

Nieuw evenwicht in het energiesysteem

Kritieke materiaalvraag voor een
klimaatneutraal Nederland in 2040

Colofon

Publicatie

Maart 2026

Auteurs

Copper8

Sybren Bosch
Dennis Jansen

Quintel

Mart Lubben
Claudia Valkenier



Benjamin Sprecher

Opdrachtgever

GREENPEACE

Sascha Landshoff

Ontwerp

Cassie Björck

Met dank aan

Bhuvesh Kaushik
Anne Roorda

Inhoudsopgave

	SAMENVATTING (Nederlands en Engels)	3
01	INLEIDING	9
02	MIJNBOUW VOOR DE ENERGIETRANSITIE	12
03	UITGANGSPUNTEN	17
04	MATERIAALVRAAG SYSTEEMSTRATEGIEËN	20
	Energiebesparing & krimp	22
	Verhogen <i>demand side response</i>	25
	Meer inzet op warmte	27
05	MATERIAALVRAAG TECHNOLOGISCHE STRATEGIEËN	30
	Windenergie	32
	Zon-PV	34
	Batterijen: systeem- en thuisbatterijen	36
	Batterijen: redox-flow systeembatterijen	38
	Batterijen: elektrische voertuigen	40
06	MATERIAALVRAAG (NIEUW EVENWICHT & CIRCULAIRE TECHNOLOGIEËN)	43
07	CONCLUSIES	48
08	PRIORITEITEN	51
	BIJLAGEN	56
	Bijlage I. Onderzoeksmethode	57
	Bijlage II. Grootste onzekerheden	58
	Bijlage III. Bronvermelding	59

Samenvatting

De energietransitie is een materialentransitie. Een schoon energiesysteem leidt tot een grote vraag naar kritieke materialen voor onder meer zonnepanelen, windturbines, batterijen en elektrolyzers. Voor de winning van deze materialen is echter mijnbouw nodig.

Deze winning en de benodigde verwerking leidt tot geopolitieke afhankelijkheden en tot ketenrisico's voor mens en milieu. Onderdeel hiervan zijn natuurrisico's als gevolg van mijnbouw, bijvoorbeeld bij winning in het regenwoud of de diepzee. Tegelijkertijd vragen duurzame energiebronnen netto de helft minder mijnbouw dan het fossiele energiesysteem, vooral door de afname in benodigde mijnbouw voor kolen.

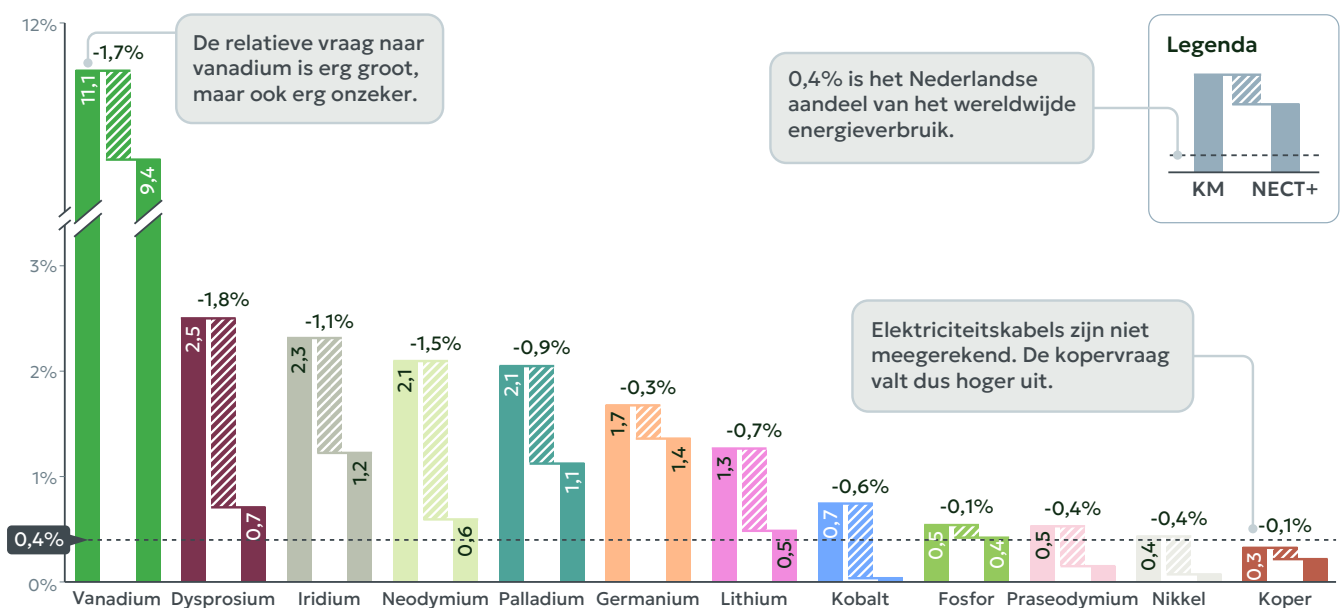
Voor de opbouw van een klimaatneutraal energiesysteem zijn veel kritieke en strategische 'transitiematerialen' nodig. Om te bepalen hoeveel van deze materialen nodig zijn, wordt in dit onderzoek uitgegaan van het Koersvaste Middenweg (KM-)scenario van Netbeheer Nederland. Dit scenario komt het dichtste in de buurt bij het nationaal beleid.

In het KM-scenario is voor elf materialen een disproportioneel groot aandeel van de wereldwijde productie nodig. De grens hiervoor is 0,4%, op basis van het Nederlands aandeel van het wereldwijde energieverbruik. Daarbij is 2035 het referentiejaar voor de transitie en 2024 het referentiejaar voor de winning. In het KM-scenario is er een grote vraag naar onder meer neodmium (2,1%), iridium (2,3%), lithium (1,2%) en kobalt (0,7%). De vraag naar koper lijkt relatief beperkt (0,3%), maar is exclusief elektriciteitskabels – die vraag zal dus hoger uitvallen.

In de huidige energietransitiescenario's wordt meer gekeken naar het verhogen van aanbod dan naar het verlagen van het energieverbruik. In het Koersvaste Middenweg-scenario is een energiereductie van in totaal 22% ingerekend. De ruimte voor verdere, grootschalige energiebesparing zit grotendeels in de industrie, die in het KM-scenario bijna de helft van de totale energievraag van Nederland voor haar rekening neemt. Daarnaast kan een afname in mobiliteit de vraag naar energie verlagen, zowel in nationaal personen- en vrachtvervoer als in internationale lucht- en scheepvaart.

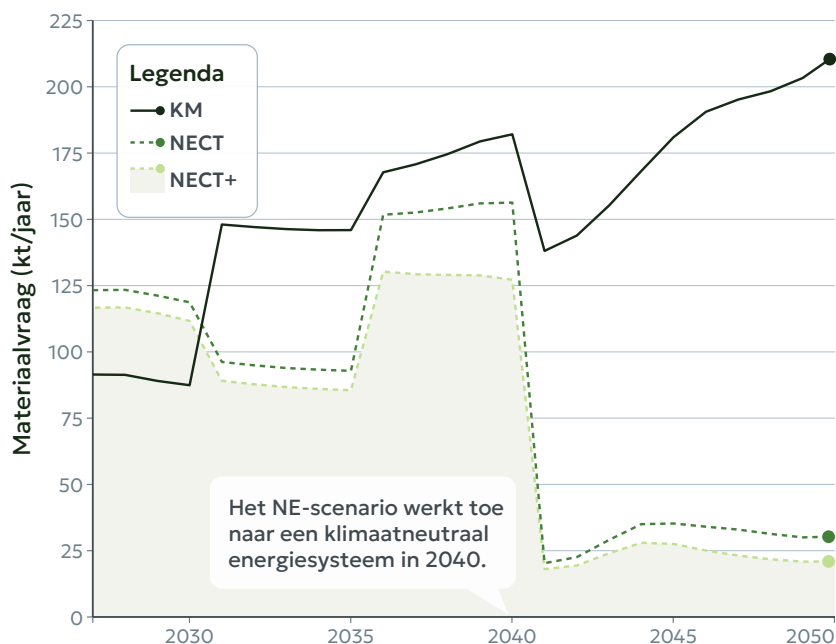
Om in 2040 een klimaatneutraal energiesysteem te realiseren met bescherming van natuur en mensen bij winning van de benodigde materialen, zijn scherpe keuzes nodig. Het vertrekpunt is dat er geen mijnbouw plaatsvindt in gebieden die als 'off-limits' worden beschouwd op basis van ecologische, natuurlijke en sociale waarden. De kaders hiervoor worden geschetst in het Greenpeace International rapport Beyond Extraction. Het huidige onderzoek laat zien welke mogelijkheden er liggen voor de Nederlandse situatie.

Met deze scherpe keuzes is het mogelijk om de vraag naar kritieke en strategische materialen te beperken. In een scenario met een nieuw evenwicht en circulaire technologieën (NECT+) is in 2035 van slechts zeven materialen meer nodig dan het relatieve aandeel van het Nederlandse energieverbruik (0,4%). Voor alle materialen is de vraag flink lager dan het KM-scenario: voor iridium is dit 1,2% (KM: 2,3%), voor neodmium 0,6% (KM: 2,1%) en voor lithium 0,5% (KM: 1,2%).

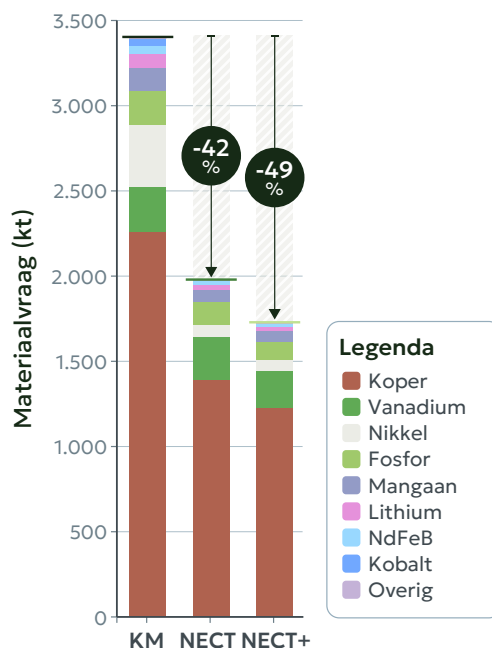


Figuur 1 | Vraag naar 'transitiematerialen' van KM, NECT en NECT+ scenario (in 2035) ten opzichte van de wereldwijde mijnbouwproductie (2024), in vergelijking met het Nederlandse energieverbruik (0,4%).

Jaarlijkse kritieke materiaalvraag NECT+ in verhouding tot NECT en KM (2027 t/m 2050)



Totale kritieke materiaalvraag 2027 t/m 2050



Figuur 2 | Totale vraag naar 'transitiematerialen' in het NECT+ scenario in de periode 2027-2050 (links), en in totaal (rechts).

Deze reducties vragen allereerst om grootschalige energiebesparing en strategische krimp. Dit leidt tot een lagere energievraag en minder benodigde opwek- en opslagcapaciteit. Hiervoor is versnelde afbouw van de energie-intensieve industrie nodig, een grote krimp in lucht- en scheepvaart en een *modal shift* van auto naar trein, bus en fiets. Dit kan leiden tot capaciteitsbesparingen van 18-24% (zon), 36-42% (wind), 37-43% (batterijen) en 64-82% (elektrolyse).

Daarnaast is inzet nodig om de kritieke materiaalvraag van energietechnologieën te verlagen. Dit vraagt om meer efficiëntie van technologieën, substitutie van technologieën door alternatieve technologieën met minder kritieke materialen en levensduurverlenging van producten en componenten.

- Bij **windturbines** kan neodymium volledig worden geëlimineerd, door een overstap naar *geared* turbines en op termijn hoge-temperatuur-supergeleiders.
- Bij **zonnepanelen** heeft levensduurverlenging de meeste potentie.
- Bij **systeem- en thuisbatterijen** zijn de substitutiemogelijkheden sterk: vervanging van NMC- door LFP-batterijen maakt kobalt en nikkel vrijwel overbodig, en natrium-ionbatterijen kunnen de lithiumvraag verlagen.
- Voor **langdurige opslag** kunnen organische flowbatterijen de vanadiumvraag naar nul reduceren.

Wanneer systeem- en technologische maatregelen worden gecombineerd, kan de totale kritieke materiaalvraag over de periode 2027-2050 met 42-49% dalen. De materiaalvraag in het jaar 2050 is 90% lager dan in het KM-scenario. In absolute zin vinden de grootste reducties plaats in de veelgebruikte materialen koper, vanadium, fosfor en mangaan.

Koper blijft in alle scenario's een aandachtspunt. In het meest vergaande scenario is koper verantwoordelijk voor 71% van de totale materiaalvraag. De kopervraag laat zich lastig verlagen, doordat koper breed wordt ingezet in vrijwel alle onderdelen van het energiesysteem.

De combinatie van maatregelen laat zien dat de kritieke materiaalvraag van de Nederlandse energietransitie kan worden ingevuld zonder mijnbouw in *restricted areas*, inclusief de diepzee. De relatieve vraag van veel materialen in 2035 ligt vaak in de buurt van het voor Nederland benodigde aandeel in 2024. Daarbij is er van de materialen die met diepzeemijnbouw worden gewonnen (koper, kobalt, nikkel en mangaan) relatief voldoende voorraad buiten deze *restricted areas* (op basis van eerder onderzoek). Wel is hier ook koper een aandachtspunt.

Uitsluitend inzet op systeem- of technologie-maatregelen is onvoldoende om de vraag naar transitiematerialen te verlagen richting een ‘verantwoorde mijnbouw’. De systeemmaatregelen – vooral energiebesparing – leiden in totaal tot 32% verlaging van de benodigde hoeveelheid transitiematerialen. De technologische maatregelen leiden gezamenlijk tot 24% reductie. Deze reducties zijn verspreid over de verschillende materialen.

Alleen een gezamenlijke inzet op de verschillende strategieën is voldoende om de potentiële reducties te realiseren. Alleen inzet op systeemmaatregelen of technologische innovatie is niet voldoende. Op basis van de analyse ontstaan zes prioriteiten: deze zijn onderstaand weergegeven.

Kritieke materialen zijn grotendeels kritiek vanwege geopolitiek. China heeft een dominante positie en kan daardoor veel invloed uitoefenen op de gehele keten. Bij publicatie van dit onderzoek (begin 2026) zijn vraag en aanbod van kritieke materialen wereldwijd relatief goed in balans, maar staat vrije handel onder druk. Inzet op het verlagen van de vraag naar kritieke materialen kan daarmee een sterke bijdrage leveren aan strategische autonomie.



SPOOR I Energiebesparing & strategische krimp

- 1 Strategische keuzes in de nationale industrie**
met een visie op welke industrie wel en welke industrie niet past in een klimaatneutraal Nederland
- 2 Structurele investering in energiebesparing**
voor zowel industrie, mobiliteit als de gebouwde omgeving
- 3 Een modal shift van auto naar deelmobiliteit**
met een groter aandeel trein, bus en fiets
- 4 Optimalisatie van bestaande infrastructuur**
onder meer door bidirectioneel laden en levensduurverlenging van zonnepanelen



SPOOR II Alternatieve, CRM-arme energietechnologieën

- 5 Investerings in onderzoek en toepassing van CRM-arme technologieën**
met gerichte R&D-financiering en sturing in tenders voor bijvoorbeeld offshore windparken
- 6 Verbeter ontwerprijtlijnen van duurzame energietechnologieën**
zowel door aanscherping via EcoDesign als door handhaving in de praktijk

Summary

The energy transition is a materials transition. A clean energy system leads to high demand for critical materials used in solar panels, wind turbines, batteries, and electrolyzers. However, obtaining these materials requires mining.

The required extraction and processing leads to geopolitical dependencies and supply chain risks for people and the environment. Among these are ecosystem risks resulting from mining, for example when extraction takes place in rainforests or the deep sea. At the same time, renewable energy sources require half the amount of mining compared to the fossil energy system, primarily due to a reduction in the mining needed for coal.

Building a climate-neutral energy system requires many critical and strategic ‘transition materials’. To determine how much of these materials will be needed, this analysis draws on the Steady Middle Path (*Koersvaste Middenweg*, KM) scenario by Netbeheer Nederland – the scenario that best reflects current national policy.

In the KM scenario, a disproportionately large share of global production is needed for eleven materials. The threshold for this is 0.4%, based on the Dutch share of global energy consumption. The reference year for the transition is 2035, and 2024 is the reference year for extraction. In the KM scenario, there is significant demand for, among others, neodymium (2.1%), iridium (2.3%), dysprosium (2.5%), and vanadium (11.1%). Demand for copper appears relatively limited (0.3%), but this

excludes electricity cables, meaning actual demand will be higher.

Current energy transition scenarios focuses more on increasing supply than on reducing energy consumption in industry and society. The Steady Middle Path scenario already accounts for a total energy reduction of 22%. The scope for further, large-scale energy savings lies largely in industry, which in the KM scenario accounts for nearly half of total Dutch energy demand. In addition, a reduction in mobility can lower energy demand, both in national passenger and freight transport and in international aviation and shipping.

To achieve a climate-neutral energy system by 2040 that protects nature and people in the extraction of the required materials, difficult choices are needed. The starting point is that no mining takes place in areas considered ‘off-limits’ based on ecological, natural, and social values. The framework for this is outlined in the Greenpeace International report *Beyond Extraction*. The current report illustrates the solution space for the Dutch situation.

With these choices, it is possible to limit demand for critical and strategic materials. In a scenario with a new equilibrium and circular technologies (NECT+), only seven materials in 2035 require more than the relative share of Dutch energy consumption (0.4%). Demand for all materials is considerably lower than in the KM scenario: for iridium it is 1.2% (KM: 2.3%), for neodymium 0.6% (KM: 2.1%), and for lithium 0.5% (KM: 1.3%).

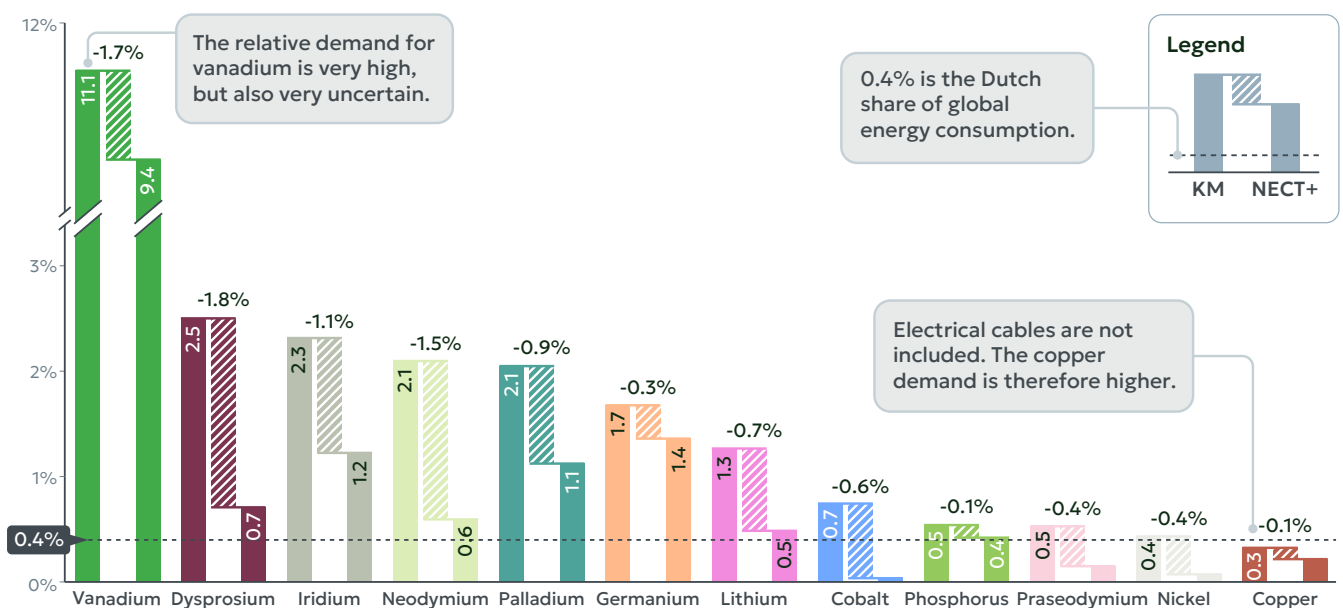
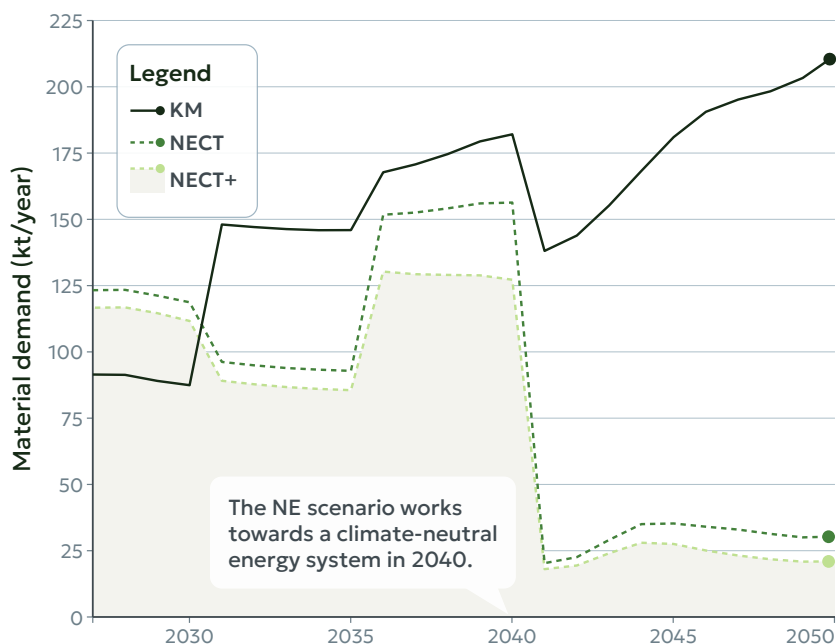


Figure 1 | Demand for ‘transition materials’ from the KM, NECT and NECT+ scenarios (in 2035) relative to global mining production (2024), compared to Dutch energy consumption (0.4%).

Annual critical material demand NECT+ in relation to NECT and KM (2027 to 2050)



Total critical material demand 2027 to 2050

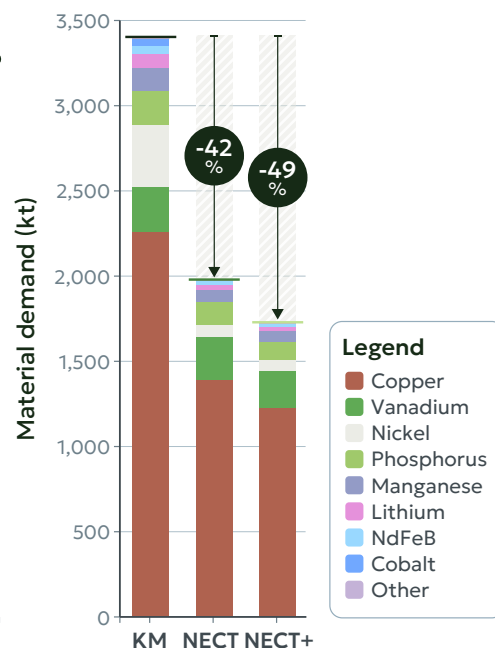


Figure 2 | Total demand for 'transition materials' in the NECT+ scenario in the period 2027-2050 (left), and in total (right).

These reductions first require large-scale energy savings and strategic downsizing. This leads to lower energy demand and less required generation and storage capacity. This calls for an accelerated phase-out of energy-intensive industry, a major reduction in aviation and shipping, and a modal shift from car to train, bus, and bicycle. This can lead to capacity savings of 18-24% (solar), 36-42% (wind), 37-43% (batteries), and 64-82% (electrolysis).

In addition, efforts are needed to reduce critical material demand from energy technologies. This requires greater efficiency from technologies, substitution with alternative technologies that use fewer critical materials, and life extension of products and components.

- In **wind turbines**, neodymium can be eliminated entirely by switching to geared turbines and, in time, high-temperature superconductors.
- In **solar panels**, life extension has the greatest potential.
- For **grid-scale and home batteries**, substitution options are strong: replacing NMC batteries with LFP batteries makes cobalt and nickel virtually redundant, and sodium-ion batteries can reduce lithium demand.
- For **long-duration storage**, organic flow batteries can reduce vanadium demand to zero.

When system and technological measures are combined, total critical material demand over the period 2027 – 2050 can fall by 49%. Material demand in 2050 is 90% lower than in the KM scenario. In absolute terms, the largest reductions occur in the widely used materials copper, vanadium, phosphorus, and manganese.

Copper remains a point of concern in all scenarios. In the most ambitious scenario, copper accounts for 71% of total material demand. Copper demand is difficult to reduce because copper is widely used in virtually all parts of the energy system.

The combination of measures shows that the critical material demand of the Dutch energy transition can be met without mining in restricted areas, including the deep sea. The relative demand for many materials in 2035 is often close to the share required for the Netherlands in 2024. For materials extracted through deep-sea mining (copper, cobalt, nickel, and manganese), there are relatively sufficient reserves outside these restricted areas (based on prior research). However, copper remains a point of concern here as well.

Focusing exclusively on system level or technology level measures is insufficient to reduce demand for transition materials towards ‘responsible mining’. System measures, primarily energy savings, together lead to a 32% reduction in the required amount of transition materials. Technological measures together lead to a 24% reduction. These reductions are spread across the different materials.

Only a combined effort across the different strategies is sufficient to realise the potential reductions. Focusing solely on system measures or technological innovation is not enough. Based on the analysis, six priorities emerge; these are presented below.

Critical materials are largely critical for geopolitical reasons. China holds a dominant position and can therefore exert significant influence across the entire supply chain. At the time of publication of this research (early 2026), supply and demand of critical materials are relatively well balanced globally, but free trade is under pressure. Efforts to reduce demand for critical materials can therefore make a strong contribution to strategic autonomy.


TRACK I
Energy savings & strategic downsizing

- Strategic choices in national industry**
with a vision of which industries do and do not fit in a climate-neutral Netherlands
- Structural investment in energy savings**
for industry, mobility, and the built environment
- A modal shift from car to shared mobility**
with a greater share of train, bus, and bicycle
- Optimisation of existing infrastructure**
through greater use of bidirectional charging and life extension of solar panels


TRACK II
Alternative, CRM-lean energy technologies

- Investments in research into and application of CRM-lean technologies**
with targeted R&D financing and steering through tenders for e.g. wind farms
- Improve design guidelines for sustainable energy technologies**
both through tightening via EcoDesign and through enforcement in practice

01

Inleiding

Wanneer we de wereldwijde CO₂-uitstoot op korte termijn willen beperken, vraagt dat om kritieke metalen voor duurzame energietechnologieën. In de transitie naar een schoon energiesysteem is daarom een nieuw evenwicht nodig. Dit hoofdstuk schetst de opgave waar we binnen de energietransitie voor staan.



INLEIDING

De energietransitie is een materialentransitie. De overgang naar een schoon energiesysteem leidt tot een grote vraag naar (kritieke) materialen voor duurzame energietechnologieën als zonnepanelen, windturbines, batterijen en elektrolyzers. Om deze ‘transitiematerialen’ te winnen, is aanvullende mijnbouw nodig.

Bij deze nieuwe mijnbouw ontstaat een dilemma. Mijnbouw leidt immers vrijwel altijd tot schade aan de natuur en ecosystemen. Deze materialen zijn echter wel nodig voor de technologieën om een klimaatneutraal energiesysteem mogelijk te maken.

De groeiende vraag naar ‘transitiematerialen’ is voor de mijnbouwindustrie het argument om de druk op overheden op te voeren om mijnbouw toe te staan. Denk daarbij zowel aan nieuwe mijnbouw op land, zoals winning van lithium in Servië, als aan winning op zee, zoals het mijnen van mangaanknollen in de Clarion-Clipperton-zone.

Het huidige energieverbruik wordt vaak als gegeven beschouwd. Dit onderzoek laat zien dat er door andere keuzes in het energiesysteem, waaronder een sterke reductie van de energievraag, een nieuw evenwicht kan ontstaan tussen onze levensstijl en de benodigde hoeveelheid materiaal om in die levensstijl te kunnen voorzien.

Deze andere oplossingsrichtingen kunnen – naast een verlaging van de benodigde mijnbouw – ook bijdragen

aan een sterkere strategische autonomie. Op dit moment is er wereldwijd een grote afhankelijkheid van China voor de import van zowel kritieke metalen als de technologieën waar deze materialen in verwerkt zitten, van zonnepanelen tot elektrische voertuigen.¹

Dit nieuwe evenwicht kan alleen ontstaan wanneer verschillende maatregelen voldoende snel en voldoende effectief worden genomen. Dit zal in de praktijk ook vragen om verschuivingen in gedrag en een kritischer perspectief op het benodigde energiegebruik. Het vereist dat we duurzame energie behandelen als schaars goed, wat het op sommige momenten zal zijn.

Het doel van dit onderzoek is om te laten zien op welke manier deze andere keuzes kunnen leiden tot een lagere vraag naar kritieke materialen. Als gevolg daarvan is ook minder mijnbouw nodig. Deze resultaten en conclusies zijn niet 1-op-1 te vertalen naar andere landen, maar bieden wel inzicht in richting en orde grootte.

Om op een rechtvaardige manier tot een klimaatneutraal energiesysteem te komen, is dus ook een verschuiving in houding en gedrag vanuit de samenleving nodig. We zullen los moeten laten dat we dezelfde hoeveelheid energie op dezelfde manier kunnen blijven verbruiken als vandaag. Met dit onderzoek nodigen we uit om het toekomstige energiesysteem vanuit een ander perspectief te bekijken.

Leeswijzer

Hoofdstuk 2

Toelichting op **beschikbare materialen uit mijnbouw** voor de energietransitie

Hoofdstuk 3

Toelichting van **uitgangspunten**, op basis waarvan een alternatief energiesysteem is gemodelleerd.

Hoofdstuk 4

Potentie van **systeemstrategieën** om de kritieke materiaalvraag van het energiesysteem te verlagen.

Hoofdstuk 5

Potentie van **technologische strategieën** om de kritieke materiaalvraag van het energiesysteem te verlagen.

Hoofdstuk 6

Potentie van de **gecombineerde systeem- en technologische strategieën** om de kritieke materiaalvraag van het energiesysteem te verlagen.

Hoofdstuk 7

Conclusies, om inzicht te geven in welke rode draden van belang zijn bij het sturen op de kritieke materiaalvraag van het energiesysteem.

Hoofdstuk 8

Prioriteiten in het verlagen van de kritieke materiaalvraag, op weg naar een nieuw evenwicht.



02

Mijnbouw voor de energietransitie

Voor een klimaatneutraal energiesysteem zijn duurzame energietechnologieën nodig. In die technologieën zitten kritieke materialen verwerkt. Om die kritieke materialen te winnen, is mijnbouw nodig. Dit hoofdstuk geeft inzicht in de beschikbare materialen vanuit mijnbouw, die gebruikt kunnen worden in de energietransitie.





MIJNBOW VOOR DE ENERGIETRANSITIE

De aanname dat voor de energietransitie nieuwe mijnbouw nodig is, wordt maatschappelijk breed gedeeld. Er zijn immers meer (kritieke) materialen nodig, die ergens vandaan moeten komen. De vraag in hoeverre deze materialen uit bestaande mijnen en recycling gewonnen kunnen worden of dat hier nieuwe mijnen (op land of in de diepzee) voor nodig zijn, wordt echter niet vaak gesteld.

Een belangrijke kanttekening bij mijnbouw voor de energietransitie is dat er ook voor het bestaande, fossiele energiesysteem veel mijnbouw nodig is. Kolenwinning is immers een voorwaarde om kolencentrales te laten draaien – en de wereldwijd verbrande hoeveelheid kolen is ook in 2025 toegenomen.² De groei in het aanbod van duurzame energie compenseert grotendeels de wereldwijde stijgende energievraag, maar niet helemaal.³

Nederlands onderzoek laat zien dat duurzame energiebronnen zorgen voor netto de helft minder mijnbouw in de opbouwfase van de energietransitie, en nog minder als de energietransitie eenmaal is

voltooid.⁴ De benodigde mijnbouw voor kritieke materialen gaat gepaard met een grotere afname van kolenmijnbouw wanneer kolenstroom wordt vervangen door duurzame elektriciteit.

Recentelijk is er veel aandacht voor diepzeemijnbouw. Daar liggen kritieke metalen, onder meer in de vorm van mangaanknollen. Op dit moment is diepzeemijnbouw in internationale wateren niet toegestaan. Greenpeace voert campagne voor een tijdelijk verbod op diepzeemijnbouw, onder meer vanwege risico's voor de kwetsbare natuur en de onzekerheid over de effecten op lange termijn.

In opdracht van Greenpeace International is recent het onderzoek *Beyond Extraction* gepubliceerd, uitgevoerd door de Technische Universiteit Sydney en het Institute for Sustainable Futures. Dit onderzoek gaat expliciet in op de wereldwijd beschikbare metalen voor de energietransitie, inclusief *restricted areas* voor mijnbouw. De belangrijkste conclusies van dit onderzoek zijn onderstaand samengevat.

Onderzoek: internationale kritieke materiaalvraag voor energietransitie

Om ernstige klimaatverandering te voorkomen, is het van het grootste belang om de opwarming van de aarde te beperken tot 1,5 °C. Dat vraagt een snelle afbouw van het gebruik van fossiele brandstoffen: kolen, olie en gas. Tegelijkertijd is mijnbouw nodig voor een opbouw van het schone, klimaatneutrale energiesysteem.

Het internationale onderzoek *Beyond Extraction* biedt inzicht in hoe de energietransitie kan plaatsvinden met minder nieuwe mijnbouw.⁵ De studie gebruikt het *One Earth Climate Model* (OECM) om drie transitiepaden door te rekenen: (i) OECM Net Zero, (ii) een *Progressive-scenario* (PRO) en (iii) een PRO-scenario met versnelde inzet van natrium-ion batterijen (PRO-Na-ion). Voor negen mineralen (koper, kobalt, grafiet, dysprosium, lithium, mangaan, neodymium, nikkel en vanadium) is de jaarlijkse en totale materiaalvraag voor zon, wind, batterijopslag en elektrische voertuigen berekend. Deze scenario's worden vergeleken met de 'reguliere' scenario's vanuit de *International Energy Agency*.

De materiaalvraag in het PRO-scenario daalt vooral door extra energiebesparing, een grotere rol voor openbaar vervoer en een minder sterke groei van het aantal auto's. In het PRO-scenario is de benodigde hoeveelheid 'transitiematerialen' in de periode 2024–2050 ongeveer een derde lager dan in OECM Net Zero-scenario. Met hoge recyclingpercentages is de jaarlijkse winning uit mijnbouw in het PRO-scenario voor vrijwel alle mineralen maximaal 2 – 6 keer hoger dan de winning van deze materialen in 2024. De enige uitzondering is vanadium, die in 2040–2050 juist iets hoger uitvalt door meer redox-flowbatterijen voor netstabilisatie.

De conclusie van *Beyond Extraction* is dat er, in een ambitieuze energietransitie, geen noodzaak is om kritieke materialen te winnen in gebieden die als 'off-limits' moeten worden beschouwd voor mijnbouw. Om dit te beoordelen combineert het onderzoek

een kaart met *restricted areas* (gebieden met hoge ecologische of sociale waarde) met *Reserves Proxy Areas* voor nikkel, lithium en kobalt.

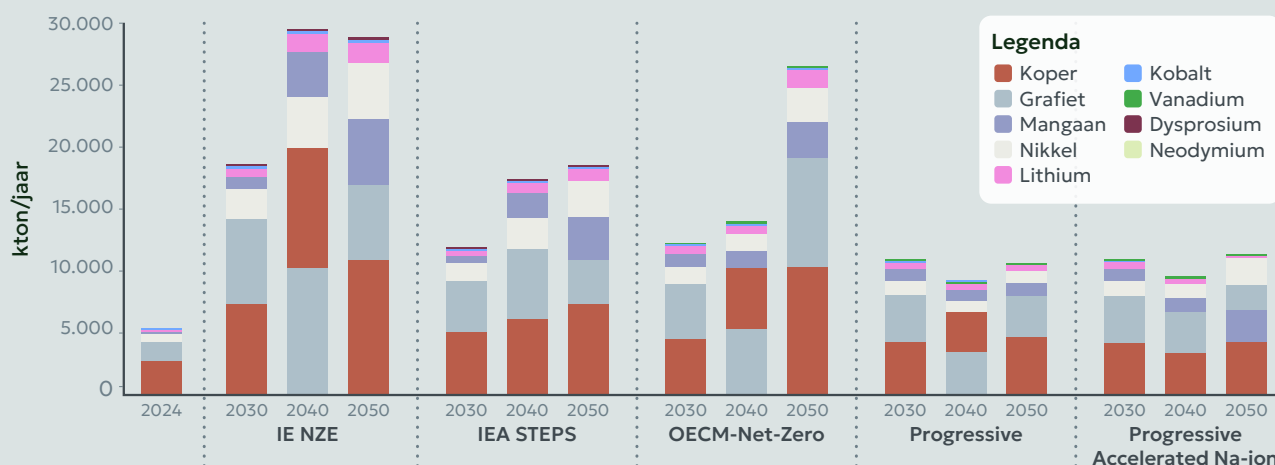
De analyse concludeert dat circa 45% van de nikkelreserves, 57% van de lithiumreserves en 27% van de kobaltreserves binnen zulke 'off-limits'-gebieden kunnen liggen. Buiten deze zogenoemde *restricted areas* zouden de beschikbare reserves voldoende kunnen zijn voor ambitieuze transitiepaden, mits de energietransitie prioriteit krijgt in de toepassing van deze materialen: in het PRO-Na-ion-scenario met recycling is de transitievraag gelijk aan ongeveer 47% (nikkel), 81% (lithium) en 24% (kobalt) van de reserves buiten *restricted areas*.



Figuur 4 | Restricted areas map uit *Beyond Extraction*.

In de aanbevelingen worden vijf interventies voorgesteld, die ook onderdeel zijn van de maatregelen in dit onderzoek:

- Vraagreductie via gedeelde mobiliteit en efficiëntie.
- Verschuiving naar batterijtechnologieën met minder lithium/kobalt/nikkel.
- Ontwerp voor hergebruik en opschaling van recycling.
- Prioritering van mineralen voor essentiële toepassingen.
- Bescherming van *restricted areas* tegen mijnbouwontwikkeling.



Figuur 3 | Vergelijking tussen 'reguliere' IEA-scenario's en drie scenario's uit *Beyond Extraction*⁵.

Materiaalvoorraden

Om te bepalen in hoeverre extra mijnbouw op land – en eventueel diepzeemijnbouw – nodig is voor de opbouw van een schoon en klimaatneutraal energiesysteem, is inzicht nodig in de totale beschikbare voorraden. Tabel 1 laat zien wat deze voorraden zijn, op basis van cijfers van USGS.⁶

De conclusie is dat voor de wereldwijde energietransitie – zoals geschetst in het rapport *Beyond Extraction* – de huidige bewezen, winbare voorraden op land voldoende moeten zijn om de wereldwijde transitie naar een schoon energiesysteem te realiseren.

Materiaal	Bewezen winbare voorraden op land (ton)	Jaarlijkse productie geraffineerd materiaal (ton, 2024)	Potentiële voorraden in zee (ton, indicatie)	% van voorraad t.b.v. energietransitie (<i>Beyond extraction</i> , OECM-scenario)
Mangaan	1.700.000.000	20.000.000	Groot	3%
Koper	980.000.000	23.000.000	Groot	26%
Nikkel	130.000.000	3.700.000	Groot	51%
Lithium	30.000.000	240.000	Klein (bijproduct)	97%
Vanadium	18.000.000	100.000	Klein (bijproduct)	10%
Zeldzame aardmetalen (Neodymium, dysprosium, praseodymium)	Nd: 12.800.000 Dy: 1.100.000	Nd: 6.000 Dy: 1.800	Klein (bijproduct)	Nd: 7% Dy: 15%
Kobalt	11.000.000	290.000	Groot	78%
Fosfor	74.000.000.000	240.000.000	Groot	Buiten scope
Titanium	560.000.000	9.400.000	Klein tot middelgroot	Buiten scope
Zilver	640.000	25.000	Klein	Buiten scope
Platina-groep-metalen (Iridium, Palladium, Platina)	Schatting: 100.000+	Ir: - Pa: 190 Pl: 170	-	Buiten scope
Gallium	Onbekend (bijproduct)	1.100	Klein (bijproduct)	Buiten scope
Germanium	Onbekend (bijproduct zink)	Onduidelijk	Klein (bijproduct)	Buiten scope
Yttrium	Onbekend, data alleen bekend op rare earths groep niveau	Onbekend, data alleen bekend op rare earths groep niveau	Klein (bijproduct)	Buiten scope

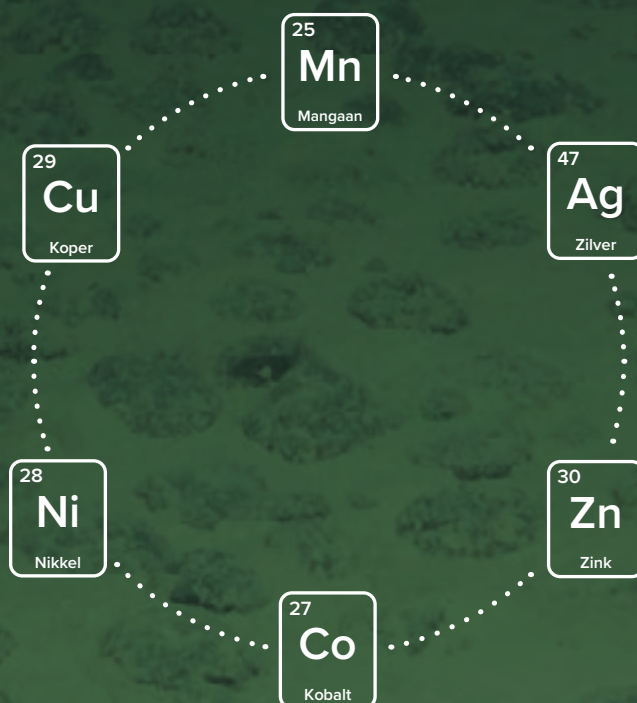
Tabel 1 | Voorraden en productiecijfers van strategische en kritieke materialen.

Metalen in de diepzee

De diepzee wordt steeds vaker genoemd als bron voor kritieke materialen. Op hoofdlijnen zijn er drie vormen van mineralen die in de diepzee voorkomen, die mogelijk relevant zijn voor de energietransitie⁷. Al deze vormen hebben miljoenen jaren nodig om te ontstaan.

- **Polymetallische- of mangaanknollen**, met als belangrijkste materialen mangaan (28%), nikkel (1,3%), koper (1,1%) en kobalt (0,2%). In deze knollen bevinden zich ook sporen van zeldzame aardmetalen en lithium, molybdeen, platina, titanium en tellurium. De samenstelling verschilt sterk per locatie. Voor economische winbaarheid moet de verspreiding van knollen in een gebied naar schatting minimaal 10 kg/m² bedragen, met gemiddelden rond 15 kg/m² over aaneengesloten gebieden.⁸
- **Ferromangaankorsten**, met relatief hoge percentage kobalt (tot wel 0,6%). Daarnaast bevatten deze korsten mangaan, koper en nikkel naast spoorconcentraties van zeldzame aardmetalen, lithium, thallium, tellurium, yttrium, bismut, niobium en wolfram. Deze korsten worden in zeer langzaam tempo afgezet op kale rotsoppervlakken. Dit proces heeft miljoenen jaren nodig om een korst van 10-20 centimeter te bereiken.
- **Zeebodem massieve sulfiden**, die koper, zink, zilver en goud bevatten. Deze sulfiden worden afgezet bij hydrothermale bronnen.

Wanneer we kijken naar de benodigde materialen voor de energietransitie en de beschikbare voorraden op land, lijken vooral nikkel en kobalt materialen waarvoor diepzeewinning mogelijk interessant is. Voor deze materialen is immers een relatief hoog aandeel van de op dit moment beschikbare voorraden op land nodig voor de energietransitie. Naast de energietransitie zijn er ook nog andere toepassingsgebieden waar deze kritieke metalen gebruikt worden, zoals high-techproducten voor elektronica, industrieel gebruik en militaire toepassingen.⁹



03

Uitgangspunten

Een nieuw evenwicht voor het energiesysteem leidt tot andere keuzes in zowel de energievraag als het ontwerp van het energiesysteem. Daarnaast liggen er verschillende mogelijkheden om nieuwe, meer circulaire technologieën toe te passen. Dit hoofdstuk schetst de uitgangspunten voor de modellering van een nieuw scenario voor het energiesysteem.

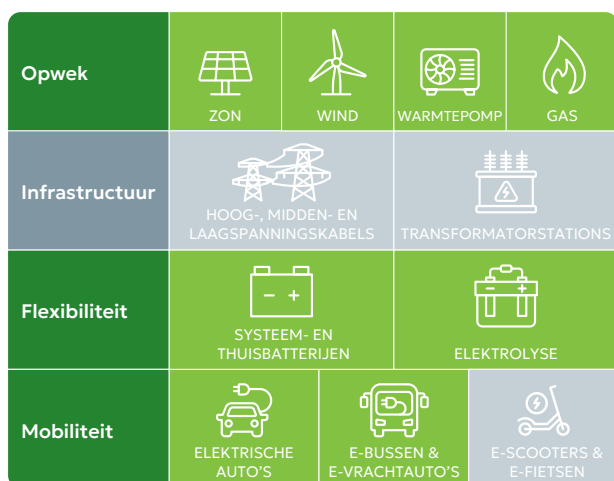


UITGANGSPUNTEN

Scope: energiesysteem

Dit onderzoek kijkt naar de onderdelen van het energiesysteem die relevant zijn voor de vraag naar 'transitiematerialen'. Binnen deze scope vallen de benodigde materialen voor opwek van elektriciteit (o.a. windturbines, zonnepanelen, elektrolyzers, gasturbines) en verschillende vormen van energieopslag. Ook elektrische voertuigen zijn meegenomen.

Elektriciteitskabels, maar ook transformatorstations, zijn niet meegenomen, omdat deze niet goed zijn gemodelleerd in het Energietransitiemodel (ETM). Voor de opwek van warmte worden warmtepompen wel meegenomen, maar warmte-distributie niet, omdat hier weinig tot geen kritieke materialen voor worden gebruikt.



Figuur 5 | Scope onderzoek.

Referentie: Koersvaste Middenweg (KM)

De basis voor de modellering in dit onderzoek is het *Koersvaste Middenweg* (KM-)scenario, dat is opgesteld door Netbeheer Nederland.¹⁰ Het KM-scenario komt – van de vier Netbeheer Nederland-scenario's – het dichtste in de buurt bij het Nationaal Plan Energiesysteem 2023 (NPE). Het NPE dient voor het Ministerie van EZK als basis voor eigen beleid.¹¹ Daarmee is dit scenario het meest geschikt als referentie voor de besparingen in kritieke materiaalvraag, die later in dit rapport worden gegeven.

In de modellering van het KM-scenario zijn een aantal randvoorwaarden gehanteerd, die ook voor het scenario Nieuw Evenwicht zijn behouden:

- **Import.** Keuzes mogen niet gecompenseerd worden door een toename in import van energie (elektriciteit, biomassa, warmte en/of waterstof).

- **Interconnectiviteit.** Elektriciteitskabels tussen landen zijn essentieel om in gevallen van (vaak lokale) overschotten of tekorten de energievraag te kunnen balanceren. Omdat in het KM-scenario met een capaciteit van 20 GW al een sterke interconnectiviteit is opgenomen, is deze niet verder verhoogd.
- **Leveringszekerheid.** De leveringszekerheid als gevolg van alternatieve keuzes mag niet dalen ten opzichte van het KM-scenario: een maximale stroomuitval van 102 uur per jaar, op basis van de modellering in het Energietransitiemodel.

Voorwaarden energiesysteem

In lijn met de strategische inzet van Greenpeace is een aantal aanvullende voorwaarden gehanteerd bij het ontwerp van een nieuw energiesysteem. Deze randvoorwaarden zijn ook onderdeel van een eerder energiesysteemscenario dat in opdracht van Greenpeace is ontwikkeld: *Nederland klimaatneutraal in 2040* (2025)⁴⁹. Deze aanvullende voorwaarden zijn verwerkt voor de modellering van maatregelen (Hoofdstuk 4). De aanvullende voorwaarden voor het Nieuw Evenwicht (NE)-scenario zijn als volgt:

- **Klimaatneutraal in 2040.** Het einddoel is klimaatneutraal in 2040, in plaats van 2050 (KM-scenario).
- **Geen kernenergie.** Er wordt geen gebruik gemaakt van kernenergie, in plaats van 7 GW aan kerncentrale-capaciteit (KM-scenario). Deze centrales zijn vervangen door 7 GW waterstof (STEG) centrales.
- **Beperkte capaciteit wind-op-zee.** De maximale capaciteit is 50 GW, in plaats van 91 GW (KM-scenario). Daarmee blijft er voldoende ruimte voor de natuur op de Noordzee.
- **Elektrolysecapaciteit.** De elektrolysecapaciteit op land is maximaal 10 GW, in plaats van 28 GW (KM-scenario), vanwege de beperking van capaciteit voor wind-op-zee. Dit wordt opgevangen door extra productiecapaciteit voor blauwe waterstof: er is 7,5 GW aan *Autothermal Reforming* (ATR)-capaciteit met CCS toegevoegd.
- **Luchtwarmtepompen.** De hoeveelheid luchtwarmtepompen wordt gehalveerd en vervangen door hybride warmtepompen op groen gas.
- **Direct air capture (DAC).** Inzet op CO₂-verwijdering uit de atmosfeer via *Direct Air Capture*-technieken wordt ingezet om de resterende emissies te compenseren en 100% CO₂-reductie in 2040 te bereiken.

Opbouw scenario's

Om te komen tot een totaalscenario voor het scenario **Nieuw Evenwicht en Circulaire Technologie (NECT)** worden in dit onderzoek een aantal deelscenario's uitgewerkt. Door de combinatie van deze deelscenario's wordt de bandbreedte in oplossingsrichtingen zichtbaar. Dat leidt tot inzicht in de mogelijke materiaalvraagbesparing bij een minder sterke implementatie van maatregelen. In combinatie met de referentie en de eindscenario's ontstaan er in deze studie in totaal zeven scenario's:

KM: Koersvaste Middenweg

op basis van de huidige uitwerking van Netbeheer Nederland en huidige materiaalintensiteiten (inclusief correctie *baseline*, zie Hoofdstuk 5).

STRATEGIEËN ENERGIESYSTEEM

NE: Nieuw Evenwicht

met verschuivingen in systeemkeuzes ten opzichte van het KM-scenario

NE+: Nieuw Evenwicht +

met sterke verschuivingen in systeemkeuzes ten opzichte van het KM-scenario

STRATEGIEËN ENERGIETECHNOLOGIEËN

CT: Circulaire technologieën

met enige verschuivingen op technologieniveau

CT+: Circulaire technologieën +

met sterkere verschuivingen op technologieniveau

GECOMBINEERDE STRATEGIEËN

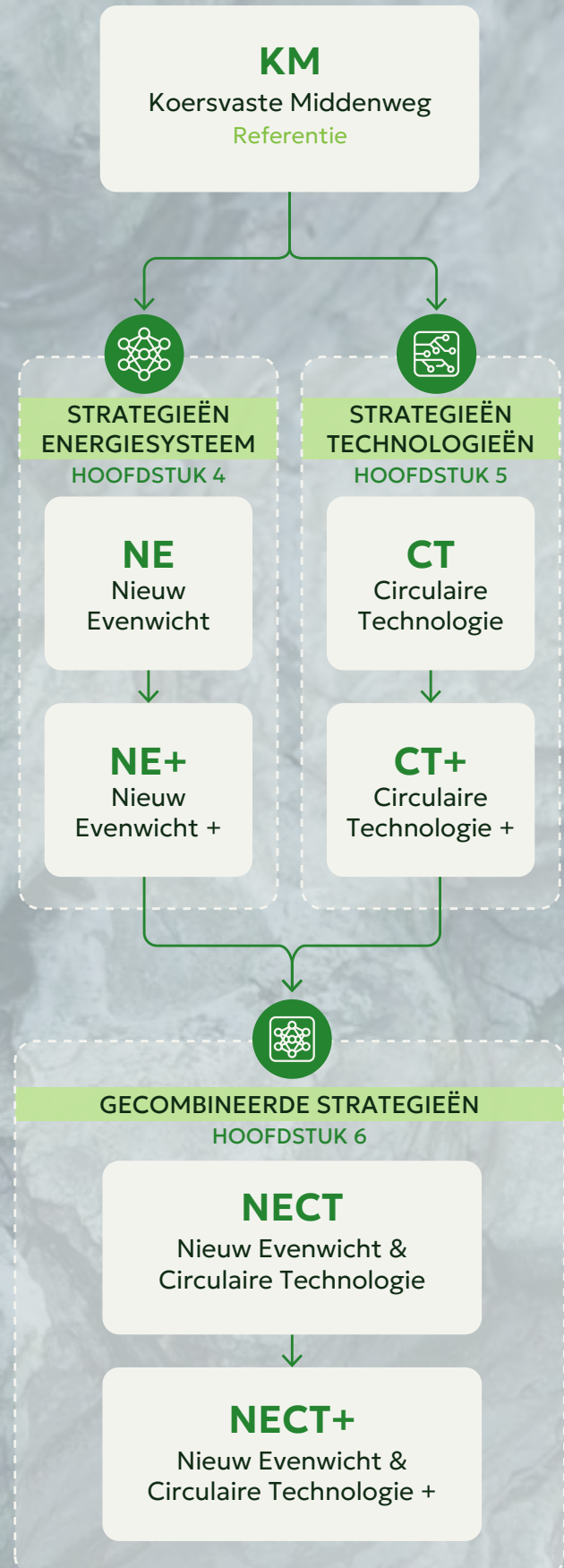
NECT: Nieuw Evenwicht & Circulaire technologieën

de combinatie van de systeemkeuzes (NE) en een verschuiving naar circulaire technologieën (CT)

NECT+: Nieuw Evenwicht & circulaire technologieën +

de combinatie van sterkere systeemkeuzes (NE+) en sterkere verschuiving naar circulaire technologieën (CT+)

OVERZICHT SCENARIO'S



Figuur 6 | Samenhang deelscenario's.

04

Materiaalvraag systeemstrategieën

Dit hoofdstuk analyseert maatregelen die op systeemniveau genomen kunnen worden om de vraag naar ‘transitiematerialen’ te verlagen. Daarbij is de reductie in kritieke materiaalvraag berekend voor drie strategieën, met in totaal zeven systeemmaatregelen.



MATERIAALVRAAG SYSTEEMSTRATEGIEËN

In het ontwerp van het energiesysteem moeten keuzes worden gemaakt. Deze keuzes worden op dit moment vaak gemaakt op basis van de prioriteiten in het energie- en klimaatbeleid: CO₂-reductie, leveringszekerheid van energie en betaalbaarheid van het systeem. Daarbij is het einddoel vanuit nationaal beleid – en daarmee van het KM-scenario – om te komen tot een klimaatneutraal energiesysteem in 2050.

Met bewuste maatregelen kan in het energiesysteem een nieuwe balans tussen vraag en aanbod ontstaan. Bij een veel lagere vraag naar energie is immers ook veel minder aanbod van (duurzame) energie nodig. Daarmee zijn er ook minder kritieke materialen nodig, wat weer leidt tot een lagere vraag naar mijnbouw en behoud van natuur op locaties met winbare materiaalvoorraden.

De maatregelen in dit hoofdstuk worden gemodelleerd met het Koersvaste Middenweg-scenario als referentie. In het ontwerp van een alternatief energiesysteem zijn daarbij aanvullende voorwaarden geschetst (zie Hoofdstuk 3).

Maatregelen: verkennend karakter

De maatregelen hebben een verkennend karakter. Voor deze doorrekening wordt het *Koersvaste Middenweg* (KM-)scenario als basis gebruikt. Dit KM-scenario is echter een *ontworpen scenario*, met als doel een *mogelijke* toekomst van het energiesysteem te verkennen. Dit scenario is dus niet opgesteld of beoordeeld vanuit marktomstandigheden, draagvlak of economische effectiviteit.

Drie strategieën

Dit hoofdstuk verkent de effecten van drie strategieën, met in totaal zeven maatregelen. Deze strategieën en maatregelen zijn samengevat in onderstaande tabel.



STRATEGIE A. Energiebesparing & krimp

- 1 Versneld afbouwen energie-intensieve industrie
- 2 Krimp in lucht- en scheepvaart
- 3 Krimp en *modal shift* in wegvervoer
- 4 Verdere verbetering gebouwisolatie



STRATEGIE B. Verhogen *demand side response*

- 5 Verlengen 'vraaguitstel' van industrie
- 6 Verhogen aandeel bidirectioneel laden



STRATEGIE C. Meer inzet op warmte

- 7 Verder uitbreiden warmtenet



STRATEGIE A. Energiebesparing & krimp



De eerste strategie is verdere energiebesparing ten opzichte van het KM-scenario. In dit KM-scenario zitten al forse besparingen, van 9-44% per sector. Om de vraag naar kritieke materialen voor het energiesysteem te beperken, is echter verdere energiebesparing nodig. In deze strategie is het volgende maatregelenpakket doorgerekend:

- 1 Versneld afbouwen energie-intensieve industrie
- 2 Krimp in lucht- en scheepvaart
- 3 Krimp en *modal shift* in wegvervoer
- 4 Verdere verbetering gebouwisolatie

1 Versneld afbouwen energie-intensieve industrie

Voor het **versneld afbouwen** van de energie-intensieve industrie is gekozen voor afbouw van specifieke industrieën, in lijn met onderzoek in opdracht van Natuur & Milieu¹². Ook zijn er geen industriële sectoren toegevoegd ten opzichte van het KM-scenario. Dit leidt in 2040 tot de volgende resultaten:

- De staalindustrie is gereduceerd met 25% (NE) en 50% (NE+);
- De raffinage- en kunstmestindustrie is gekrompen met 50% (NE) en 100% (NE+).

2 Krimp in lucht- en scheepvaart

Voor de **krimp in lucht- en scheepvaart** is een reductie van 80-90% in 2050 noodzakelijk om de opwarming van de aarde te kunnen beperken tot 1,5 °C. Dit volgt uit een CO₂-budgetanalyse die laat zien wat er nodig is om binnen een eerlijk aandeel van het mondiale koolstofbudget te blijven.¹³ Op basis van deze inzichten is in dit scenario een vergaande krimp van zowel de luchtvaart als scheepvaart voorgesteld. Voor de luchtvaart is dit in 2040 een afname van

42,5% (NE) tot 85% (NE+). Voor de scheepvaart is dit een verlaging van 25% (NE) tot 50% (NE+). De afnames uit het NE+ scenario zijn in lijn met de scenario's uit *Beyond Extraction*⁵.

3 Krimp en *modal shift* in wegvervoer

Voor **personenvervoer** is zowel uitgegaan van een krimp in het totale aantal voertuigkilometers als een verschuiving in modaliteiten:

- De **krimp** is gebaseerd op 12% reductie van de totale vervoersvraag in 2050, ten opzichte van 2019. Dit betekent een jaarlijkse groei van +0,1% (NECT) en jaarlijkse krimp van 0,6% (NECT+), in vergelijking met +0,9% per jaar in het KM-scenario.
- Bij de **verschuiving** is uitgegaan van een verschuiving van 12,5% in 2040 (NE) tot 25% in 2040 (NE+) van autokilometers naar fietsen, bussen, treinen en trams. Deze verschuiving is evenredig verdeeld over de vier alternatieve mobiliteitsvormen.

Voor **vrachtvervoer** is zowel uitgegaan van een krimp in het totale aantal ladingtonbewegingen als een verschuiving in modaliteiten:

- De **krimp** is gebaseerd op een reductie van 6 miljoen naar 3,6 miljoen ladingtonkilometers in het NECT+ scenario (-2,4%/jaar), met een tussenvorm in het NECT-scenario (-0,7% per jaar), ten opzichte van een groei in het KM-scenario (+1,0% per jaar).
- Bij de **verschuiving** is uitgegaan van een verschuiving van wegvervoer evenredig naar spoor en binnenvaart tot gevolg welke een verhoogd aandeel van 29 naar 58% zien.

4 Verdere verbetering gebouwisolatie

Voor **gebouwisolatie** is uitgegaan van verdere energiebesparing voor woningen, met 10% (NE) en 20% (NE+). Voor overige gebouwen (o.a. kantoren) zijn de aannames in het Koersvaste Middenweg aangehouden: hiervoor zijn reeds hoge isolatiegraden gemodelleerd.

Maatregel	Referentie (2019)	KM-scenario (2050)	NE-scenario (2040)	NE+ -scenario (2040)
1 Versneld afbouwen energie-intensieve industrie				
Staalsector	-	9% energie- besparing	- 25% capaciteit	- 50% capaciteit
Raffinage- en kunstmestsector	-		- 50% capaciteit	- 100% capaciteit
2 Krimp in lucht- en scheepvaart				
Luchtvaart	Luchtvaart 46 TWh	Geen krimp	Luchtvaart - 42,5%	Luchtvaart - 85%
Zeescheepvaart	Zeescheep-vaart 86 TWh		Zeescheepvaart - 25%	Zeescheepvaart - 50%
3 Krimp en modal shift in wegvervoer				
Personenvervoer				
Jaarlijkse krimp (voertuigkilometers)	-	+ 0,9% / jaar Voertuig- kilometers	+ 0,1% / jaar Voertuig- kilometer	- 0,6% / jaar Voertuig- kilometers
Verschuiving in 2050 (voertuigkilometers)	-	Zeer geringe verschuiving	12,5% verschuiving van autovervoer naar fietsen, bussen, treinen & trams	25% verschuiving van autovervoer naar fietsen, bussen, treinen & trams
Aandeel auto in 2050 (voertuigkilometers)	74%	73%	61%	49%
Goederenvervoer				
Jaarlijkse krimp	-	+ 1,0% / jaar	- 0,7% / jaar	- 2,4% / jaar
Verschuiving in 2050	-			
Aandeel vrachtwagen in 2050 (ladingtonkilometers)	77%	68%	60%	41%
4 Verdere verbetering gebouwisolatie				
Reductie in warmtevraag door betere isolatie	-	11% reductie	21% reductie	31% reductie
Energiebruik (gemiddeld)	178 kWh/m ²	158 kWh/m ²	142 kWh/m ²	126 kWh/m ²

Tabel 2 | Kenmerken van maatregelen | Strategie *Energiebesparing & krimp*.

Capaciteitsbesparing

De strategie 'Energiebesparing & krimp' heeft grote invloed op de benodigde capaciteit voor zowel energie-opwekking als energie-opslag. Dit leidt in het NE-scenario tot reducties van 18% (zon) tot 64% (elektrolyse). In het NE+-scenario zijn dit zelfs mogelijke reducties van 24% (zon) tot 82% (elektrolyse). De capaciteitsbesparingen zijn samengevat in tabel 3.

In het Koersvaste Middenweg-scenario is de industrie in 2050 de belangrijkste energieverbruiker, met 48% van het energieverbruik. Een snelle afbouw van de energie-intensieve industrie heeft de meeste invloed op de benodigde transitiematerialen voor de productie van energie.

Technologie	Koersvaste Middenweg (KM)	Nieuw Evenwicht (NE)	Nieuw Evenwicht (NE+)
 Zon	117 GW	96 GW (-18%)	89 GW (-24%)
 Wind	91 GW	58 GW (-36%)	53 GW (-41%)
 Batterijen (excl. onbenutte voertuigen)*	58 GW	31 GW (-46%)	31 GW (-46%)
 Elektrolyse	28 GW	10 GW (-64%)	5 GW (-82%)

Tabel 3 | Capaciteit van duurzame technologieën | Strategie *Energiebesparing & krimp*.

(*) inclusief batterijen in mobiliteit die worden ingezet voor de balans op het elektriciteitsnet. Batterijen die niet worden ingezet voor de balans zijn niet opgenomen in deze tabel.





STRATEGIE B. Verhogen *demand side response*



Een tweede strategie is het verhogen van de *demand side response* (DSR) ten opzichte van het KM-scenario. Vergaande DSR kan de energievraag flink verlagen op momenten dat er minder energie beschikbaar is. In deze strategie is het volgende maatregelenpakket doorgerekend:

- 5 Verlengen ‘vraaguitstel’ van industrie
- 6 Verhogen aandeel bidirectioneel laden

5 Verlengen ‘vraaguitstel’ van industrie

Voor de industrie is **vraaguitstel** gemodelleerd voor zowel de chemie, de metaalsector, datacenters en overige sectoren. Daarbij is vraaguitstel gemodelleerd van 24 uur (KM-scenario) naar 48 uur (NE) en 72 uur (NE+). Een mogelijke oplossingsroute voor dit vraaguitstel zijn ‘warmtebatterijen’ bij bedrijven zelf. Er zijn veel kansrijke ontwikkelingen op dit gebied¹⁴, die echter nog niet goed zijn opgenomen in de modellering van het energiesysteem.

6 Verhogen aandeel bidirectioneel laden

Voor het verhogen van het aandeel **bidirectioneel laden** wordt de accucapaciteit van elektrische voertuigen actiever ingezet om in de totale energievraag te voorzien. Daarbij wordt een groter deel van de in totaal 76 GW / 568 GWh aan batterijvermogen in de mobiliteit als tijdelijke opslagcapaciteit ingezet. Het aandeel bidirectioneel laden van personenauto's (totaal: 32 GW) wordt in deze strategie verhoogd van 14% (KM) naar 21% (NE) en 29% (NE+). Dat is een verdubbeling van de beschikbaarheid van de personenauto's voor bidirectioneel laden ten opzichte van het Koersvaste Middenweg-scenario.

De batterijen in bestelbusjes, vrachtwagens en bussen worden niet ingezet in het KM-scenario, maar worden met 5% (NE) en 10% (NE+) wel benut.

Beide maatregelen verlagen het netto energieverbruik echter niet. Deze maatregelen helpen vooral om de energievraag tijdelijk te beperken. Een modellering van het tijdelijk *afschakelen* van industriële capaciteit – waarbij de energievraag dus niet op een later moment alsnog ontstaat – is met het ETM niet te modelleren.

Maatregel	Referentie (2019)	KM-scenario (2050)	NE-scenario (2040)	NE+ -scenario (2040)
5 Verlengen 'vraaguitstel' van industrie				
Vraaguitstel industrie & datacenters (uren)	0 uur	+ 24 uur	+ 48 uur	+ 72 uur
6 Verhogen aandeel bidirectioneel laden				
Elektrische auto's (% bidirectioneel)	0%	14%	21%	29%
Elektrische bus, bestelbus & vrachtwagen (% bidirectioneel)	0%	0%	5%	10%

Tabel 4 | Kenmerken van maatregelen | Strategie *Verhogen Demand Side Response*.

Capaciteitsbesparing

De strategie 'Verhogen *demand side response*' leidt tot enige capaciteitsbesparing in de benodigde hoeveelheid systeembatterijen: ca 7% in het NE-scenario en 8% in het NE+ -scenario. Het opgestelde vermogen van zonnepanelen, windturbines en elektrolyse is echter veel hoger dan in het KM-scenario. Dit is het gevolg van systeemkeuzes in

het NE-scenario die afwijken van het KM-scenario (referentie), zoals het niet bouwen van kerncentrales. Omdat een van de randvoorwaarden is dat er geen significant grotere import van elektriciteit en waterstof wordt toegestaan, is het nodig om extra vermogen aan zon, wind en elektrolyse op te stellen.

Technologie	Koersvaste Middenweg (KM)	Nieuw Evenwicht (NE)	Nieuw Evenwicht (NE+)
 Zon	117 GW	146 GW (+25%)	136 GW (+16%)
 Wind	91 GW	93 GW (+3 %)	93 GW (+3%)
 Batterijen (excl. onbenutte voertuigen)*	58 GW	53 GW (-7%)	54 GW (-8%)
 Elektrolyse	28 GW	35 GW (+25%)	35 GW (+25%)

Tabel 5 | Capaciteit van duurzame technologieën | Strategie *Verhogen Demand Side Response*.

(*) inclusief batterijen in mobiliteit die worden ingezet voor de balans op het elektriciteitsnet. Batterijen die niet worden ingezet voor de balans zijn niet opgenomen in deze tabel.



STRATEGIE C. Meer inzet op warmte



Een derde strategie is sterkere inzet op warmte ten opzichte van het KM-scenario. Deze sterkere inzet op warmte kan de vraag naar elektriciteit beperken, net als het verlagen van de piekvraag met slimme warmtepompen. In deze strategie is één maatregel doorgerekend: het verder uitbreiden van het warmtenet.

7 Verder uitbreiden warmtenet

Voor de **aansluiting op het warmtenet** is het aandeel gebouwen en huishoudens op het warmtenet verder verhoogd. Daarbij vindt voor huishoudens een verhoging plaats van 20% (KM) naar 23% (NE) en 27% (NE+). Voor overige gebouwen is dit een verhoging naar 25% (NE) en 30% (NE+). In dit scenario is bewust gekeken naar het aansluiten van andere gebouwen dan huishoudens, omdat deze een ander soort energieverbruik hebben.

Maatregel	Referentie (2019)	KM-scenario (2050)	NE-scenario (2040)	NE+ -scenario (2040)
7 Verder uitbreiden warmtenet				
Mate van aansluiting op warmtenet	-	Enige aansluiting	Verdere aansluiting	Veel verdere aansluiting
% gebouwen	7%	20%	25%	30%
% huishoudens	4%	20%	23%	27%

Tabel 6 | Kenmerken van maatregelen | Strategie *Meer inzet op warmte*.

Capaciteitsbesparing

Meer warmtenetten ten opzichte van het KM-scenario leiden tot een lagere vraag naar warmtepompen. Die lagere vraag naar warmtepompen verlaagt de piekvraag van elektriciteit op kritieke momenten: de randen van de dag op donkere en koude momenten in het jaar. Het verlagen van de elektriciteitsvraag op piekmomenten door de inzet van warmte leidt daarom tot minder benodigde opslagcapaciteit voor elektriciteit. De strategie 'Meer inzet op warmte' leidt daarmee tot een afname in de hoeveelheid benodigde systeembatterijen: 12% in het NE-scenario en 15% in het NE+ -scenario.

Het opgestelde vermogen van zonnepanelen, windturbines en elektrolyse is juist veel hoger dan in het KM-scenariopad. Dit is – net als bij Strategie B – het gevolg van systeemkeuzes in het NE-scenario die afwijken van het KM-scenario, zoals het niet bouwen van kerncentrales. Omdat een van de randvoorwaarden is dat er geen significant grotere import van elektriciteit en waterstof wordt toegestaan, is het nodig om extra vermogen aan zon, wind en elektrolyse op te stellen.

Technologie	Koersvaste Middenweg (KM)	Nieuw Evenwicht (NE)	Nieuw Evenwicht (NE+)
 Zon	117 GW	146 GW (+25%)	134 GW (+15%)
 Wind	91 GW	93 GW (+3 %)	88 GW (-3%)
 Batterijen (excl. onbenutte voertuigen)*	58 GW	51 GW (-12%)	49 GW (-15%)
 Elektrolyse	28 GW	35 GW (+25%)	35 GW (+25%)

Tabel 7 | Capaciteit met maatregelpakket | Strategie *Meer inzet op warmte*.

(*) inclusief batterijen in mobiliteit die worden ingezet voor de balans op het elektriciteitsnet. Batterijen die niet worden ingezet voor de balans zijn niet opgenomen in deze tabel.

Resultaat: systeemstrategieën

De inzet van systeemstrategieën kan leiden tot een reductie in opgestelde capaciteit voor duurzame energietechnologieën. Daarbij is met name inzet op energiebesparing en krimp essentieel om de benodigde reducties te halen. Zonder deze sterke mate van energiebesparing is dit niet mogelijk, in combinatie met de vanuit Greenpeace gestelde randvoorwaarden voor het ontwerp van het energiesysteem (zie Hoofdstuk 3).

Wanneer de gemodelleerde besparingen niet worden gerealiseerd, en de gestelde randvoorwaarden wel worden gehandhaafd, is een flink hogere capaciteit

aan duurzame energie-opwekking nodig dan in het KM-scenario, tot wel 25% voor zowel zon als elektrolyse. Dit is nader toegelicht in strategieën B en C. De combinatie van de drie strategieën (A, B, C) kan leiden tot flinke reducties. Deze reductie is echter lager dan de optelsom van de drie scenario's, omdat de systeemeffecten niet bij elkaar op te tellen zijn. Inzet op de drie strategieën samen kan in 2050 leiden tot een flinke afname van alle duurzame energietechnologieën. In het NE-scenario is dit een reductie van 18% (zon) tot 64% (elektrolyse), in het NE+-scenario zelfs 24% (zon) tot 82% (elektrolyse).

Technologie	Koersvaste Middenweg (KM)	Nieuw Evenwicht (NE)	Nieuw Evenwicht (NE+)
 Zon	117 GW	96 GW (-18%)	89 GW (-24%)
 Wind	91 GW	58 GW (-36%)	53 GW (-41%)
 Batterijen (excl. onbenutte voertuigen)*	58 GW	33 GW (-43%)	36* GW (-39%)
 Elektrolyse	28 GW	10 GW (-64%)	5 GW (-82%)

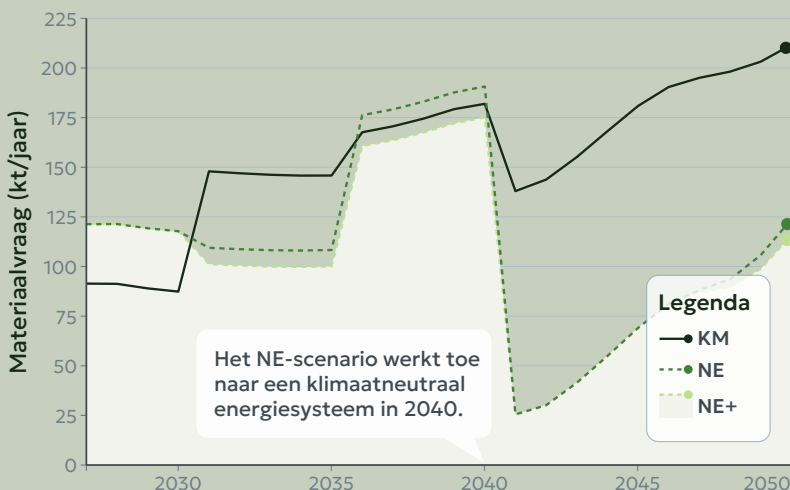
Tabel 8 | Capaciteit door combinatie strategieën A, B en C.

(*) inclusief batterijen in mobiliteit die worden ingezet voor de balans op het elektriciteitsnet. Batterijen die niet worden ingezet voor de balans zijn niet opgenomen in deze tabel.

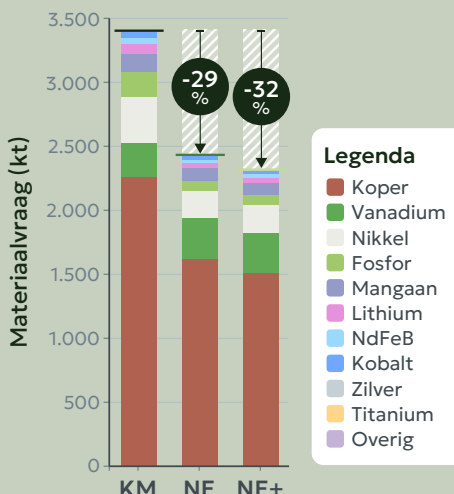
De reductie in de kritieke materiaalvraag in 2050 als gevolg van andere systeemkeuzes is circa 45%. Over de periode tot en met 2050 is dit in totaal 32% (cumulatief). De precieze besparingen verschillen per materiaal en per toepassing. De maatregelen werken

over het algemeen echter breed door, en verlagen de vraag naar alle kritieke materialen. In figuur 7 is vooral een opbouw van de duurzame energiec capaciteit richting 2040 te zien, als gevolg van de doelstelling om in 2040 klimaatneutraal te zijn.

Jaarlijkse kritieke materiaalvraag NE+ in verhouding tot NE en KM (2027 t/m 2050)



Totale kritieke materiaalvraag 2027 t/m 2050



Figuur 7 | Materiaalvraag van het energiesysteem tussen 2026 en 2050 voor de NE en NE+ scenario's, met ter referentie het KM-scenario.

05

Materiaalvraag technologische strategieën

Verschuivingen van op dit moment gebruikte technologieën naar meer circulaire technologieën kunnen de totale vraag naar 'transitiematerialen' flink verlagen. Dat geldt zowel voor wind, zon, batterijsystemen en elektrische voertuigen. Dit hoofdstuk kijkt naar de strategieën levensduurverlenging, substitutie en toenemende efficiëntie.





MATERIAALVRAAG TECHNOLOGISCHE STRATEGIEËN

Drie strategieën

Dit hoofdstuk kijkt naar mogelijkheden om de kritieke materiaalvraag te verlagen als gevolg van andere technologische keuzes. Daarbij kijkt dit rapport naar de volgende drie strategieën:



STRATEGIE D. Efficiëntie

Efficiëntie, waardoor minder materiaal nodig is per GW of GWh.



STRATEGIE E. Substitutie

Vervanging van componenten met kritieke materialen door componenten met minder kritieke metalen.



STRATEGIE F. Levensduurverlenging

Verlenging van de levensduur van producten, waardoor de vervangingsvraag wordt uitgesteld of producten worden hergebruikt.

Deze technologische maatregelen worden doorgerekend voor windturbines, zonnepanelen en batterijen (systeem- en thuisbatterijen, redox-flowbatterijen en vehicle-to-grid).

Buiten scope: recycling

Op de langere termijn zal recycling een belangrijke rol spelen in het verlagen van de materiaalvraag voor vervangingen. Ter illustratie: als het lukt om 25% recycled content in de CRM-component van duurzame energietoepassingen te gebruiken, dan daalt de vraag naar primaire materialen bijna net zo sterk. Deze 25% recycling is in lijn met het Europese doel uit de Critical Raw Materials Act.

Desalniettemin is recycling niet meegenomen in dit onderzoek. De potentie van recycling in de periode tot 2040 – wanneer het energiesysteem in het Nieuw Evenwicht scenario klimaatneutraal moet zijn – is beperkt. In die periode, tot en met 14 jaar vanaf nu, is een enorme groei nodig in de capaciteit aan duurzame energietechnologieën. Tegelijkertijd zijn de vrijkomende hoeveelheden zonnepanelen, windturbines en batterijen nog klein. Pas rond 2040-2045 beginnen grote hoeveelheden materialen beschikbaar te komen voor recycling.

Bovendien zijn recyclingpercentages van kritieke materialen vooralsnog zeer onzeker, omdat deze typisch in zeer kleine hoeveelheden gebruikt worden (zoals bijvoorbeeld de halfgeleiders in zonnepanelen) of alleen met gespecialiseerde en op dit moment nauwelijks toegepaste recyclingmethoden gescheiden kunnen worden (zoals zeldzame aardmetalen), en is het zeer uitdagend om uit gerecycled materiaal terug te brengen naar de kwaliteitstandaard die vereist is voor toepassing in het energiesysteem.

Dit alles maakt dat het degelijk modelleren van recycling in een vrij ambitieus scenario als Nieuw Evenwicht zeer uitdagend, en buiten de scope van dit onderzoek.

Tot slot, dit rapport heeft een Nederlands perspectief, terwijl de keten van recycling en verwerking naar nieuwe componenten en producten zich niet binnen Nederland bevindt. Recycling van een materiaal in Nederland zal dus niet automatisch leiden tot een verbetering van de Nederlandse strategische autonomie.



Windenergie

De grootste kritieke materiaalvraag bij windturbines komt voort uit het gebruik van NdFeB permanente magneten. In de modellering is een geleidelijke overgang naar NdFeB-arme technologieën doorgerekend. Op basis van interviews en een JRC-rapport dat eveneens alternatieven voor NdFeB in windturbines onderzoekt¹⁵, is gekozen voor een gedeeltelijke overstap naar (bestaande) *geared* turbines, met nieuwere generator technologieën vanaf 2035.

In het CT-scenario is ervan uitgegaan dat in 2040 volledig NdFeB-vrije generatoren voor *offshore* windturbines op commerciële schaal beschikbaar komen, bijvoorbeeld hoge-temperatuur-

supergeleidende generatoren, waardoor NdFeB-magneten geheel overbodig worden.¹⁵ Daarvoor zijn echter serieuze R&D-investeringen nodig, die op dit moment nog niet worden gedaan.

In het CT+-scenario is ervoor gekozen om vanaf 2030 voor onshore windturbines uitsluitend *geared* turbines toe te passen. Op land zijn deze turbines beter toepasbaar dan op zee, door de hogere onderhoudsvraag en frequentere vervangingen. In de baseline wordt overigens al gerekend met een lager dysprosiumgehalte in permanente magneten dan de basisgegevens van het JRC aangeven, als gevolg van reeds gerealiseerde technologische verbeteringen.¹⁶

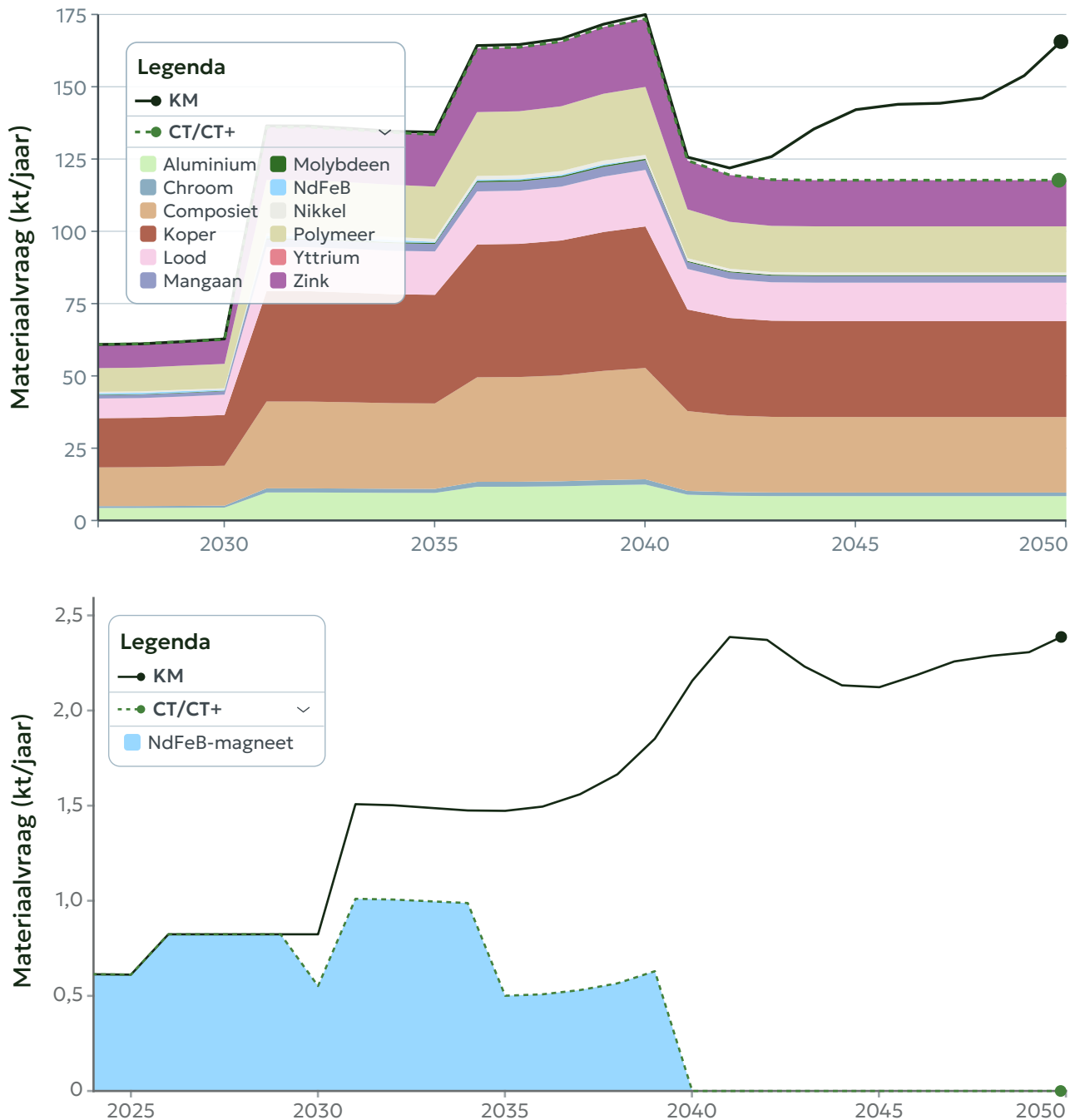
Strategie	Maatregel	Implementatie	
Actualisatie baseline (ten opzichte van JRC)			
	Efficiëntie	Dysprosiumgehalte in permanente (NdFeB-)magneten naar 1,5% door verbeterde technieken in <i>grain boundary diffusion</i> ¹⁶	Per direct
Technologische maatregelen: CT-scenario			
	Levensduurverlenging	Gehele windturbine: 40 jaar ¹⁷	Per direct
	Substitutie	33% vermindering NdFeB in rotor <i>direct drive</i> windturbines door introductie geared windturbines ¹⁸	2030
	Substitutie	66% vermindering NdFeB door introductie <i>electrically excited</i> generatoren ¹⁵	2035
	Substitutie	100% vermindering NdFeB door introductie hoge temperatuur supergeleiders ¹⁵	2040
Technologische maatregelen: CT+ scenario			
	Substitutie	100% <i>geared</i> generatoren voor wind-op-land	2030

Tabel 9 | Overzicht van maatregelen voor windenergie.

Effecten op materiaalvraag

In windturbines is er vooral een grote vraag naar kritieke metalen voor de NdFeB-magneten. Als gevolg van de keuze voor andere technologieën wordt het mogelijk om deze vraag naar nul terug te brengen. Voor overige materialen wordt er na 2040 een besparing voorzien

door langere levensduur van turbines, oplopend tot een 30% lagere materiaalvraag in 2050. Deze langere levensduur laat in Figuur 8a een oplopend effect zien. Het maximale effect is te verwachten in de periode na 2050, wat na de gemodelleerde periode valt.



Figuur 8a (alle kritieke materialen) en 8b (NdFeB, aangepast uit 'Magnetisme van Circular Ontwerp, 2026')⁴⁶ | Langere levensduur verlaagt de materiaalvraag vergeleken met KM vanaf 2040. Figuur 7b laat zien dat de vraag naar NdFeB-magneten vanaf 2030 sterk afneemt t.o.v. KM.



Zon-PV

De zonnepanelenmarkt wordt momenteel gedomineerd door kristallijn-silicium (c-Si) panelen. Voor dit type paneel zijn verschillende kritieke en strategische metalen nodig, waarvan de belangrijkste silicium, koper en aluminium zijn. Omdat zilver eveneens een problematisch metaal lijkt te zijn vanwege de sterk groeiende vraag vanuit PV, is ook dit metaal in de analyse betrokken.

Voor zonnepanelen wordt een zeer sterke daling van het zilveragehalte en een forse verbetering van het siliciumgebruik verwacht, als gevolg van stijgende zilverprijzen, betere productietechnieken en verdere integratie van PV-cellen. Ook is een geleidelijke verlaging in de benodigde hoeveelheid koper en aluminium gemodelleerd als gevolg van een algehele efficiëntieverbetering in de panelen.¹⁵ Daardoor is er per GW geïnstalleerd vermogen geleidelijk minder koper en aluminium nodig.

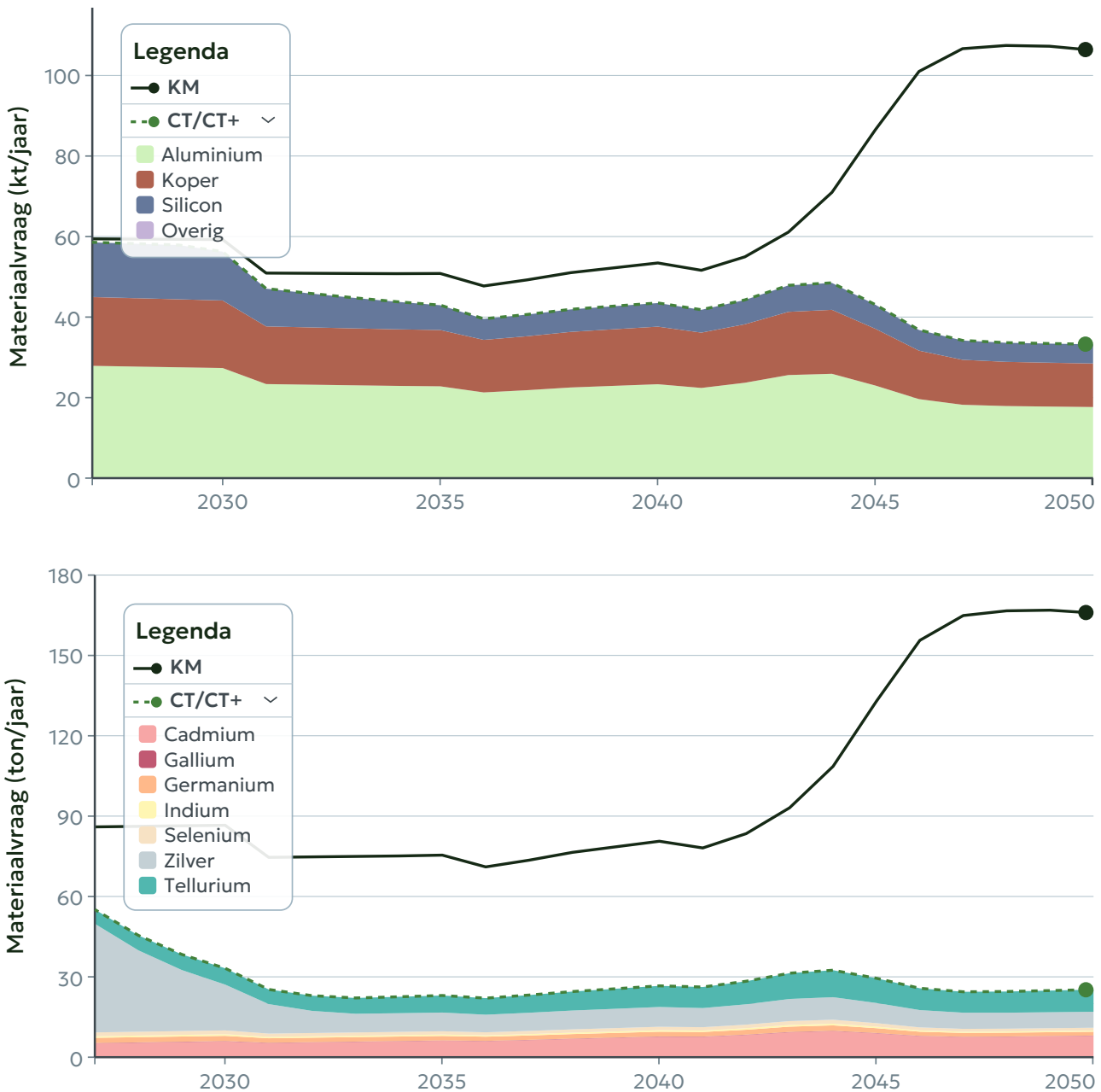
Strategie	Maatregel	Implementatie
Actualisatie baseline (ten opzichte van JRC ⁴⁷)		
	Substitutie	Marktaandeel CIGS maximaal 1%
Technologische maatregelen: CT-scenario		
	Efficiëntie	Jaarlijks 25% verlaging in zilveragehalte van elektrische contacten, tot minimum van 2 ton / GW in 2030 ¹⁹
	Efficiëntie	Jaarlijkse verlaging van 0,65% in koper (Cu) en aluminium (Al) ¹⁵
	Efficiëntie	50% reductie in silicium (gehele PV-cel) ¹⁵
	Levensduur-verlenging	Verlengen levensduur naar 35 jaar (baseline: 25 jaar) ¹⁹
Technologische maatregelen: CT+ scenario		
	Levensduur-verlenging	Verlengen levensduur naar 40 jaar (baseline: 25 jaar) ¹⁹

Tabel 10 | Overzicht maatregelen voor zonne-energie.

Effecten op materiaalvraag

Substitutie, verbeterde efficiëntie, en levensduurverlenging hebben zeer groot effect op de vraag naar materialen voor PV. De absolute materiaalvraag van zonnepanelen wordt gedomineerd door koper, aluminium en silicium, die qua massa het grootste aandeel vormen. De volgende effecten zijn zichtbaar:

- Door efficiëntieverbetering daalt de materiaalvraag in 2050 met ongeveer 43% ten opzichte van 2027, terwijl er 117 GW PV wordt bijgeplaatst. De materiaalvraag in 2050 is ongeveer 70% lager dan in het baseline KM-scenario.
- De effecten van substitutie — met name op zilver — worden geleidelijk zichtbaar in de periode tot 2035.
- Levensduurverlenging wordt goed zichtbaar vanaf 2045, wanneer een grote materiaalbesparing ontstaat doordat de eerste grote vervangingsgolf wordt uitgesteld.
- Het CT+-scenario toont geen zichtbaar effect, omdat de extra vijf jaar levensduur (van 35 naar 40 jaar) pas doorwerkt na 2050.



Figuur 9a en 9b | Materiaalvraag van zonn-PV in de tijd met alle materialen (boven) en zonder de dominante materiaalstromen koper, aluminium en silicium (onder).



Batterijen: systeem- en thuisbatterijen

In een schoon en vergaand geëlektrificeerd energiesysteem zijn batterijen onmisbaar om het energienet te balanceren bij verschillen tussen vraag en aanbod. Naarmate het aandeel zon en wind groeit, zullen die verschillen steeds frequenter optreden. In het KM-scenario staat in 2050 in totaal 257 GWh aan systeembatterijen en 34 GWh aan thuisbatterijen opgesteld.

LFP-batterijen voor systeemtoepassingen hebben doorgaans een vermogensduur van 4 uur: een batterijsysteem van 4 GWh kan dan gedurende 4 uur 1 GW leveren.²⁰ Er bestaan inmiddels enkele batterijsystemen die richting de 6 tot 8 uur gaan.²¹

Bij alle batterijtypen kan sterk worden gestuurd op de kritieke materiaalvraag, zowel via

levensduurverlenging als via substitutie met andere batterijtechnologieën. De levensduur van batterijen kan relatief eenvoudig worden verlengd door kwalitatief goed productontwerp en adequaat batterijmanagement. Denk aan het voorkomen van te ver opladen of van oververhitting.

In de literatuur wordt vaak uitgegaan van een aandeel nikkel-mangaan-kobalt (NMC-)technologie voor thuisbatterijen en systeembatterijen. Deze scenario's zijn ingehaald door de werkelijkheid. Tegenwoordig worden bijna uitsluitend lithium-ijzer-fosfaat (LFP-)batterijen gebruikt, die geen kobalt en nikkel bevatten.²² LFP-batterijen kunnen op termijn plaatsmaken voor Natrium-ion (Na-ion) batterijen.²³ In China gebeurt dit op dit moment al op beperkte, maar commerciële schaal.^{24,25}

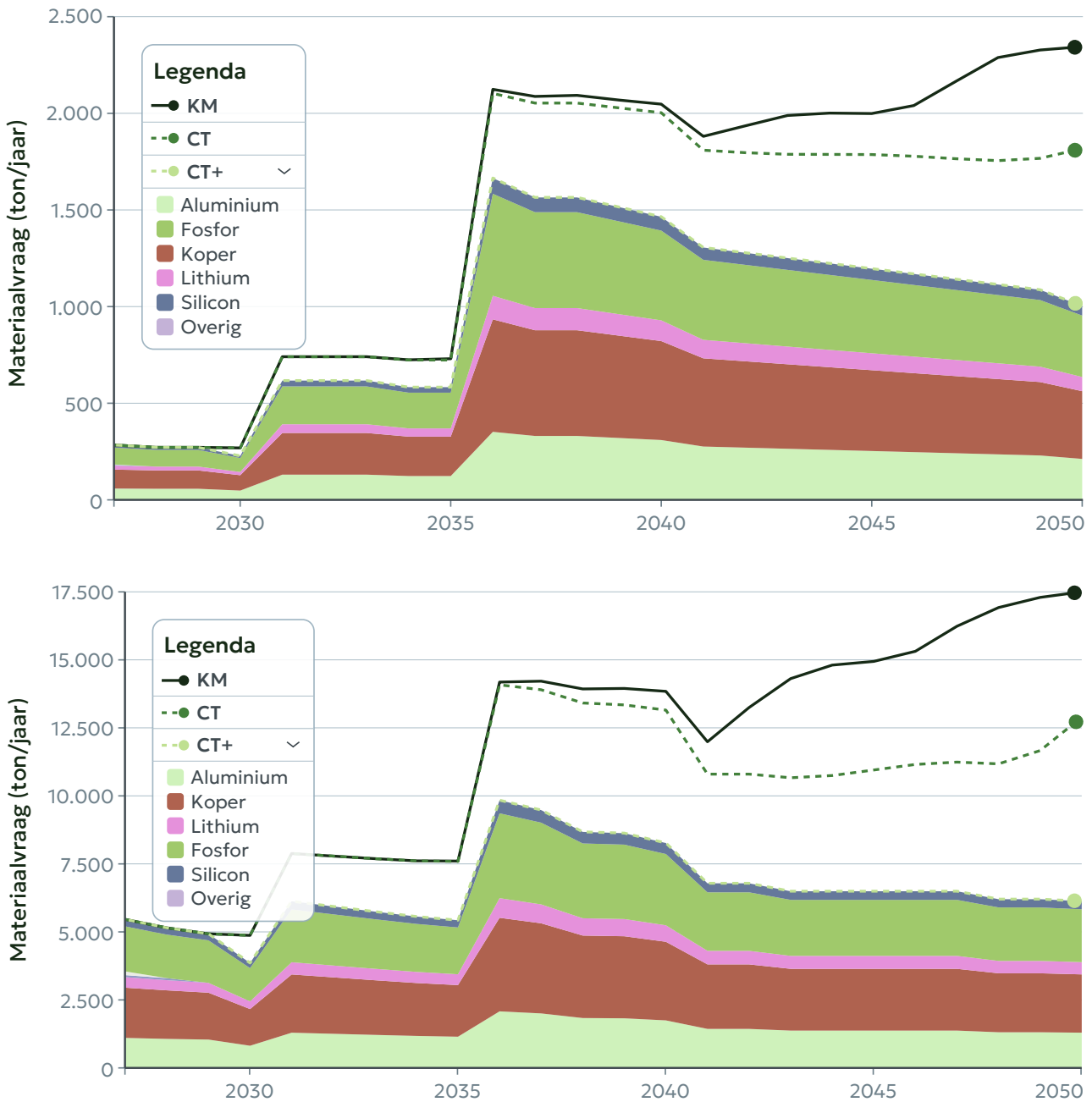
Strategie		Maatregel	Implementatie
Actualisatie baseline (ten opzichte van JRC ⁴⁸)			
	Substitutie	Vervanging van NMC-batterijen met LFP-batterijen	Per direct
	Substitutie	Introductie natriumbatterijen, tot 28% in 2050	Oplopend richting 2050
Technologische maatregelen: CT-scenario			
	Levensduurverlenging	Levensduurverlenging LFP-batterijen: tot 24 jaar (referentie: 16 jaar)	Per direct
Technologische maatregelen: CT+ scenario			
	Levensduurverlenging	Levensduurverlenging LFP-batterijen: tot 40 jaar (referentie: 16 jaar)	Per direct
	Substitutie	Vervanging door natriumbatterij: 58% in 2050	2030 - 2050

Tabel 11 | Overzicht van maatregelen voor systeem- en thuisbatterijen.

Effecten op materiaalvraag

De totale materiaalvraag voor batterijen tot en met 2050 blijft toenemen, ook bij relatief vergaande maatregelen. Dit is het gevolg van de sterke benodigde groei in batterijcapaciteit voor het nieuwe energiesysteem met meer zon en wind. Uit de doorrekeningen komt het volgende naar voren:

- De effecten van substitutie zetten direct in, maar werken vooral door bij de grootschalige uitrol van batterijsystemen, die voorzien is voor de periode vanaf 2035.
- Levensduurverlenging wordt duidelijk merkbaar vanaf 2040, wanneer de materiaalvraag minder snel stijgt door een lagere vervangingsvraag (vergeleken met de referentielevensduur van 16 jaar).
- De kritieke materialen kobalt en nikkel komen in deze scenario's niet meer voor, vanwege de verschuiving van NMC- naar LFP-batterijen.
- In 2050 is de materiaalvraag in CT+ lager voor zowel systeembatterijen (66%) als thuisbatterijen (57%). De grootste winst vindt plaats in de vraag naar mangaan, koper en aluminium.



Figuur 10a en 10b | Materiaalvraag van systeem- en thuisbatterijen in het CT+ -scenario, in vergelijking met CT en de baseline (KM).



Batterijen: redox-flow systeembatterijen

Redox-flowbatterijen zijn een specifiek batterijtype dat relatief langdurig op vol vermogen kan leveren. Typische periodes liggen tussen 24 en 48 uur, in tegenstelling tot LFP- en Na-ionbatterijen die een veel kortere ontladtijd hebben. In het KM-scenario staat in 2050 in totaal 108 GWh aan redox-flowbatterijen opgesteld. Het scenario voorziet ook een sterke groei tegen het einde van de scenarioperiode: in 2030 is pas 21 GWh geplaatst, in 2040 gaat het om 48 GWh.

Bij redox-flowbatterijen wordt energie opgeslagen in vloeibare elektrolyten, die laden en ontladen via elektrochemische cellen. De elektrolyt kan in grote tanks worden bewaard, los van de elektrochemische cel (die het vermogen bepaalt). De opslagduur verlengen kan relatief eenvoudig en goedkoop door een extra tank met elektrolyt toe te voegen. De verwachting is dat dit batterijtype wordt ingezet als alternatief voor lithium-ion- en natrium-ionbatterijen op locaties waar capaciteit belangrijker is dan vermogen. Het betreft

dus eveneens een systeembatterij, maar vanwege de andere onderliggende technologie wordt het apart gemodelleerd.

Vanuit materiaalperspectief worden redox-flowbatterijen vaak gemodelleerd als vanadium-flowbatterijen. Dit type bestaat al geruime tijd, maar wordt nog nauwelijks op commerciële schaal toegepast. De grote 'verwachte' vraag naar vanadium in de modellen is daarmee relatief onzeker, vergeleken met bijvoorbeeld de relatief zekere vraag naar neodymiummagneten voor windturbines.

In deze studie is de vervanging van vanadium-flowbatterijen door organische flowbatterijen doorgerekend. Organische flowbatterijen bevatten geen kritieke metalen.²³ Naar deze technologie wordt op dit moment veel onderzoek gedaan, maar tijdige investeringen zijn noodzakelijk om het TRL-niveau voldoende te verhogen voor grootschalige toepassing.

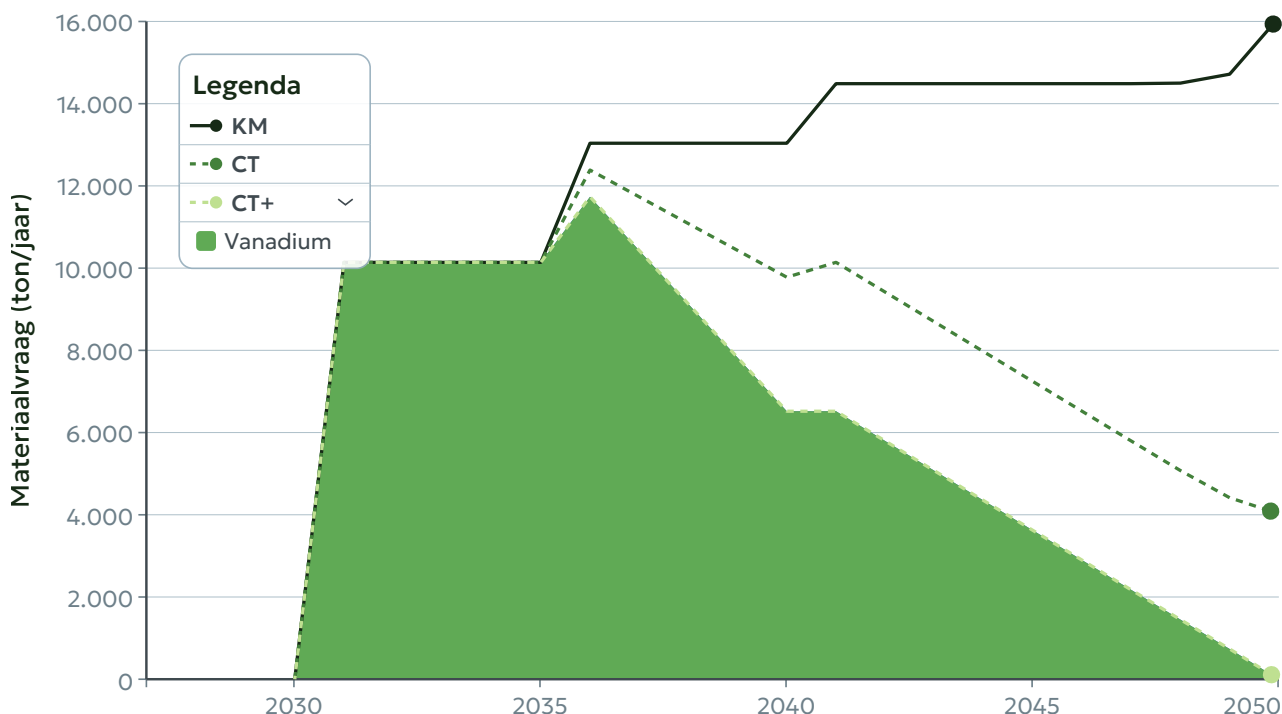
Strategie	Maatregel
Technologische maatregelen: CT-scenario	
 Substitutie	Toepassing organische flowbatterijen: • 25% in 2040 • 75% in 2050
Technologische maatregelen: CT+ scenario	
 Substitutie	Toepassing organische flowbatterijen: • 50% in 2040 • 100% in 2050

Tabel 12 | Maatregelen bij redox-flowbatterijen.

Effecten op materiaalvraag

De vanadiumvraag in het baseline-scenario is zeer groot in verhouding tot de wereldwijde productie (~12%, zie Hoofdstuk 6). Grootschalige substitutie door organische flowbatterijen kan de vanadiumvraag

naar nul reduceren. De snelheid waarmee dat gebeurt, zal afhangen van hoe snel alternatieve technologieën worden ontwikkeld en opgeschaald.



Figuur 11 | Materiaalvraag van redox-flowbatterijen, met vervanging door organische flowbatterijen. De sterke toename aan jaarlijkse instroom in 2030 komt doordat wordt aangenomen dat in de periode 2030-35 jaarlijks een gelijke hoeveelheid redox-flowbatterijen wordt opgesteld.

Disclaimer: vanadium

Dit onderzoek biedt geen diepgaande analyse van de ontwikkelingen rond vanadium. Het is mogelijk dat het aanbod van vanadium relatief eenvoudig kan worden opgeschaald, waardoor de zeer hoge vraag in het KM-scenario (ten opzichte van de huidige wereldwijde productie) minder problematisch is dan de cijfers momenteel doen vermoeden. Lithium is bijvoorbeeld een ander batterijmateriaal waarvan het aanbod veel eenvoudiger blijkt op te schalen dan tien jaar geleden werd aangenomen. Op langere termijn zullen er bovendien door autonome ontwikkelingen waarschijnlijk alternatieven voor vanadium ontstaan. Zonder gericht beleid kan dit proces echter 10 tot 20 jaar langer duren, wat aanzienlijke risico's met zich meebrengt voor de energietransitie.



Batterijen: elektrische voertuigen

Voor elektrisch vervoer wordt een combinatie van maatregelen gemodelleerd, zowel op het niveau van de batterij (substitutie) als voor het gebruik van elektrische voertuigen, zoals levensduurverlenging, intensivering van gebruik en *modal shifts*. Wij modelleren hier alleen het CRM-gebruik van de batterijen in elektrisch vervoer. Voor een analyse van NdFeB-magneten in voertuigen, uitgewerkt voor zwaar vervoer, zie het rapport: *'Magnetisme van circulair ontwerp, 2026'*.⁴⁶

In het KM-scenario behouden kobalt- en nikkelhoudende NMC-batterijen een relatief groot marktaandeel. Deze batterijtechnologie ontwikkelt zich in de loop van de tijd richting hogere energiedichtheid en lager kobaltgehalte (bekend als 8-1-1 en 9-0.5-0.5-batterijen). In het CT-scenario wordt NMC verregaand gesubstitueerd door LFP-batterijen. In het CT+ scenario wordt richting 2050 ook een grotere inzet van Na-ion batterijen voorzien. Bovendien wordt een verlenging van de levensduur van de batterij van 16 jaar naar 24 jaar gemodelleerd. Op vlootniveau wordt de vrachtwagenvloot gehalveerd, en neemt het aantal personen- en bedrijfsauto's met 56% af.

Strategie	Maatregel		Implementatie
Technologische maatregelen: CT-scenario			
	Levensduurverlenging	Langere levensduur gehele batterij: 24 jaar (referentie: 16 jaar) ²³	Per direct
	Substitutie	Snellere vervanging van NMC-batterijen door LFP-batterijen ²³	Nu - 2050
Technologische maatregelen: CT+ scenario			
	Levensduurverlenging	Langere levensduur gehele batterij: 32 jaar (referentie: 16 jaar) ²³	Per direct
	Substitutie	Grotere vervanging LFP-batterijen met natriumbatterijen, tot 49% in 2050 ²³	Nu - 2050
Voertuigaantallen: CT en CT+ scenario			
	Personenvervoer en lichte bedrijfsauto's	Reductie van 16% (2030), oplopend tot 56% (2050) ten opzichte van de baseline ²⁶	Nu - 2050
	Vrachtwagens	Reductie van 40% (2040) en 50% (2050) ten opzichte van de baseline ²⁶	Nu - 2050

Tabel 13 | Overzicht maatregelen voor elektrische voertuigen.

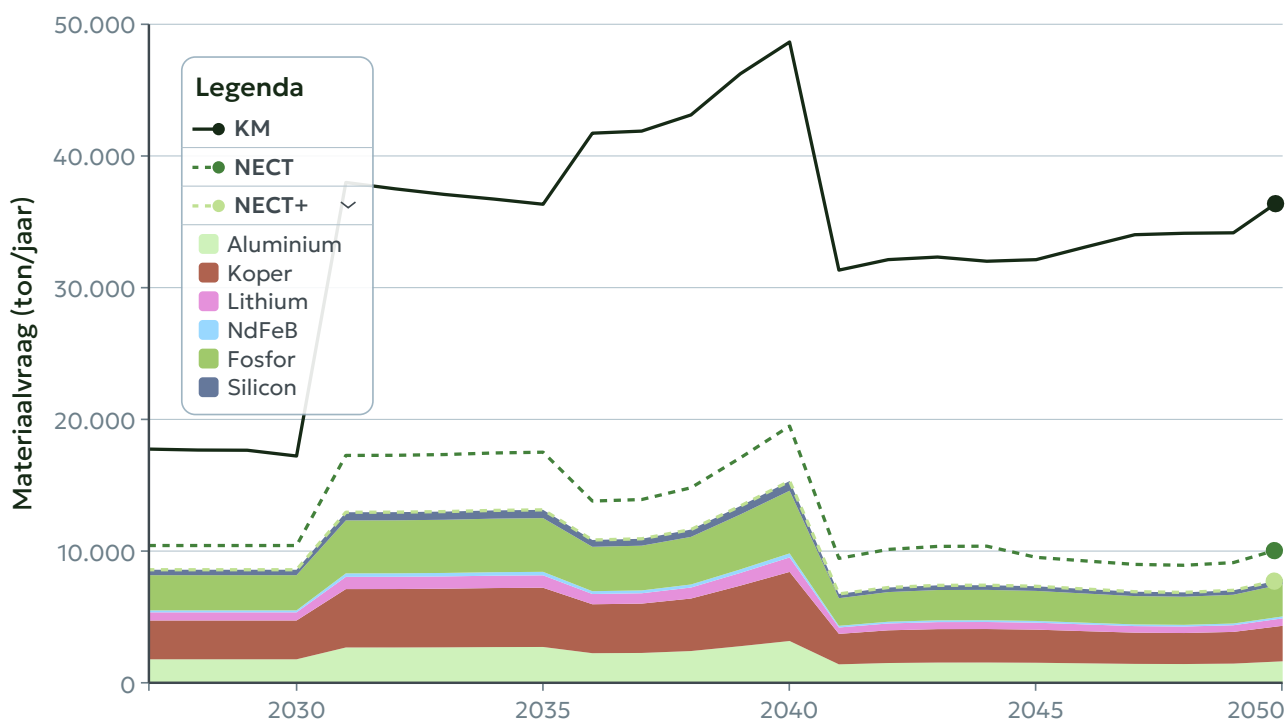
Effecten op materiaalvraag

Het effect van technologische maatregelen gecombineerd met het effect van de reductie van het totale aantal voertuigen is te zien in Figuur 12. De totale materiaalvraag neemt met 79% af. De scenario's laten de volgende effecten zien:

- Substitutie heeft een sterk effect op de materiaalvraag. De keuze voor een bepaald batterijtype hangt nauw samen met de technische competenties in de supply chain. Op dit moment

heeft China een zeer grote voorsprong in de ontwikkeling van alle batterijtypes, waaronder Nacionbatterijen.

- Levensduurverlenging werkt vanaf 2040 door, uitgaande van de langere levensduur ten opzichte van de referentiewaarde (16 jaar). Wanneer er tijdig beleid wordt ingevoerd rondom levensduurverlenging van elektrische voertuigen die nu al op de markt verkocht worden, kan deze maatregel eerder effect sorteren.



Figuur 12 | Het effect van maatregelen om het aantal elektrische voertuigen te verminderen.

Resultaat technologische strategieën

Voor de meeste duurzame technologieën — zon, wind en batterijen — bestaan er relatief veel technologische opties om minder 'transitiematerialen' in te zetten. Bij een gecombineerde toepassing van deze opties is het mogelijk om de kritieke materiaalvraag van het energiesysteem in 2050 substantieel terug te dringen. Bij elektrolyse bevindt het technologisch onderzoek naar alternatieven zich nog in een vroeg stadium; eventuele besparingen voor deze technologie zijn daarom buiten deze analyse gelaten.

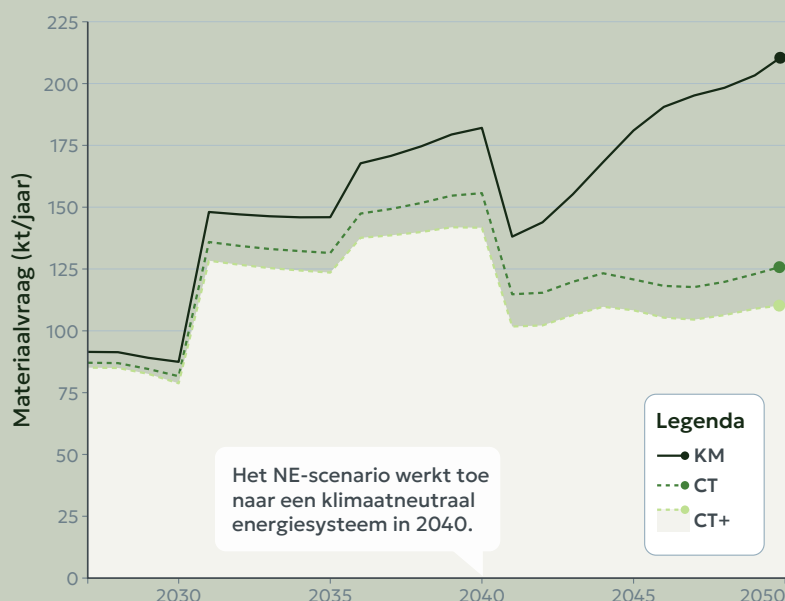
Wanneer alle gemodelleerde technologische maatregelen worden doorgevoerd, kan de totale kritieke materiaalvraag in 2050 circa 48% dalen ten opzichte van het KM-scenario. In de periode tot en met 2050 (de cumulatieve materiaalvraag) gaat het in totaal om 25%.

Een aanzienlijk deel van de resterende vraag naar kritieke en strategische materialen bestaat uit koper. De kopervraag laat zich lastig verlagen, omdat koper in veel verschillende technologieën wordt ingezet voor elektriciteitsgeleiding. Een alternatief voor koper is aluminium, maar dat heeft andere eigenschappen waardoor het niet voor alle toepassingen geschikt is.

Wanneer dit strategische (maar niet 'kritieke') koper buiten beschouwing wordt gelaten, kan de vraag naar kritieke materialen in 2050 met ongeveer 65% dalen. In de periode tot en met 2050 gaat het in totaal om 35%. Voor specifieke kritieke materialen kan de vraag in 2050 zelfs tot nul worden teruggebracht, waaronder neodymium (voor permanente NdFeB-magneten) en vanadium.

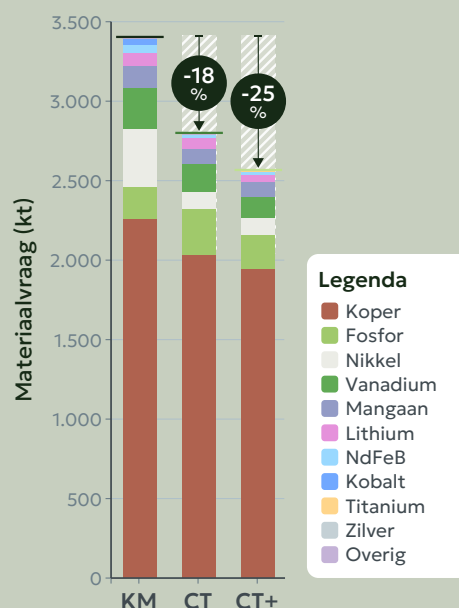
Jaarlijkse kritieke materiaalvraag

CT+ in verhouding tot CT en KM (2027 t/m 2050)



Totale kritieke materiaalvraag

2027 t/m 2050



Figuur 13 | Materiaalvraag van het energiesysteem tussen 2027 en 2050 voor het scenario CT+, met ter referentie KM en CT.

06

Materiaalvraag Nieuw Evenwicht en Circulaire Technologieën

Er zijn veel mogelijkheden om de vraag naar transitiematerialen te verlagen. Daarvoor kunnen zowel systeemmaatregelen (Hoofdstuk 4) als de technologische maatregelen (Hoofdstuk 5) een belangrijke rol spelen. Dit hoofdstuk laat zien wat de effecten zijn van een combinatie van systeem- en technologiemaatregelen.



MATERIAALVRAAG NIEUW EVENWICHT EN CIRCULAIRE TECHNOLOGIEËN

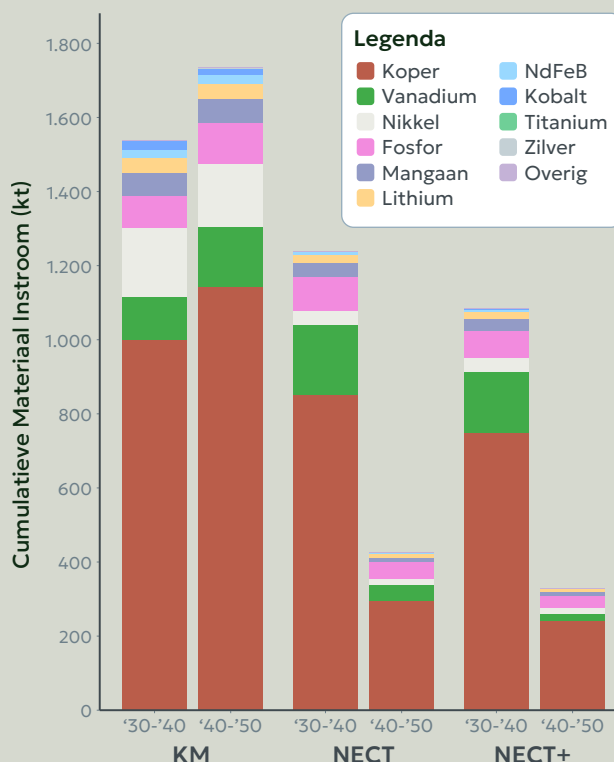
In de periode tot en met 2050 is een grote reductie in de vraag naar kritieke en strategische materialen te realiseren. In de scenario's in dit onderzoek komen we tot een reductie van ongeveer 49% van de cumulatieve materiaalvraag over de periode 2027-2050. De totale materiaalvraag in het jaar 2050 is 90% lager. Omdat dit een optelsom is van verschillende materialen met elk een eigen ketendynamiek, leidt dit niet tot een gelijksoortige verlaging in afhankelijkheden en ketenrisico's.

Andere sectoren met kritieke materiaalvraag

Naast de energietransitie zijn er ook andere sectoren met een grote vraag naar kritieke materialen. Denk aan de digitale transitie (elektronica), aan industriële toepassingen (machines) en aan toepassingen in defensietechnologie. De beste inschatting voor Nederland wordt gegeven in *Nederlandse afhankelijkheid van kritieke materialen*.⁹ Dit rapport geeft echter alleen een monetaire inschatting. Een eerdere studie van de Europese Commissie geeft aan dat de vraag naar kritieke materialen uit de energietransitie relatief groot is ten opzichte van andere sectoren.²⁷

De gecombineerde scenario's van Nieuw Evenwicht laten zien dat er in de periode tot en met 2040 grote investeringen worden gedaan in het energiesysteem, vanuit de ambitie dat Nederland in 2040 klimaatneutraal is. Tegelijkertijd is te zien dat deze grote (materiaal)investeringen in 2040 eindigen, waar het KM-scenario verder doorbouwt aan een klimaatneutraal energiesysteem in de periode tot en met 2050. In de Nieuw Evenwicht-scenario's wordt dus enerzijds sneller de duurzame capaciteit neergezet, maar is ook minder capaciteit nodig door de sterke focus op vraagvermindering en krimp.

Een belangrijk aandachtspunt is dat de keuzes om te komen tot het NECT-scenario grote maatschappelijke effecten kunnen hebben. Vooral de effecten van vraagvermindering en krimp hebben een structurele invloed op de Nederlandse economie, onder meer door het verlagen van de internationale lucht- en scheepvaart en het versneld afbouwen van de energie-intensieve industrie. Ook maatregelen als verdergaande isolatie of het sterker inzetten op warmtenetten hebben maatschappelijke effecten, omdat dit raakt aan maatregelen en energievoorziening van individuele woningen. Het verder bepalen van deze maatschappelijke effecten is buiten scope van dit onderzoek. De maatschappelijke effecten van technologische maatregelen zijn naar verwachting relatief beperkt.



Figuur 14 | Jaarlijkse materiaalvraag van het KM-scenario in vergelijking met het NECT en NECT+ scenario, in gemiddeldes voor de periode 2030-2040 en 2040-2050.



Materiaalvraag energietransitie: absolute vraag

In absolute zin wordt de grootste vraag naar kritieke en strategische materialen gevormd door koper, vanadium, fosfor en mangaan. De hoge kopervraag komt doordat koper in vrijwel alle onderdelen van het energiesysteem wordt gebruikt: in het NECT+ scenario is de kopervraag verantwoordelijk voor 71% van de totale materiaalvraag.

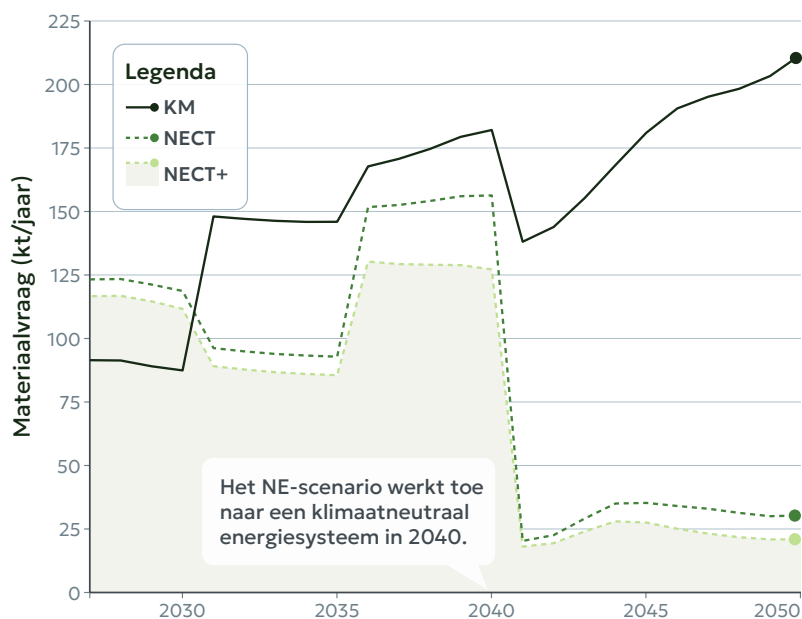
Vanadium, fosfor en mangaan zijn materialen die voornamelijk van belang zijn voor batterijen. Mangaan wordt – naast de toepassing in sommige batterijtypes – ook toegepast als legeringselement in staal (indicatief 1,65%). De hoge mangaanvraag is

duisende een gevolg van de vele hoeveelheid staal, bijvoorbeeld voor pijlers en torens voor offshore windturbines.

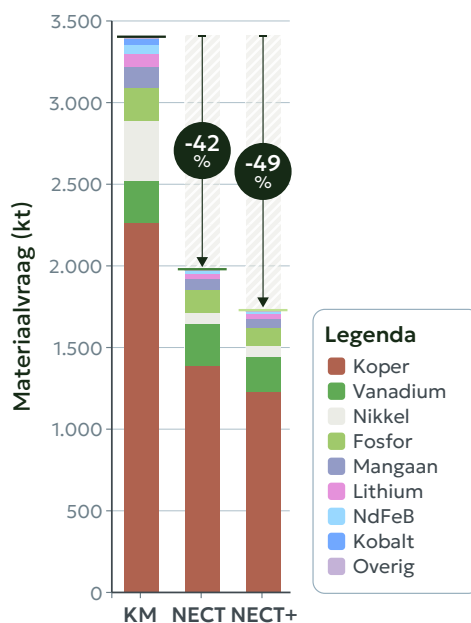
In het KM-scenario wordt significant meer nikkel (voor elektrisch vervoer) gebruikt dan in de NECT-scenario's. In die laatste worden NMC-batterijen veel sneller gesubstitueerd door de door nikkel-vrije LFP-batterijen, met lagere nikkelvraag tot gevolg.

De vraag naar alle kritieke materialen daalt in zowel het NECT als het NECT+ scenario flink. De vraag naar nikkel daalt met 81-83%, de vraag naar lithium met 61-69%, de vraag naar mangaan met 50-55%, de vraag naar neodymium met 61-66% en de kopervraag met 39-46%.

Jaarlijkse kritieke materiaalvraag
NECT+ in verhouding tot NECT en KM (2027 t/m 2050)



Totale kritieke materiaalvraag
2027 t/m 2050



Figuur 15 | Materiaalvraag van het energiesysteem voor NECT+, vergeleken met NECT en het KM-scenario met een baseline in technologieën.

Materiaalvraag energietransitie: vergelijking met mijnbouwproductie

Om een indicatie te geven wat de vraag naar kritieke en strategische materialen voor de Nederlandse energietransitie betekent, is deze uitgezet in relatie tot de wereldwijde mijnbouwproductie in 2024. Voor interpretatie van deze getallen is de verhouding van Nederland tot de wereld van belang:

- **Bevolking:** 0,22% wereldwijde aantal inwoners;
- **Energie:** 0,39% wereldwijde finale energieverbruik²⁹;
- **Financieel:** 1,1% wereldwijde BBP.

Figuur 16 laat de relatieve Nederlandse vraag zien, als aandeel van de wereldwijde winning. Daarbij zijn zowel de benodigde hoeveelheden voor het Koersvaste Middenweg (KM-)scenario, het Nieuw Evenwicht en Circulaire Technologieën (NECT-)scenario als het NECT+ scenario opgenomen. In de figuur is het Nederlands aandeel van het finale energieverbruik (0,39%) als referentie opgenomen.

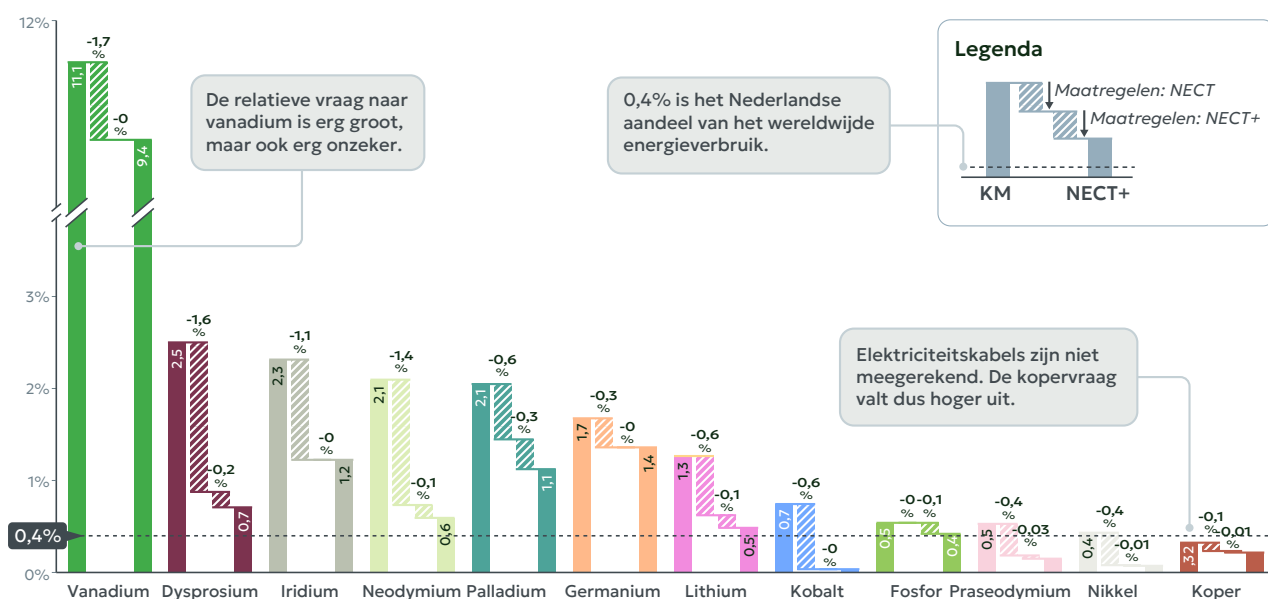
Waar in het KM-scenario nog voor 11 materialen een ‘hoge’ relatieve vraag is, is dit in het NECT+ scenario nog slechts voor acht materialen het geval. Wel is de vraag naar alle kritieke materialen lager, waarmee risico's, afhankelijkheden en ketenimpacts verminderen. Zo daalt de vraag naar neodymium van 2,1% naar 0,59% en de vraag naar lithium van 1,2% naar 0,49%.

De grootste relatieve vraag in het NECT+ scenario bestaat uit vanadium (9,4%), germanium (1,4%), iridium (1,2%), palladium (1,1%) en zeldzame

aardmetalen dysprosium (0,71%) en neodymium (0,59%). De relatief zeer hoge vanadiumvraag voor redox-flowbatterijen is niet noodzakelijk een probleem, omdat dit materiaal op dit moment nog zeer beperkt wordt toegepast en er ook voldoende alternatieven beschikbaar zijn. Datzelfde geldt voor de vraag naar germanium, dat wordt toegepast in zonnepanelen. De vraag naar iridium en palladium (elektrolyzers) en dysprosium en neodymium (windturbines) is lastiger te verlagen, omdat alternatieven zich nog in vroege fasen van ontwikkeling bevinden of vragen om een verschuiving in de markt (zie Hoofdstuk 5).

Voor nikkel (0,07%) en koper (0,22%) is de Nederlandse metaalvraag voor de energietransitie in het NECT+ scenario relatief beperkt. De vraag naar lithium (0,49%) is relatief lager dan in veel scenario's enkele jaren geleden is geschat. In het geval van lithium en nikkel komt dit relatief lage aandeel door een sterke groei van de productie in de afgelopen jaren. In het geval van koper (0,22%) komt dit doordat koper al een relatief veelgebruikt materiaal is, waardoor deze Nederlandse vraag geen groot aandeel is. Let op: de materiaalvraag voor elektriciteitsinfrastructuur – waaronder laag-, midden- en hoogspanningskabels – is in deze analyse niet meegenomen (zie Hoofdstuk 2).

Wanneer het vertrekpunt is om de mijnbouw niet verder te laten groeien – zie Hoofdstuk 3 – is het relevant om de toekomstige vraag naar strategische en kritieke metalen (gevisualiseerd jaar: 2035) te vergelijken met de huidige mijnbouwproductie (cijfers: 2024). De afgelopen jaren heeft de mijnbouw hoge groeicijfers laten zien. Er is echter discussie over de mate waarin de mijnbouw in de toekomst deze groeipercentages bij zal kunnen houden.³⁰



Figuur 16 | Vraag naar kritieke metalen voor de Nederlandse energietransitie als aandeel van de wereldwijde jaarproductie, voor KM-scenario met baseline in technologieën en NECT+ scenario met energiesysteemkeuzes + circulaire technologieën.

Aandachtspunt: koper

Een belangrijk aandachtspunt is de groeiende kopervraag. Zowel absoluut als relatief is de vraag naar koper voor de energietransitie groot. In dit onderzoek is alleen gekeken naar de kopervraag voor toepassing in duurzame energietechnologieën: kabels zijn niet meegenomen (zie Hoofdstuk 2). Waar de totale kopervraag in het KM-scenario in dit rapport 2.460 kton is, kan hier bij het meerekenen van hoog- en middenspanningskabels 31.6 kton koper bij komen.²⁸

De wereldwijde productie van koper neemt met 15% groei over de periode 2019-2024 relatief veel minder sterk toe dan de wereldwijde productie van andere kritieke metalen. Dit komt omdat koperwinning al een volwassen markt is, waarbij winning al duizenden jaren plaatsvindt. Waar het relatief eenvoudig is om de productie van lithium te verdubbelen, door de relatief lage winning op dit moment, is het voor koper zeer uitdagend om het aanbod te verdubbelen door de huidige grote koperproductie. Dit is ook de reden waarom koper wel als *strategisch* materiaal wordt gezien, ondanks dat dit volgens de definities niet 'kritiek' is.

Historisch perspectief: groeiende mijnbouwproductie

Als gevolg van de groeiende vraag naar kritieke materialen wereldwijd – zowel voor de energietransitie als voor andere toepassingen – is de mijnbouwproductie de afgelopen jaren flink gestegen. Tussen 2019 en 2024 is van vrijwel alle kritieke materialen meer gewonnen. Ter illustratie zijn de groeicijfers van vier materialen in onderstaande tabel samengevat.^{31,6} Het IEA verwacht vanwege verdere stijging van de mijnbouwproductie dat tot 2035 vraag en aanbod redelijk in evenwicht zullen blijven.³²

Dit betekent dat de Nederlandse vraag als aandeel van de wereldwijde productie relatief daalt. Waar in eerder onderzoek in 2020 nog zeer hoge percentages zijn genoemd – zowel voor Nederland³³, Europa³⁴ als wereldwijd¹ – zijn die percentages inmiddels significant lager.

Metaal	2019 (ton)	2024 (ton)	Groei (%)
Koper	20.000.000	23.000.000	+ 15%
Zeldzame aardmetalen (o.a. Neodymium, Dysprosium)	210.000	390.000	+ 86%
Kobalt	140.000	290.000	+ 107%
Lithium	77.000	240.000	+ 210%

Tabel 14 | Groei in wereldwijde productie van enkele kritieke materialen.

07

Conclusies

Met andere keuzes in zowel de vraag naar energie als de toegepaste technologieën kan een nieuw evenwicht ontstaan. Dit hoofdstuk licht de belangrijkste conclusies toe die van belang zijn om hier op te sturen.



CONCLUSIES

Om te komen tot de grote reducties (Hoofdstuk 6), is een combinatie nodig van strategieën op systeemniveau en op technologieniveau. Maatregelen op alleen systeemniveau of alleen technologieniveau zijn onvoldoende om deze besparingen te kunnen realiseren.



Systeemniveau

De systeemmaatregelen in dit onderzoek leiden gezamenlijk tot een reductie van circa 32% van de cumulatieve materiaalvraag. De strategie *energiebesparing & krimp* is daarin verreweg het meest effectief: de benodigde capaciteit voor zon daalt met 18-24%, voor wind met 36-42%, voor batterijen met 46% en voor elektrolyse met 64-82%.

Uit de modellering blijkt dat systeemmaatregelen vooral de benodigde batterijopslagcapaciteit verlagen (tot 43%). De totale elektriciteitsvraag neemt minder sterk af dan de opslagvraag. Dit komt doordat de besparingen het sterkst doorwerken op de momenten waarop zon en wind weinig produceren: donkere winterdagen met een hoge piekvraag naar warmte. De maatregelen verlagen dus vooral de benodigde opslagcapaciteit voor die kritische momenten, en in mindere mate de totale opwekcapaciteit.

Het NECT-scenario concentreert de investeringen in het energiesysteem in de periode tot 2040. De materiaalvraag in de periode daarna neemt sterk af. In het KM-scenario blijft de materiaalvraag voor de opbouw van een klimaatneutraal energiesysteem doorlopen tot 2050 en komt er een vervangingsvraag op gang. In het NECT-scenario wordt deze vervangingsvraag uitgesteld tot na 2050, doordat beter productontwerp leidt tot een langere levensduur van componenten.



Technologieniveau

Technologische maatregelen kunnen de cumulatieve materiaalvraag met circa 24% verlagen ten opzichte van het KM-scenario. Het effect van deze maatregelen wordt vooral zichtbaar na 2040: innovaties hebben gemiddeld 10 tot 15 jaar nodig om tot commerciële schaal te komen. Levensduurverlenging leidt eveneens vooral na 2040 tot besparingen, doordat de vervangingsvraag wordt uitgesteld.



Windturbines. De grootste kritieke materiaalvraag bij windturbines zit in NdFeB-permanente magneten. Door

een geleidelijke overstap naar *geared* turbines, elektrisch bekrachtigde generatoren en (op termijn) hoge-temperatuur-supergeleiders, kan de vraag naar neodymium en dysprosium volledig worden geëlimineerd. De markt ontwikkelt deze alternatieven niet autonoom; gerichte R&D-investeringen zijn noodzakelijk.



Zonnepanelen. Bij zonnepanelen heeft levensduurverlenging de meeste potentie. Veel panelen worden op dit moment verwijderd voor het einde van de technische levensduur, onder meer als gevolg van vergunningstermijnen of een betere businesscase bij vervanging door nieuwere panelen. De verlaging van het zilver- en siliciumgebruik per GW verloopt grotendeels als autonome technologische ontwikkeling. De markt voor zonnepanelen wordt vrijwel geheel gedomineerd door China.



Batterijen. Voor batterijen zijn er sterke substitutiemogelijkheden. Vervanging van NMC-batterijen door LFP-batterijen maakt kobalt en nikkel vrijwel overbodig. Natrium-ionbatterijen worden al commercieel toegepast in China en kunnen de vraag naar lithium verlagen. Voor langdurige opslag kunnen organische flowbatterijen de vanadiumvraag naar nul reduceren. China heeft op dit moment een grote voorsprong in de ontwikkeling van de meeste batterijtypes.



Materiaalniveau

In het NECT+ scenario blijft de Nederlandse vraag naar de meeste kritieke materialen (in transitiejaar 2035) onder de 1% van de wereldwijde mijnbouwproductie (referentiejaar: 2024). Kobalt en nikkel worden vrijwel volledig weggesubstitueerd (tot 0,01% en 0,07% van de wereldwijde productie). De zeldzame aardmetalen, fosfor en lithium blijven eveneens onder de 1%.

De grote uitschieter is vanadium, met circa 9,4% van de wereldwijde productie. Dit betreft een technologie (vanadium-flowbatterijen) die nog nauwelijks op commerciële schaal wordt toegepast en waarvoor goede alternatieven in ontwikkeling zijn. Deze relatief hoge voorspelde waarde heeft daarom enige nuance. Enerzijds is het niet een gegeven dat alle flow-batterijen die worden neergezet van het specifieke type vanadium-flow batterijen zullen zijn. Anderzijds is het zo dat er op dit moment vrij weinig vanadium wordt geproduceerd. Deels is vanadium een bijproduct van ijzerproductie. Het zou dus kunnen dat het relatief eenvoudig is om vanadiumproductie op te schalen. In hoeverre dat via ijzerproductie zou

kunnen of dat er nieuwe vanadiummijnen moeten worden ontwikkeld is nog onduidelijk.

Koper blijft in alle scenario's een aandachtspunt. In het NECT+ scenario is koper verantwoordelijk voor ruim 71% van de totale kritieke materiaalvraag. De kopervraag laat zich lastig verlagen, omdat koper breed wordt ingezet voor elektriciteitsgeleiding in vrijwel alle onderdelen van het energiesysteem. De wereldwijde koperproductie groeit aanzienlijk trager dan die van andere kritieke metalen (gemiddeld 3% jaarlijkse groei over de periode 2019-2024), doordat koperwinning een volwassen markt is.



Mijnbouw

De resultaten van ons onderzoek laten zien dat het via systeem- en technologische interventies mogelijk is om mijnbouw in ecologisch en sociaal onaanvaardbare gebieden (inclusief de diepzee) te voorkomen.

In het *Beyond Extraction* rapport werkt Greenpeace “acceptabele” mijnbouw uit via zogeheten *restricted areas* (RA1) die *off-limits* zouden moeten blijven voor extractie, waaronder beschermde natuur, gebieden met hoge biodiversiteit (op land en in de zee), en gebieden van inheemse gemeenschappen. Door deze *restricted areas* te vergelijken met de verwachte locaties kan een ‘veilige ruimte’ voor extractie worden gedefinieerd. Het rapport doet dit voor nikkel-, lithium- en kobaltereserves. De bevinding is dat een aanzienlijk deel van de reserves in zulke gebieden liggen (ordegrootte: ~45% nikkel, ~57% lithium en ~27% kobalt).

In dit onderzoek valt de materiaalvraag van de Nederlandse energietransitie voor drie materialen een stuk lager uit dan in het baseline KM scenario. Voor nikkel met 81-83%, en voor lithium met 61-69%. De vraag naar kobalt verdwijnt effectief bijna helemaal (~98%). Koper en mangaan worden niet geanalyseerd in termen van *restricted areas* in *Beyond Extraction*, maar beide materialen zijn alsnog relevant voor de discussie. Koper omdat het om grote volumes gaat, en mangaan omdat het veel in mangaanknollen (diepzee) zit. De vraag koper daalt met 39-46%, en de vraag naar mangaan neemt met 50-55% af.

De energietransitie leidt tot netto de helft minder mijnbouw dan het fossiele energiesysteem, vooral omdat het gebruik van kolen gepaard gaat met zeer grote hoeveelheden mijnbouw. Als door duurzame energie er minder kolen wordt verbrand, dan weegt dit ruimschoots op tegen de extra mijnbouw die nodig is voor de metalen in de energietransitie.⁴

De combinatie van maatregelen in dit onderzoek laat zien dat de kritieke materiaalvraag van de Nederlandse energietransitie kan worden ingevuld zonder diepzeemijnbouw. Als gevolg van de maatregelen in de NECT en NECT+ scenario's wordt immers duidelijk dat de jaarlijkse materiaalvraag van de energietransitie – zelfs in de opbouwperiode tot en met 2040 – voor veel materialen past binnen een ‘eerlijk aandeel’ van de Nederlandse vraag (2035) ten opzichte van de huidige productie (2024). Dat betekent dat er dus geen grote opschaling van de huidige mijnbouw nodig is om aan de toekomstige vraag te kunnen voldoen.

Voor de materialen waar nog wel een relatief hoge vraag naar is, vooral voor elektrolyzers en windturbines, lijken alternatieven beschikbaar te komen. Dit vraagt nog wel om sterke technologische innovatie. Het belangrijkste aandachtspunt blijft de benodigde hoeveelheid koper.



Geopolitiek

Kritieke materialen zijn grotendeels kritiek vanwege geopolitiek. Omdat China invloed heeft in vrijwel de gehele keten – winning, raffinage, productie van onderdelen en eindproducten – is er wereldwijd een grote afhankelijkheid van China ontstaan voor de levering van duurzame energietechnologieën. Individuele landen kunnen zich wel onderscheiden met nieuwe mijnbouw, maar omdat zowel de raffinage als productie door China worden gedomineerd, blijft deze afhankelijkheid bestaan. Mede als gevolg daarvan is ook de Verenigde Staten zich actief aan het positioneren.

Bij publicatie van dit onderzoek (begin 2026) zijn vraag en aanbod van kritieke materialen wereldwijd relatief goed in balans, maar is er van vrije handel geen sprake. Dit wordt steeds duidelijker zichtbaar, zowel door verstoringen in de ketens van (producten met) kritieke materialen als in de vele incidenten in de internationale politiek, zoals bijvoorbeeld de Amerikaanse interesse in Groenland.

De verwachting is dat de sterk groeiende vraag naar deze materialen voor onder meer de energietransitie deze problemen zal vergroten. Een lagere vraag naar kritieke metalen kan de afhankelijkheid van China beperken. Het verlagen van de materiaalvraag draagt daarmee bij aan meer strategische autonomie.

08

Prioriteiten

Er zijn verschillende mogelijkheden om de kritieke materiaalvraag van de energietransitie te beperken. Dat leidt zowel tot minder noodzaak voor mijnbouw, lagere ketenrisico's voor mens en milieu en een lagere geopolitieke afhankelijkheid. Dit hoofdstuk geeft zes prioriteiten.



PRIORITEITEN

Om de transitie naar een schoon en duurzaam energiesysteem mogelijk te maken, zijn 'transitiematerialen' nodig. Om deze opbouw van een duurzaam energiesysteem mogelijk te maken binnen de grenzen van 'verantwoorde' mijnbouw, is een nieuw evenwicht nodig. Daarvoor is een gecombineerde prioriteit op twee sporen noodzakelijk:



SPOOR I Energiebesparing & strategische krimp

- 1 **Strategische keuzes in de nationale industrie** met een visie op welke industrie wel en welke industrie niet past in een klimaatneutraal Nederland
- 2 **Structurele investering in energiebesparing** voor zowel industrie, mobiliteit als de gebouwde omgeving
- 3 **Een *modal shift* van auto naar deelmobiliteit** met een groter aandeel trein, bus en fiets
- 4 **Optimalisatie van bestaande infrastructuur** onder meer door bidirectioneel laden en levensduurverlenging van zonnepanelen



SPOOR II Alternatieve, CRM-arme energietechnologieën

- 5 **Investeringen in onderzoek en toepassing van CRM-arme technologieën** met gerichte R&D-financiering en sturing in tenders voor windparken
- 6 **Verbeter ontwerprijtlijnen van duurzame energietechnologieën** zowel door aanscherping via EcoDesign als door handhaving in de praktijk

Voor alle oplossingsrichtingen geldt: op korte termijn is de reductie in kritieke materiaalvraag beperkt, maar op middellange termijn (vanaf circa 10 jaar) kunnen andere ontwerp- en technologiekeuzes substantieel doorwerken in de vraag naar transitiematerialen. Dit vraagt echter om langjarig en stabiel overheidsbeleid, met gerichte beleidssturing en investeringen. Dat moet leiden tot een wederopbouw van kennis- en industriële capaciteiten, waarvoor ook de randvoorwaarden zoals voldoende technisch geschoold personeel op orde moeten zijn.

Opbouw oplossingsrichtingen

Deze oplossingsrichtingen zijn gekozen om de vraag naar 'transitiematerialen' te beperken. Ter illustratie en concretisering zijn deze onderbouwd vanuit andere onderzoeken en adviezen.



De belangrijkste strategie om toe te werken naar een klimaatneutraal energiesysteem binnen grenzen van verantwoorde mijnbouw is een grootschalige inzet op het verbruiken van minder energie. Alle energie die niet wordt gebruikt, hoeft immers niet te worden opgewekt. Ondanks de groei van duurzame energieproductie groeit wereldwijd ook de vraag naar fossiele brandstoffen – waaronder kolen – nog steeds, als gevolg van de wereldwijd stijgende energievraag.²

1 Maak strategische keuzes in nationale industrie

In het Koersvaste Middenweg-scenario is de industrie in 2050 verantwoordelijk voor circa de helft van het energieverbruik. Om de benodigde duurzame technologieën voor het klimaatneutrale energiesysteem te realiseren, is dan ook een sterke vraagreductie van de industrie nodig. Dit vraagt om strategische krimp in energie-intensieve sectoren.

Uit de modellering in dit onderzoek blijkt dat energiebesparing en industriële krimp de benodigde capaciteit flink kan verlagen. Ten opzichte van het KM-scenario gaat dit voor zonnepanelen om 18-24%, voor wind om 36-42%, voor batterijen om 46% en voor elektrolyse om 64-82%. Dit werkt direct door in de benodigde vraag naar kritieke en strategische materialen voor deze technologieën.

Om deze grote reducties te realiseren, zijn heldere keuzes nodig over welke industrie Nederland in de toekomst wil behouden – en welke niet. In dit onderzoek is gekozen voor afbouw van de olieverwerkende industrie, de staalindustrie en kunstmestproductie. In de uitwerking zijn ook alternatieve keuzes mogelijk, zo lang de te realiseren energiebesparing overeind blijft.

Oplossingsrichtingen

- **Opstellen van visie op toekomst van Nederlandse industrie**, met prioritering van industriële sectoren. Bepaal daarin ook voor welke industrie afbouw nodig is, vanuit zowel het perspectief van strategische autonomie als economisch toegevoegde waarde. Door keuzes voor afbouw is aanleg van een duurzaam energiesysteem voor deze industriële activiteiten niet nodig.³⁵

- **Samenwerken aan Europese industrievisie**, om industriële activiteiten ruimtelijk te herpositioneren naar plekken waar deze vanuit energievoorziening het beste passen. Daarbij is het aanbod aan schone energie dus leidend voor de lange-termijn locatiekeuze van industrieën.

2 Investeer structureel in energiebesparing

Het Koersvaste Middenweg-scenario, dat het uitgangspunt is voor nationaal beleid, gaat al uit van een grote energiebesparing in 2050 om de klimaatdoelen te kunnen halen. Deze energiebesparing is op dit moment nog niet gerealiseerd, maar wel essentieel om te komen tot een klimaatneutraal energiesysteem.

Naast de netto energiebesparing is ook de tijdelijke energiebesparing op momenten van weinig energie-aanbod van belang. De elektriciteitsvraag van de industrie en van datacenters stuwt de totale elektriciteitsvraag sterk op, ook in periodes met beperkte beschikbaarheid. Om een stabiele energievoorziening voor de ‘persoonlijke’ energievraag en maatschappelijke functies te borgen, kan besparing elders bijdragen.

Oplossingsrichtingen

- **Inzetten op maximale energiebesparing in de nieuwbouw en renovatie van woningen, kantoren en maatschappelijk vastgoed.** Kijk daarbij zowel naar goede isolatie als naar ontwerp oplossingen om de hoeveelheid installatietechniek – en daarmee het elektriciteitsverbruik – te beperken.³⁶
- **Maximeren van de energievraag per kilometer van elektrische voertuigen.** Overweeg om eisen te stellen aan de energiestaat per kilometer per voertuigklasse, zoals op dit moment in China al gebeurt.³⁷
- **Stimuleren van *demand side response* bij grootverbruikers**, zowel in het afschakelen van capaciteit als het uitstellen van energievraag. Daarbij gaat het vooral om industriële productiecapaciteit en datacenters.

Zet in op een *modal shift* van auto naar deelmobiliteit, trein, bus en fiets

De meeste ‘transitiematerialen’ zijn nodig voor de verschuiving naar een elektrisch vervoersysteem. In het NE+-scenario neemt het aantal personen- en bedrijfsauto's met 56% af en het aantal vrachtwagens met 50%, door een combinatie van *modal shift* en deelmobiliteit. Gecombineerd met technologische maatregelen leidt dit tot een reductie van 79% in de materiaalvraag voor elektrisch vervoer (zie Hoofdstuk 5). Dit komt door de grote hoeveelheid benodigde batterijen voor elektrische voertuigen. Bovendien leiden voertuigkilometers met elektrische auto's tot een flinke energievraag gedurende het hele jaar.

Een *modal shift* van auto naar deelmobiliteit, trein, bus en fiets kan daarom veel verschil maken, zowel in het energieverbruik (zie ook #2) als in de benodigde ‘transitiematerialen’. Zelfs een beperkte *modal shift* kan al leiden tot flinke verbeteringen. Dat deze inzet op een *modal shift* nodig is, is niet nieuw: al in het Klimaatakkoord (2018) is gesteld dat het 1-op-1 vervangen van benzine-auto's door elektrische auto's niet wenselijk en niet mogelijk is.³⁸

Oplossingsrichtingen

- **Verbeteren van het openbaar vervoer**, zowel in het verhogen van de beschikbaarheid als de intensiteit. Daarbij gaat het vooral om openbaar vervoer buiten hoogstedelijke regio's, waar veel potentie ligt om het aantal autokilometers te beperken.³⁹
- **Inzetten op verschuiving van vervoerskilometers** met meer materiaalintensieve voertuigen naar minder materiaalintensieve voertuigen, zoals een verschuiving van personenauto's naar elektrische fiets.
- **Stimuleren van deelmobiliteit**, waarmee de gebruiksintensiteit van voertuigen wordt verhoogd. Zo kan deelmobiliteit de gebruiksintensiteit van privé-persoonauto's tot 11x verhogen, waar deze nu 95% van de tijd geparkeerd staan.⁴⁰

Optimaliseer bestaande infrastructuur

Er zijn verschillende manieren om binnen de huidige energiesysteemkeuzes minder kritieke materialen te gebruiken. Vaak is dit het gevolg van het toepassen van andere technologieën. Deze technologieën krijgen nu vaak niet de voorkeur vanuit bijvoorbeeld betrouwbaarheid, kosten of technologische volwassenheid. De systeemmaatregelen in dit onderzoek laten zien dat bidirectioneel laden de benodigde systeembatterijcapaciteit met 7-14% kan verlagen, en een verdere uitbreiding van warmtenetten met 12-15% (zie Hoofdstuk 4).

Het kiezen voor technologieën met een lagere kritieke materiaalvraag vraagt om sturing. De nationale (en Europese) overheden maken vaak de keuze om te sturen op doelen, en de technologiekeuzes aan marktpartijen te laten. Omdat marktpartijen optimaliseren op kosten, is er echter minder vraag naar alternatieve technologieën met minder kritieke materialen. Om op lange termijn onze afhankelijkheid te beperken, is het dus nodig om expliciet te sturen op technologieën die minder kritieke materialen vragen.

Oplossingsrichtingen

- **Creëren van mogelijkheden voor alle auto's om als systeembatterij te functioneren.** Vanaf 2030 moeten in de EU alle laadpalen technisch geschikt zijn voor bidirectioneel laden. Zet hier in Nederland versneld op in en zorg ook dat bidirectioneel laden juridisch mogelijk wordt.
- **Inzetten op levensduurverlenging van bestaande zonnepanelen.** In de praktijk worden veel panelen vervangen wanneer er één onderdeel defect is – regelmatig al na vijf tot acht jaar – terwijl de ontwerplevensduur 25 tot 40 jaar bedraagt.⁴¹



In aanvulling op grootschalige energiebesparing en strategische krimp is grootschalige inzet op alternatieve energietechnologieën nodig. Deze alternatieve technologieën hebben een lagere vraag naar kritieke metalen. Het doel hiervan is om materialen toe te passen waar minder mijnbouw voor nodig is, zodat deze technologieën grootschalig kunnen worden toegepast zonder verdere groei van mijnbouw.

Voor verschillende technologieën bestaan er mogelijkheden om deze te produceren met veel minder (of zelfs zonder) kritieke metalen. Het gecombineerde effect van technologische maatregelen is in de doorrekening van dit rapport een reductie van circa 24% van de cumulatieve materiaalvraag. Bij windturbines kan de vraag naar neodymium en dysprosium volledig worden geëlimineerd. Bij redox-flowbatterijen kan de vanadiumvraag naar nul worden teruggebracht door substitutie met organische alternatieven. Bij systeem- en thuisbatterijen daalt de materiaalvraag met respectievelijk 66% en 57% in het CT+-scenario (zie Hoofdstuk 5).

5 Investeer in onderzoek & toepassing naar CRM-arme technologieën

Voor grootschalige toepassing van kritieke-materiaal-arme (CRM-arme) technologieën is nog veel (fundamenteel) onderzoek nodig. Dit vraagt om grote investeringen vanuit zowel de publieke als private sector. Een bijkomend voordeel van op Europees onderzoek gebaseerde technologieën is dat dit de technologische afhankelijkheid van China verlaagt. Vanuit strategische autonomie is dat net zo belangrijk als afhankelijkheid van kritieke materialen.

Om tot volwassen technologieën te komen, zijn na de onderzoeksfase ook investeringen in het marktrijp maken van deze technologie nodig. Dat vraagt om risicodragende investeringen in start- en scale-ups. Daarnaast kan de overheid een rol spelen in een bredere toepassing van deze technologieën, bijvoorbeeld door hiernaar te vragen in tenders.

Oplossingsrichtingen

- **Financieren van fundamenteel onderzoek** naar energietechnologieën met geen of zeer beperkte vraag naar kritieke materialen.
- **Inrichten van publieke onderzoeksfinanciering**, vooral nodig voor technologieën met een relatief

lage technologische volwassenheid en onderzoek dat gericht is op substitutie. Voor dit onderzoek is het vaak moeilijk om private cofinanciering te organiseren, omdat dit niet in het kortetermijnbelang van het bedrijfsleven is.

- **Organiseren van risicodragende financiering voor innovatief bedrijfsleven**, dat oplossingen biedt met een lagere kritieke materiaalvraag dan veelgebruikte alternatieven. Wijzig indien nodig risicobeoordeling van start- en scale-ups op basis van hun bijdrage aan strategische autonomie.
- **Sturen in tenders voor windturbineparken** – zowel op land als op zee – op toepassing van technologieën met minder kritieke materialen.

6 Verbeter ontwerprichtlijnen van duurzame energietechnologieën

Voor verschillende producten zijn Europees ontwerprichtlijnen vastgesteld in de *EcoDesign for Sustainable Products Regulation* (ESPR). Ook voor batterijen en zonnepanelen bestaan deze ontwerprichtlijnen. Deze richtlijnen worden periodiek aangescherpt, waardoor er regelmatig kansen liggen om deze te verbeteren.

Met goede ontwerprichtlijnen ontstaat een level *playing field*. Dit gelijke speelveld geldt voor alle partijen die producten op de Europese markt verkopen – zowel Europese producenten als producenten van buiten Europa. Omdat Europa voor buitenlandse producenten een belangrijke afzetmarkt van groene technologie is, is de verwachting dat de meeste partijen aan eisen zullen voldoen.

Oplossingsrichtingen

- **Implementeren van kwalitatief goede circulaire ontwerprichtlijnen**, inclusief ontwerpen voor langere levensduur, betere reparatiebaarheid en verschillende vormen van hoogwaardige verwerking aan einde levensduur. Het is per product en soms per component verschillend welke ontwerpstrategie het meest relevant is. Dit kan verder onderzocht worden, maar er is genoeg kennis voorhanden om op dit moment al grote stappen te zetten.
- **Borgen van handhaving van deze richtlijnen**, bijvoorbeeld met steekproefsgewijze controles van producten. Recente voorbeelden van consumentenproducten laten zien dat deze controle zeer beperkt is.⁴²

Bijlagen



Onderzoeksmethode

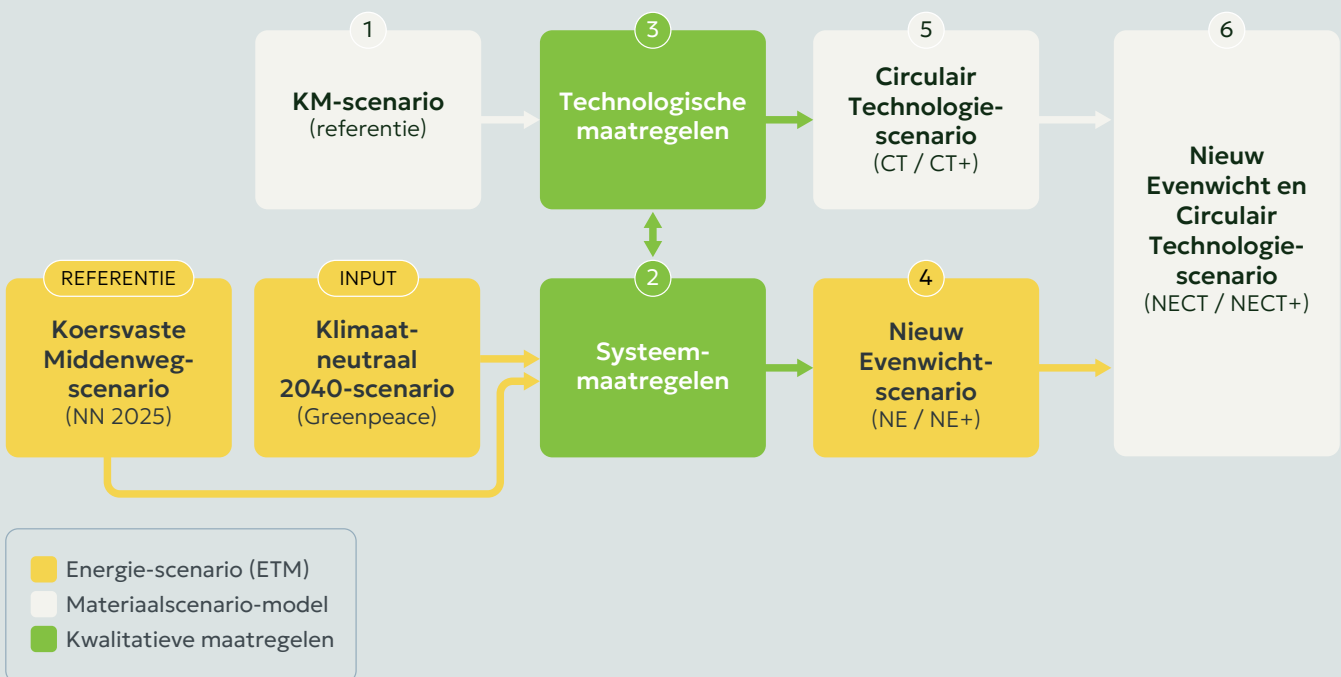
Om inzicht te creëren in de kritieke materiaalvraag van een duurzaam energiesysteem, is in dit onderzoek gebruik gemaakt van twee verschillende modellen. De resultaten van deze modellen leiden gezamenlijk tot de resultaten en conclusies.

Om te komen tot de resultaten zijn op hoofdlijnen zes stappen gezet:

1. **Berekenen kritieke materiaalvraag van Koersvaste Middenweg (KM-)scenario**, op basis van geïnstalleerd vermogen in dit scenario. Daarbij is de materiaalvraag meegerekend van zowel de opbouw van het nieuwe energiesysteem (capaciteitsgroei) als de vervanging van bestaande capaciteit bij eindelevensduur.
2. **Uitwerken van mogelijke systeemmaatregelen**, die leiden tot andere keuzes in de capaciteiten van te installeren duurzame energietechnologieën. Deze zijn in kaart gebracht op basis van een inventarisatie uit eerder onderzoek, gesprekken met systeemexperts en input vanuit Greenpeace.
3. **Uitwerken van mogelijke technologische maatregelen**, die leiden tot andere technologische keuzes en materiaalintensiteiten van te installeren duurzame technologieën. Deze zijn in kaart gebracht op basis van literatuuronderzoek en een uitgebreide interviewronde met experts.

4. **Verwerken van systeemmaatregelen in het Energietransitiemodel (ETM)**, waarmee de effecten van de maatregelen in capaciteitsbesparing zichtbaar worden. Er is gekozen om hiervoor het ETM te gebruiken, omdat daarmee ook inzicht ontstaat in wat de effecten zijn op het functioneren van het energiesysteem. Ook zijn onderdelen van het Klimaatzaak-scenario, dat eerder in opdracht van Greenpeace in het ETM is ontwikkeld, meegenomen. De systeemmaatregelen zijn vervolgens gemodelleerd tot twee scenario's: Nieuw Evenwicht (NE) en Nieuw Evenwicht + (NE+)
5. **Verwerken van technologische maatregelen in materiaalvraagmodel**, waarmee de effecten van de technologische maatregelen op de totale materiaalvraag duidelijk wordt. Deze technologische maatregelen zijn gemodelleerd tot twee scenario's: Circulaire technologie (CT) en Circulaire technologie + (CT+)
6. **Berekenen van de kritieke materiaalvraag van het 'Nieuw Evenwicht en Circulaire Technologie' (NECT-)scenario**, in twee varianten: een NECT-variant en NECT+ variant.

Deze aanpak is op hoofdlijnen geschetst in figuur 17.



Figuur 17 | Aanpak op hoofdlijnen.

Grootste onzekerheden

De basis voor dit onderzoek is het Koersvaste Middenweg-scenario. Ook dit is slechts een scenario: hoe het daadwerkelijke energiesysteem er uit gaat zien en hoeveel (kritieke) materialen daarvoor nodig zijn, kan in de praktijk anders lopen.

Onzekerheden in het energiesysteem

Er zijn veel onzekerheden in het energiesysteem, die ook invloed hebben op de benodigde opwek-, opslag- en transportcapaciteit van elektriciteit een aantal voorbeelden zijn:

- De energievraag van de industrie kan sterk wijzigen wanneer er veel industrie uit Nederland vertrekt. Dit heeft grote gevolgen voor de energiebehoefte en het patroon van vraag en aanbod van energie.
- De opgestelde vermogens en opslagcapaciteit van batterijen ontwikkelt zich snel (zie ook Batterijtechnologie). In de meeste scenario's wordt uitgegaan van een opslagcapaciteit van 4 uur voor een gemiddelde systeembatterij. Door sterk dalende kosten zijn er inmiddels ook projecten met een langere opslag: zo heeft het Chinese PowerChina Ulanqab Project een opslagcapaciteit van 6 uur (1 GW / 6 GWh). In Australië is een 475MW / 3.148MWh-systeem in aanbouw wat een nog langere capaciteit heeft.²¹
- De energievraag van datacenters, onder andere voor kunstmatige intelligentie (AI), is nu gebaseerd op KM-scenario. Daarin is totale energievraag van 'centrale ICT' (inclusief datacenters) in 2050 met een factor 13 toegenomen t.o.v. 2019 (tot 55 TWh). Deze vraag kan sneller stijgen bij bredere toepassing van AI.

Onzekerheden in de materiaalvraag

De grootste onzekerheden in de materiaalvraag van duurzame technologieën:

- Batterijtechnologie kent een zeer snelle ontwikkeling. Er is een breed scala aan *battery chemistries* in ontwikkeling. Een keuze voor een specifieke technologie leidt tot relatief hoge materiaalvragen op basis van die technologie, terwijl in de praktijk naar verwachting een bredere technologiemix zal ontstaan.
- Ter illustratie: in het JRC-rapport (2026)⁴⁸ die als uitgangspunt van deze studie is gebruikt, wordt nog aangenomen dat NMC-batterijen lange tijd dominant blijven, terwijl er op moment van schrijven al grootschalig LFP-batterijen wordt ingezet. Natriumbatterijen komen in het JRC-rapport niet voor, maar worden anno 2025 al commercieel toegepast in Chinese elektrische auto's.⁴³ Het is aannemelijk dat de Europese markt snel zal volgen.
- Er zijn risico's dat de capaciteitsfactor voor wind-op-zee lager wordt naarmate er meer turbines worden neergezet.⁴⁴ Dit betekent een mogelijk lagere energie-opwekking door wind-op-zee dan verwacht.
- De elektrolyser-technologie kent grote onzekerheden in de vraag naar iridium. De materiaalvraag van commerciële elektrolyzers is veel hoger dan de materiaalvraag van nieuwe elektrolyzers die in het laboratorium worden ontwikkeld, tot een factor 200 verschil.⁴⁵ Deze lab-schaal ontwikkelingen zijn echter nog niet bewezen te werken op grote schaal. Omdat Iridium een co-product is van platinaproductie, en platina momenteel veel gebruikt wordt in het fossiele energiesysteem (o.a. katalysatoren in brandstofmotoren), kan een daling in de vraag naar platina ook leiden tot een daling in het aanbod van iridium.

Bronvermelding

- [1] IEA (2021). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. IEA, Parijs. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- [2] IEA (2025). Coal 2025. IEA, Parijs. <https://www.iea.org/reports/coal-2025>
- [3] IEA (2025). World Energy Outlook 2025. IEA, Parijs. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025>
- [4] Nijens, J., Behrens, P., Kraan, O., Sprecher, B., & Kleijn, R. (2023). Energy transition will require substantially less mining than the current fossil system. Joule, 7(11), 2408-2413.
- [5] Institute for Sustainable Futures (2026) Beyond Extraction: pathways for a 1.5 °C aligned energy transition with less materials.
- [6] U.S. Geological Survey (2025). Mineral commodity summaries 2025 (ver. 1.2, March 2025). U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf>
- [7] EASAC (2023). Deep-Sea Mining: Assessing Evidence on Future Needs and Environmental Impacts. EASAC. Deep-sea mining: assessing evidence on future needs and environmental impacts
- [8] International Seabed Authority (2022). Polymetallic Nodules [Factsheet]. ISA. <https://www.isa.org.jm/wp-content/uploads/2022/06/eng7.pdf>
- [9] CBS (2025). Nederlandse afhankelijkheid van kritieke materialen. CBS. <https://www.cbs.nl/nl-nl/publicatie/2025/40/nederlandse-afhankelijkheid-van-kritieke-materialen>
- [10] Netbeheer Nederland (2025). Netbeheer Nederland scenario's editie 2025. Netbeheer Nederland, Den Haag. <https://www.netbeheernederland.nl/artikelen/nieuws/netbeheer-nederland-scenarios-editie-2025>
- [11] Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (2023). Nationaal Plan Energiesysteem. Rijksoverheid, Den Haag. <https://open.overheid.nl/documenten/2f5cbb52-0631-4aad-b3dd-5088fab859c5/file>
- [12] Deen, M., & Jongsma, C. (2023). Verkenning van een fossielvrije industrie: Productie binnen het carbonbudget. CE Delft. https://ce.nl/wp-content/uploads/2023/06/CE_Delft_220351_Verkenning-van-een-fossielvrije-industrie_def.pdf
- [13] Grebe, S., Faber, J., Juijn, D., Meijer, C., de Vries, M., Heijink, M., & Rooijers, F. (2024). Carbon budget aviation. CE Delft. https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2024/01/CE_Delft_230219_Carbon_budget_aviation_Def.pdf
- [14] de Boer, R., Smeding, S.F., & Zondag, H.A. (2025) Overzicht industriële warmteopslagtechnologie en toepassing. TNO. <https://publications.tno.nl/publication/34643912/51dkidSY/TNO-2025-R10406.pdf>
- [15] Carrara, S., Baldassarre, B., Jakimów, M., Kuzov, T., Mc Govern, L., Nohl, L., Ierides, M., & Christou, M. (2025). Deep Dive on critical raw materials for wind turbines in the EU, Black C. (ed.). Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/5665594>
- [16] Interview met expert werkzaam in ontwerp van elektrische motoren (november 2025).
- [17] Dorias, T., & Chivers, B. (2022) Lifetime extension and optimal lifecycle offshore wind turbines. Topsector Energie. https://topsectorenergie.nl/documents/335/20220414_RAP_DNV_Lifetime_extension_and_optimal_lifecycle_offshore_wind_turbin_tUf1Zv2.pdf
- [18] Interview met expert werkzaam in het produceren van elektrische motoren en magnetische assemblies (november 2025).
- [19] Interview met onderzoekers in fotonvoltaïsche technologieën (oktober 2025).
- [20] Seel, J.; Kemp, J.; Cheyette, A.; Millstein, D.; Gorman, W.; Jeong, S., Robson, D., Setiawan, R., & Bolinger, M. (2024). Utility-Scale Solar, 2024 Edition: Empirical Trends in Deployment, Technology, Cost, Performance, PPA Pricing, and Value in the United States. Lawrence Berkeley National Laboratory. OSTI ID: 2467433. <https://escholarship.org/uc/item/4q73115g>
- [21] Heynes, G. (17 oktober 2025). Ark Energy Bags State Approval for 3.1 GWh Richmond Valley Solar plus storage site in Australia. Energy Storage News. <https://www.energy-storage.news/ark-energy-bags-state-approval-for-3-1gwh-richmond-valley-solar-plus-storage-site-in-australia/>
- [22] BloombergNEF & Pylontech (2023). Scaling the Residential Energy Storage Market. Bloomberg Finance L.P. <https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/Scaling-the-Residential-Energy-Storage-Market.pdf>
- [23] Interview onderzoeker nieuwe batterijtechnologieën (2025)
- [24] Maisch, M. (2 juli 2024). World's largest sodium-ion battery goes into operation. PV Magazine. <https://www.pv-magazine.com/2024/07/02/worlds-largest-sodium-ion-battery-goes-into-operation/>
- [25] Yan, Z., & Goh, B. (21 april 2025). China's CATL launches new sodium-ion battery brand. Reuters. <https://www.reuters.com/technology/chinese-battery-maker-catl-launches-second-generation-fast-charging-battery-2025-04-21/>
- [26] Martin, B., Pestiaux, J., Schobbens, Q., Emmrich, J., & Hagemann, M. (2020). A radical transformation of mobility in Europe: Exploring the decarbonisation of the transport sector by 2040. Explorative Scenario and Related Policy Packages; NewClimate Institute: Cologne, Germany; Climact: Brussels, Belgium.
- [27] European Commission: Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. (2020). Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU: a foresight study. Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/58081>

- [28] **Copper8 & TU Delft** (2026) Ontwerp voor leveringszekerheid: Verkenning circulaire ontwerpstrategieën om de vraag naar kritieke materialen te verlagen.
- [29] **Berekening op basis van: IEA** (2025) IEA Energy Statistics Data Browser. IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>
- [30] **Sprecher, B., & Kleijn, R.** (2021) Tackling material constraints on the exponential growth of the energy transition. *One Earth*, 4(3), 335-338.
- [31] **U.S. Geological Survey** (2020). Mineral commodity summaries 2020. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/mcs2020>
- [32] **IEA** (2025). Global Critical Mineral Outlook 2025. IEA. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ef5e9b70-3374-4caa-ba9d-19c72253bfc4/GlobalCriticalMineralsOutlook2025.pdf>
- [33] **Metabolic, Copper8, Polaris, & Quintel** (2021). Een circulaire energietransitie: Verkenning naar de metaalvraag van het Nederlandse energiesysteem en kansen voor de industrie. Copper8. <https://www.copper8.com/wp-content/uploads/2025/12/Een-circulaire-energietransitie.pdf>
- [34] **Gregoir, L., & van Acker, K.** (2022). Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge. *European Metals*. <https://european-metals.eu/metals-for-clean-energy-ku-leuven-study/>
- [35] **Wetenschappelijke Klimaatraad** (2026). Advies: Kiezen of verliezen – Hoe maken we de energie-intensieve industrie toekomstbestendig? WKR. <https://www.wkr.nl/actueel/nieuws/2026/01/29/advies-kiezen-of-verliezen>
- [36] **Copper8, W/E Adviseurs, Metabolic & Alba Concepts** (2023). Circulaire energierenovaties. Copper8. <https://www.copper8.com/wp-content/uploads/2025/12/WP1-Rapport-circulaire-energierenovatie-WE-deel-1.pdf>
- [37] **TechNode Feed** (26 december 2025). China to enforce new EV energy consumption standard in 2026, capping 2-ton models at 15.1 kWh/100 km. TechNode. <https://technode.com/2025/12/26/china-to-enforce-new-ev-energy-consumption-standard-in-2026-capping-2-ton-models-at-15-1-kwh-100-km/>
- [38] **Ministerie van Economische Zaken en Klimaat** (2019). Klimaatakkoord: hoofdstuk Mobiliteit [rapport]. Rijksoverheid, Den Haag. <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-7f383713-bf88-451d-a652-fbd0b1254c06/pdf>
- [39] **Mobiliteitsalliantie** (2019). Deltaplan 2030: Hoog tijd voor mobiliteit. Mobiliteitsalliantie. <https://mobiliteitsalliantie.nl/wp-content/uploads/2019/06/Deltaplan-def-druk-LR.pdf>
- [40] **Jorritsma, P., Witte, J.-J., Alonso González, M.J., & Hamersma, M.** (2021). Deelauto- en deelfietsmobiliteit in Nederland: ontwikkelingen, effecten en potentie. Kennisinstituut voor Mobiliteit. <https://www.kimnet.nl/documenten/2021/10/05/deelauto--en-deelfietsmobiliteit-in-nederland-ontwikkelingen-effecten-en-potentie>
- [41] **AMS Institute, TU Delft, & Universiteit Leiden** (2025). De impact van zonnepanelen in steden. Circulaire Maakindustrie. https://circulairemaakindustrie.nl/app/uploads/2025/02/05350_levensduurverlenging_zonnepanelen_v3.pdf
- [42] **Consumentenbond** (30 oktober 2025). Consumentenbond waarschuwt voor gevaarlijke producten Temu en SHEIN. Consumentenbond. <https://www.consumentenbond.nl/nieuws/2025/consumentenbond-waarschuwt-voor-gevaarlijke-producten-temu-en-shein>
- [43] **Kang, L.** (5 januari 2024). JAC's Yiwei starts delivering EVs with sodium ion batteries. CnEVPost. <https://cnevpost.com/2024/01/06/jac-yiwei-starts-delivering-evs-with-sodium-ion-batteries/>
- [44] **Ferreira, C. S., Larsen, G. C., & Sørensen, J. N.** (2026). A theoretical upper limit for offshore wind energy extraction. *Cell Reports Sustainability*, 3(1).
- [45] **TNO** (24 oktober 2022). Breakthrough Electrolyser Development: 200 times less iridium needed. TNO. <https://www.tno.nl/en/newsroom/2022/10/breakthrough-electrolyser-development/>
- [46] **Copper8 & TU Delft** (2026) Magnetisme van circulair ontwerp: Verkenning circulaire ontwerpstrategieën om de vraag naar NdFeB te verlagen
- [47] **Taylor, N., Kuzov, T., Chatzipanagi, A., Carrara, S., Jakimow, M., Materna, F., Espinosa, N., Latunussa, C., Bobba, S., Jaeger-Waldau, A., Leccisi, E. & Christou, M.** (2025). Deep Dive on critical raw materials for solar photovoltaics in the EU. Publications Office of the European Union. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC141760>
- [48] **Bobba, S., Latunussa, C., Manni, F.M. & Mathieux, F.** (2025). Deep Dive on critical raw materials for batteries in the EU. Publications Office of the European Union. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC141715>
- [49] **Kalavasta, CE Delft & Berenschot** (2025) Nederland klimaatneutraal in 2040 – Een haalbaarheidsanalyse



Copper  Quintel