2023) wordt fluorspar gebruikt in zonnepanelen en warmtepompen; echter, dit materiaal is niet opgenomen in de database.

TNO Nederlands Materialen Observatorium

Materiaalstromen (alle CRM's en SRM's)

Hieronder worden de materiaalstromen getoond in de scenario's ADAPT en TRANSFORM als percentage van de wereldwijde productie per materiaal.

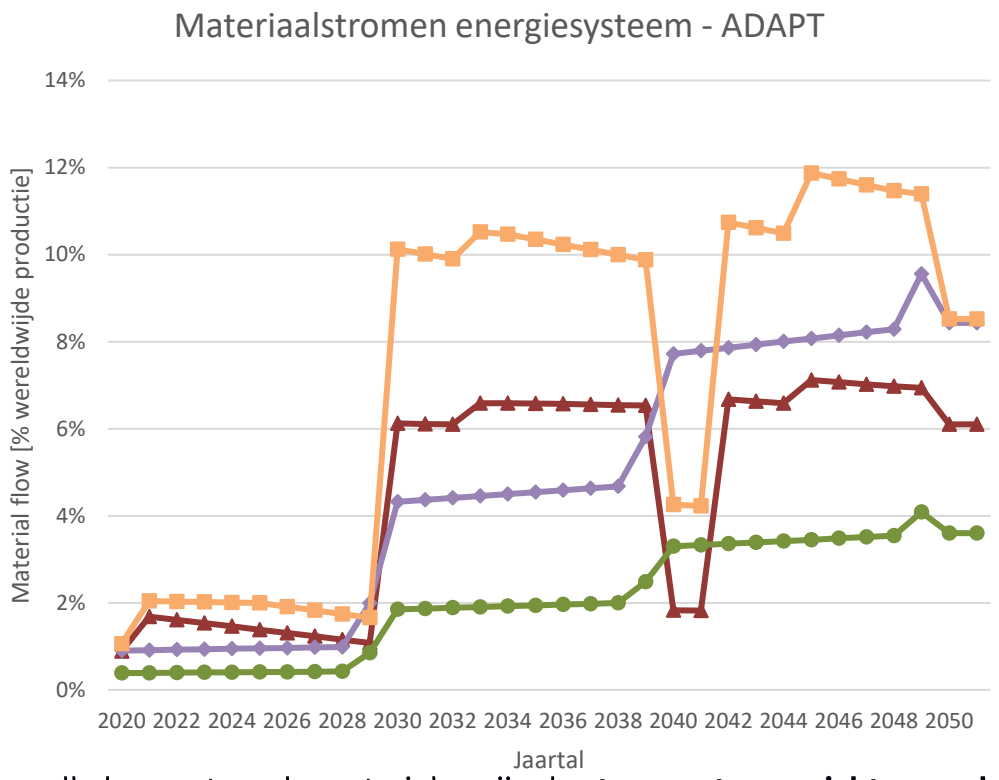


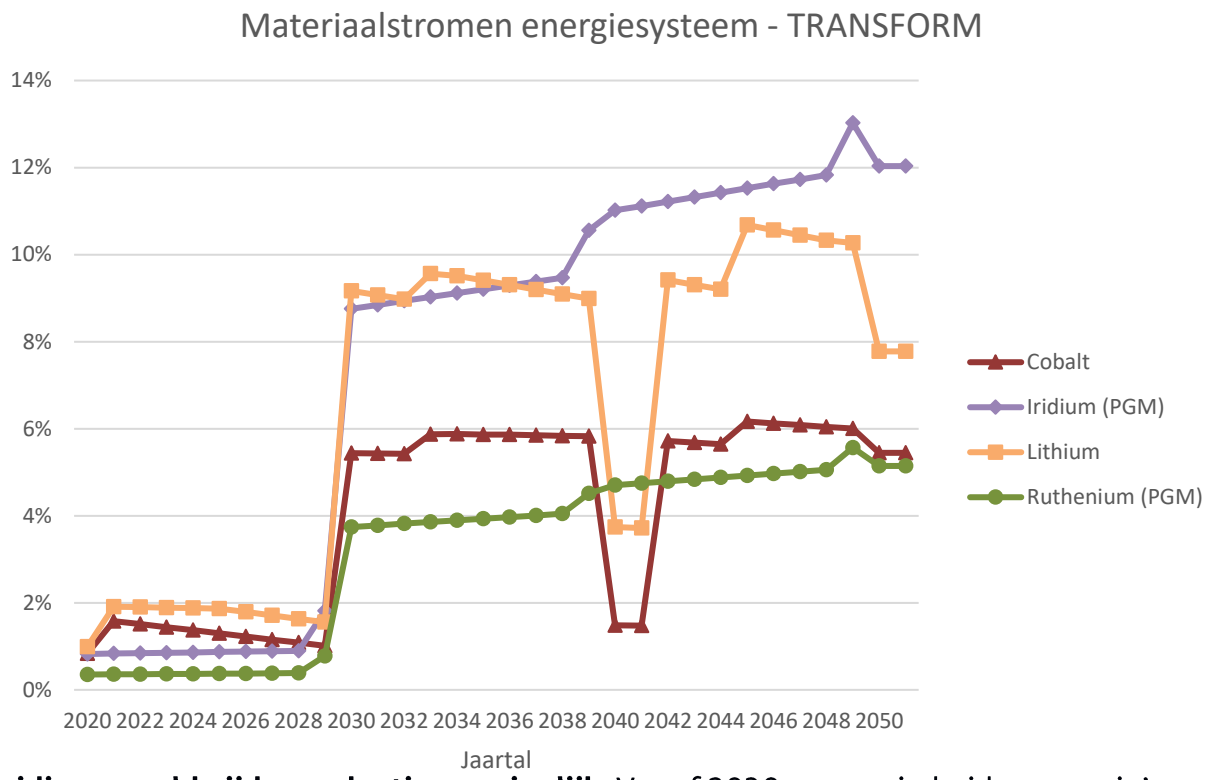


Multi-criteria-analyse Co, Ir, Li, Ru

Materiaal	Wereld-wijde productie [ton]	Supply risk	Toelichting supply risk	Toepassing in energiesysteem	Directe afhankelijkheid van de Europese energietechnologie-productie	Toelichting directe afhankelijkheid
Kobalt	151 875	2.8	EU 81% afhankelijk van import, grootste producent DR Congo (63%), EoL-RIR 22%	AEL- en SOE-elektrolysers (elektrodes), gasturbines (legeringselement in constructie), windturbines (permanente magneten, tandwielkast)	Hoog	Componenten voor elektrolysers (waaronder elektrodes) worden voor 35% in Europa gemaakt. Kobalt is hiervoor van belang. NdFeB worden 98% geïmporteerd uit China, maar kobalt is mogelijk wel nodig voor het maken van tandwielkasten in Europa; 24% van de componenten voor windmolens worden in Europa gemaakt.
Iridium (PGM)	8.3	3.9	EU 99% afhankelijk van import, grootste producent is Zuid-Afrika (93%), EoL-RIR 12% (alle PGM's)	PEM-elektrolyser (katalysator)	Hoog	Componenten voor elektrolysers (waaronder elektrodes) worden voor 35% in Europa gemaakt. Het is hier goed op te merken dat deze waardeketen *emergent* is maar op dit moment nog nauwelijks bestaat; de materiaalstromen zijn gebaseerd op projecties. De onzekerheid rond werkelijke materiaalstromen is onzekerder dan voor andere technologieën.
Lithium	122 535	1.9	EU 100% afhankelijk van import, grootste producent is China (56%), EoL-RIR 13% (alle PGM's)	Li-ion batterijen	Zeer laag	Europa speelt slechts een kleine rol in de toeleveringsketen voor batterijen wereldwijd; over de hele keten heen (van grondstoffen tot assemblages) vindt slechts 2-6% in Europa plaats.
Ruthenium (PGM)	11	3.8	EU 100% afhankelijk van import, grootste producent is Zuid-Afrika (94%), EoL-RIR 12% (alle PGM's)	PEM-elektrolyser (elektrodes)	Hoog	Groot deel van de *emergente* waardeketen voor elektrolysers vindt in Europa plaats.

Materiaalstromen Co, Ir, Li, Ru





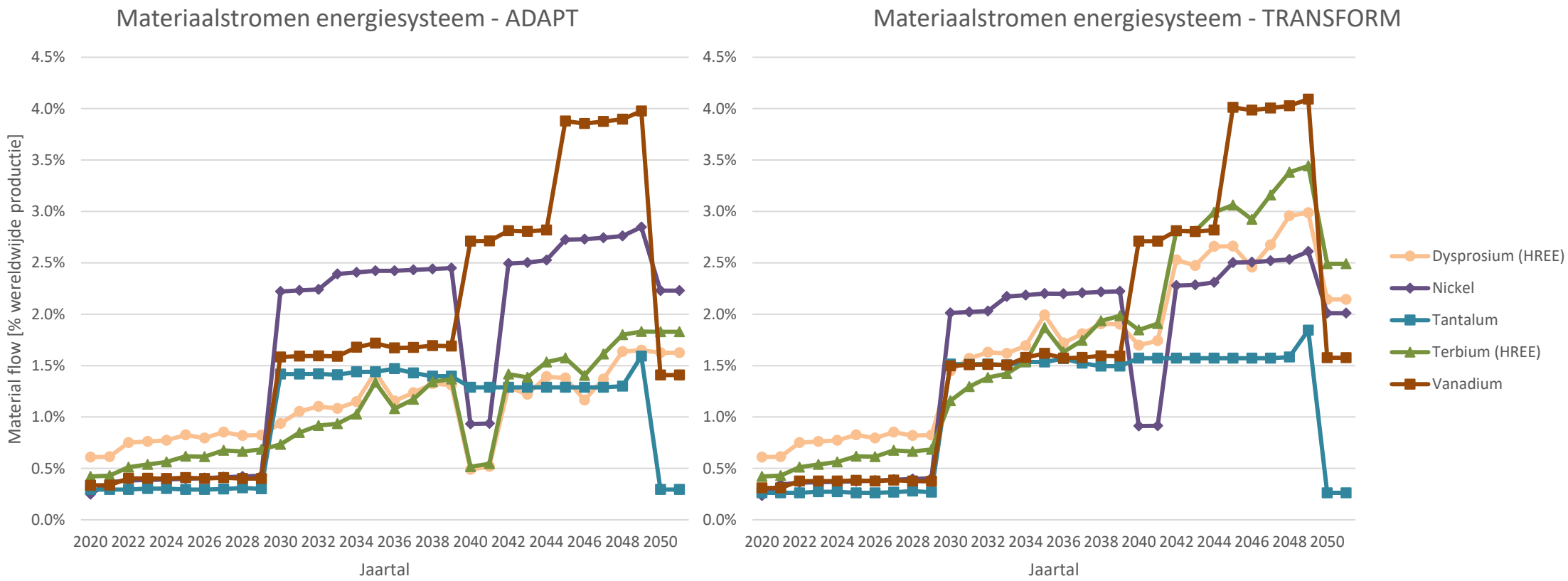
Voor alle bovenstaande materialen zijn de **stromen ten opzichte van de huidige wereldwijde productie aanzienlijk**. Vanaf 2030 nemen in beide scenario's de stromen aanzienlijk toe vanwege het hogere opschalingstempo van verschillende energiesysteem-assets. De **daling in de lithium- en kobaltstromen in 2040 en 2041** kan worden verklaard doordat het **aantal elektrische voertuigen (EV's) tussen 2040 en 2050 minder snel toeneemt** dan tussen 2030 en 2040. Vanaf 2042 nemen de materiaalstromen weer toe doordat EV-batterijen worden vervangen (de aangenomen levensduur van EV-batterijen op basis van verschillende literatuurbronnen is 12 jaar). De **lithiumstromen liggen lager in TRANSFORM dan in ADAPT** vanwege het kleinere aantal EV's. Ook de **kobaltstroom is iets lager in TRANSFORM**: weliswaar is er meer kobalt nodig door het hoger aantal elektrolysers maar tegelijkertijd minder kobalt door het kleinere aantal EV's en de aanvankelijk snellere afbouw van gasturbines ten opzichte van ADAPT (in TRANSFORM blijft er uiteindelijk wel 4.5 GW aan gascentrales opgesteld staan in 2050, terwijl de gascentralecapaciteit in ADAPT wordt afgebouwd naar 0). Daarentegen zijn de **iridium- en rutheniumstromen groter** vanwege het hogere aantal elektrolysers in TRANSFORM.

Multi-criteria-analyse Dy, Ni, Ta, Tb, V

Materiaal	Wereld-wijde productie [ton]	Supply risk	Toelichting supply risk	Toepassing in energiesysteem	Directe afhankelijkheid van de Europese energietechnologie-productie	Toelichting directe afhankelijkheid
Dysprosium (HREE)	708	5.6	EU 100% afhankelijk van import, grootste producent is China (84%), EoL-RIR 0%	Windturbines en warmtepompen (NdFeB-magneten)	Laag	NdFeB-magneten worden voor 98% geïmporteerd uit China; Europese productie heeft daardoor een lage directe afhankelijkheid van Dy.
Nickel	2 827 358	0.5	EU 75% afhankelijk van import, grootste producent is China (33%), EoL-RIR 16%	Batterijen, elektrolysers (elektrodes, poreuze transportlaag, bipolaire platen), zonnepanelen (voor electroplating en als constructiemateriaal), legeringselement in verschillende energietechnologieën zoals windturbines en CCS	Zeer hoog	Nikkel is van belang voor de componenten voor windmolens en elektrolysers, die voor een groot deel (24% respectievelijk 35%)in Europa geproduceerd worden. Aangezien de productie van componenten voor zonnepanelen en batterijen slechts voor een klein deel in Europa plaatsvindt, zijn deze productieketens minder kwetsbaar.
Tantalum	1501	1.3	EU 99% afhankelijk van import, grootste producent is DR Congo (35%), EoL-RIR 0%	Geothermie, A-USC gasturbines	Onbekend	Tantaal wordt vooral gebruikt in condensatoren en legeringen. Onduidelijk hoe dit precies zit voor componenten in de geothermie en A-USC gasturbines en welke productie in Europa plaatsvindt.
Terbium (HREE)	182	4.9	EU 100% afhankelijk van import, grootste leverancier aan EU is China (64%), EoL-RIR 6%	Windturbines (NdFeB-magneten)	Laag	NdFeB-magneten worden voor 98% geïmporteerd uit China; Europese productie heeft daardoor een lage direct afhankelijkheid van Tb.
Vanadium	45 774	2.3	Importafhankelijkheid EU onbekend, grootste producent China (62%), EoL-RIR 1%	Elektrolyt in vanadium-redox-flowbatterijen (VRFB's), legeringselement voor staal (in o.a. windturbines en CCS), elektrolysers (elektrodes)*	Zeer hoog	Terwijl de batterijproductieketen voor een groot deel buiten Europa plaatsvindt, wordt een substantieel deel van de componenten voor windturbines en elektrolysers wel in Europa geproduceerd.

* Volgens Carrara et al. (2023) wordt vanadium gebruikt als materiaal in elektrodes voor elektrolysers. Dit komt echter niet naar voren uit de TNO-materiaalintensiteitdatabase.

Materiaalstromen Dy, Ni, Ta, Tb, V



Ook voor deze materialen zijn de voor het energiesysteem benodigde stromen aanzienlijk, met percentages tussen de 0.7% en 4.1% van de wereldwijde productie. **In TRANSFORM zijn de dysprosium- en terbiumstromen hoger** dan in ADAPT vanwege de grotere windenergie-capaciteit. Ook nemen deze stromen in TRANSFORM na 2040 sneller toe vanwege het hogere opschalingstempo van windenergie. De **vanadiumstroom is in ADAPT en TRANSFORM vrijwel gelijk**; er is in TRANSFORM weliswaar meer vanadium nodig als legeringselement voor staal in windturbines, tegelijkertijd is er minder vanadium nodig vanwege de lagere CCS-capaciteit. Dit zorgt voor een lagere vraag voor vanadium als staal-legeringselement. Ook zijn er geen vanadium-redox-flowbatterijen (VRFB's) in het energiesysteem in TRANSFORM. Eenzelfde "uitruil" zien we voor nikkel, waarvan de stromen iets lager liggen in TRANSFORM: er is ten opzichte van ADAPT meer nikkel nodig door de grotere capaciteit windturbines en elektrolysers, maar minder door de lagere capaciteit EV-batterijen en CCS.

Multi-criteria-analyse Cu, nat. graphite, Hf, Nd, Nb (1/2)

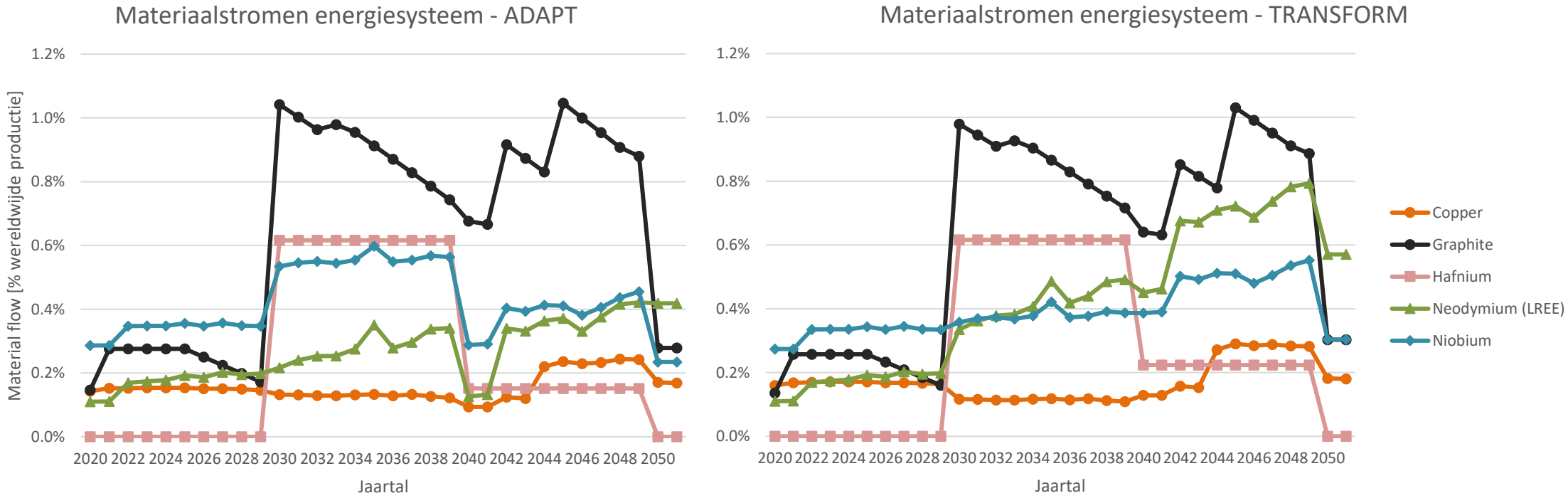
Materiaal	Wereld-wijde productie [ton]	Supply risk	Toelichting supply risk	Toepassing in energiesysteem	Directe afhankelijkheid van de Europese energietechnologie -productie	Toelichting directe afhankelijkheid
Copper	25 479 677	0.1	EU 48% afhankelijk van import, grootste producenten Chili (28%) en Peru (12%), EoL-RIR 55%	Bijna alle energietechnologieën (bekabeling, omvormers, regelsystemen, leidingen, warmtewisselaars, etc.) en in het elektriciteitsnet	Zeer hoog	Componenten voor windmolens en elektrolysers worden voor een substantieel deel in Europa zelf geproduceerd. Componenten voor het elektriciteitsnet vermoedelijk ook.*
Natural graphite	1 609 871	1.8	EU 99% afhankelijk van import, grootste producent is China (67%), EoL-RIR 3%	Batterijen (elektrodes) en AEL, PEM- en AEM-elektrolysers (elektrodes, scheidings- en bipolaire platen)	Hoog	Batterij-elektrodes worden voor het overgrote deel niet in Europa geproduceerd, maar componenten voor elektrolysers wel.
Hafnium	28	1.5	EU is een exporteur, Frankrijk is de grootste wereldwijde producent (76%), EoL-RIR 0%	Kernenergie (regelstaven)	Waarschijnlijk hoog	Het is onduidelijk hoe de productieketen voor regelstaven er op dit moment uitziet. Getuige de inzet van de Europese Commissie en verschillende lidstaten op kernenergie zal waarschijnlijk ook de Europese productie van regelstaven belangrijk worden.
Neodymium (LREE)	26845	4.5	EU 100% afhankelijk van import, grootste producent China (68%), EoL-RIR 1%	Windturbines (NdFeB-magneten)	Laag	NdFeB-magneten worden voor 98% geïmporteerd uit China; Europese productie heeft daardoor een lage directe afhankelijkheid van Nd.
Niobium	47710	4.4	EU 100% afhankelijk van import, grootste producenten Brazilië (89%) en Canada (11%), EoL-RIR 0%	Kleine hoeveelheden als legeringselement voor staal in verschillende energietechnologieën.	Onduidelijk; waarschijnlijk enige mate	Onduidelijk is voor welk deel de productie van dit staal in Europa plaatsvindt per technologie. Voor windturbines wordt bijv. 12% van verwerkte materialen in Europa gemaakt, exacte data voor staal nog niet bekend

Multi-criteria-analyse Cu, nat. graphite, Hf, Nd, Nb (2/2)

* Koper is ook nodig voor componenten van het elektriciteitsnet, zoals kabels en transformatoren. Hoewel het elektriciteitsnet buiten beschouwing is gelaten in deze materiaalstromenanalyse, hebben Nohl et al. (2025) een analyse uitgevoerd van de materiaalvraag van geplande elektriciteitsnetuitbreidingen. Volgens de analyse komt de koperbehoefte in 2030 uit op 15.7% van de totale huidige koperconsumptie in de EU (gewonnen koperconcentraat) en 32% van EU-koperproductie.

In welke mate elektriciteitsnet-componenten (kabels en transformatoren) in Europa worden geproduceerd is in deze studie niet uitgezocht, maar Butorac (2025) en Papaioannou et al. (2025) wijzen op een significante Europese productiesector voor deze componenten. Het elektriciteitsnet is in de EU Net-Zero Industry Act tevens aangeduid als strategische sector en deze wetstekst onderschrijft de “noodzaak van veerkrachtige en effectieve toeleveringsketens voor de productie van het elektriciteitsnet”. Daarom is de inschatting dat koper als ruw materiaal voor de Europese maakindustrie nodig gaat zijn (Butorac, 2025).

Materiaalstromen Cu, nat. graphite, Hf, Nd, Nb

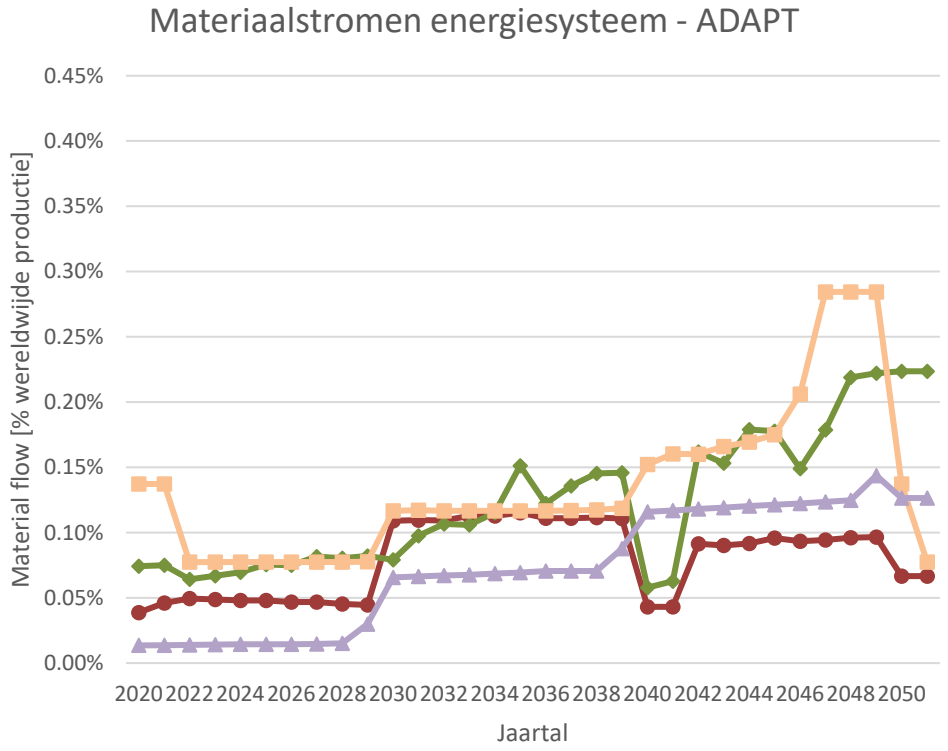


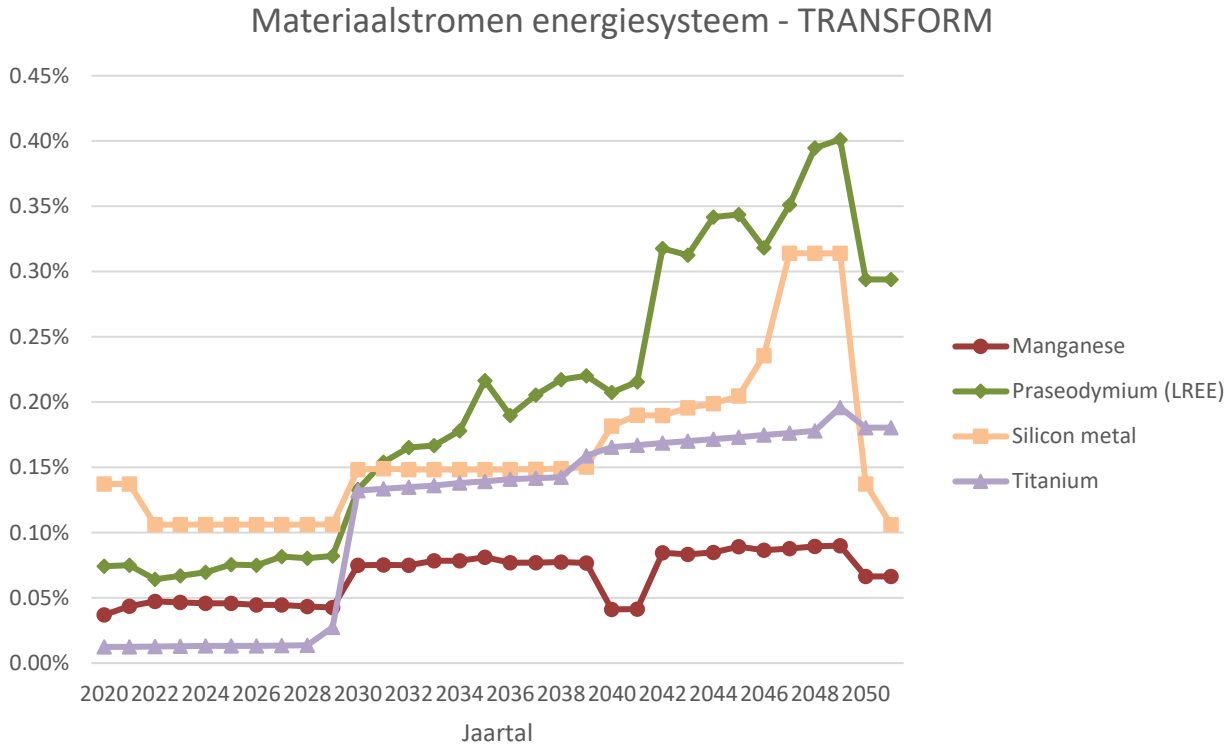
De **materiaalstromen voor neodymium liggen consistent hoger in TRANSFORM**; dit heeft te maken met de hogere windenergiecapaciteit én de snellere toename van de windenergiecapaciteit na 2040 ten opzichte van ADAPT.
Opvallend is dat de **materiaalstromen voor koper in ADAPT en TRANSFORM nagenoeg hetzelfde** zijn. Klaarblijkelijk wordt de hogere vraag naar koper door de grotere capaciteit wind- en zonne-energie, elektrolysers en warmtepompen in TRANSFORM gecompenseerd door de lagere vraag door de kleinere capaciteit gascentrales, CCS en WKK. De **niobiumstroom ligt tot 2040 lager in TRANSFORM**; er is weliswaar meer niobium nodig als legeringselement voor staal in windturbines maar tegelijkertijd minder voor staal in gascentrales, CCS en WKK. Echter, **na 2040 neemt de niobium-stroom in TRANSFORM toe tot een hoger niveau dan in ADAPT**. Dit heeft wederom te maken met de snellere ontwikkeling van de geïnstalleerde capaciteit windenergie in TRANSFORM. De **stroom van natuurlijk grafiet is nagenoeg hetzelfde in beide scenario's**; er is in TRANSFORM weliswaar minder nodig vanwege de kleinere capaciteit EV-batterijen maar tegelijkertijd meer vanwege het hogere aantal elektrolysers.
De **hafnium-stroom is tot 2040 hetzelfde in beide scenario's** omdat de kernenergie-capaciteit in 2040 in beide scenario's hetzelfde is. Echter, de kernenergie-capaciteit is hoger in 2050 in TRANSFORM; vandaar de **hogere hafnium-stroom na 2040**.

Multi-criteria-analyse Mn, Pr, Si, Ti

Materiaal	Wereld-wijde productie [ton]	Supply risk	Toelichting supply risk	Toepassing in energiesysteem	Directe afhankelijkheid van de Europese energietechnologie-productie	Toelichting directe afhankelijkheid
Manganese	13 988 346	1.2	EU 96% afhankelijk van import, grootste producenten Zuid-Afrika (29%) en Australië (16%), EoL-RIR 9%	Legeringselement in staal voor verschillende energietechnologieën, batterijen en elektrolysers (elektrodes)	Hoog	De productie van elektrolysercomponenten vindt voor een substantieel deel in Europa plaats, waar batterijcomponenten grotendeels buiten Europa worden geproduceerd.
Praseodymium (LREE)	6860	3.2	EU 100% afhankelijk van import, grootste producent is China (85%), EoL-RIR 10%	SOE yttrium elektrolysers, windturbines (NdFeB-magneten)	Enige mate	Het toekomstig marktaandeel van SOE yttrium-elektrolysers, is onzeker.
Silicon metal	3 425 422	1.4	EU 64% afhankelijk van import, grootste producent China (76%), EoL-RIR 0%	Zonnepanelen (halfgeleiders), legeringselement in staal voor verschillende energietechnologieën, siliconen in windturbine- en elektrolyser-onderdelen	Zeer hoog	De productie van componenten voor windenergie en elektrolysers vindt voor een substantieel deel in Europa plaats; voor zonnepanelen is dit niet aan de orde.
Titanium	255 990	0.5	EU 100% afhankelijk van import, grootste producenten zijn China (25%), Zuid-Afrika (13%) en Australië (12%), EoL-RIR 19%	Verschillende toepassingen in het energiesysteem, met name in elektrolysers (o.a. scheidingsplaten, current collectors, bipolaire platen, poreuze transportlaag)	Hoog	Elektrolysercomponenten worden voor een groot deel in Europa gemaakt.

Materiaalstromen Mn, Pr, Si, Ti



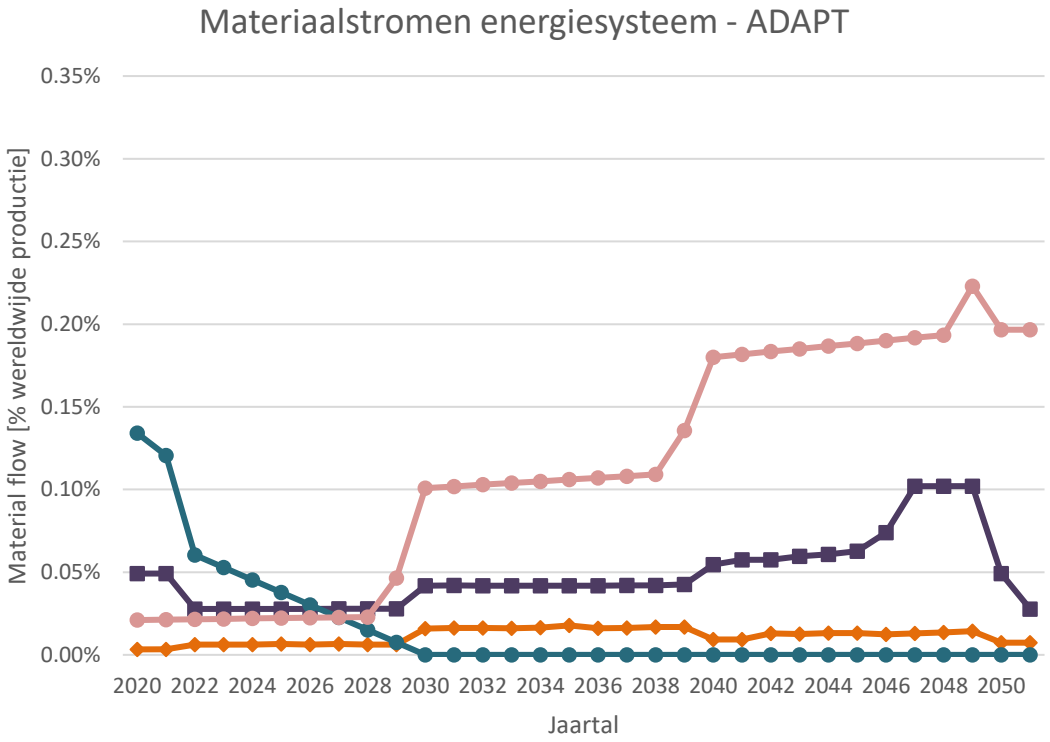


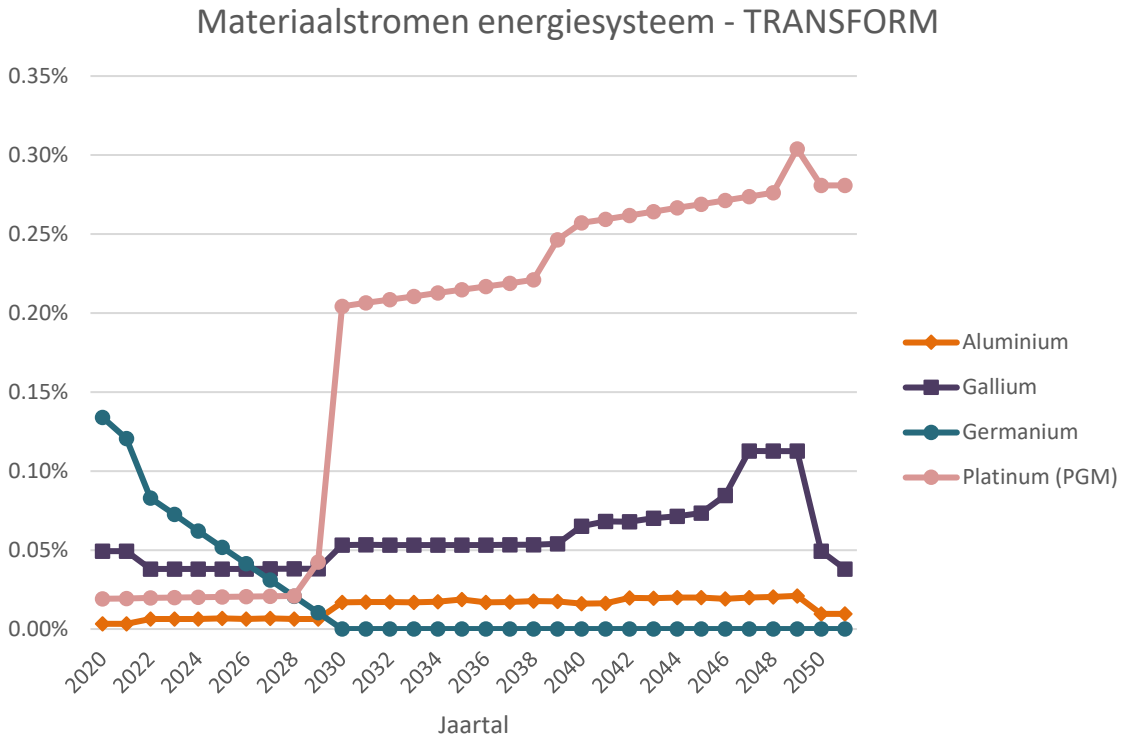
Voor de materialen **mangaan, platinum, praseodymium en siliciummetaal zien wij dat relatief kleine materiaalstromen** (<0.40% van de huidige wereldwijde productie) benodigd zijn voor het energiesysteem. Voor **mangaan en siliciummetaal** is de observatie dat **er is naar deze materialen enerzijds meer vraag** door de hogere capaciteiten van windenergie, zonne-energie, warmtepompen en elektrolysers maar **anderzijds minder vraag** door lagere capaciteiten van CCS, gascentrales en WKK in TRANSFORM ten opzichte van ADAPT. Voor mangaan leidt zelfs tot lagere stromen in TRANSFORM (tot 2040, daarna zijn de stromen nagenoeg van dezelfde grootte als in ADAPT), waar de stroom voor siliciummetaal iets hoger uitvalt. De **praseodymium-stroom is in TRANSFORM beduidend hoger** door de grotere vraag vanuit windenergie; deze neemt na 2040 ook sneller toe door het hogere opschalingstempo van windenergie. In TRANSFORM is er ook een **hogere materiaalstroom van titanium** te zien. Dit komt doordat er meer elektrolysers in het energiesysteem zijn.

Multi-criteria-analyse Al, Ga, Ge, Pt

Materiaal	Wereld-wijde productie [ton]	Supply risk	Toelichting supply risk	Toepassing in energiesysteem	Directe afhankelijkheid van de Europese energietechnologie-productie	Toelichting directe afhankelijkheid
Aluminium	62 734 647	1.2	EU 55% afhankelijk van import, grootste producenten (bauxietwinning) Australië (28%) en China (21%), EoL-RIR 32%	Wordt gebruikt als constructiemateriaal in bijna alle energietechnologieën	Zeer hoog	De componenten voor windturbines en elektrolysers worden voor een groot deel in Europa geproduceerd. Voor warmtepompen is onduidelijk welke componenten in Europa worden gemaakt.
Gallium	488	3.9	EU 98% afhankelijk van import, grootste producent is China (94%), EoL-RIR 0%	CIGS-zonnepanelen (kleine hoeveelheden in absorptielaag)	Zeer laag	De zonnepanelen-productieketen bevindt zich voor het overgrote deel niet in Europa.
Germanium	135	1.8	EU 42% afhankelijk van import, grootste producent is China (90%), EoL-RIR 2%	a-Si & GaAs zonnepanelen (kleine hoeveelheden in wafers)	Zeer laag	De zonnepanelen-productieketen bevindt zich voor het overgrote deel niet in Europa.
Platinum (PGM)	142	2.1	EU 99% afhankelijk van import, grootste producent is Zuid-Afrika (71%), EoL-RIR 12% (alle PGM's)	AEL- & PEM-elektrolysers	Hoog	De productie van elektrolyser-componenten vindt voor een groot deel in Europa plaats.

Materiaalstromen Al, Ga, Ge, Pt





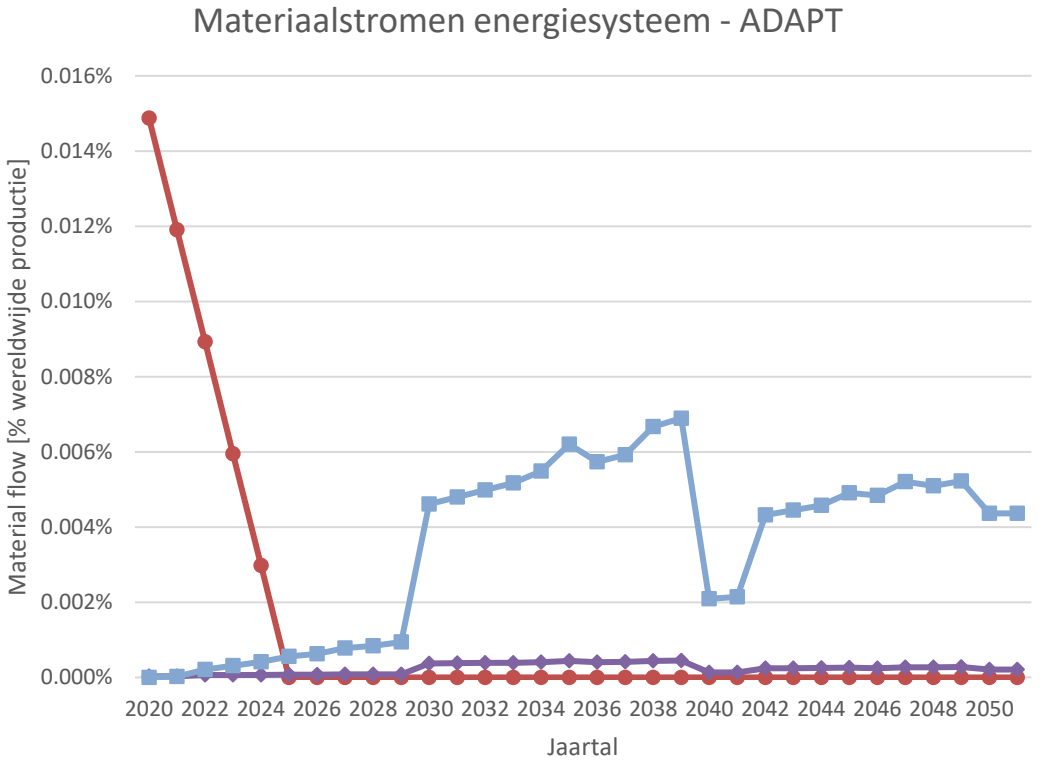
De **materiaalstromen van aluminium, gallium, germanium en magnesium zijn in ADAPT en TRANSFORM nagenoeg hetzelfde**. De scherpe daling in germanium heeft ermee te maken dat dit materiaal vooral in a-Si-zonnepanelen wordt gebruikt, waarvan het marktaandeel steeds verder afneemt (ten gunste van c-Si-zonnepanelen), tot 0% in 2030.

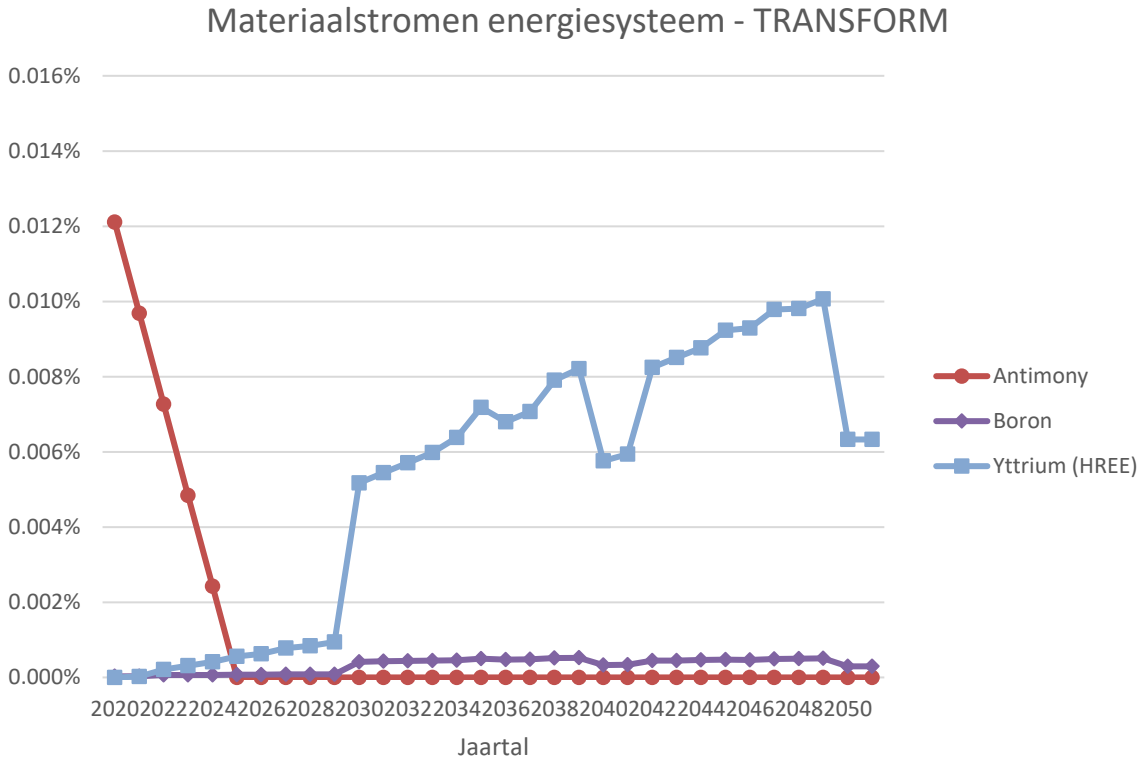
De **aluminium-stroom blijft in TRANSFORM na 2040 constant**, in tegenstelling tot een daling in ADAPT, omdat er in TRANSFORM meer windturbines, zonnepanelen en elektrolysers worden bijgebouwd. De **platinum-stroom is substantieel hoger in TRANSFORM** door het grotere aantal elektrolysers.

Multi-criteria-analyse Sb, B, Y

Materiaal	Wereld-wijde productie [ton]	Supply risk	Toelichting supply risk	Toepassing in energiesysteem	Directe afhankelijkheid van de Europese energietechnologie-productie	Toelichting directe afhankelijkheid
Antimony	38 598	1.8	EU 100% afhankelijk van import, grootste producenten China (56%) en Tadzjikistan (20%), EoL-RIR 28%	Lead-acidbatterijen	Zeer laag	De productieketens voor batterijen vinden voor het overgrote deel buiten Europa plaats.
Boron	1 272 415	3.6	EU 100% afhankelijk van import (waarvan 99% uit Turkije), grootste producenten Turkije (48%) en VS (25%), EoL-RIR 1%	Kernenergie (o.a. regelstaven, koeling), windturbines (NdFeB-magneten), CdTe en c-Si zonnepanelen (kleine hoeveelheden voor kristallijn siliciumgebaseerde wafers)	Waarschijnlijk hoog	Het is onduidelijk hoe de productieketen voor regelstaven er op dit moment uitziet. Getuige de inzet van de Europese Commissie en verschillende lidstaten op kernenergie zal waarschijnlijk ook de Europese productie van regelstaven belangrijk worden.
Yttrium (HREE)	5133	3.5	EU 100% afhankelijk van import, grootste leverancier aan EU is China (64%), EoL-RIR 31%	SOE yttrium elektrolysers, kernenergie, offshore wind.	Enige mate	Het toekomstig marktaandeel van SOE yttrium-elektrolysers, is onzeker.

Materiaalstromen Sb, B, Y





Vanwege het gebruik van yttrium in SOE-elektrolysers ligt de **yttrium-stroom in TRANSFORM hoger**. Te zien is dat ook de materiaalstroom van **boor constant blijft in TRANSFORM**, waar een daling te zien is in ADAPT. Dit komt door de iets hogere capaciteit kernenergie in TRANSFORM.

Vanwege de afname van het marktaandeel van lead-acidbatterijen tot 0% in 2025 is in beide scenario's een **scherpe daling van de antimoon-stroom** tot 0 te zien.

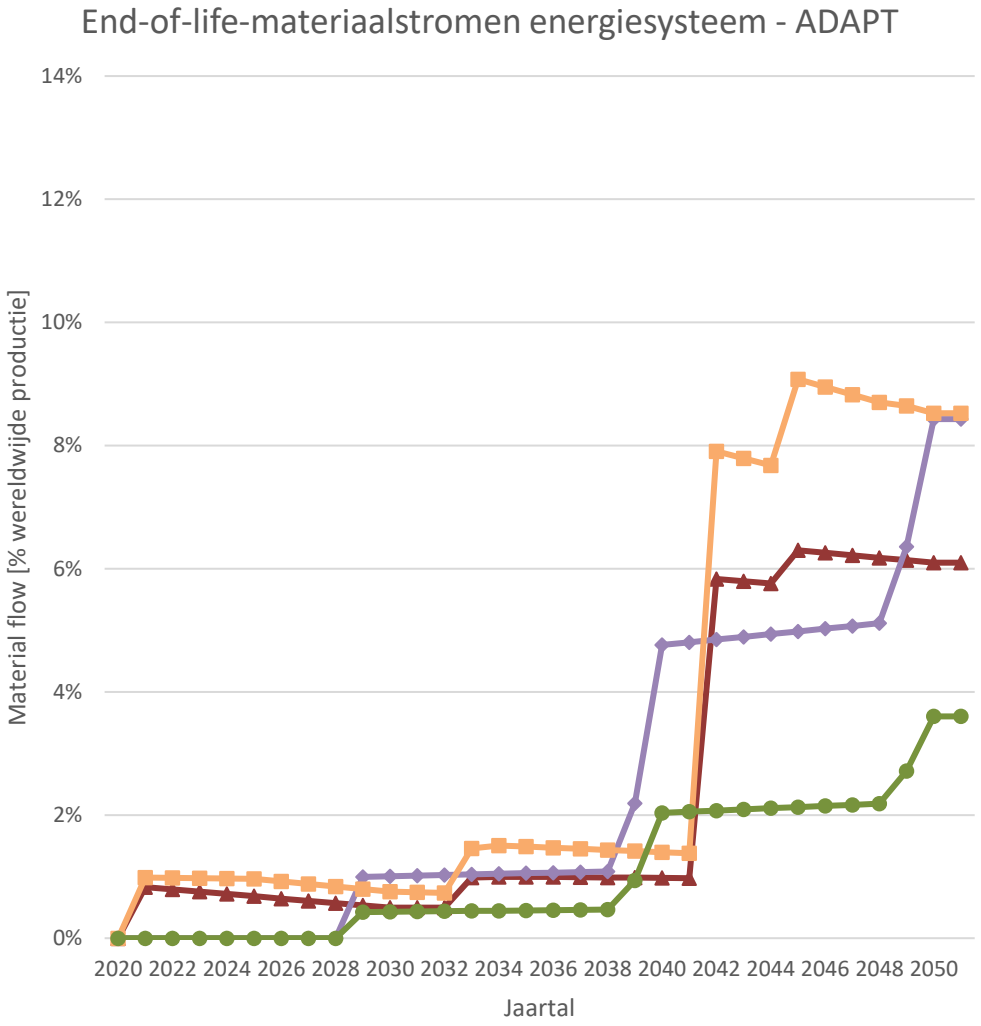
Aanvullende analyse end-of-life materiaalstromen

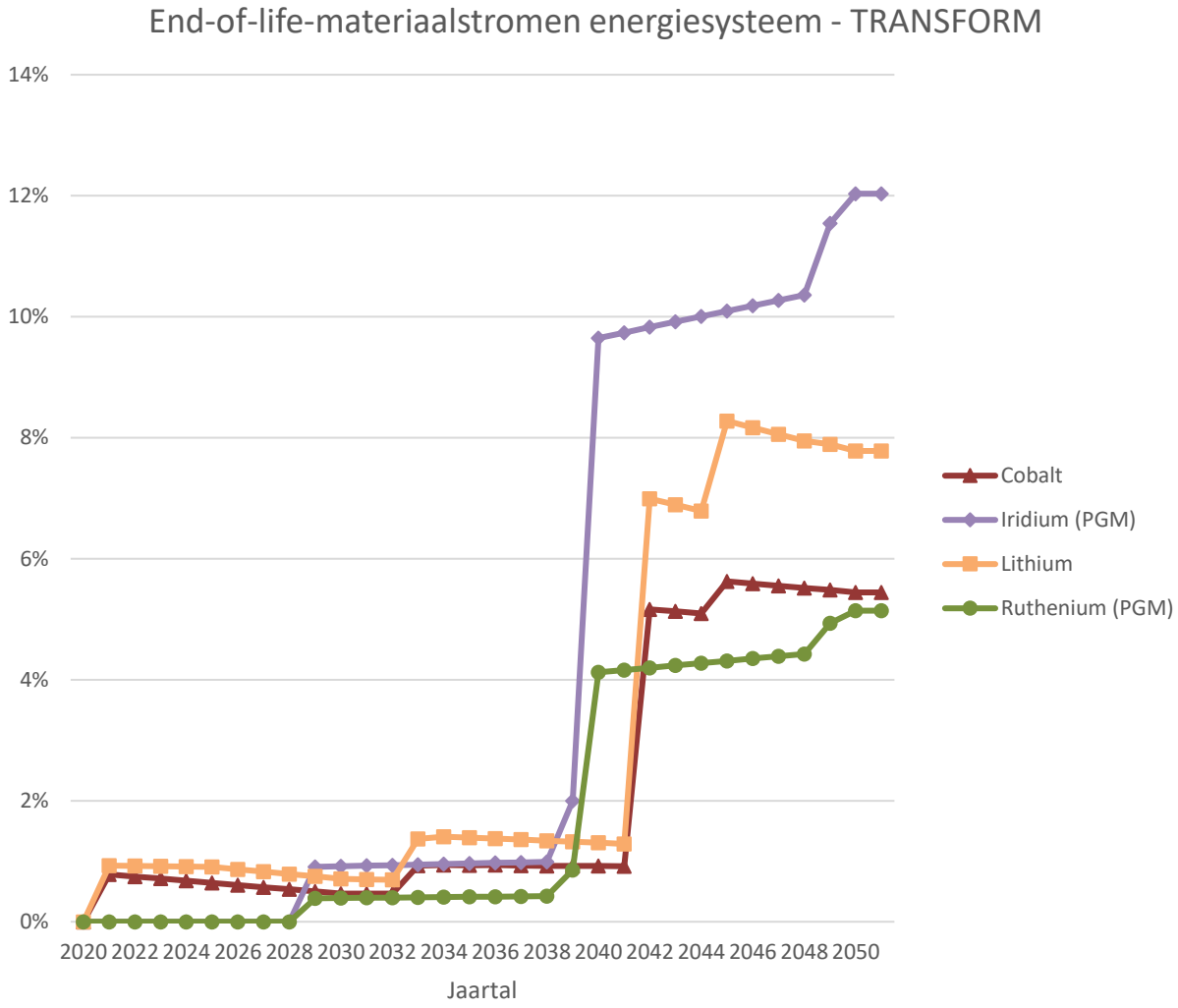
In bovenstaande slides hebben we de resultaten gepresenteerd van de totale materiaalstromen: de grondstoffenvraag voortkomend uit capaciteitstoevoeging voor energiesysteem-assets en vervanging van assets die het einde van hun levensduur zijn. Aanvullend hebben we onderzocht welke materiaalstromen vrijkomen uit assets die het einde van hun levensduur hebben bereikt (de *end-of-life*-materiaalstromen): dit is interessant vanuit het oogpunt van recycling. Materialen die vrijkomen uit assets aan het einde van hun levensduur kunnen in potentie worden hergebruikt en kunnen de druk op de grondstoffenvraag verlichten. Het is van belang om te weten wanneer men substantiële end-of-life materiaalstromen kan verwachten, zodat de benodigde recyclinginfrastructuur tijdig kan worden opgebouwd.

De resultaten voor de end-of-life materiaalstromen zijn op de volgende slides weergegeven. Op basis van de scenario's ADAPT en TRANSFORM en de levensduur-aannames uit de materiaalintensiteit-database, is te zien dat substantiële stromen voornamelijk na 2040 ontstaan. Hieronder zijn voor vier typen assets de end-of-life-materiaalstromen beschreven.

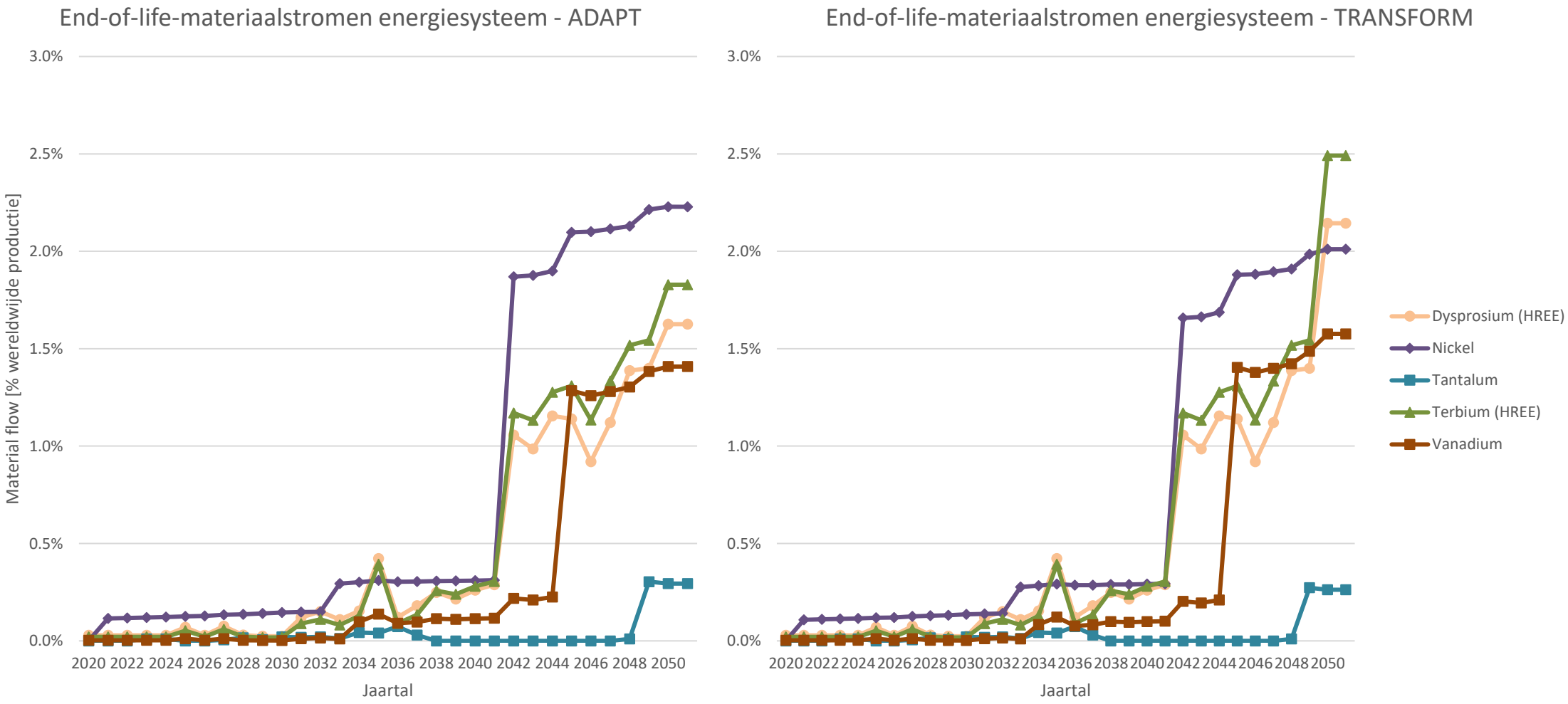
- Batterijen: kobalt, lithium, grafiet, nikkel, mangaan en koper. Het is de verwachting dat er voor 2040 ook al substantiële end-of-life-stromen voor deze materialen zullen zijn, omdat er reeds batterijen in het energiesysteem aanwezig zijn, bijvoorbeeld in EV's. Deze stromen nemen toe over tijd en stijgen vooral na 2040.
- Elektrolysers: iridium, ruthenium, grafiet, titanium, nikkel en platinum. Voor deze materialen zijn pas na 2040 substantiële end-of-life-stromen te verwachten.
- Windmolens: zeldzame aardelementen (*Rare Earth Elements,* REE's) voor NdFeB-magneten (terbium, dysprosium, neodymium, praseodymium en boor), legeringselementen voor staal (niobium, vanadium, mangaan, nikkel en siliciummetaal) en koper. Rond 2035 zijn al end-of-life-stromen voor deze materialen te verwachten, omdat een aantal windmolens dan al het einde van hun levensduur zullen bereiken. Vanwege het toenemende opschalingstempo van windenergie zijn na 2040 grotere stromen te verwachten, die verder zullen stijgen tot 2050.
- Zonnepanelen: siliciummetaal, gallium, koper, aluminium, nikkel en boor. Voor deze materialen zijn pas na 2040 substantiële end-of-life-stromen te verwachten.

End-of-life materiaalstromen Co, Ir, Li, Ru

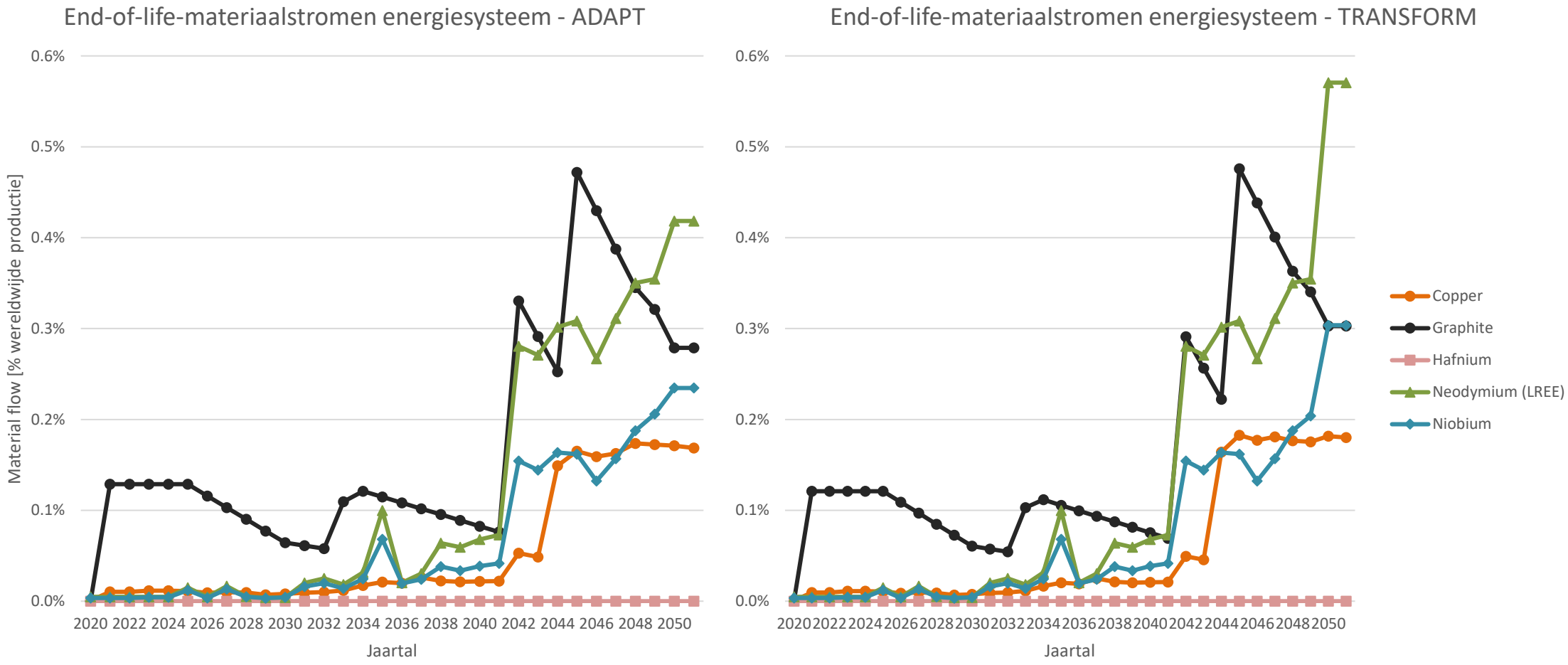




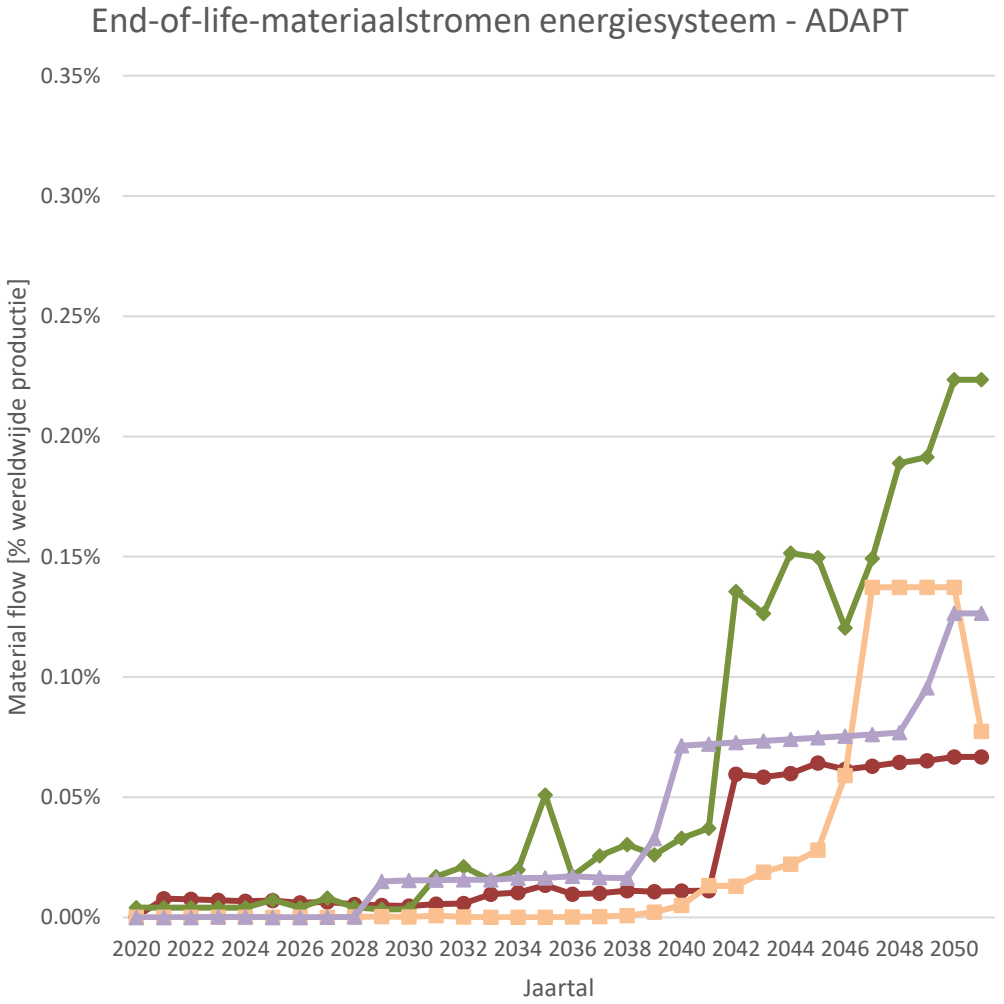
End-of-life materiaalstromen Dy, Ni, Ta, Tb, V

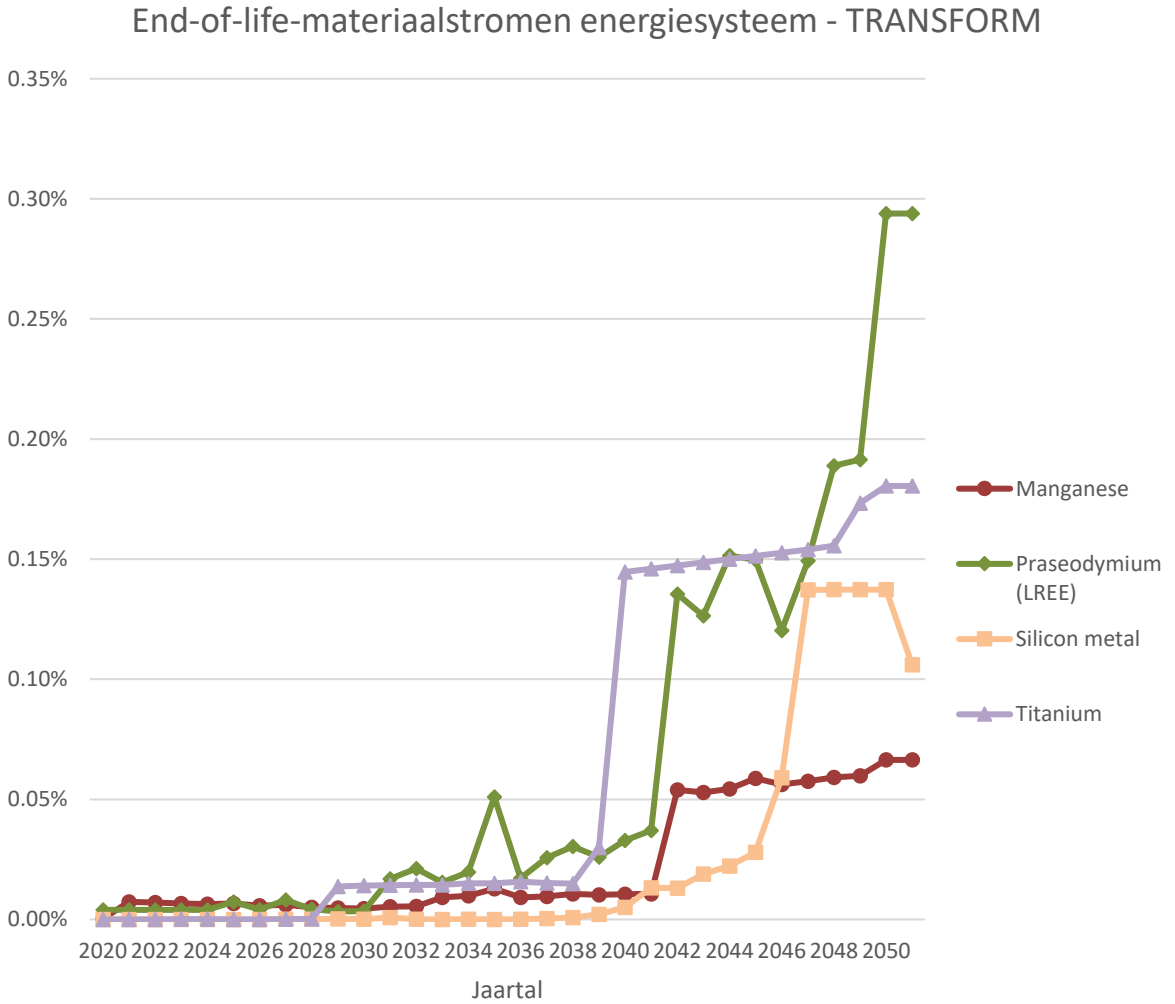


End-of-life materiaalstromen Cu, nat. graphite, Hf, Nd, Nb

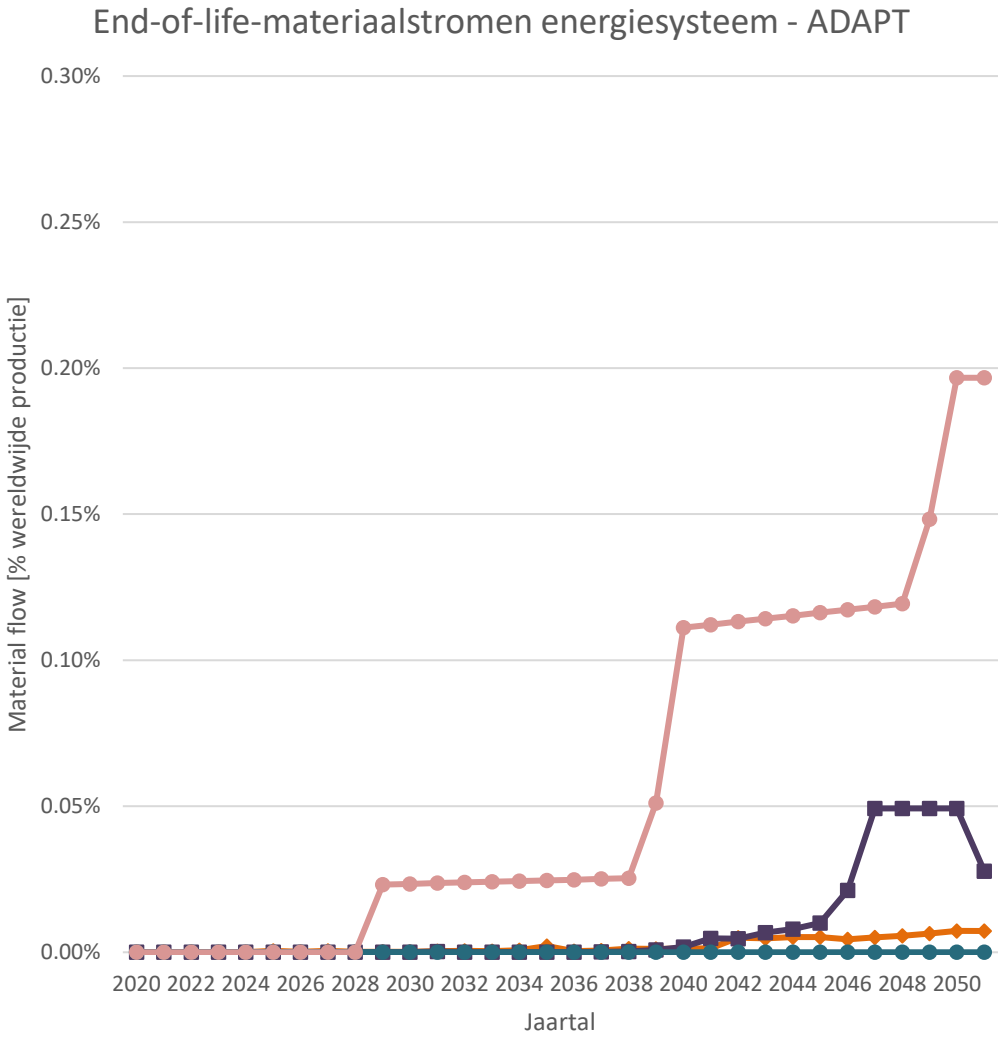


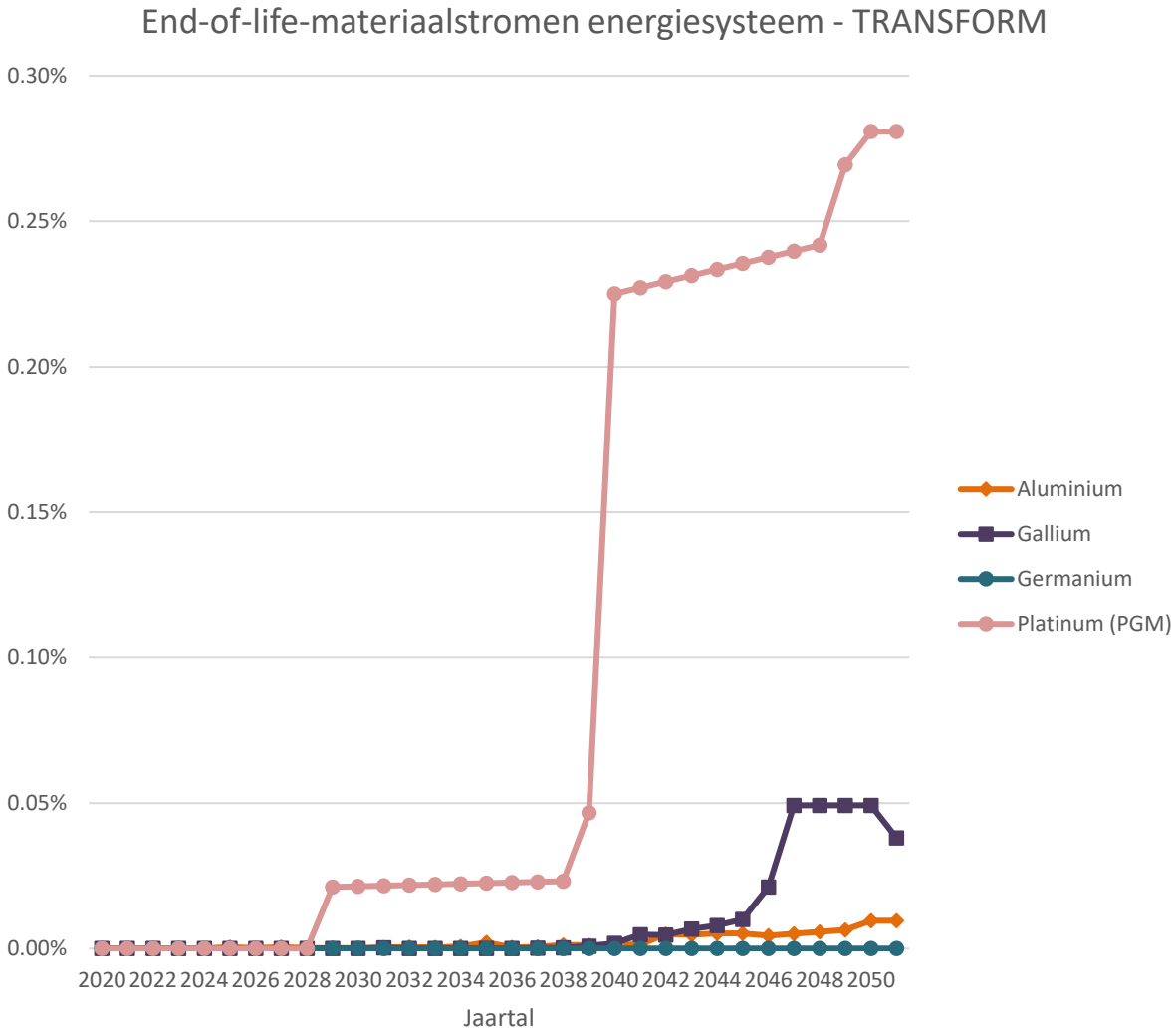
End-of-life materiaalstromen Mn, Pr, Si, Ti



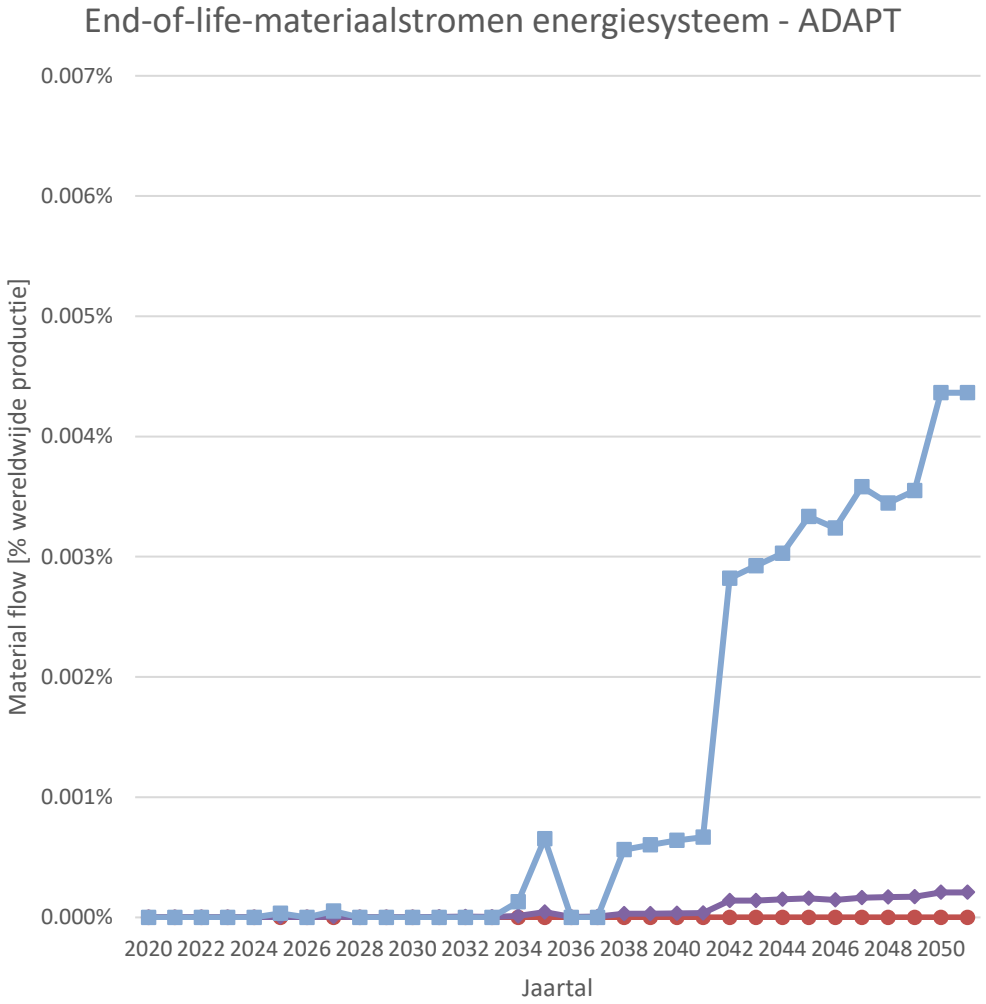


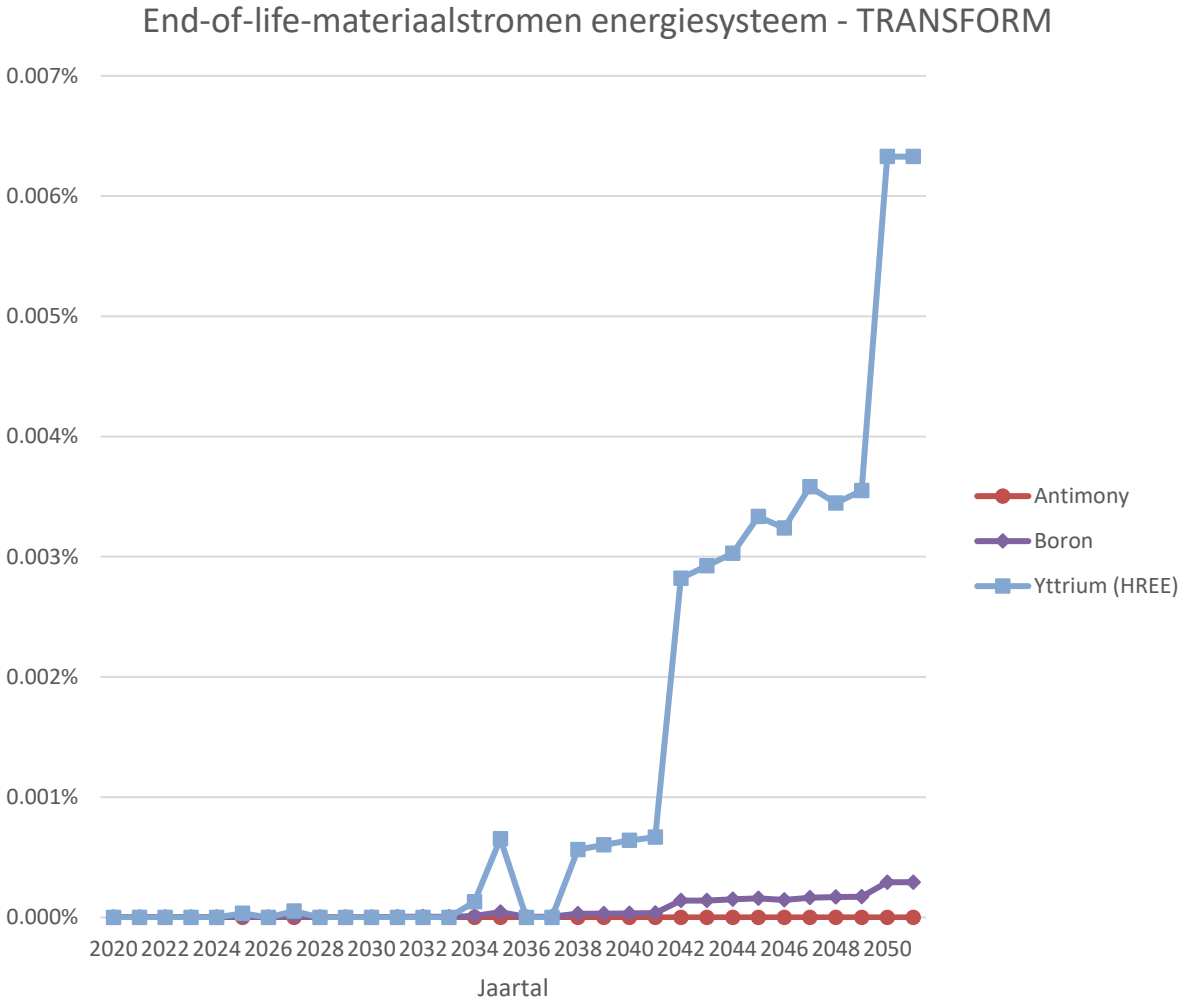
End-of-life materiaalstromen Al, Ga, Ge, Pt





End-of-life materiaalstromen Sb, B, Y





Conclusies (1/2)

Keuzes in het energiesysteem hebben consequenties voor de vraag naar specifieke kritieke materialen. In onderstaande tabel is weergegeven hoe de materiaalstromen in ADAPT en TRANSFORM zich tot elkaar verhouden.

- **In TRANSFORM liggen de materiaalstromen van lithium en kobalt lager dan in ADAPT**, vooral door het kleinere aantal EV's. **Tot 2040 zijn ook de stromen van niobium en mangaan lager, maar daarna stijgen ze**: mangaan bereikt het niveau van ADAPT, terwijl niobium zelfs hoger uitkomt. Dit komt doordat de aanvankelijk lagere vraag – door minder capaciteit van gascentrales, CCS, WKK en batterijen – na 2040 toeneemt door de versnelde opschaling van windenergie.
- **Voor een aantal materialen zijn de stromen in ADAPT en TRANSFORM vrijwel gelijk**. Dit komt doordat een hogere vraag door extra capaciteit voor windenergie, zonne-energie en elektrolysers wordt gecompenseerd door een lagere vraag door de kleinere capaciteit van batterijen, gascentrales, CCS en WKK.
- **De materiaalstromen van zeldzame aardmetalen (of *Rare Earth Elements*, REE's), *Platinum Group Metals* (PGM's), titanium en niobium (na 2040) zijn hoger in TRANSFORM**. Dit komt door de extra capaciteit windenergie en elektrolysers.

Lagere materiaalstromen in TRANSFORM t.o.v. ADAPT	Ongeveer dezelfde materiaalstromen in beide scenario's		Hogere materiaalstromen in TRANSFORM t.o.v. ADAPT	
Lithium	Vanadium	Siliciummetaal	Ruthenium (PGM)	Niobium (na 2040)
Kobalt	Nickel	Aluminium	Iridium (PGM)	Praseodymium (LREE)
Niobium (tot 2040)	Tantaal	Gallium	Terbium (HREE)	Titanium
Mangaan (tot 2040)	Natuurlijk grafiet	Germanium	Dysprosium (HREE)	Platinum (PGM)
	Koper	Antimoon	Neodymium (LREE)	Yttrium (HREE)
	Hafnium	Boor		
	Mangaan (na 2040)			

Conclusies (2/2)

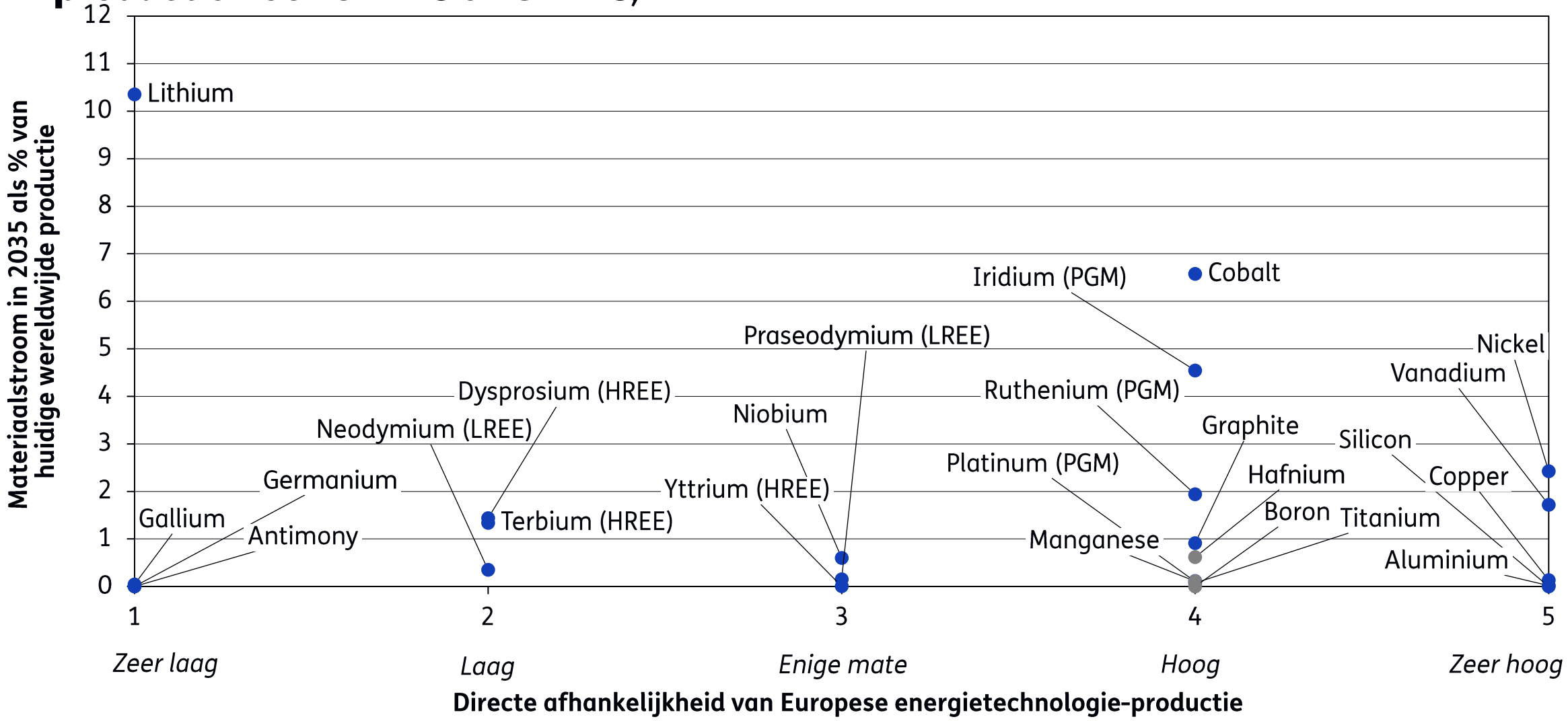
- De kritieke energiesysteemmaterialen die zorgen voor de **hoogste materialenstromen** ten opzichte van hun huidige wereldwijde productie zijn: lithium, iridium, kobalt en ruthenium. De materialen vanadium, nikkel, dysprosium, terbium en tantaal volgen op de voet qua ordegrootte. Lithium, iridium, kobalt en ruthenium zijn nodig **voor de elektrodes van elektrolysers en batterijen** (kobalt, iridium, lithium, ruthenium en nikkel). Vanadium dient als **elektrolytcomponent** in vanadium-redox-flowbatterijen en als **legeringselement voor staal**. Ook nikkel dient als legeringselement voor staal. Ten opzichte van het staalvolume zijn de benodigde hoeveelheden van deze legeringselementen klein, maar ze worden wel in bijna alle energietechnologieën gebruikt; vandaar dat deze materiaalstromen toch relatief groot zijn. Een andere groep materialen waar relatief grote vraag naar ontstaat betreft de **materialen voor NdFeB-magneten** (dysprosium, terbium en in mindere mate neodymium). Tot slot wordt tantaal gebruikt in condensatoren en legeringen in geothermie en gascentrales.

- Voor een substantieel deel van deze materialen geldt dat deze nodig zijn voor de opbouw van een eigen Europese productiecapaciteit voor energietechnologieën. Deze CRM's/SRM's zouden derhalve als extra kritisch kunnen worden aangemerkt vanuit het perspectief van strategische autonomie. Op de volgende slides zijn voor alle relevante CRM's en SRM's de **materiaalstroom in 2035 als percentage van de huidige wereldwijde productie** versus de **directe afhankelijkheid van Europese energietechnologie-productie** voor deze grondstoffen weergegeven. 2035 is als jaartal gekozen omdat in dit jaar het opschalingstempo voor de meeste energiesysteem-assets hoog ligt in de energiesysteemscenario's, maar er nog geen substantiële end-of-life-stromen zijn.

- Het **tempo van opschaling** is van belang: een hoog opschalingstempo kan druk leggen op toeleveringsketens. Dit is ook te zien in de resultaten van de materiaalstromen: vanaf 2030 neemt het opschalingstempo voor de meeste energiesysteem-assets toe, wat resulteert in een snelle stijging van de meeste materiaalstromen.

- Op basis van de capaciteitsontwikkeling van energiesysteem-assets in de scenario's ADAPT en TRANSFORM en de gebruikte levensduur-aannames, **is de verwachting dat met name na 2040 materialen vrijkomen uit assets die aan vervanging toe zijn**. Het is van belang dat de **benodigde infrastructuur voor het collecteren en recyclen van deze materialen tijdig gereed** is om de potentie van deze secundaire materiaalstromen te kunnen benutten.

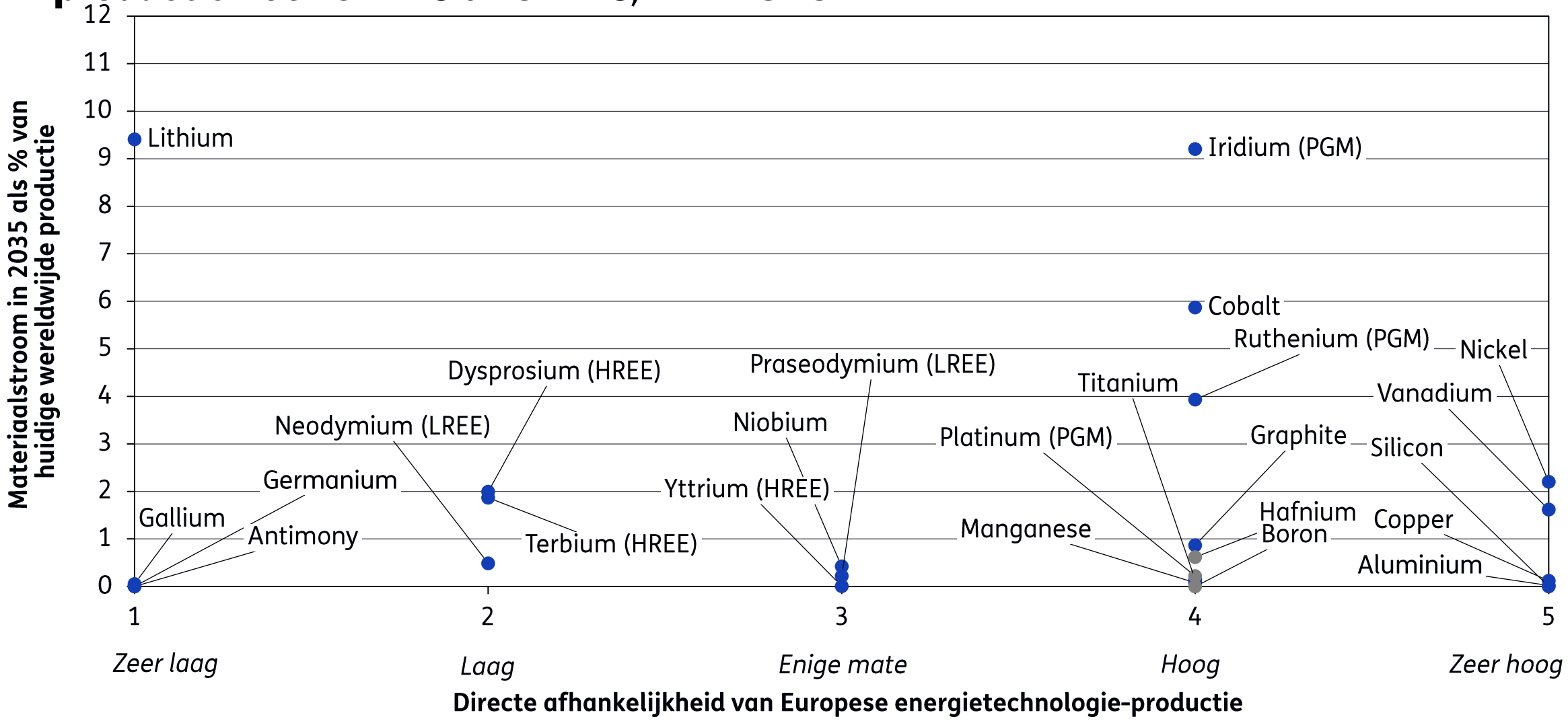
Materiaalstroom versus directe afhankelijkheid van Europese energietechnologie-productie voor CRM's en SRM's, ADAPT



● Materialen waarvoor een *waarschijnlijke* score geldt voor de directe afhankelijkheid.

TNO Nederlands Materialen Observatorium

Materiaalstroom versus directe afhankelijkheid van Europese energietechnologie-productie voor CRM's en SRM's, TRANSFORM



Materialen waarvoor een *waarschijnlijke* score geldt voor de directe afhankelijkheid.

TNO Nederlands Materialen Observatorium

Reflectie op de methodologie

- Deze studie moet gezien worden als een eerste stap om de resultaten van het energiesysteem-optimalisatiemodel OPERA te koppelen aan materiaalintensiteit-data. Het is voor de lezer belangrijk te beseffen dat de analyse van materiaalstromen van het energiesysteem daarmee onderhevig is aan een verschillende aannames, zowel van de scenario's ADAPT en TRANSFORM als van de materiaalintensiteit-data. Technologische innovatie op het gebied van materiaalintensiteit is niet meegenomen. Het marktaandeel van sub-technologieën voor bijvoorbeeld wind- en zonne-energie is wel meegenomen; hier liggen weer andere scenario's aan ten grondslag, afkomstig uit verschillende literatuurbronnen. In deze studie zijn deze aannames niet geëvalueerd of getoetst.
- De directe afhankelijkheid van Europese energietechnologie-productie van kritieke grondstoffen is soms lastig te beoordelen vanwege de beperkte detailgraad van de beschikbaar data. Zo wijst de analyse van Carrara et al. (2023) wel uit dat 24% van de componenten voor windmolens in Europa worden gemaakt. Echter, welke componenten in Europa worden gemaakt en welke worden geïmporteerd, is nog niet duidelijk.
- De TNO-database en Carrara et al. (2023) spreken elkaar soms tegen wat betreft de toepassing van materialen in het energiesysteem. In de resultaten van de multi-criteria-analyse is dit zo veel mogelijk aangegeven. Verder onderzoek is nodig om deze verschillende bronnen in lijn te brengen met elkaar.
- De scope van deze studie is kritieke materialen volgens de definitie van de Europese Commissie (2023). Binnen die scope is de materiaalintensiteit van ADAPT versus TRANSFORM met elkaar vergeleken. Hierbij dient opgemerkt te worden dat ADAPT meer fossiele grondstoffen vergt dan TRANSFORM (zie verder Scheepers et al., 2024).

Aanbevelingen

- **TNO-materiaaldatabase uitbreiden en verdiepen:** TNO zal verder bouwen aan de TNO-materiaalintensiteit-database en, mede op basis van de feedback, prioriteit geven aan zaken waar vanuit maatschappelijke vragen en beleidsdoelstellingen behoefte is.
- **Op specifieke strategische technologieën werken we vanuit het NMO verder aan deep dives:** Opties voor dergelijke verdiepende cases zijn de Europese staalindustrie, kernenergie.
- **Handelingsperspectief:** Het voorgestelde resultaat moet worden gezien als een momentopname. De meerwaarde ligt nu in het duiden van deze inzichten samen met stakeholders en experts.
- **Methodeontwikkeling:** Voor het NMO was de achterliggende doel ook om een methode te ontwikkelen die helpt bij het analyseren en duiden van materiaal-intensiteiten. De huidige multi-criteria-analyse is een eerste demonstratie van deze methode. Voor komend jaar zullen we evalueren of deze criteria voldoende basis bieden voor het ondersteunen van strategische besluitvorming en of er additionele criteria kunnen worden meegenomen.
- **Modelleren van materiaalafhankelijkheid als onderdeel van energiesysteemstudies:** Scenario-gebaseerde energiesysteemstudies zoals de TNO-studies met het OPERA-model (Scheepers et al., 2024) vormen een belangrijke pijler voor het uitwerken van het Nationaal Plan Energiesysteem. Op het moment dat materiaalafhankelijkheid en strategische autonomie belangrijke onderdelen vormen van strategische afwegingen is het wellicht opportuun om de energiesysteemmodellen zelf uit te breiden met materiaalintensiteiten.

Voetnoten geïnstalleerde capaciteiten OPERA

1) Waterstofcentrales zijn in de materiaalstromenanalyse niet meegenomen want deze zitten niet in de TNO-materiaalintensiteit-database.
2) CCU is ook niet meegenomen in de materiaalstromenanalyse omdat dit een zeer brede categorie is met veel verschillende technologieën, die bovendien veelal niet in de TNO-materiaalintensiteitdatabase.
3) Bij de elektrolysecapaciteit in OPERA gaat het om de elektrolysecapaciteit voor verhandelbare waterstof. In OPERA worden "elektrolysers ook gebruikt in kunstmestfabrieken voor de productie van ammoniak en in raffinaderijen voor de productie van synthetische brandstoffen en grondstoffen. Deze elektrolysecapaciteit (in 2050 6.6 GW in ADAPT en 8.7 GW in TRANSFORM) is geïntegreerd in de productieprocessen en de waterstof die het produceert wordt niet beschouwd als verhandelbare waterstof." (Scheepers et al., 2024)
4) Scheepers et al. (2024) geven voor een aantal energiesysteem-assets de capaciteit in 2022 op basis van CBS-data. Echter, van andere energiesysteem-assets is de capaciteit niet bekend of lastig te achterhalen uit beschikbare data. Voor deze assets (behalve elektrische voertuigen) is aangenomen dat ze vanaf 2020 ingroeien van 0 naar de capaciteit in 2030 die uit de modelresultaten volgt.
5) Voor elektrische voertuigen is het lastig om exact te bepalen hoeveel GWh aan batterijen zij bevatten. Het aantal voertuigen is wel bekend, maar om dit om te rekenen naar GWh is een aanname nodig over de gemiddelde batterijcapaciteit per voertuig. Omdat deze aanname mogelijk niet overeenkomt met die in OPERA, hebben we ervoor gekozen de totale batterijcapaciteit voor elektrische voertuigen te laten groeien van 0 in 2010 naar de capaciteit in 2030 zoals die uit de modelresultaten volgt.

Methodologie: berekening materiaalstromen

Berekening materiaalstromen. Onderstaande formules beschrijven hoe de materiaalstromen worden berekend.

Formule	Uitleg
$materiaalstroom_{x,t} = \sum_n (materiaalvraag_{x,t})_n$	De materiaalstroom *x* in jaar *t* is gelijk aan de som over de materiaalvraag van technologieën *n* voor materiaal *x*, in jaar *t*
$(materiaalvraag_{t,x})_n = \sum_i \Delta capaciteit_{i,t} * materiaalintensiteit_{i,t}$	De materiaalvraag van technologie *n* in jaar *t* voor materiaal *x* is gelijk aan de som over de subtechnologieën *i* van de Δcapaciteit van subtechnologie *i* in jaar *t* maal de materiaalintensiteit i_x
$\Delta capaciteit_{i,t} = marktaandeel_{i,t} * \Delta capaciteit_{n,t}$	De Δcapaciteit van subtechnologie *i* in jaar *t* marktaandeel subtechnologie *i* in jaar *t* maal de Δcapaciteit van technologie *n* in jaar *t*

Met Δcapaciteit wordt de capaciteit bedoeld die er elk jaar bijkomt; dit is gebaseerd op de scenarioprojecties van geïnstalleerde capaciteit en de vervangingsvraag die optreedt doordat opgestelde capaciteiten het eind van hun levensduur bereiken.

Deze materiaalstromenberekening maakt gebruik van data afkomstig uit verschillende bronnen (zie ook slide 6).

1. Materiaalintensiteiten: afkomstig uit materiaalintensiteiten-database TNO op basis van verschillende databronnen
2. Projectie marktaandeel subtechnologieën: literatuur (check database)
3. Projectie capaciteiten technologieën energiesysteem: afkomstig uit resultaten van het OPERA-model (op basis van scenario's ADAPT en TRANSFORM)

Bronnen

- Butorac, S. (2025). EU electricity grid – European Parliament briefing. European Parliament Research Service EPRS. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/772854/EPRS_BRI%282025%29772854_EN.pdf
- Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D., Alves Dias, P., Cavalli, A., Georgitzikis, K., Grohol, M., Itul, A., Kuzov, T., Latunussa, C., Lyons, L., Malano, G., Maury, T., Prior Arce, Á., Somers, J., Telsnig, T., Veeh, C., Wittmer, D., Black, C., Pennington, D., Christou, M. (2023). Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/386650, JRC132889. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC132889
- CBS (2025). Elektriciteit; productie en productiemiddelen. https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/37823wkk/table?ts=1765895991555
- Europese Commissie (2023). Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – final report.
- Europese Commissie (2025). Commission assesses nuclear investment needs by 2050 in view of decarbonisation and competitiveness goals. European Commission press release, 13 June 2025. IP_25_1488_EN.pdf
- Hahn Menacho, A.J; Sacchi, R.; Bauer, C.; Panos, E.; McKenna, R.; Burgherr, P. (2025). The material-energy nexus in net-zero transition scenarios: exploring environmental trade-offs and uncertainties. Resources, Conservation and Recycling, Volume 218, 2025, 108251, ISSN 0921-3449. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108251
- Nohl, L., Finck, R., Magnani, N. and Volkanovski, A. (2025), Material requirements for electricity grids, Black, C. and Tzimas, E. (editors), European Commission, Petten, JRC143190. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC143190
- Papaioannou, I., Andreadou, N., De Paola, A., Mountraki, A., Georgakaki, A. et al. (2025), Clean Energy Technology Observatory: Electricity Grids in the European Union - 2025 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025, https://data.europa.eu/doi/10.2760/7561135, JRC144103.
- Scheepers, M.; van Stralen, J.; Giraldo Chavarriaga, J.; Elberry, A.; Uslu, A.; Oliveira, C. (2024). Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050 – Scenario update and scenario variants for industry. TNO.
- Schlichenmaier, S. & Naegler, T. (2022). May material bottlenecks hamper the global energy transition towards the 1.5 °C target? Energy Reports, Volume 8, Pages 14875-14887, ISSN 2352-4847. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.025
- Weistra, H. (2025). *Supply Chain Vulnerability Assessment of Critical Raw Material-Dependent Technologies - Development of a novel multi-stage risk evaluation methodology.* Master thesis. Universiteit Leiden & TU Delft. Nog niet gepubliceerd.