

Circulaire strategieën voor het energiesysteem

Kritieke materiaalvraag van de Nederlandse
energietransitie



Colofon

Publicatie

April 2026

Auteurs

Copper

Sybren Bosch
Dennis Jansen

Quintel

Mart Lubben
Claudia Valkenier



Benjamin Sprecher

TU Delft

Bhuvesh Kaushik
Niklas Engberg
Dirk Jacobs

Opdrachtgever



Ministerie van Economische Zaken
en Klimaat

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van EZK.
Tijdens het onderzoek is een klankbordgroep betrokken vanuit de
ministeries EZK en IenW.

gasunie

In aanvulling op de onderzoeksvraag van het Ministerie van EZK is ook
de kritieke materiaalvraag van de vier Netbeheer Nederland-scenario's
inzichtelijk gemaakt, in opdracht van Gasunie
(namens Netbeheer Nederland).

Ontwerp

Cassie Björck

Inhoudsopgave

	SAMENVATTING	3
01	INLEIDING	8
02	UITGANGSPUNTEN	12
03	MATERIAALVRAAG NETBEHEER NEDERLAND SCENARIO'S	17
04	CIRCULAIRE STRATEGIEËN OP SYSTEEMNIVEAU	23
	Strategie A. Verdere energiebesparing	25
	Strategie B. Verhogen <i>demand side response</i>	27
	Strategie C. Meer inzet op warmte	30
	Strategie D. Meer inzet op biograndstoffen	32
05	CIRCULAIRE STRATEGIEËN OP TECHNOLOGIENIVEAU	37
	Windenergie	39
	Zon-PV	41
	Batterijen: systeem- en thuisbatterijen	43
	Batterijen: redox-flow systeembatterijen	45
	Batterijen: elektrische voertuigen	47
06	MATERIAALVRAAG CIRCULAIR MIDDENWEG- EN TECHNOLOGIESCENARIO	50
07	PRIORITEITEN	57
08	AANDACHTSPUNTEN	65
	BIJLAGEN	68
	Bijlage I. Onderzoeksmethode	69
	Bijlage II. Scenario's energietransitiemodel (ETM)	70
	Bijlage III. Grootste onzekerheden	71
	Bijlage IV. Aanbevelingen vervolgonderzoek	72
	Bijlage V. Bronvermelding	73

Samenvatting

De energietransitie is een materialentransitie. Om vergaande klimaatverandering te beperken, is een snelle opschaling nodig van duurzame energietechnologieën als zonnepanelen, windturbines, batterijen en elektrolyzers. Hiervoor zijn kritieke materialen nodig. Daarmee vindt er een verschuiving plaats van olie, kolen en gas naar kritieke en strategische materialen.

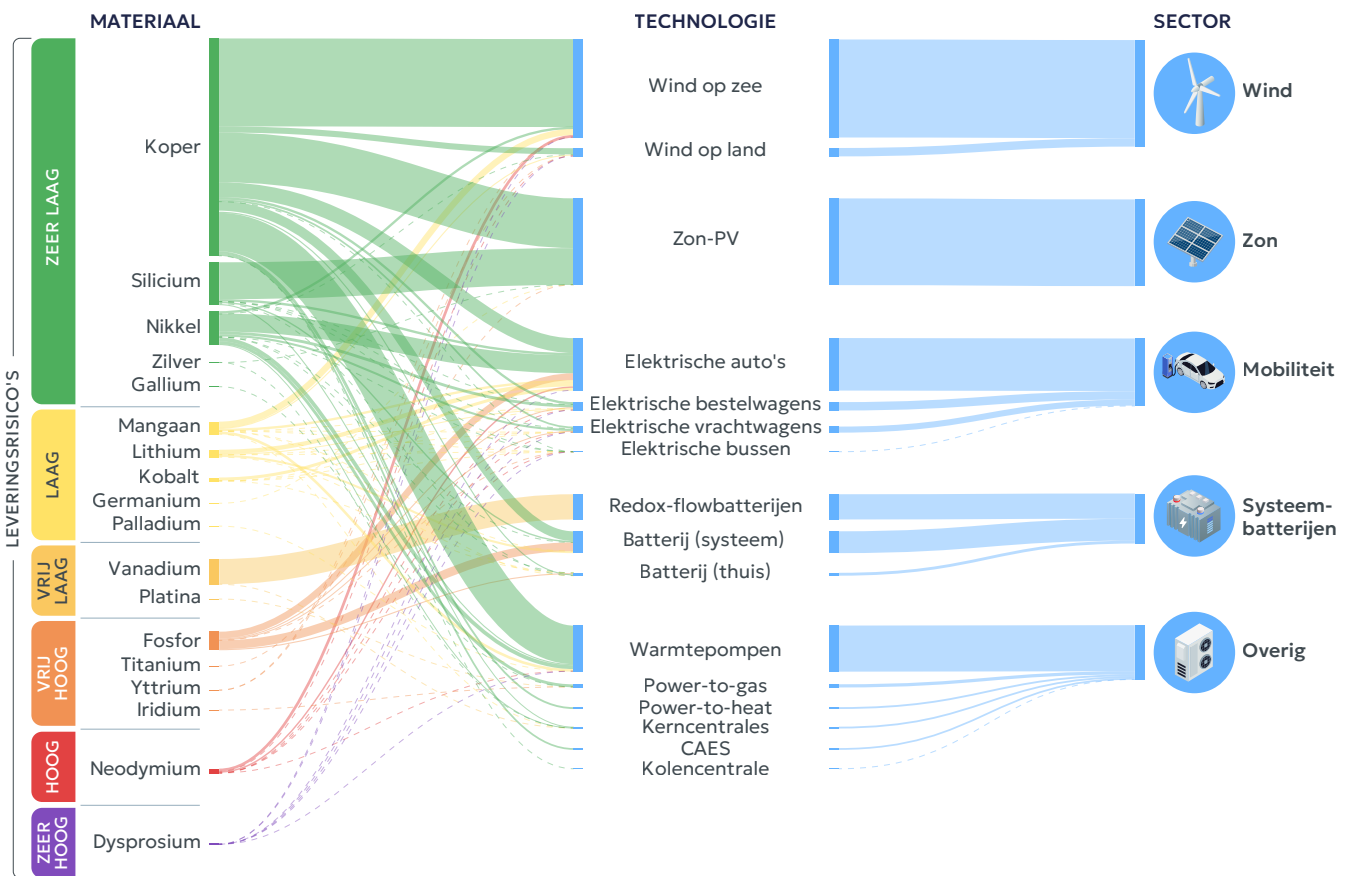
Gebruik van kritieke materialen leidt tot nieuwe geopolitieke afhankelijkheden. China heeft een dominante positie in vrijwel alle onderdelen van deze productieketens. Deze geopolitieke afhankelijkheid wordt steeds duidelijker zichtbaar. De verwachting is dat de sterk groeiende vraag naar deze materialen de afhankelijkheid zal vergroten.

Om deze afhankelijkheden en risico's in de energietransitie te beperken, zijn bewuste keuzes nodig in het gebruik van kritieke en strategische materialen. Een circulair perspectief kan leiden tot andere keuzes. Dit onderzoek verkent de mogelijkheden van zowel strategieën in het ontwerp van het energiesysteem als strategieën binnen duurzame energietechnologieën.

Status: eerste verkenning

Dit onderzoek is een eerste verkenning van maatregelen die in het energiesysteem genomen kunnen worden. De basis van het onderzoek is het *Koersvaste Middenweg* (KM-)scenario van Netbeheer Nederland. Het KM-scenario is ook de referentie voor de mogelijke reducties. Er zijn aanvullende maatregelen denkbaar, die in dit onderzoek niet zijn meegenomen. Ook zijn er beperkingen in de energiesysteemmodellering (ETM).

De vraag naar kritieke materialen verschilt sterk per technologie. De grootste vraag in de periode tot en met 2050 wordt gevormd door koper (67%), dat in vrijwel alle technologieën wordt gebruikt. Ook leiden batterijen tot een grote materiaalvraag: vooral silicium (13%), nikkel (11%), vanadium (8%), fosfor (6%) en mangaan (4%). De materialen die als het meest kritiek gezien worden zijn de zeldzame aardmetalen neodymium en dysprosium.



Figuur | Totale kritieke materiaalvraag van de Nederlandse energietransitie tot en met 2050 in het *Koersvaste Middenweg*scenario, met leveringsrisico per materiaal

Systemstrategieën

Om de vraag naar kritieke materialen te verlagen, liggen er binnen het energiesysteem vooral mogelijkheden in het beperken van de piekvraag naar energie. Dat leidt tot een lagere benodigde batterijcapaciteit, waardoor minder kritieke materialen nodig zijn. De mogelijkheden om met aanpassingen in het systeemontwerp de materiaalbehoefte voor de opwekcapaciteit structureel te verlagen, lijken in deze verkenning beperkt te zijn.

De systeemmaatregelen kunnen gezamenlijk leiden tot een kritieke materiaalreductie van 3-8% in de periode tot en met 2050. In absolute zin vindt de grootste besparing plaats in de benodigde materialen voor batterijen (21%), als gevolg van de volumereductie (strategie A, B, C).

STRATEGIE A. Verdere energiebesparing

Verdere energiebesparing leidt vooral tot minder benodigde opslagcapaciteit. Binnen deze strategie is gekeken naar zowel het verbeteren van de gebouwisolatie (woningen, kantoren) als een *modal shift* voor personenvervoer van auto naar openbaar vervoer. Verdere energiebesparing van 10-20% en een 10-25% groei van fietsen, bussen, treinen en trams leidt tot een besparing van 5-12 GW in batterijcapaciteit en een lichte besparing van 2-3 GW in opwekcapaciteit (zon, wind).

STRATEGIE C. Meer inzet op warmte

Meer inzet op warmte verlaagt het benodigde batterijvermogen. Een uitbreiding van het warmtenet voor gebouwen kan zowel de vraag naar elektriciteit als het benodigde batterijvermogen voor de winter(piek) vraag beperken. Een verhoging van het aandeel warmte tot 23-27% (huishoudens) en 25-30% (utiliteitsgebouwen) kan leiden tot een reductie in benodigde batterijcapaciteit van 7-9 GW en een lichte verlaging van de opwekcapaciteit van wind (0-3 GW).

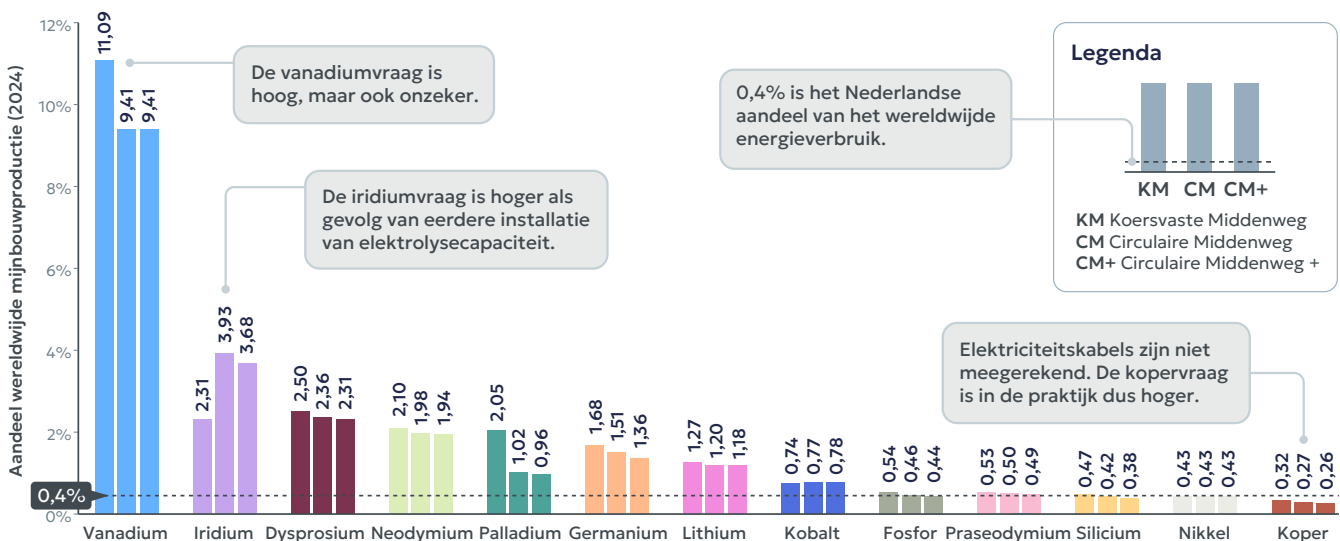
STRATEGIE B. Verhogen demand side response

Verhoging van *demand side response* (DSR) verlaagt de benodigde opslagcapaciteit. Met DSR-maatregelen neemt in periodes van piekvraag zowel de energievraag af (door vraagtstel van de industrie) als het energieaanbod toe (door bi-directioneel laden van elektrische voertuigen). Een verlenging van vraagtstel naar 48-72 uur en verhoging van het aandeel bidirectioneel laden van personenauto's naar 21-28% leidt tot een besparing van 5-7 GW in batterijcapaciteit.

STRATEGIE D. Meer inzet op biogrondstoffen

Vervanging van waterstof door biogrondstoffen in de lucht- en scheepvaart leidt tot minder opwek- en elektrolysecapaciteit. Een verlaging van 20% naar 10-0% (luchtvaart) en van 10% naar 5-0% (scheepvaart) leidt tot 11-21 GW lagere benodigde opwekcapaciteit van zon en 2-5 GW minder benodigde elektrolysecapaciteit. Dit vraagt echter wel om extra import van duurzame biogrondstoffen, terwijl vanuit beleid juist de voorkeur ligt op afbouw hiervan.

Met de combinatie van de gemodelleerde maatregelen binnen de vier systeemstrategieën blijft in 2035 van elf metalen de relatieve vraag hoger dan 0,4% - het Nederlandse aandeel van het wereldwijde energieverbruik. Hierbij is de vraag in 2035 – als referentiejaar voor de transitie – vergeleken met de winning in 2024. Van zeven metalen is het relatieve aandeel dan zelfs hoger dan 1,0%: iridium (elektrolyzers), palladium (warmtepompen) neodymium, dysprosium (windturbines), germanium (zonnepanelen), vanadium en lithium (batterijen).



Figuur | Kritieke materiaalvraag van KM-, CM- en CM+ scenario's (in 2035) t.o.v. wereldwijde mijnbouwproductie (in 2024)

Technologische strategieën

Deze verkenning kijkt binnen drie strategieën (efficiëntie, substitutie en levensduurverlenging) in totaal naar dertien maatregelen.



Wind

Voor windturbines vormt neodymium relatief de grootste kritieke materiaalvraag. Neodymium is een essentieel materiaal in permanente (NdFeB-)magneten. Met de huidige technologiemix is in 2035 zo'n 2,1% van de wereldwijde jaarproductie (2024) nodig voor de Nederlandse energietransitie. De grootste reducties zijn mogelijk door een geleidelijke overgang naar andere technologieën, zoals *electrically excited* generatoren en hoge-temperatuur supergeleidende generatoren. Deze alternatieve technologieën hebben minder tot geen permanente magneten – en daarmee neodymium – nodig.



Zon

Voor zonnepanelen zijn germanium en silicium relatief de meest benodigde kritieke materialen. Deze materialen zijn essentieel voor het functioneren van zonnepanelen. Silicium is lastig te vervangen, voor germanium zijn alternatieven beschikbaar. Met de huidige technologiemix is in 2035 is zo'n 1,7% van de wereldwijde jaarproductie (2024) van germanium nodig voor de Nederlandse energietransitie. De grootste reducties zijn mogelijk door levensduurverlenging en een grotere efficiëntie in ontwerp en productie. De effecten van deze strategieën worden echter pas na 2050 zichtbaar.

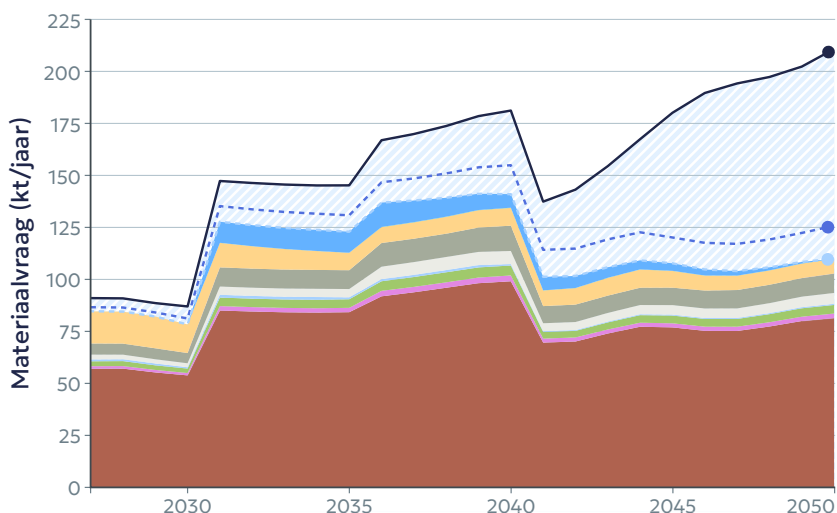


Systeem- en thuisbatterijen

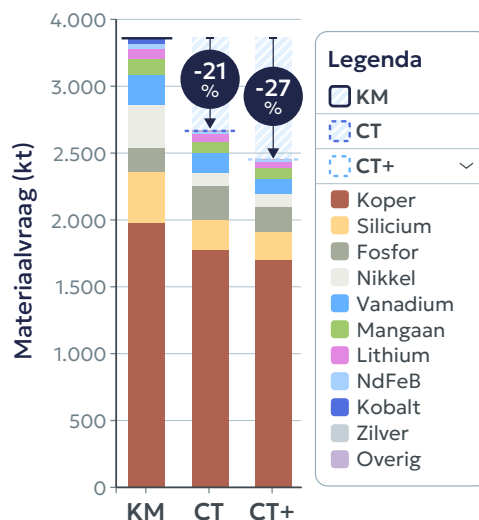
Voor systeem- en thuisbatterijen zijn koper, lithium en mangaan de meest benodigde kritieke materialen. In batterijtechnologie zijn echter veel ontwikkelingen: zo worden NMC-batterijen naar verwachting steeds vaker vervangen door LFP-batterijen. Ook kunnen natriumbatterijen hun intrede doen. Wanneer de technologische verbeteringen en verschuivingen in opslagtechnologieën worden meegerekend, kan de lithiumvraag in 2035 worden verlaagd naar 0,9% (van 1,3%) van de wereldwijde jaarproductie (2024). Bij nikkel kan een verlaging plaatsvinden tot 0,1% (van 0,4%) en kobalt (0,7% in KM) kan vrijwel geheel worden uitgefaseerd.

De technologische maatregelen kunnen er gezamenlijk toe leiden dat de vraag naar kritieke en strategische materialen in 2050 met zo'n 46% daalt ten opzichte van het reguliere KM-scenario. De cumulatieve materiaalvraag tot 2050 daalt dan met 21-27%. In absolute zin vindt de grootste verlaging plaats in de benodigde materialen voor batterijen (vanadium, nikkel en mangaan), omdat deze de grootste volumes hebben en hier de meeste alternatieve technologieën beschikbaar zijn. Vanuit leveringsrisico's vindt de grootste verlaging plaats binnen windturbines (neodymium), waar de relatieve vraag van Nederland groot is.

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



Totale kritieke materiaalvraag 2027 t/m 2050



Figuur | Verlaging van de kritieke materiaalvraag door circulaire technologiemaatregelen

Gecombineerde strategieën

Bij gecombineerde systeem- en technologie strategieën is de Nederlandse vraag in 2035 als aandeel van de wereldwijde mijnbouwproductie (in 2024) voor acht materialen hoger dan het Nederlandse aandeel van het wereldwijde energieverbruik (0,4%). Dit geldt voor onder meer vanadium (9,4%), iridium (3,6%), neodymium (0,85%) en lithium (0,81%). Voor materialen als koper (0,25%) en nikkel (0,10%) is de vraag kleiner dan het relatieve Nederlandse energieverbruik. Deze percentages kunnen veranderen als gevolg van innovatie of een groei in de mijnbouwproductie.

Deze gecombineerde inzet kan de vraag naar kritieke en strategische materialen in 2050 met zo'n 57% laten dalen ten opzichte van het reguliere KM-scenario. De cumulatieve materiaalvraag tot 2050 daalt dan met 25-34%. De resterende materiaalvraag bestaat voor bijna 75% uit koper. De grootste absolute winst is te behalen bij koper, vanadium en nikkel. De grootste relatieve winst is te behalen bij de materialen vanadium (flowbatterijen), neodymium (windturbines) en palladium (warmtepompen).

Inzet

Ondanks technologische ontwikkelingen blijft de vraag naar kritieke materialen voor het energiesysteem groot, omdat de benodigde capaciteit snel toeneemt. Om leveringsrisico's en ketenimpacts te beperken, is het daarom van belang om zowel op systeem- als technologieniveau aan de slag te gaan.

Tegelijkertijd gaat verbetering van de strategische autonomie verder dan vervanging van materiaal. Ook zonder kritieke materialen kunnen afhankelijkheden van buitenlandse technologieën ontstaan, zoals Chinese

natriumbatterijen. Een afbouw van deze afhankelijkheden vraagt om investeringen. De effecten van technologische maatregelen zijn vaak beperkt op korte termijn, maar groter op middellange termijn. Bij het nemen van deze maatregelen is een lange-termijnperspectief dus noodzakelijk.

Systemniveau

Maximale energiebesparing

I Zowel door het stimuleren van een *modal shift* in mobiliteit als verdere energiebesparing in gebouwen.

Beter afstemmen vraag & aanbod van energie

II Met onderzoek naar verdere *demand side response* in datacenters en de industrie en het creëren van voorwaarden om elektrische auto's in te zetten als flexibele opslag.

Technologieniveau

Sturen op alternatieve technologieën met minder kritieke materialen

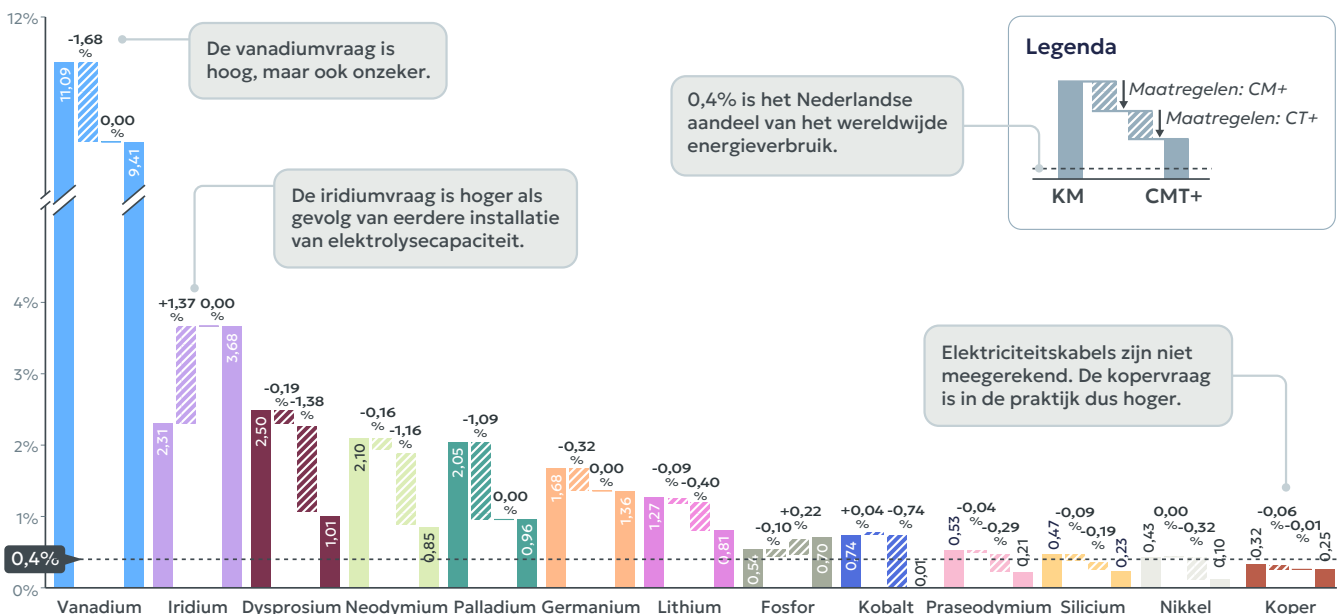
III Vooral binnen batterijen en windturbines, zowel door sturing in aanbestedingen als door investeren in fundamenteel en industrieel onderzoek.

Levensduurverlenging van bestaande capaciteit

IV Vooral voor zonnepanelen en batterijsystemen, door onder meer afstemming van vergunningstermijnen en ontwerpeisen.

Verbeteren van ontwerp door efficiënter materiaalgebruik

V Onder meer door verdere ontwikkeling van EcoDesign.



Figuur | Bijdrage van systeem- en technologische strategieën aan kritieke materiaalvraagreductie (in 2035) vergeleken met de wereldwijde mijnbouwproductie (in 2024)

CIRCULAIRE STRATEGIEËN Systeemniveau



STRATEGIE A. Verdere energiebesparing

- 1 Verbeteren gebouwisolatie
- 2 Verschuiving in vervoersmiddelen, met een *modal shift* in personenvervoer

Andere vormen van energiebesparing zijn niet doorgerekend, maar kunnen uiteraard ook leiden tot een lagere kritieke materiaalvraag van het energiesysteem.



STRATEGIE B. Verhogen *demand side response*

- 3 Verlengen periode 'vraaguitstel' van industrie
- 4 Verhogen aandeel bi-directioneel laden in mobiliteit



STRATEGIE C. Meer inzet op warmte

- 5 Verder uitbreiden warmtenet



STRATEGIE D. Meer inzet op biograndstoffen

- 6 Vervangen waterstof in lucht- en scheepvaart met biograndstoffen

CIRCULAIRE STRATEGIEËN Technologieniveau



STRATEGIE E. Efficiëntie



Verlagen dysprosiumgehalte naar 1,5%



- Verlagen zilveragehalte elektrische contacten
- Verlagen koper en aluminium
- Verlagen silicium



STRATEGIE F. Substitutie



- Toepassen geared windturbines (2030)
- Toepassen electrically excited generatoren (2035)
- Toepassen hoge-temperatuur supergeleiders (2040)



- Vervangen NMC- met LFP-batterijen (2026)
- Toepassen natriumbatterijen (2030)



Toepassen organische flowbatterijen



STRATEGIE G. Levensduurverlenging



Verlengen levensduur naar 40 jaar



Verlengen levensduur naar 35-40 jaar



Verlengen levensduur LFP-batterijen tot 24 – 40 jaar

01

Inleiding

Om ernstige klimaatverandering te beperken, is een snelle opschaling nodig van duurzame energietechnologieën. Denk aan zonnepanelen, windturbines, batterijen, elektrolyzers en elektrische voertuigen. Voor deze energietechnologieën zijn (kritieke) materialen nodig. Gebruik van deze materialen leidt echter tot geopolitieke afhankelijkheden en tot ketenrisico's voor mens en milieu. Om deze afhankelijkheden en ketenrisico's te verminderen, is er inzet nodig om de kritieke materiaalvraag te verminderen.

INLEIDING

De wereldwijde transitie naar een schoon energiesysteem gaat niet slagen zonder aandacht voor kritieke materialen.¹ Deze materialen zijn echter ook cruciaal voor onder andere militaire toepassingen, digitale infrastructuur en consumentenelektronica. Met een groeiende wereldbevolking en vooral een groeiende wereldwijde middenklasse neemt de druk op deze materialen toe, ook zonder de transitie naar een duurzaam energiesysteem.² In de toepassing van deze metalen is er dus zowel concurrentie tussen landen als tussen toepassingen.

Met de verschuiving naar een schoon energiesysteem verschuift ook de geopolitieke afhankelijkheid. De huidige afhankelijkheid in de import van fossiele brandstoffen – van het Midden-Oosten en de VS – verschuift naar een afhankelijkheid in de import van technologieën met kritieke materialen. In veel delen van die productieketens is China dominant: in winning van grondstoffen, in verwerking tot materialen, in productie van componenten of in een combinatie van deze drie.¹

Deze nieuwe, geopolitieke afhankelijkheid is de afgelopen jaren zichtbaarder geworden. Als gevolg van geopolitieke spanningen staat internationale handel steeds verder onder druk. Daarmee groeit het risico op leveringsproblemen. In april 2025 heeft China exportrestricties ingesteld op verschillende zeldzame aardmetalen en de bijbehorende magneten, die essentieel zijn voor onder meer windturbines en elektrische motoren. In oktober 2025 zijn deze exportbeperkingen uitgebreid – en vervolgens weer uitgesteld.³ Vooralsnog worden eindproducten (zonnepanelen, elektrische auto's) wel volledig geleverd. Tijdelijke productiestops als gevolg van deze exportbeperkingen, onder meer in de auto-industrie door een gebrek aan permanente magneten, illustreren echter onze afhankelijkheid.⁴

Beleidsmatige context

De Europese Commissie wil zowel de Europese CO₂-uitstoot verlagen als de afhankelijkheid van kritieke materialen beperken. Op het gebied van klimaat wordt ingezet op 55% CO₂-reductie in 2030 en 90% CO₂-reductie in 2040. Op het gebied van kritieke grondstoffen stelt de *Critical Raw Material Act* (CRMA) doelstellingen voor eigen winning, verwerking en recycling binnen Europa.⁵ Ook diversificatie van de herkomst is een doel.

Om de doelen uit de CRMA te kunnen realiseren, is eind 2025 het *RESourceEU Action Plan* gelanceerd.⁶ Het doel van dit plan is om vergunningverlening van strategische projecten te versnellen en financiële risico's voor investeerders te beperken. Daarbij gaat het zowel om mijnbouw-, verwerkings- als recyclingprojecten. Ook worden er onder dit actieplan gesprekken met andere landen opgezet, waaronder Zuid-Afrika, Brazilië en Australië.

Voor de nationale uitvoering van de CRMA en RESourceEU is de Nationale Grondstoffenstrategie leidend.⁷ In aanvulling daarop is er nationaal beleid op circulaire economie.⁸ Circulaire keuzes in het energiesysteem kunnen bijdragen aan het verminderen van de materiaalvraag. Daarmee nemen ook leveringsrisico's en ketenimpact af.

Doel

Met dit onderzoek willen we verkennen hoe de kritieke materiaalvraag van het energiesysteem kan worden verlaagd door inzet op circulaire strategieën. Dit onderzoek kijkt zowel naar keuzes die kunnen worden gemaakt in het ontwerp van het energiesysteem als naar keuzes die kunnen worden gemaakt binnen energietechnologieën. Daarmee is dit onderzoek een update en verdere verdieping van het eerdere onderzoek *Een circulaire energietransitie* (2021)⁹: zie het kader op de volgende pagina.

Eerder onderzoek: Circulaire energietransitie

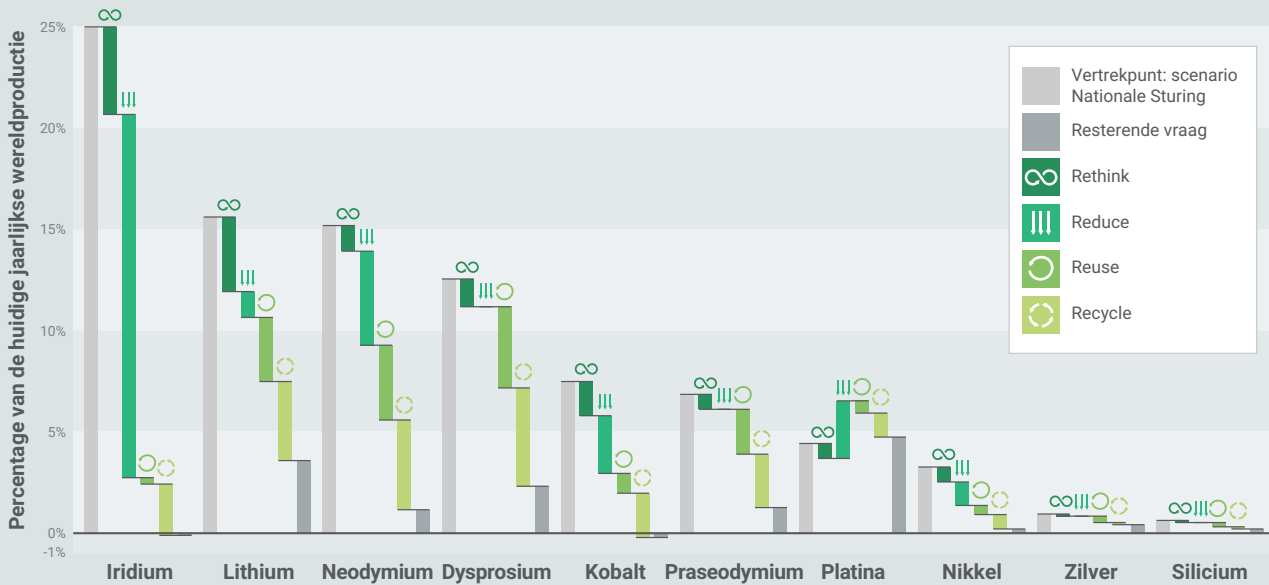
In 2021 is eerder onderzoek uitgevoerd naar de kritieke materiaalvraag van het Nederlandse energiesysteem. Voor dat onderzoek zijn de op dat moment meest recente *Integrale Infrastructuurverkenningen 2030-2050* als basis gehanteerd. De materiaalvraag van de verschillende I13050-scenario's is op basis van toenmalige verwachtingen over technologische ontwikkelingen uitgezet tegen mijnbouwproductiecijfers uit 2019.

De belangrijkste twee conclusies uit het onderzoek van 2021 zijn als volgt:

- Voor veel kritieke materialen heeft Nederland een veel groter aandeel van de wereldwijde mijnbouwproductie nodig, dan een 'eerlijk' aandeel op basis van inwoners, energieverbruik of BBP.
- Een combinatie van alle circulaire strategieën – zowel *Refuse, reduce, repair* en *recycle* – is nodig om de materiaalvraag voldoende te verlagen.



Dit rapport herhaalt deze analyse op basis van actuele inzichten. Daarbij gaat veel meer aandacht uit naar specifieke maatregelen op *Rethink* – het maken van andere keuzes in het ontwerp van het energiesysteem.



Figuur 1 | Indicatie van bijdrage van circulaire strategieën uit eerder onderzoek⁹

Leeswijzer

Hoofdstuk 2

Schetst de **uitgangspunten**, op basis waarvan de analyse is uitgevoerd.

Hoofdstuk 3

Presenteert de **kritieke materiaalvraag** van de verschillende **Netbeheer Nederland-scenario's**, inclusief het *Koersvaste Middenweg*-scenario.

Hoofdstuk 4

Licht de **circulaire strategieën op systeemniveau** toe, waar op ingezet kan worden om de kritieke materiaalvraag te verminderen.

Hoofdstuk 5

Licht de **circulaire strategieën op technologieniveau** toe, die helpen om de kritieke materiaalvraag te verminderen.

Hoofdstuk 6

Presenteert de **kritieke materiaalvraag van het 'Circulaire Middenwegscenario'**, waarin beide circulaire strategieën zijn verwerkt.

Hoofdstuk 7

Geeft de belangrijkste **conclusies** op basis van de resultaten.

Hoofdstuk 8

Doet **aanbevelingen** voor beleidsinterventies voor toepassing van de circulaire strategieën.

02

Uitgangspunten

Een circulair perspectief kan leiden tot andere keuzes. Dit onderzoek verkent de mogelijkheden van zowel strategieën in het ontwerp van het energiesysteem als strategieën binnen duurzame energietechnologieën. Om te komen tot een nieuw, circulair scenario is een aantal uitgangspunten vastgesteld. Dit hoofdstuk licht deze uitgangspunten toe.



UITGANGSPUNTEN

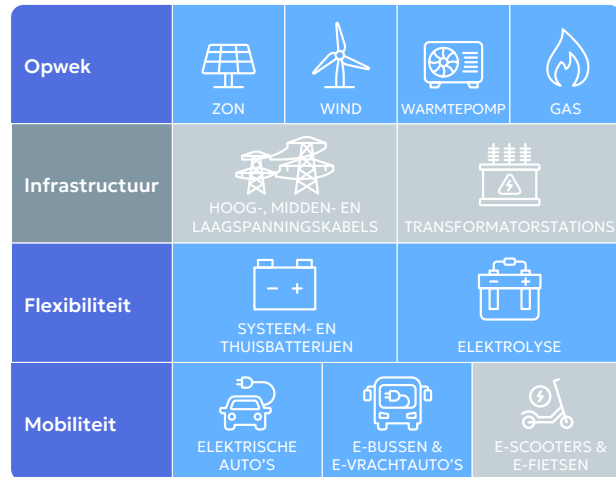
Afbakening: energiesysteem

Dit onderzoek kijkt naar de onderdelen van het energiesysteem die relevant zijn voor de kritieke materiaalvraag. Binnen de scope vallen de benodigde materialen voor opwek van elektriciteit (o.a. windturbines, zonnepanelen, nucleair, gasturbines) en verschillende vormen van energieopslag en -conversie (o.a. batterijen, elektrolyzers). Voor de opwek van warmte worden warmtepompen wel meegenomen, maar warmte-distributie niet – omdat hier weinig tot geen kritieke materialen voor worden gebruikt. Dit onderzoek kijkt niet naar circulaire maatregelen buiten het energiesysteem, zoals een afnemende vraag naar warmtepompen door het anders aansturen van de bouwopgave: dit is recent onderzocht door CE Delft.¹⁰

Elektriciteitskabels en transformatorstations zijn niet meegenomen in deze studie. De beschikbare data zijn hiervoor ontoereikend. Deze gegevens zijn geen onderdeel van de Netbeheer Nederland scenario's 2025 en ook niet in voldoende detail opgenomen in de investeringsplannen van netbeheerders. Ook eerdere I13050-verkenningen geven geen volledig beeld: hier mist bijvoorbeeld de ontwikkeling van de aanleg van kabels en de transformatorstations van TenneT.¹¹

Elektrische voertuigen – zowel personenauto's als elektrische bussen en vrachtwagens – zijn wel meegenomen. Dit geldt zowel voor de voertuigen die een rol hebben in het energiesysteem (voor *vehicle-to-grid* energieopslag) als voor voertuigen die daar geen rol hebben. Elektrische fietsen en scooters zijn niet meegenomen, mede omdat het vooralsnog lastig te bepalen is hoe groot deze markt gaat worden.

Naast toepassingen in het energiesysteem zijn kritieke materialen ook essentieel voor veel producten *buiten* het energiesysteem. Deze toepassingen zijn buiten scope voor dit onderzoek.¹² Wel zorgt het energiesysteem voor een relatief grote vraag naar kritieke materialen ten opzichte van andere toepassingen. Dit geldt bijvoorbeeld voor zeldzame aardmetalen, indium en lithium.







Figuur 2 | Afbakening energiesysteem voor onderzoek kritieke materiaalvraag

Vertrekpunt energiesysteem: Koersvaste Middenweg (KM)-scenario

Voor dit onderzoek is het *Koersvaste Middenweg* (KM-)scenario het vertrekpunt.¹³ 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.¹⁴ Daarmee is het KM-scenario van de NBNL-scenario's het meest geschikt als basis voor de scenario-ontwikkeling van circulaire alternatieven. De vier scenario's zijn verder uitgewerkt in Hoofdstuk 3.

De belangrijkste kenmerken van het KM-scenario (2050) ten opzichte van het referentiejaar (2019) zijn samengevat in tabel 1. Wijzigingen van keuzes ten opzichte van het KM-scenario, zoals de aankondiging van begin 2025 om de ambities voor wind-op-zee af te schalen¹⁵, zijn niet verwerkt in de modellering.

Koersvaste Middenweg	2019	2050	Vershil
Opwek- en opslagcapaciteit (GW)			Toename
 Zon	6	117	Factor 20
 Wind	3	91	Factor 30
 Batterijen	0	58	-
 Elektrolyse	0	28	-
Energiegebruik: finaal energetisch en non-energetisch (TWh)			Besparing
Landbouw	39	25	34%
Gebouwen	71	48	33%
Huishoudens	107	77	28%
Industrie	347	316	9%
Transport	141	80	44%
Internationaal transport	132	105	20%
Energie en overig	5	9	-
TOTAAL	842	660	22%

Tabel 1 | Kenmerken van het *Koersvaste Middenweg*-scenario, in vergelijking met referentie (2019)

Randvoorwaarden toekomstig energiesysteem

In dit onderzoek wordt een nieuw scenario opgesteld: de 'Circulaire Middenweg' (CM), wat onderzoekt in hoeverre de vraag naar kritieke materialen verlaagd kan worden. Voor CM is een aantal randvoorwaarden opgesteld, in lijn met de beleidskeuzes rondom het KM-scenario. Die randvoorwaarden zijn de grenzen waarbinnen de modellering van circulaire strategieën plaatsvindt.

- Import.** Circulaire keuzes mogen niet gecompenseerd worden door een toename in import van energie (elektriciteit, warmte en/of waterstof). Daarmee wordt voorkomen dat een lagere vraag van kritieke metalen binnen Nederland leidt tot een hogere vraag naar kritieke metalen in het buitenland. Ook wordt voorkomen dat deze keuzes leiden tot een grotere afhankelijkheid van brandstoffen of grondstoffen uit het buitenland. Voor duurzame biograndstoffen is een uitzondering gemaakt om tot maximaal 100 PJ meer te kunnen importeren dan in het KM-scenario.
- 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 al een sterke interconnectiviteit is opgenomen, is deze in het CM-scenario niet verder verhoogd.
- Leveringszekerheid.** De leveringszekerheid mag als gevolg van circulaire keuzes niet dalen ten opzichte van het KM-scenario: een maximale stroomuitval van 102 uur per jaar, op basis van de modellering in het Energietransitiemodel. Let op: het ETM geeft hiervoor niet het beste beeld. Netbeheerders gebruiken hiervoor eigen modellering.
- Kernenergie.** Omdat in het KM-scenario al 7 GW kernenergie is opgenomen (momenteel in Nederland: 0,5 GW), is in het CM-scenario geen extra kernenergie toegevoegd. Het KM-scenario zit aan de bovenkant van de bandbreedte van de Netbeheer Nederland-scenario's.
- Export.** In het KM-scenario zit veel export, onder andere van waterstof (461 PJ / 128 TWh) en ammoniak (62 PJ / 17 TWh). Deze zijn constant in alle scenario's.

Focus op Critical and Strategic Raw Materials (CSRM)

De focus van dit onderzoek ligt op kritieke en strategische materialen, op basis van de Europese lijst van *Critical and Strategic Raw Materials* (CSRM, zie figuur 3). Kritieke en strategische grondstoffen zijn grondstoffen met zowel een groot economisch belang als verhoogde risico's rondom productie en levering.¹⁶ De lijst van de Europese Commissie wordt periodiek geactualiseerd: voor dit onderzoek is de versie van 2023 als vertrekpunt gebruikt.

In aanvulling op de CSRM-lijst is zilver opgenomen in deze analyse, omdat dit materiaal als problematisch wordt gezien door de markt. Dit wordt geïllustreerd door de extreme prijschommelingen van begin 2026.

Andere materialen die niet op de CSRM-lijst staan, zijn geen onderdeel van dit onderzoek, maar kunnen nog steeds van belang zijn voor de energietransitie. Denk bijvoorbeeld aan staal of beton. Voor staal geldt dat verschillende CSRMs als legeringselementen worden gebruikt, zoals niobium en vanadium. Legeringselementen voor staal zijn in dit rapport gebaseerd op JRC-data.

Voor de leveringsrisico's van deze materialen wordt uitgegaan van de *risk indicator* van het *Joint Research Centre* van de Europese Commissie.¹⁷ De laatste actualisatie is in 2023 gedaan.

Voor de winning van deze materialen gaat dit onderzoek uit van de huidige productie (2024), op basis van data uit de US Geological Survey (USGS).¹⁸ Een alternatief is om de vraag uit te zetten tegen inschattingen voor toekomstige winning, bijvoorbeeld op basis van de *Global Critical Mineral Outlook* (IEA). Hier is echter niet voor gekozen, omdat deze inschattingen niet voor alle materialen beschikbaar zijn en ook onzekerheden kennen.¹⁹ Tegelijkertijd kan het percentage ten opzichte van de huidige productie tot overschatting van het relatieve aandeel van de Nederlandse vraag leiden, omdat de productie in de tijd kan stijgen (zie Hoofdstuk 6).

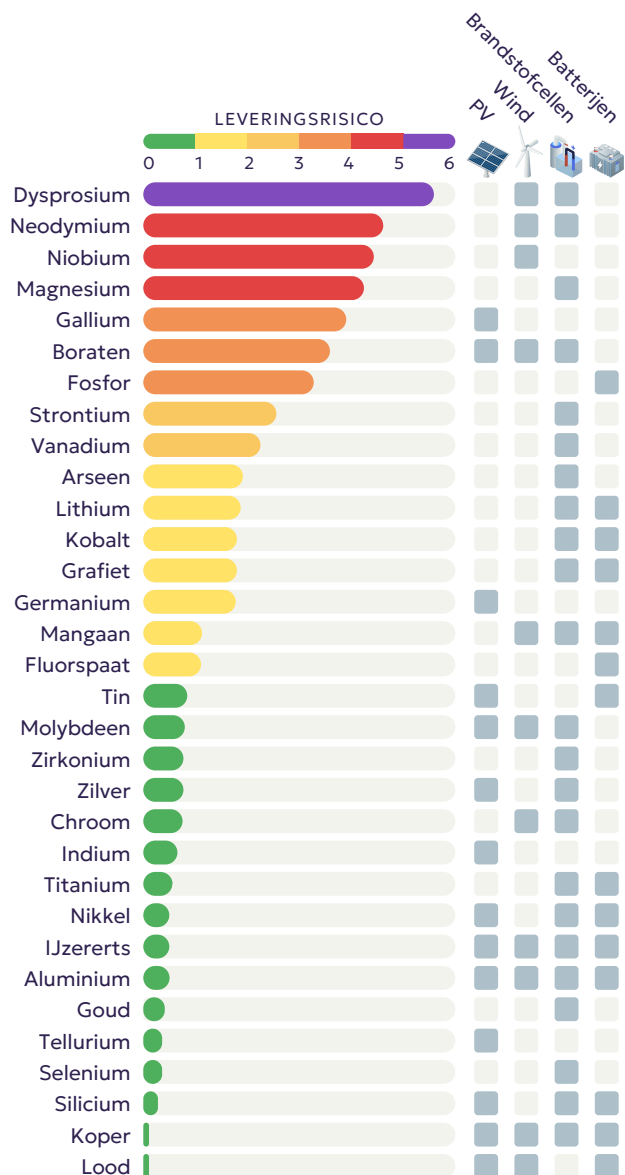
Materiaalvraag inclusief vervangingsvraag

Dit onderzoek kijkt naar de totale (kritieke) materiaalvraag tot en met 2050, inclusief de vervangingen van installaties aan het einde van hun levensduur. Dit leidt tot een grotere materiaalvraag dan wanneer er wordt gekeken naar de *netto toevoeging aan de voorraad*. Wanneer producten zoals zonnepanelen of batterijen moeten worden vervangen, moet immers eerst recycling en nieuwe productie plaatsvinden. Ook voor die verwerkings- en productieketens is er op dit moment nog een (grote)

afhankelijkheid van het buitenland. Vervanging leidt daarmee in feite ook tot nieuwe materiaalvraag.

Materiaalvraag technologieën

Er zijn veel ontwikkelingen in duurzame technologieën. De basis voor de analyse wordt gevormd door Europese referentiegetallen, zoals gepubliceerd door het *Joint Research Centre* van de Europese Commissie.^{20,21,22} Om een betere inschatting te kunnen maken van zowel de huidige materiaalintensiteit als toekomstige ontwikkelingen, is vervolgens een interviewronde gehouden met experts uit wetenschap en bedrijfsleven. Op basis daarvan zijn aanscherpingen in deze materiaalvraag meegenomen. Meer informatie is opgenomen in de methode (Bijlage I).



Figuur 3 | Toeleveringsrisico's van kritieke materialen, inclusief sectoren waar deze in worden gebruikt (bron: Europese Commissie¹⁶)

Opbouw scenario's

Om te komen tot een totaalscenario **Circulaire Middenweg en circulaire Technologieën (CMT)**, worden in dit onderzoek vier deelscenario's uitgewerkt. Twee deelscenario's gaan uit van circulaire keuzes in het ontwerp van het energiesysteem, twee deelscenario's gaan uit van circulaire keuzes in energietechnologieën. Door deze verschillende deelscenario's ontstaat een beeld van de mogelijke bijdragen van de verschillende systeem- en technologiekeuzes. In combinatie met de referentie en de eindscenario's zijn er daarmee in totaal zeven (deel)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

CM: Circulaire Middenweg

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

CM+: Circulaire middenweg +

met sterkere 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

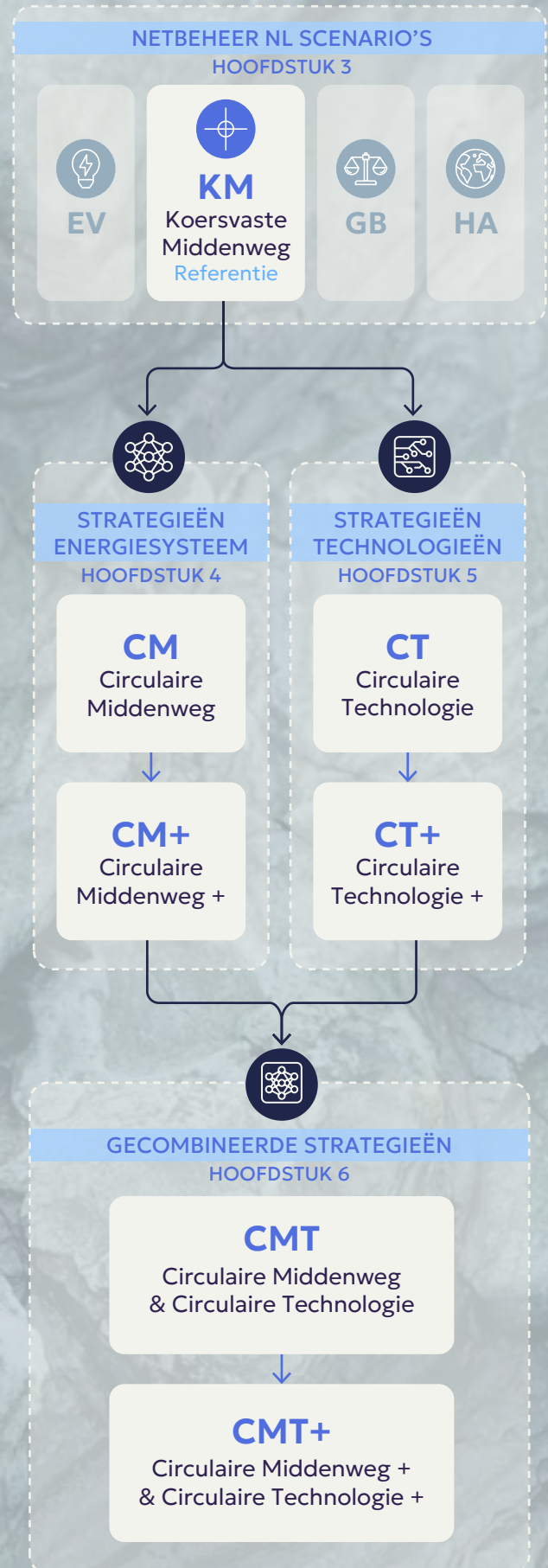
CMT: Circulaire middenweg & technologieën

de combinatie van de systeemkeuzes (CM) en technologische verschuivingen (CT)

CMT+: Circulaire middenweg & technologieën +

de combinatie van de sterkere systeemkeuzes (CM) en sterkere technologische verschuivingen (CT)

OVERZICHT SCENARIO'S



Figuur 4 | Overzicht scenario's

03

Materiaalvraag Netbeheer Nederland- scenario's

Netbeheer Nederland heeft vier scenario's opgesteld voor het Nederlandse energiesysteem in 2050. Centraal staat het *Koersvaste Middenweg*-scenario. In aanvulling daarop zijn drie hoekvlagscenario's ontwikkeld. Dit hoofdstuk laat de materiaalvraag van deze verschillende scenario's zien.

MATERIAALVRAAG NETBEHEER NEDERLAND-SCENARIO'S

Vier scenario's

De vier scenario's van Netbeheer Nederland geven de bandbreedte van mogelijkheden voor een klimaatneutraal Nederlands energiesysteem in 2050. Ieder scenario maakt daarin andere keuzes over de wijze waarop energie wordt opgewekt, opgeslagen en gebruikt. Er zijn vier scenario's.



Eigen Vermogen (EV)

Een hoekvlag met een grotere inzet op elektrificatie en de binnenlandse productie daarvan en lage import van waterstof en biobrandstoffen.



Horizon Aanvoer (HA)

Een hoekvlag met een grotere import van waterstofdragers, zoals ammonia.



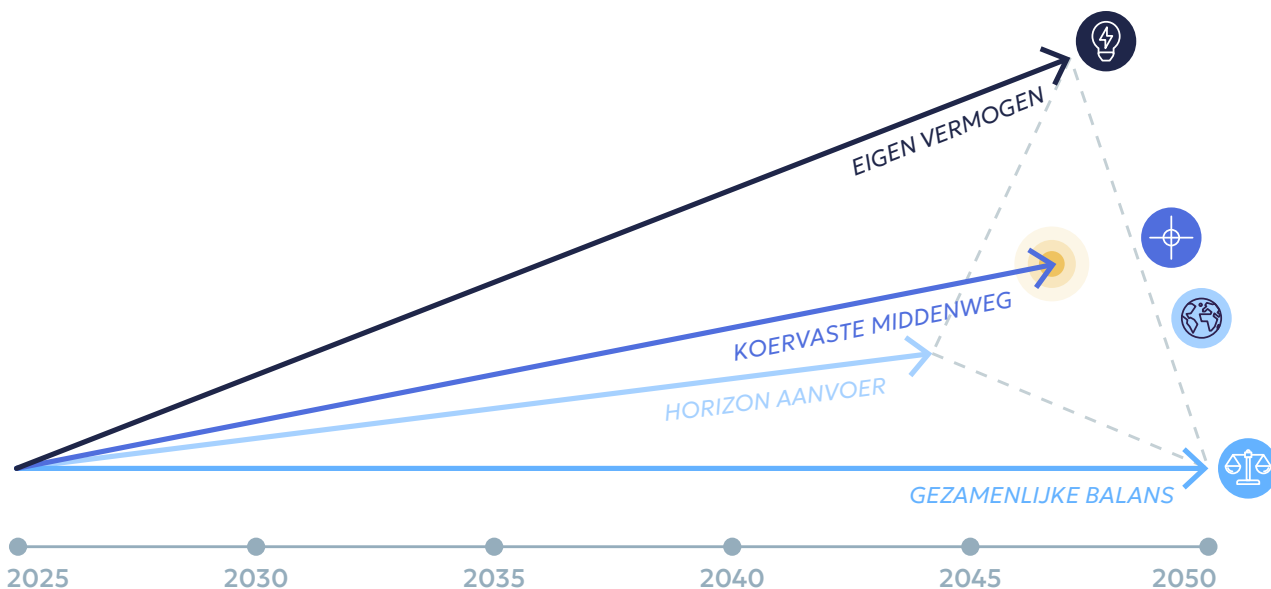
Gezamenlijke Balans (GB)

Een hoekvlag met een grotere import van biobrandstoffen.



Koersvaste Middenweg (KM)

Een 'middenscenario' tussen de drie hoekvlaggen en tevens het scenario dat het dichtste in de buurt komt bij het Nationaal Plan Energiesysteem.



Figuur 5 | Duiding van drie hoekvlagscenario's, inclusief Koersvaste Middenweg (bron: Netbeheer Nederland 2025)

Verschillen Netbeheer Nederland-scenario's

Alle Netbeheer Nederland-scenario's gaan uit van een mix in de vraag van energiedragers. De scenario's verschillen echter sterk in de mate waarin specifieke energiedragers worden toegepast:

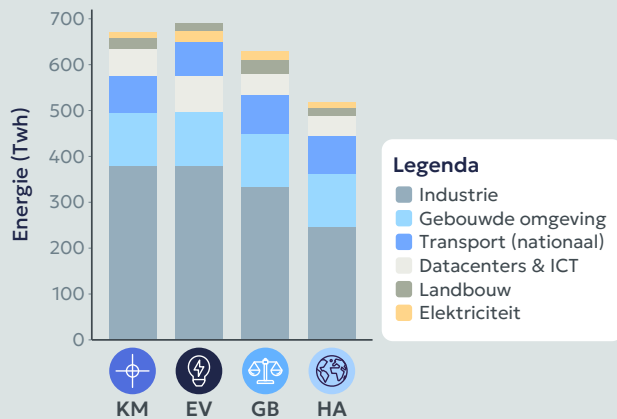
- Gezamenlijke Balans** heeft de hoogste inzet van biomassa voor biobrandstoffen en biomethaan.
- Horizon Aanvoer** heeft de grootste import van waterstof en de laagste energievraag in de industrie, door verschuiving productie naar elders.
- Eigen Vermogen** gaat uit van de grootste elektrificatie in alle sectoren en de hoogste binnenlandse opwek.

Tussen de scenario's zijn een aantal belangrijke verschillen. Enkele daarvan, die invloed hebben op de kritieke materiaalvraag, zijn:

- De inzet van kernenergie, variërend tussen *Koersvaste Middenweg* (7 GW) en *Horizon aanvoer* (0 GW).
- De mate van elektrificatie, variërend van zeer hoog (*Eigen Vermogen*) tot lager (*Gezamenlijke Balans* en *Horizon Aanvoer*) ten opzichte van *Koersvaste Middenweg*.

- De mate van finale energievraag, variërend van hoger (*Eigen Vermogen*) tot lager (*Horizon Aanvoer*).

Dit leidt tot andere systeemkeuzes als gevolg van veranderende vraag- en aanbodpatronen. Dit is een belangrijke reden voor de verschillen in opgestelde vermogens voor zon, wind, batterijen en elektrolyse. De finale energievraag (in TWh) en opgestelde vermogens in 2050 (in GW) zijn in figuur 6 en tabel 2 samengevat.



Figuur 6 | Finale energievraag van de vier Netbeheer Nederland-scenario's (in 2050)

Vermogen per technologie (GW 2050)	KM	EV	GB	HA
Zon	117	174	101	77
Wind	91	105	71	52
Batterijen	130	145	102	91
Elektrolyse	28	34	20	14

Tabel 2 | Opgesteld vermogen (GW) voor ieder Netbeheer Nederland-scenario (in 2050)

Type batterij	KM		EV		GB		HA	
	GW	GWh	GW	GWh	GW	GWh	GW	GWh
Thuisbatterij	8	34	12	50	15	58	4	16
Systeembatterij	27	216	25	200	14	112	16	130
Mobiliteit	76	568	82	602	61	486	61	494
Flowbatterij	6	108	7	126	5.5	99	5	90
OPAC	3	320	6	640	3	256	1	128
Bij opwek	10	*	12	*	5	*	4	*
TOTAAL	130	1.246	145	1.617	102	1.012	91	858

Tabel 3 | Uitsplitsing opslagtechnologieën voor elektriciteit in opgesteld vermogen (GW) en volume (GWh) voor ieder Netbeheer Nederland-scenario (in 2050)

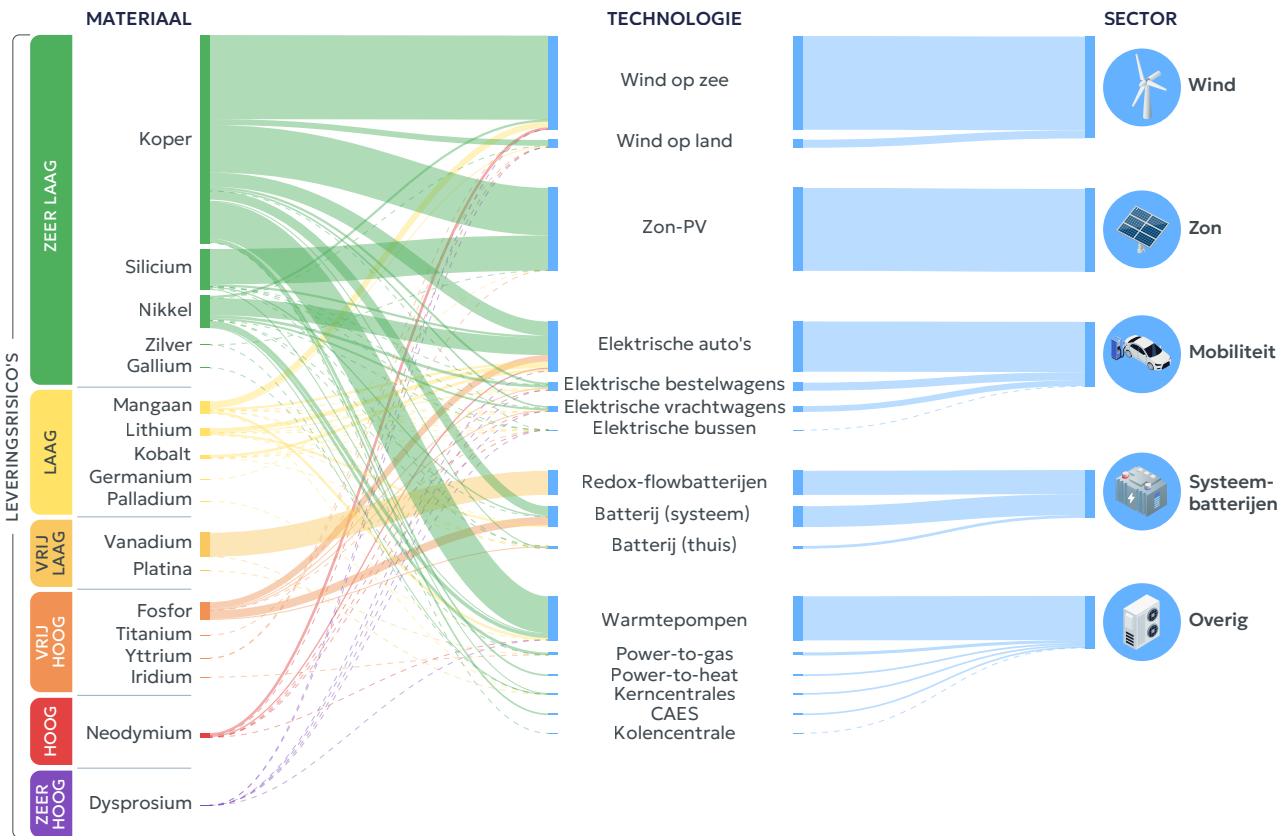
* relatief opslagvolume is afhankelijk van batterijtechnologie, daarom niet opgenomen

Materiaalvraag per technologie

De energietransitie vereist grote hoeveelheden koper, omdat het in elektriciteitsgeleiding wordt gebruikt bij alle energietechnologieën. Na koper verschilt de vraag naar kritieke materialen sterk per technologie. Daardoor ontstaan grote verschillen in kritieke materiaalvraag tussen de verschillende Netbeheer Nederland-scenario's. Zo zijn voor windturbines veel permanente magneten nodig met een grote vraag naar onder meer neodymium. Batterijen vragen – afhankelijk van de batterijtechnologie – onder meer

veel lithium, nikkel, vanadium en fosfor. Zonnepanelen hebben een relatief grote vraag naar silicium en zilver.

Op basis van leveringsrisico's is echter zichtbaar dat kritieke materialen voor windturbines (neodymium, dysprosium), elektrolyzers (iridium) en redox-flow batterijen (vanadium) de grootste risico's kennen. Van deze materialen is in absolute zin weinig nodig, maar deze zijn essentieel voor het goed en efficiënt functioneren van deze technologieën.



Figuur 7 | Totale kritieke materiaalvraag van de Nederlandse energietransitie tot en met 2050 in het Koersvaste Middenwegscenario, met leveringsrisico per materiaal

Materiaalvraag infrastructuur

Ook voor de elektriciteitsinfrastructuur – kabels en transformatorstations – zijn kritieke materialen nodig, vooral koper. In beschikbare informatie is echter geen goede doorrekening van de benodigde capaciteit aan kabels opgenomen, zoals ook toegelicht in Hoofdstuk 2. De materiaalvraag voor de infrastructuur is daarom niet meegenomen.

Materiaalvraag: verschillen tussen scenario's

In alle scenario's is een sterke groei nodig van de hoeveelheid kritieke metalen voor het energiesysteem. Dit is het gevolg van de benodigde capaciteit van zonnepanelen, windturbines, batterijen en waterstof. De mate waarin kritieke materialen nodig zijn, verschilt echter sterk per scenario.

De kritieke materiaalvraag van de verschillende scenario's is samengevat in Figuur 8. Daarin is zowel de absolute vraag (8a) als de jaarlijkse vraag ten opzichte van de wereldwijde productie (8b) weergegeven. De belangrijkste kenmerken per scenario:

Koersvaste Middenweg (KM)

Het scenario *Koersvaste Middenweg* (KM) laat een sterke groei zien in de benodigde kritieke materiaalvraag ten opzichte van het huidige energiesysteem. Dit komt door de sterke inzet op elektrificatie in combinatie met een daling van de totale energievraag (22%).

Eigen Vermogen (EV)

Het scenario *Eigen Vermogen* (EV) heeft de hoogste kritieke materiaalvraag. Ten opzichte van het KM-scenario is de geïnstalleerde capaciteit van alle duurzame technologieën hoger: zowel zonnepanelen, windturbines, batterijen als elektrolyzers.

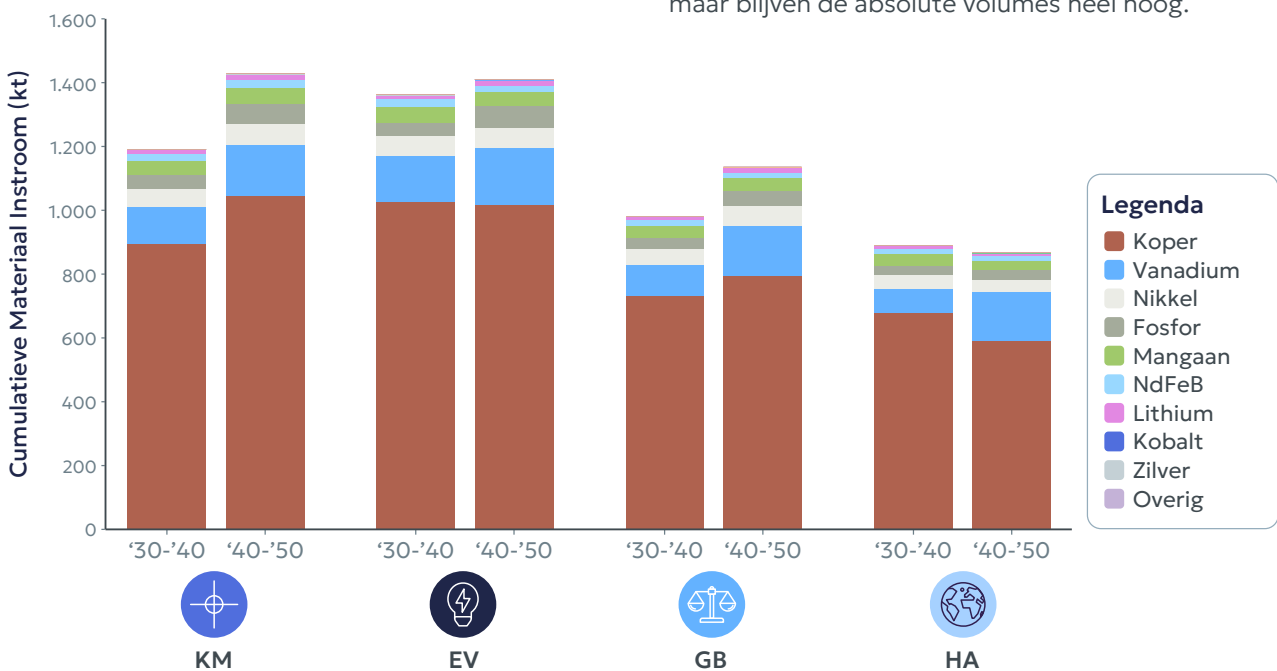
Gezamenlijke Balans (GB)

Het scenario *Gezamenlijke Balans* (GB) heeft een lagere mate van geïnstalleerde duurzame energietechnologieën, vanwege de grotere inzet van biomassa. In plaats van kritieke materialen is hier dus meer (duurzaam geproduceerde) biomassa nodig als grondstof voor het energiesysteem.

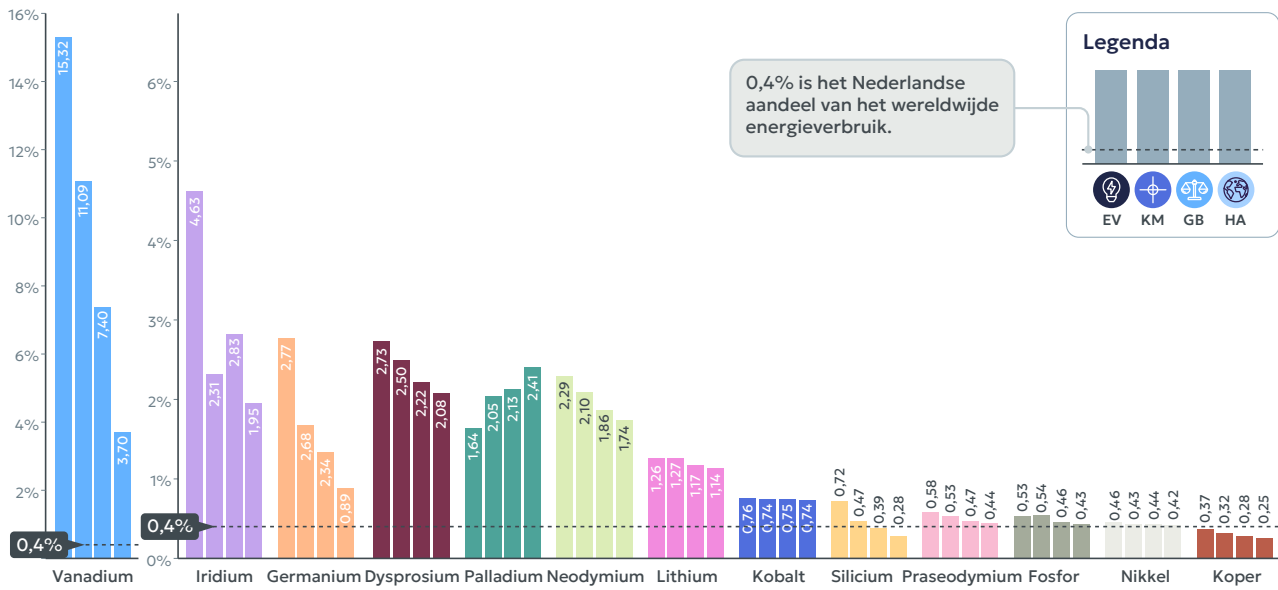
Horizon Aanvoer (HA)

Het scenario *Horizon Aanvoer* (HA) heeft de laagste kritieke materiaalvraag binnen het Nederlandse energiesysteem, omdat er meer waterstofdragers worden geïmporteerd uit het buitenland. Er moet extra opwek- en elektrolysecapaciteit in het buitenland worden geïnstalleerd, waarmee de vraag naar kritieke materialen verschuift naar buiten Nederland.

In relatieve zin zijn er in alle vier de scenario's elf materialen met een relatief 'hoge' vraag. 'Hoog' betekent een vraag die in 2035 hoger is dan het Nederlands aandeel van het wereldwijde finale energieverbruik (0,4%)²³, uitgezet tegen de huidige wereldwijde mijnbouwproductie van deze materialen (2024). Omdat een deel van deze materialen ook nodig is voor andere toepassingen, zoals zeldzame aardmetalen in consumentenelektronica, industriële machines of militaire producten, kan een dergelijk 'hoog' aandeel leiden tot leveringsrisico's. Voor koper is het relatieve aandeel lager dan deze richtwaarde, maar blijven de absolute volumes heel hoog.



Figuur 8 | Totale, periodieke materiaalvraag van het Nederlandse energiesysteem voor de vier energiesysteemscenario's, voor de periode 2030-2040 en 2040-2050 (exclusief elektrisch vervoer)



Figuur 9 | Jaarlijkse kritieke materiaalvraag voor de vier energiesysteemscenario's in 2035 (referentiejaar), als aandeel van wereldwijde jaarproductie (2024)

04

Circulaire strategieën op systeemniveau

Dit hoofdstuk analyseert de maatregelen die op systeemniveau genomen kunnen worden om de kritieke materiaalvraag te verlagen. Deze bijdrage is bepaald voor vier strategieën, met in totaal zes maatregelen. Dat leidt tot een 'Circulaire Middenweg' en 'Circulaire Middenweg +' scenario.



CIRCULAIRE STRATEGIEËN OP SYSTEEMNIVEAU

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.

Wanneer de vraag naar kritieke metalen sterker wordt meegenomen in afwegingen rondom de inrichting van het energiesysteem, ontstaan mogelijk andere keuzes. Het doel van die keuzes is om de ketenrisico's van kritieke materiaalvraag van het energiesysteem te verlagen – en daarmee dus om de opgestelde vermogens voor zon, wind, batterijen en elektrolyse te verlagen.

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.

Vier strategieën

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



STRATEGIE A. Verdere energiebesparing

- 1 Verbeteren gebouwisolatie
- 2 Verschuiving in vervoersmiddelen, met een *modal shift* in personenvervoer



STRATEGIE B. Verhogen *demand side response*

- 3 Verlengen periode 'vraaguitstel' van industrie
- 4 Verhogen aandeel bi-directioneel laden in mobiliteit



STRATEGIE C. Meer inzet op warmte

- 5 Verder uitbreiden warmtenet



STRATEGIE D. Meer inzet op biograndstoffen

- 6 Vervangen waterstof in lucht- en scheepvaart met biobrandstoffen



STRATEGIE A. Verdere energiebesparing



De eerste strategie is *verdere energiebesparing* ten opzichte van het KM-scenario door meer energie-efficiënte invulling van behoeften. Als gevolg van energiebesparing is ook minder capaciteit nodig voor duurzame opwek en opslag. In het KM-scenario zitten echter al forse besparingen, met 9-44% per sector. Een maatregel moet dus verder gaan dan de bestaande besparingen. Binnen deze strategie zijn de volgende maatregelen doorgerekend:

- 1 Verbeteren gebouwisolatie
- 2 Verschuiving in vervoersmiddelen, met *modal shift* in personenvervoer

1 Verbeteren gebouwisolatie

Voor **gebouwisolatie** is uitgegaan van verdere energiebesparing voor alle gebouwen (woningen, kantoren, maatschappelijke functies), ten opzichte van de op dit moment gemodelleerde besparing in het KM-scenario (11%).

2 Verschuiving in vervoersmiddelen, met *modal shift* in personenvervoer

Voor een ***modal shift* in mobiliteit** is uitgegaan van een verschuiving van autokilometers naar fietsen, bussen, treinen en trams. In tabel 4 is het aandeel voertuigkilometers van de totale aantal personenmobiliteitskilometers weergegeven. De verschuiving is een eigen indicatie, met als doel om het effect hiervan te kunnen bepalen. Er is geen verschuiving in goederenvervoer meegenomen, omdat hiervoor aanvullende infrastructuur (vaarwegen, rails) op orde moeten zijn.

Buiten scope

Voor de **industrie** zijn in deze strategie geen aanvullende besparingsmaatregelen opgesteld. In het KM-scenario zijn al maatregelen verwerkt op basis van *best-available-technologies*. Daarmee gaat dit maatregelenpakket uit van optimalisatie van de huidige industrie, in lijn met het KM-scenario van Netbeheer Nederland.





Maatregel	Referentie (2019)	KM-scenario (2050)	CM-scenario (2050)	CM+ -scenario (2050)
1 Verbeteren gebouwisolatie				
Energiebesparing gebouwde omgeving	-	11%	+ 10%	+ 20%
Energievraag	178 kWh/m ²	158 kWh/m ²	142 kWh/m ²	126 kWh/m ²
2 <i>Modal shift</i> in personenvervoer				
Mate van verschuiving	-	Zeer geringe verschuiving	10% groei van fietsen, bussen, treinen & trams	25% groei van fietsen, bussen, treinen & trams
Personenkilometers: aandeel auto's	74,09%	73,50%	70,85%	66,88%

Tabel 4 | Kenmerken van maatregelen | Strategie *Verdere energiebesparing*

Capaciteitsbesparing

De strategie 'Verdere energiebesparing' heeft vooral invloed op de benodigde batterijcapaciteit: een besparing van 9% (CM) tot 21% (CM+). Dit komt doordat een grotere energiebesparing met deze maatregelen (gebouwisolatie en vervoersmiddelen) voornamelijk leidt tot een lagere energie(piek)vraag in de winterperiode, waar deze energie voor een deel afkomstig is uit energie-opslag in batterijen.

Deze strategie heeft beperkte invloed op de opgestelde vermogens van zon en wind en de benodigde capaciteit voor elektrolyse. Dit komt voornamelijk door de hoge energiebesparing in het KM-scenario ten opzichte van de huidige situatie (zie Hoofdstuk 2): de gebouwde omgeving en landbouw besparen in het KM-scenario circa 30% ten opzichte van de huidige situatie, transport meer dan 40%. Aanvullende besparing heeft hierdoor beperkt effect op de energievraag.

Technologie	Koersvaste Middenweg (KM)	Circulaire Middenweg (CM)	Circulaire Middenweg (CM+)
 Zon	117 GW	116 GW (-1%)	116 GW (-1%)
 Wind	91 GW	90 GW (-1%)	89 GW (-2%)
 Batterijen (excl. onbenutte voertuigen)	58 GW	53 GW (-9%)	46 GW (-21%)
 Elektrolyse	28 GW	28 GW	28 GW

Tabel 5 | Capaciteitsbesparing van duurzame technologieën | Strategie *Verdere energiebesparing*

Maatschappelijke gevolgen

- **Gedrag.** Voor een verschuiving in het gebruik van vervoersmiddelen is ander gedrag nodig. Dit wordt eenvoudiger door een verbetering van het openbaar vervoer, zowel in kwaliteit als in beschikbaarheid in landelijke gebieden. Hier is wel beleidsmatige aandacht voor nodig.
- **Betaalbaarheid.** Verdere energiebesparing in de maatschappij kan een positief effect hebben op de betaalbaarheid van energie. Er is immers minder energie nodig, waardoor eindgebruikers minder kosten hebben. Tegelijkertijd vraagt dit wel om extra investeringen in onder andere gebouwisolatie. Wel is er een afnemend effect van de investering: de eerste investeringen realiseren de meeste energiebesparing tegen relatief lage kosten, bij verdere isolatie neemt deze verhouding af.



STRATEGIE B. Verhogen demand side response



Een tweede strategie is het verhogen van de *demand side response* (DSR) – het aanpassen van de energievraag aan het beschikbare aanbod. Dit is vooral relevant in periodes met een laag aanbod aan duurzame energie, zoals ‘donkerluwtes’: momenten dat het donker en windstil is. In deze strategie zijn de volgende maatregelen doorgerekend:

- 3 Verlengen periode ‘vraaguitstel’ van industrie
- 4 Verhogen aandeel bi-directioneel laden in mobiliteit

3 Verlengen periode ‘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 (CM) en 72 uur (CM+). Een mogelijke oplossingsroute voor dit vraaguitstel zijn ‘warmtebatterijen’ bij bedrijven zelf. Er zijn veel kansrijke ontwikkelingen op dit gebied²⁵, die echter nog niet goed zijn opgenomen in de modellering van het energiesysteem.

4 Verhogen aandeel bi-directioneel laden in mobiliteit

Voor het verhogen van het aandeel **bi-directioneel 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 huidige KM-scenario gaat uit van een bi-directionele laadcapaciteit van 4 GW: 14% van het totale batterijvermogen van personenauto’s (32 GW). De batterijen in bestelbussen, vrachtwagens en bussen worden niet ingezet. In totaal wordt in het KM-scenario daarmee 6% van de capaciteit van het totale wagenpark benut. Beide maatregelen verlagen het netto energieverbruik echter niet. Deze maatregelen helpen vooral om de energievraag tijdelijk te beperken.

Buiten scope

*In deze strategie is het **beperken van de energievraag** – bijvoorbeeld door het tijdelijk afschakelen van industriële capaciteit of datacenters – niet meegenomen in de modellering. Dit kan mogelijk leiden tot verlaging van de benodigde opwekcapaciteit.*

Maatregel	Referentie (2019)	KM-scenario (2050)	CM-scenario (2050)	CM+ -scenario (2050)
3 Verlengen periode vraaguitstel				
Vraaguitstel industriële sectoren	-	+ 24 uur	+ 48 uur	+ 72 uur
4 Aandeel bi-directioneel laden				
% auto’s	0%	14%	21%	28%
% bus, bestelbus, vrachtwagen	0%	0%	0%	10%

Tabel 6 | Kenmerken van maatregelen | Strategie Demand Side Response

Capaciteitsbesparing





De strategie 'Verlengen periode vraaguitstel' leidt tot enige capaciteitsbesparing in de benodigde systeembatterijen: 8% in het CM-scenario en 13% in het CM+ -scenario. Een hogere besparing in batterijcapaciteit zonder een hogere stroomuitval (binnen het ETM) zou mogelijk zijn. Dit leidt echter tot verlies van elektrische opwek uit zon en wind (*curtailment*), die niet kan worden opgeslagen. Daardoor ontstaat een hogere vraag naar waterstof, die niet mogelijk is vanuit de randvoorwaarden (Hoofdstuk 2).

Deze strategie leidt niet tot een verlaging van de opwekcapaciteit, omdat het netto energieverbruik niet verandert. Er vindt uitsluitend uitstel van de vraag plaats: de industrie gebruikt tijdelijk minder energie, maar gebruikt na de periode van vraaguitstel weer meer energie.

Bij deze capaciteitsbesparing van batterijen zijn enkele kanttekeningen te maken. Allereerst is de

onderbouwing van de benodigde batterijcapaciteit in het KM-scenario beperkt: dit zijn de beste inschattingen op het moment van publicatie. Ook heeft het ETM een beperkte modellering van leveringszekerheid en stroomuitval. Daarnaast heeft de industrie al enorme uitdagingen bij +24 uur vraaguitstel. Ook moet vraaguitstel niet worden gecompenseerd door batterijen achter de meter, omdat de materiaalbesparing dan teniet wordt gedaan.

Het versterken van de inzet op bi-directioneel laden leidt tot directe verlaging van de benodigde batterijcapaciteit. Vaker laden en ontladen betekent echter ook dat batterijen meer laadcycli doorlopen. Dit kan de levensduur van batterijen beïnvloeden. Technische ontwikkelingen in batterijtechnologie kunnen dit effect weer corrigeren. De mate waarin deze effecten doorwerken, is met dit onderzoek niet inzichtelijk te maken.

Technologie	Koersvaste Middenweg (KM)	Circulaire Middenweg (CM)	Circulaire Middenweg (CM+)
 Zon	117 GW	117 GW	117 GW
 Wind	91 GW	91 GW	91 GW
 Batterijen (excl. onbenutte voertuigen)	58 GW	53 GW (-8%)	51 GW (-13%)
 Elektrolyse	28 GW	28 GW	28 GW

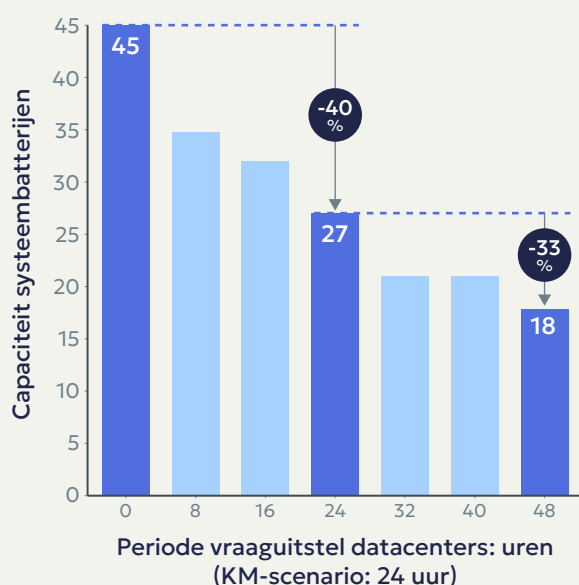
Tabel 7 | Capaciteitsbesparing van duurzame technologieën | Strategie *Demand Side Response*

Datacenters: bijdrage aan capaciteitsreductie systeembatterijen

Er is een sterke samenhang tussen vraagverschuiving in datacenters en de benodigde capaciteit aan systeembatterijen. In het huidige KM-scenario is 27 GW systeembatterijen opgenomen, met maximaal 24 uur aan vraagverschuiving. Het aanpassen van de duur van dit (relatief kleine) vraaguitstel heeft een groot effect op de benodigde capaciteit aan systeembatterijen: met uitstel tot 48 uur kan 1/3 van de systeembatterijcapaciteit worden bespaard.

Dit effect kan voor het *Circulaire Middenweg*-scenario echter niet volledig worden benut, omdat bij het verder verlagen van de batterijcapaciteit de import van waterstof toeneemt. Dit komt doordat een verder afnemende batterijcapaciteit leidt tot een grotere benodigde inzet van waterstof op andere momenten in het jaar.

Figuur 11 | Mogelijke afname in batterijcapaciteit door vraaguitstel datacenters



Maatschappelijke gevolgen

- **Industrie.** De belangrijkste consequentie is de noodzaak om industriële processen uit te kunnen stellen bij periodes van weinig elektriciteitsproductie. Voor veel productieprocessen is dit technisch uitdagend. Daarnaast heeft deze beperking van de productiecapaciteit financiële gevolgen voor de industrie.
- **Menselijk gedrag.** Voor een sterkere *demand side response* is vanuit menselijk gedrag meer acceptatie nodig. Denk bijvoorbeeld aan meer ruimte voor laadpalen (mobiliteit) en lagere snelheid van internet- en AI-toepassingen (door vraaguitstel bij datacenters).
- **Betaalbaarheid.** Meer flexibiliteit in de energievraag kan zowel een positief als negatief effect hebben op de betaalbaarheid. Enerzijds is er minder capaciteit nodig voor opslag, wat leidt tot lagere systeemkosten. Anderzijds leidt dit tot hogere kosten voor industriële partijen met een grote basisvraag naar energie.



STRATEGIE C. Meer inzet op warmte



Een derde strategie is het meer inzetten op warmte ten opzichte van het KM-scenario. Deze sterkere inzet op lage-temperatuurwarmte kan zowel de vraag naar elektriciteit als het benodigde batterijvermogen voor de winter(piek)vraag beperken.

5 Verder uitbreiden warmtenet

Voor de aansluiting op het warmtenet is het aandeel gebouwen en huishoudens op het warmtenet verder verhoogd. Dit is gedaan voor zowel woningen als utiliteitsgebouwen. Het CM+ scenario heeft nu hetzelfde aandeel warmtenet-aansluitingen als het *Eigen Vermogen* (EV-) scenario van Netbeheer Nederland.

Een kanttekening bij deze maatregel is dat ook warmte geproduceerd moet worden. Enerzijds zijn daar natuurlijke warmtebronnen voor, zoals geothermie en aquathermie. Wanneer die niet voldoen of niet op locatie beschikbaar zijn, zijn er industriële alternatieven, zoals restwarmte uit de industrie of afvalverbrandingsinstallaties.

Buiten scope

Alternatieve warmtevoorzieningen, zoals meer inzet op warmtebatterijen in de industrie of collectieve warmtevoorzieningen op wijk- of buurniveau, zijn niet meegenomen. Deze zijn in het ETM nog niet goed te modelleren.

Maatregel	Referentie (2019)	KM-scenario (2050)	CM-scenario (2050)	CM+ -scenario (2050)
5 Verder uitbreiden warmtenet				
Huishoudens	-	20%	23%	27%
Utiliteitsgebouwen	-	20%	25%	30%

Tabel 8 | Kenmerken van maatregel | Strategie *Meer inzet op warmte*





Capaciteitsbesparing

Meer warmtenetten leiden tot een lagere vraag naar warmtepompen ten opzichte van het KM-scenario. 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. Ook draagt dit bij aan het beperken van netcongestie op deze momenten. Wel zijn hiervoor extra warmteleidingen en lokale warmte-opslag nodig.

De strategie 'Meer inzet op warmte' leidt daarmee tot een afname in de hoeveelheid benodigde systeembatterijen: 14% in het CM-scenario en 20% in het CM+ -scenario. Ook is er een lichte afname

in de benodigde opwekcapaciteit voor wind, die belangrijk is voor een stabiele energie-opwekking in deze periode van het jaar. De vraag naar zonnepanelen en elektrolyse verandert niet.

Het verhogen van de warmtenetvraag heeft in dit geval geleid tot een licht hogere vraag naar biomassa (door een gas-back-up). Als alternatieven voor deze hogere vraag naar biomassa kunnen *power-to-heat*, restwarmte, aquathermie, geothermie of zonthermie een rol spelen. Net als bij Strategie B kan de capaciteit van systeembatterijen niet te ver worden verlaagd, omdat dan meer waterstofimport nodig is. In plaats van waterstof zijn andere oplossingen mogelijk, maar die raken dan weer andere uitgangspunten – zoals meer import van fossiele koolstoffen of groen gas.

Technologie	Koersvaste Middenweg (KM)	Circulaire Middenweg (CM)	Circulaire Middenweg (CM+)
 Zon	117 GW	117 GW	117 GW
 Wind	91 GW	91 GW	88 GW (-2%)
 Batterijen (excl. onbenutte voertuigen)	58 GW	51 GW (-12%)	49 GW (-16%)
 Elektrolyse	28 GW	28 GW	28 GW

Tabel 9 | Capaciteitsbesparing met maatregelpakket | Strategie *Meer inzet op warmte*

Maatschappelijke gevolgen

- **Infrastructuur.** Meer inzet op warmte verlaagt netcongestie: een belangrijk voordeel. Wel vraagt meer inzet op warmte een verdere uitbreiding van warmtenetten. Ook is er meer warmteproductie nodig.
- **Menselijk gedrag.** Een warmtenet is een collectieve infrastructuur, die een grote en relatief stabiele afname nodig heeft om rendabel te kunnen functioneren. Draagvlak en acceptatie voor een groter aandeel warmtenetten is een voorwaarde om verdere uitbreiding te kunnen realiseren.
- **Betaalbaarheid.** De kosten (en daarmee prijzen) van warmtenetten hangen sterker af van lokale factoren dan van nationale keuzes en tarieven. Een verdere uitbreiding van het warmtenet leidt naar verwachting tot relatief duurdere warmtenetten, omdat deze ook op locaties worden aangelegd waar elektrificatie op dit moment de voorkeur heeft.
- **Maatschappelijke kosten.** Omdat een verdere inzet op warmtenetten netcongestie beperkt, kan dit mogelijk leiden tot lagere maatschappelijke kosten als gevolg van netcongestie. Dit moet verder worden onderzocht.



STRATEGIE D. Meer inzet op biograndstoffen



Een vierde strategie is meer inzet op duurzame biograndstoffen (NPE: ‘duurzame koolstofdragers’) ten opzichte van het KM-scenario. Daarmee wordt een deel van de vraag naar elektriciteit en waterstof vervangen door duurzame biobrandstoffen. Daarbij is een maximum gesteld van 100 PJ extra import van duurzame biograndstoffen ten opzichte van het KM-scenario.

6 Vervangen waterstof in lucht- en scheepvaart met biobrandstoffen

Er zijn verschillende toepassingen waar meer biograndstoffen kunnen worden ingezet in een klimaatneutraal energiesysteem. Vanuit het kabinetsbeleid gebaseerd op het duurzaamheidskader biograndstoffen wordt laagwaardige toepassing – zoals verbranding voor warmte of elektriciteit – afgebouwd.²⁶ Voor andere toepassingen, waar nog geen goede duurzame alternatieven beschikbaar zijn, is op middellange termijn nog wel inzet van biograndstoffen voorzien. Denk bijvoorbeeld aan brandstoffen voor lucht- en scheepvaart.

Inzet Duurzaamheidskader Biograndstoffen

De maatregelen hebben een verkennend karakter. Vanuit het Duurzaamheidskader biograndstoffen is de inzet juist gericht op het vervangen van biograndstoffen met waterstof, om zo de behoefte aan biograndstoffen voor het energiesysteem te beperken. Het doel van deze verkennende maatregel is om inzicht te creëren in het effect op de kritieke materiaalvraag van meer of minder inzet van biograndstoffen.

In dit onderzoek is gekozen voor vervanging van waterstof met biograndstoffen in de lucht- en scheepvaart, ten opzichte van het KM-scenario. Dit is een ‘overbruggingstoepassing’ vanuit het *Duurzaamheidskader Biograndstoffen*. In het KM-scenario gebruikt de luchtvaart voor 20% waterstof als brandstof (ca. 33 PJ): deze wordt vervangen door biokerosine. In de scheepvaart wordt 10% waterstof gebruikt (ca. 23 PJ): deze wordt vervangen door bio-LNG. In totaal gaat het om een verschuiving van circa 55 PJ naar biograndstoffen. Dit zal in de praktijk meer biograndstoffen vragen, als gevolg van omzettingsverliezen (mede afhankelijk van de productieroute en het type biograndstof).

Maatregel	KM-scenario (2050)	CM-scenario (2050)	CM+ -scenario (2050)
6 Vervangen waterstof in lucht- en scheepvaart met biobrandstoffen			
Luchtvaart	20% waterstof	10% waterstof verhoging biobrandstoffen	0% waterstof verhoging biobrandstoffen
Scheepvaart	10% waterstof	5% waterstof verhoging bio-LNG	0% waterstof verhoging bio-LNG





Tabel 10 | Kenmerken van maatregel | Strategie *Meer inzet op biograndstoffen*

Capaciteitsbesparing

De vervanging van de waterstofvraag in de luchtvaart (20% in 2050) en zeescheepvaart (10% in 2050) met biobrandstoffen leidt tot een reductie van 50 PJ aan waterstofvraag. Dat voorkomt capaciteit om waterstof te produceren en elektriciteit voor waterstofproductie op te wekken. Hierdoor kan een zonvermogen dat gelijk staat aan alle zon-op-veld (21 GW) worden vermeden. Ook kan de elektrolysecapaciteit met bijna 20% dalen.

Dilemma tussen afhankelijkheden

Bij de keuze tussen kritieke grondstoffen voor elektrolyse versus biograndstoffen voor verbranding spelen twee verschillende soorten grondstoffenafhankelijkheid. De kritieke grondstofvraag voor elektrolyse is één keer nodig voor de opbouw van het systeem – en later voor de vervangingsvraag. Biograndstoffen voor verbranding zijn juist continue nodig, wat weer leidt tot nieuwe afhankelijkheden. Deze afhankelijkheden ontstaan doordat er naar verwachting een grotere vraag nodig is dan binnen Nederland reëel geproduceerd kan worden.

Technologie	Koersvaste Middenweg (KM)	Circulaire Middenweg (CM)	Circulaire Middenweg (CM+)
 Zon	117 GW	106 GW (-9%)	96 GW (-18%)
 Wind	91 GW	91 GW	91 GW
 Batterijen (excl. onbenutte voertuigen)	58 GW	58 GW	58 GW
 Elektrolyse	28 GW	26 GW (-7%)	23 GW (-18%)

Tabel 11 | Capaciteitsbesparing met maatregel | Strategie *Meer inzet op biograndstoffen*

Maatschappelijke gevolgen

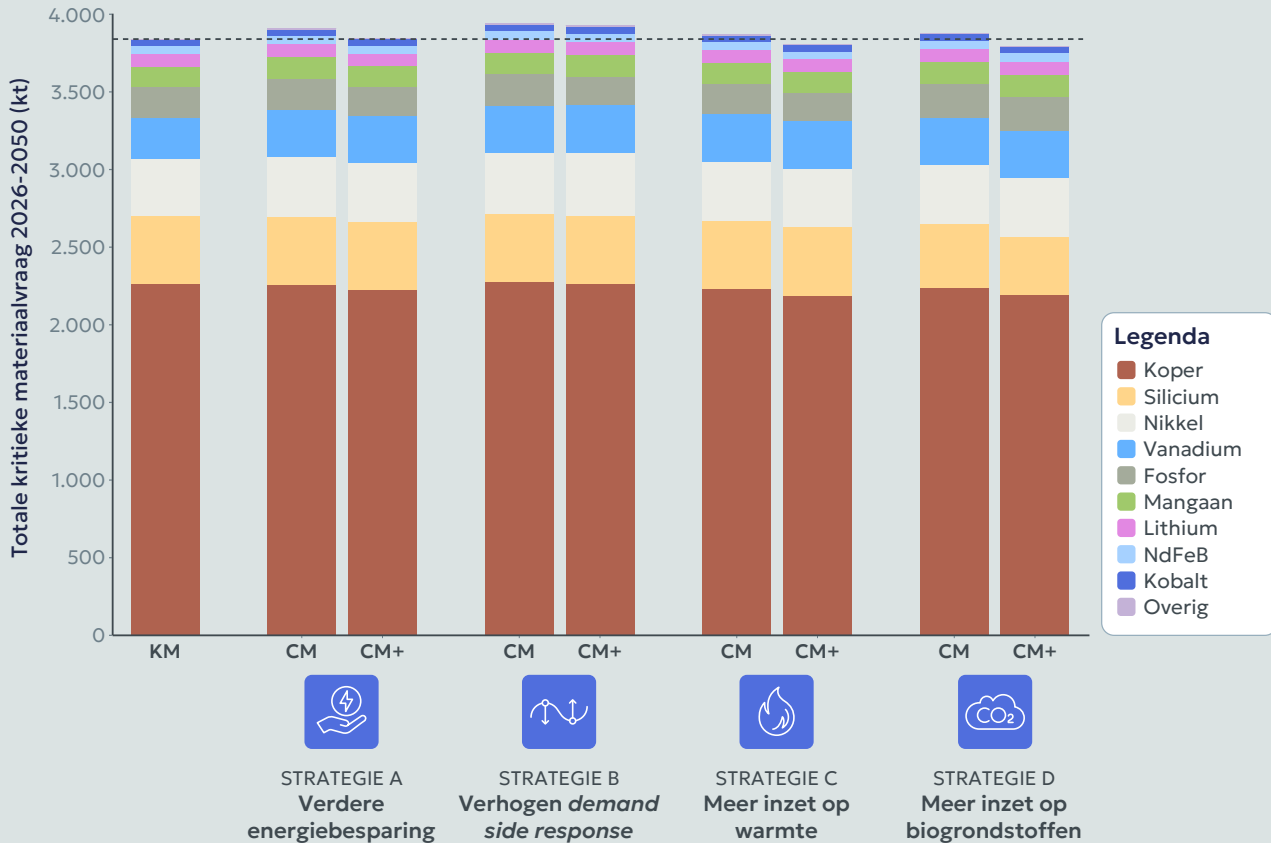
- **Geen gevolgen voor energiegebruik.** De verwachting is dat deze strategie beperkt effect heeft op het energiegebruik: de omgang met energie door burgers en bedrijven hoeft niet te veranderen. Wel kan een beperking van de inzet op waterstof de ontwikkeling van een nationale waterstofinfrastructuur vertragen, waardoor het ook voor andere toepassingen lastiger wordt om waterstof in te zetten.
- **Beschikbaarheid duurzame biograndstoffen.** Een aandachtspunt bij een sterkere inzet op duurzame koolstofdragers is de beschikbaarheid van duurzame biograndstoffen. Wanneer de beschikbaarheid beperkt is, kan dit leiden tot hoge prijzen of een gebrek aan mogelijkheden om biograndstoffen duurzaam te importeren.



Resultaat: individuele systeemstrategieën

De individuele systeemstrategieën hebben per systeemstrategie in deze modellering beperkt effect (Figuur 12). De totale materiaalvoorraad in het energiesysteem schommelt tussen 3,5 en 3,7 miljoen ton, waarvan ruim 60% uit koper bestaat. Opvallend is dat veel systeemniveau scenario's net iets hoger uitkomen dan het *baseline* KM-

scenario. Dit komt doordat systeembatterijen (en vooral vanadium-flowbatterijen) eerder gebouwd worden, waardoor richting 2050 een additionele vervangingsvraag ontstaat vergeleken met KM. Dit kan met levensduurverlengende maatregelen ondervangen worden, zoals besproken in hoofdstuk 5.



Figuur 12 | Materiaalvraag van individuele systeemmaatregelen (per strategie). De materiaalvraag in CM valt iets hoger uit dan in KM omdat er eerder batterijen worden neergezet. Daardoor ontstaat er een extra vervangingsvraag die de totale materiaalvraag tot aan 2050 verhoogd



Resultaat: combinatie systeemstrategieën









De mogelijkheden om de kritieke materiaalvraag van het energiesysteem te verlagen door andere ontwerpkeuzes binnen het energiesysteem zijn relatief beperkt. Dit is voornamelijk het gevolg van de systeemkeuzes die in het *Koersvaste Middenweg*-scenario zijn gemaakt. Deze keuzes, zoals inzet van kernenergie, interconnectiviteit en energiebesparing, leiden al tot een relatief optimale materiaalvraag (zie ook Hoofdstuk 2).

Capaciteitsbesparing

De capaciteitsbesparing van de gecombineerde strategieën ('knoppen') is samengevat in tabel 12. De grootste besparingen zijn mogelijk in batterijcapaciteit (17-21%), gevolgd door zon (9-17%) en elektrolyse (7-18%). Daarbij verschilt het welke strategie tot welke besparing leidt: strategieën A, B en C leiden voornamelijk tot een besparing in batterijcapaciteit, strategie D leidt tot een besparing in opwek- en elektrolysecapaciteit. De reductie in mogelijk te installeren windcapaciteit is met deze strategieën relatief beperkt.

Het vervangen van waterstof door biograndstoffen in de lucht- en zeescheepvaart (Strategie D) heeft een relatief groot effect op de geïnstalleerde capaciteit aan energietechnologieën. Hierdoor kan 21 GW capaciteit aan zonnepanelen en 5 GW aan elektrolysecapaciteit worden bespaard, met gelijkblijvende import van waterstof, elektriciteit en stroomuitval. Wel is hiervoor extra import van biograndstoffen nodig. Daarnaast leidt *verdere energiebesparing* (Strategie A) tot een flinke mogelijke reductie in de batterijcapaciteit, tot 12 GW.

Als gevolg van systeemeffecten is een directe optelsom van de knoppen niet mogelijk. De potentiële winst van alle strategieën samen is daarom lager dan de winst van de optelsom van de individuele strategieën. Dit geldt vooral voor de reducties in batterijcapaciteit.

	 Zon	 Wind	 Batterijen	 Elektrolyse
 STRATEGIE A. Verdere energiebesparing	-1 GW (-1 GW)	-1 GW (-2 GW)	-5 GW (-12 GW)	-
 STRATEGIE B. Verhogen <i>demand side response</i>	-	-	- 5 GW (-7 GW)	-
 STRATEGIE C. Meer inzet op warmte	-	0 (-3 GW)	-7 GW (-9 GW)	-
 STRATEGIE D. Meer inzet op biograndstoffen	-11 GW (-21 GW)	-	-	-2 GW (-5 GW)
Referentie: KM-scenario	117 GW	91 GW	58 GW	28 GW
TOTAAL: Circulaire Middenweg (CM)	106 GW -11 GW -9%	89 GW - 2 GW -2%	48 GW -10 GW -17%	26 GW -2 GW -7%
TOTAAL: Circulaire Middenweg+ (CM+)	96 GW -21 GW -17%	86 GW -5 GW -5%	46 GW -12 GW - 21%	23 GW -5 GW - 18%

Tabel 12 | Effecten van gecombineerde systeemstrategieën

Materiaalbesparing

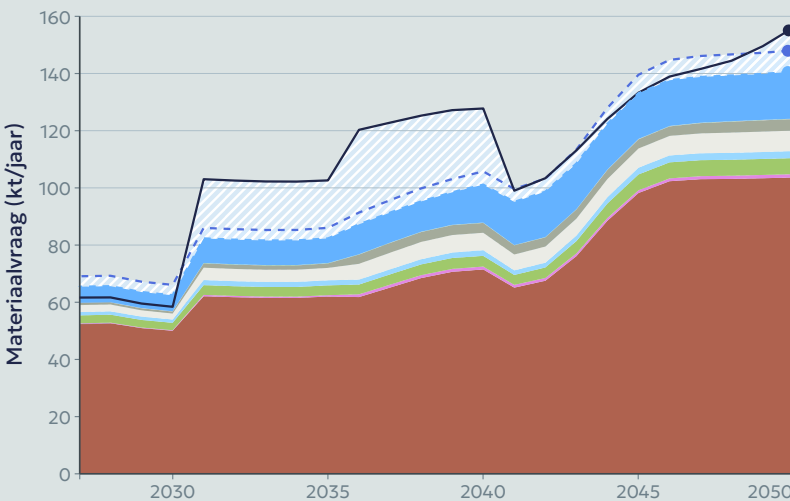
Wanneer de verschillende systeemstrategieën worden gecombineerd, wordt in ons model de totale hoeveelheid kritieke materialen voor het energiesysteem tot en met 2050 met 3% (CM-scenario) tot 8% (CM+ scenario) beperkt. Dit is weergegeven in figuren 13 en 14. De grootste besparingen vinden plaats in koper (wat nodig is voor vrijwel alle technologieën) en in materialen gerelateerd aan batterijen (-21%). Opvallend is dat vooral in de periode 2030-2040 minder materiaal gebruikt wordt dan in de KM *baseline*. Dit komt doordat er in CM minder materiaalintensieve systeembatterijen nodig zijn. De grootste relatieve winst vindt plaats bij vanadium (flowbatterijen), iridium en palladium (elektrolyzers). Omdat de

effecten van de systeemmaatregelen op de totale materiaalvraag van de energietransitie in een specifiek jaar beperkt zijn, zijn de reducties in de kritieke materiaalvraag dat ook.

Met de combinatie van de vier systeemstrategieën – in de CM+ variant – blijft in 2035 van elf metalen de relatieve vraag hoger dan 0,4% - het Nederlandse aandeel van het wereldwijde energieverbruik. 2035 is hier gekozen als referentiejaar in de transitie. Van zeven metalen is het relatieve aandeel dan zelfs hoger dan 1,0%: iridium (elektrolyzers), palladium (warmtepompen), neodymium, dysprosium (windturbines), germanium (zonnepanelen), vanadium en lithium (batterijen).

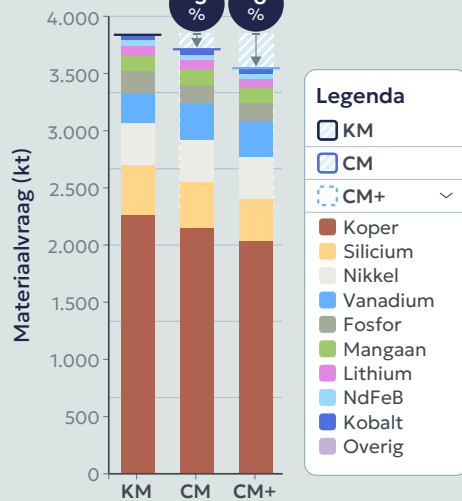
Jaarlijkse kritieke materiaalvraag

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

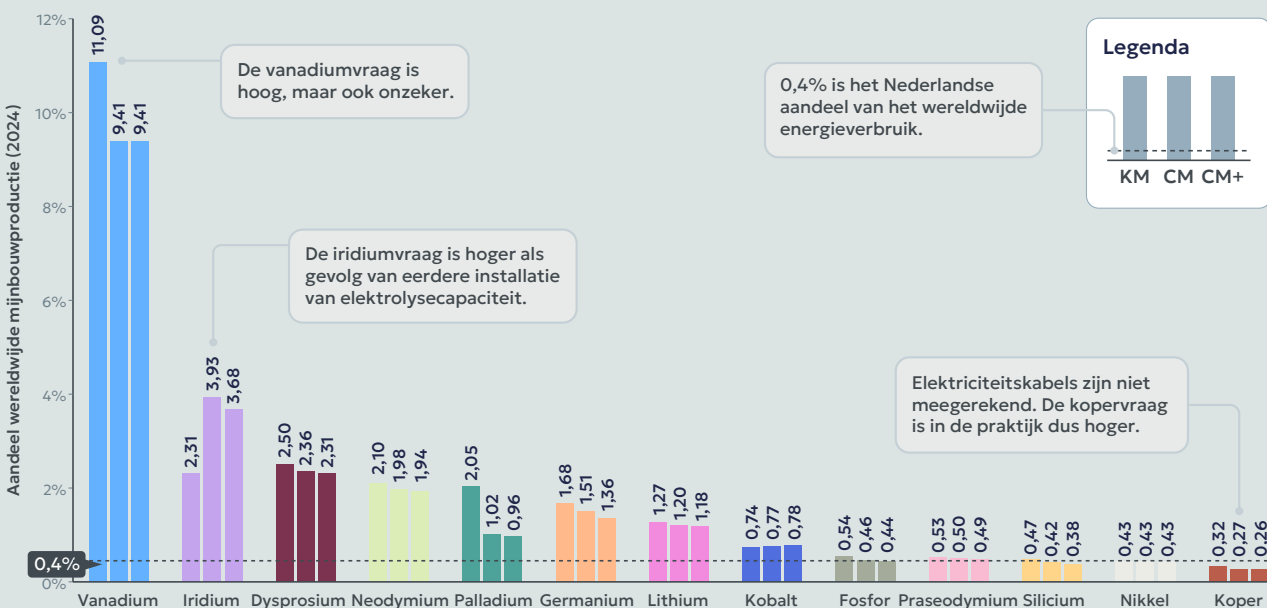


Totale kritieke materiaalvraag

2027 t/m 2050



Figuur 13 | Materiaalvraag van het energiesysteem tussen 2026 en 2050 voor CM+, met ter vergelijking CM en KM



Figuur 14 | Relatieve, jaarlijkse materiaalvraag voor 2035 (referentiejaar), ten opzichte van wereldwijde mijnbouwproductie (2024)

05

Circulaire strategieën op technologieniveau

Dit hoofdstuk analyseert de maatregelen die op technologieniveau genomen kunnen worden om de kritieke materiaalvraag te verlagen door middel van levensduurverlenging, substitutie en toenemende efficiëntie.



CIRCULAIRE STRATEGIEËN OP TECHNOLOGIENIVEAU

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

Substitutie, waarbij componenten met minder kritieke materialen worden gebruikt



STRATEGIE F. Levensduurverlenging

Levensduurverlenging, waarbij de vervangingsvraag wordt uitgesteld of producten worden hergebruikt

Vijf technologieën

De technologische maatregelen die volgen uit deze strategieën worden toegepast op vijf technologieën:



Windturbines, waarin vaak permanente NdFeB-magneten worden toegepast.



Zonnepanelen, waar op dit moment kristallijn-silicium (C-si) de meestgebruikte technologie is.



Systeem- en thuisbatterijen, die voor een relatief korte termijn op vol vermogen energie kunnen leveren, waar op dit moment in de praktijk veel lithium-ijzer-fosfaat (LFP-) batterijen worden toegepast.



Redox-flowbatterijen, die voor een langere periode op vol vermogen energie kunnen leveren, in de *baseline* gemodelleerd met vanadium-flowbatterijen.



Batterijen in elektrische voertuigen, met op dit moment nog een relatief groot aandeel NMC-batterijen.

Circulaire strategieën

Vanuit het perspectief van circulaire economie zijn er verschillende strategieën denkbaar om de materiaalvraag te verminderen.²⁴ Dit hoofdstuk kijkt naar technologische maatregelen om de materiaalvraag te beperken via de strategieën **efficiëntie**, **substitutie** en **levensduurverlenging**.

De strategie recycling is in dit onderzoek niet meegenomen, in tegenstelling tot eerder onderzoek.⁹ Deze keuze is gemaakt omdat recycling niet leidt tot een directe verlaging van de Nederlandse vraag naar kritieke materialen tot en met 2050. De productie van duurzame energietechnologieën vindt immers vrijwel volledig in het buitenland plaats: eventuele grondstoffen uit Nederlandse recycling zullen dus alsnog naar het buitenland moeten om deze toe te kunnen passen in duurzame energietechnologieën. Daarnaast eindigt de levensduur van veel energietechnologieën die op dit moment worden geïnstalleerd pas na 2050.









Windenergie

De grootste kritieke materiaalvraag in windturbines is het gevolg van de toepassing van permanente NdFeB-magneten. In het KM-basis scenario is tussen 2040 en 2050 de jaarlijkse instroom 2.4 kton NdFeB. In 2035 is zo'n 2,1% van de wereldwijde jaarproductie nodig voor de vraag naar Nederlandse windturbines. Daarnaast zijn ook grote hoeveelheden koper nodig. Ongeveer 28% van de berekende materiaalvraag (zonder bulkmaterialen zoals staal en beton) voor windturbines bestaat uit koper, terwijl NdFeB slechts 1% voor rekening neemt.

Voor deze NdFeB-magneten is een overgang naar NdFeB-arme technologieën gemodelleerd. Op basis van interviews en onderzoek van de JRC,²² is gekozen voor een gedeeltelijke overstap naar (bestaande) *geared* turbines, met vanaf 2035 nieuwere windtechnologieën.

In de modellering is aangenomen dat in 2040 voor *offshore* windturbines hoge temperatuur supergeleidende generatoren op commerciële schaal beschikbaar zijn, waardoor er geen NdFeB magneten meer nodig zijn. Dit vraagt echter om serieuze R&D-investeringen, die op dit moment nog niet gedaan worden.

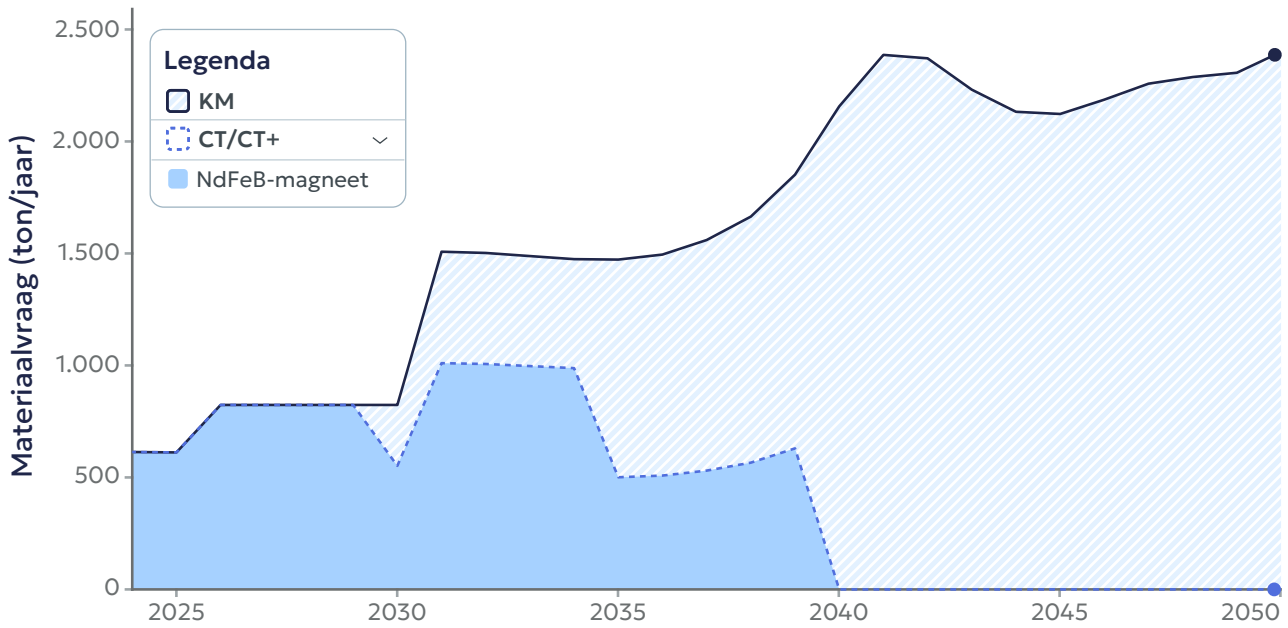
In het CT+ scenario is gekozen om voor onshore windturbines vanaf 2030 alleen nog *geared* turbines te gebruiken. Op land worden deze turbines veel toegepast. Op zee wordt hier nauwelijks voor gekozen vanwege de grote onderhoudsintensiteit – en als gevolg daarvan de hogere onderhoudskosten. In dit onderzoek wordt al gerekend met een lager dysprosiumgehalte in permanente magneten dan in de basisinformatie vanuit de JRC, als gevolg van op dit moment reeds gerealiseerde technologische verbetering.²⁷

Strategie	Maatregel	Implementatie
Baseline-aanpassing		
 Efficiëntie	Dysprosiumgehalte in permanente (NdFeB-)magneten naar 1,5% door verbeterde technieken in <i>grain boundary diffusion</i> ²⁷	Per direct
Technologische maatregelen: CT-scenario		
 Levensduurverlenging	Gehele windturbine: 40 jaar ²⁸	Per direct
 Substitutie	33% vermindering NdFeB in rotor <i>direct drive</i> windturbines door introductie <i>geared</i> windturbines ²⁹	2030
 Substitutie	66% vermindering NdFeB door introductie <i>electrically excited</i> generatoren ²²	2035
 Substitutie	100% vermindering NdFeB door introductie hoge temperatuur supergeleiders ²²	2040
Technologische maatregelen: CT+ scenario		
 Substitutie	100% <i>geared</i> generatoren voor wind-op-land	2030

Tabel 13 | 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 (zie Figuur 15).



Figuur 15 | Vraag naar NdFeB-magneten in het CT-scenario









Zon-PV

De markt voor zonnepanelen bestaat op dit moment voornamelijk uit kristallijn-silicium (C-si) zonnepanelen. Voor dit type zonnepaneel zijn verschillende kritieke en strategische metalen nodig. De belangrijke zijn silicium, koper en aluminium. Daarnaast modeleren we ook zilver, omdat de toenemende vraag vanuit PV voor een grote stijging in de zilverprijs heeft gezorgd.

Voor zonnepanelen wordt een zeer sterke verlaging van het zilveragehalte en een sterke verbetering van het siliciumgehalte voorspeld als gevolg van hogere zilverprijzen, betere productietechnieken en 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.²¹ Daardoor is er per GW geïnstalleerd vermogen geleidelijk minder koper en aluminium nodig.

Daarbij worden veel zonnepanelen op dit moment verwijderd voor het einde van de technische levensduur, onder meer als gevolg van vergunningtermijnen of een betere businesscase bij vervanging door nieuwere panelen.³⁰ Dat leidt tot onnodig waardeverlies en veel mogelijkheden voor hergebruik van deze panelen. Technisch hebben zonnepanelen vaak een levensduur van 35-40 jaar, terwijl in de business case vaak wordt uitgegaan van een levensduur van zo'n 25 jaar.

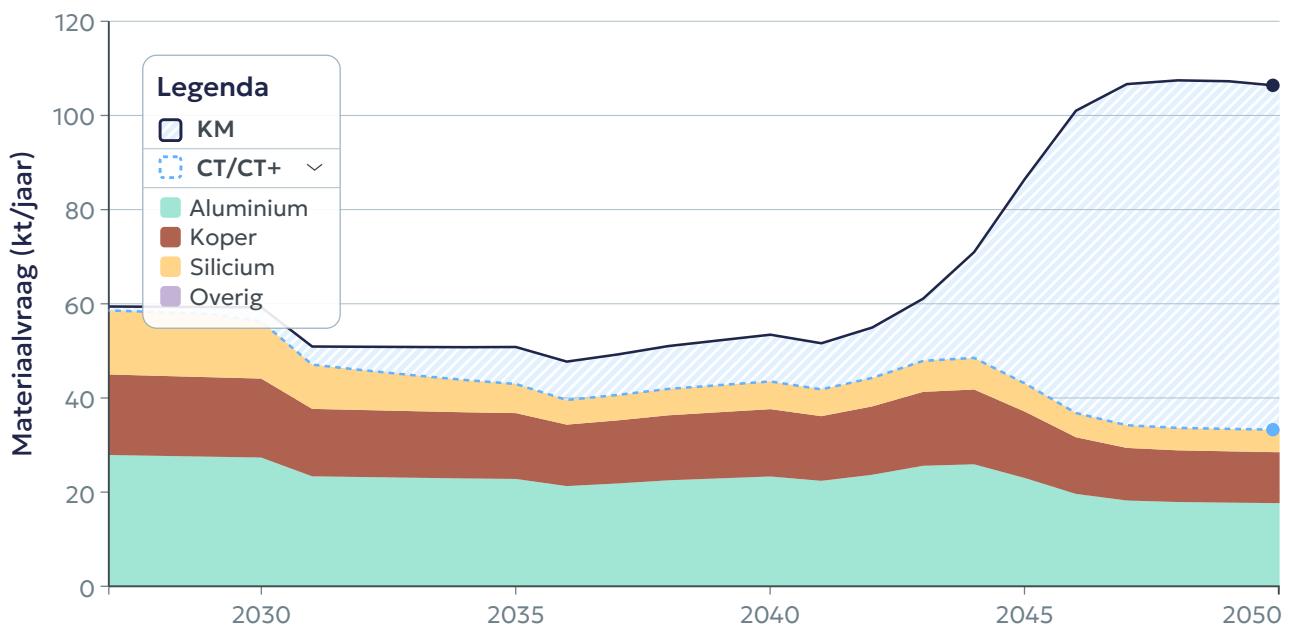
Strategie	Maatregel	Implementatie
Actualisatie <i>baseline</i> (ten opzichte van JRC)		
 Substitutie	Marktaandeel CIGS maximaal 1%	Nu - 2050
Technologische maatregelen: CT-scenario		
 Efficiëntie	Jaarlijks 25% verlaging in zilveragehalte van elektrische contacten, tot minimum van 2 ton / GW in 2030 ³¹	Nu - 2030
 Efficiëntie	Jaarlijkse verlaging van 0,65% in koper (Cu) en aluminium (Al) ²¹	Nu - 2050
 Efficiëntie	50% reductie in silicium (gehele PV-cel) ²¹	Nu - 2035
 Levensduurverlenging	Verlengen levensduur naar 35 jaar (<i>baseline</i> : 25 jaar) ³¹	Per direct
Technologische maatregelen: CT+ scenario		
 Levensduurverlenging	Verlengen levensduur naar 40 jaar (<i>baseline</i> : 25 jaar) ³¹	Per direct

Tabel 14 | Overzicht maatregelen voor zonne-energie

Effecten op materiaalvraag

De absolute materiaalvraag voor zonnepanelen wordt gedomineerd door koper, aluminium en silicium, die in massa het grootste aandeel hebben (zie Figuur 16). De volgende effecten zijn zichtbaar:

- De efficiëntieverbetering leidt tot een lichte afname van de totale materiaalvraag, terwijl er significant meer nieuwe capaciteit wordt geïnstalleerd.
- De effecten van substitutie en verbeterde efficiëntie – vooral op zilver – worden geleidelijk zichtbaar in de periode tussen nu en 2035.
- De effecten van levensduurverlenging worden goed zichtbaar vanaf 2045, waar een grote materiaalbesparing mogelijk wordt door vervanging te voorkomen.
- Het CT+ scenario heeft geen zichtbaar effect, want de extra vijf jaar levensduur (van 35 naar 40 jaar) heeft pas effect in de periode na 2050.



Figuur 16 | Materiaalvraag van zon-PV in het CT+ -scenario, in vergelijking met CT en KM.



Batterijen: systeem- en thuisbatterijen

In een schoon en vergaand geëlektrificeerd energiesysteem zijn batterijen essentieel om het energienet te stabiliseren bij verschillen tussen vraag en aanbod. Met een groeiend aandeel zon en wind zullen die verschillen tussen vraag en aanbod steeds vaker voorkomen. In 2050 staat in het KM-scenario in totaal 257 GWh aan systeembatterijen en 34 GWh aan thuisbatterijen opgesteld.

De LFP-batterijen in systeembatterijen hebben meestal 4 uur aan vermogen: een 4 GWh batterijsysteem kan dan 4 uur lang 1 GW leveren.³² Er zijn enkele batterijsystemen die richting de 6-8 uur gaan.³³

Voor alle batterijtypen kan er sterk worden gestuurd op de vraag naar kritieke materialen, zowel met levensduurverlenging als met substitutie door

andere batterijtechnologieën. De levensduur van batterijen kan relatief eenvoudig verlengd worden met kwalitatief goed productontwerp en goed batterijmanagement. Denk daarvoor bijvoorbeeld aan het voorkomen van te ver opladen of te heet worden van de batterij.

Veel *baseline*-scenario's gaan uit van nikkel-mangaan-kobalt (NMC-)technologie voor thuisbatterijen en systeembatterijen. In de praktijk worden hiervoor op dit moment bijna uitsluitend lithium-ijzer-fosfaat (LFP-)batterijen gebruikt.³⁴ Dit heeft een enorm effect op de kritieke materiaalvraag. Bovendien kunnen LFP-batterijen op termijn worden vervangen door Natrium-ion (Na-ion) batterijen.³⁵ Dit gebeurt in China op dit moment al op kleine, maar commerciële schaal.^{36,37}

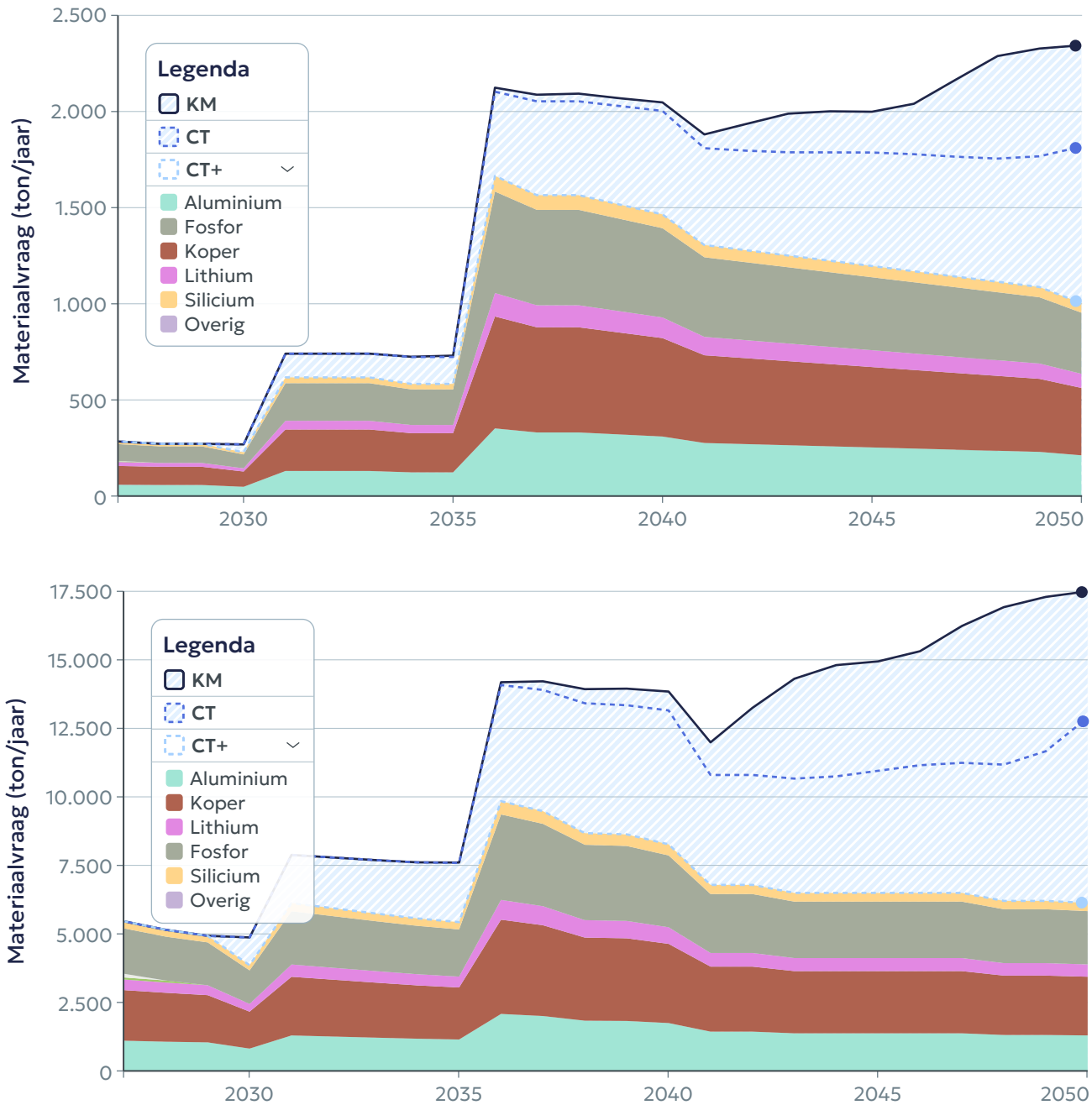
Strategie	Maatregel	Implementatie
Actualisatie <i>baseline</i> (ten opzichte van JRC)		
 Substitutie	Vervanging NMC-batterijen met LFP-batterijen	Per direct
 Substitutie	Introductie natriumbatterijen, tot 28% in 2050	Oplopend richting 2050
Technologische maatregelen: CT-scenario		
 Levensduurverlenging	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 15 | Overzicht van maatregelen voor systeem- en thuisbatterijen

Effecten op materiaalvraag

De totale materiaalvraag voor batterijen blijft tot en met 2050 stijgen, zelfs met relatief vergaande maatregelen (zie Figuur 17a voor systeembatterijen en 17b voor thuisbatterijen). Dit is het gevolg van de sterke benodigde groei in batterijcapaciteit. Uit de doorrekeningen van deze maatregelen wordt het volgende zichtbaar:

- De effecten van substitutie starten direct, maar hebben vooral effect bij de grootschalige installatie van batterijsystemen. Die is voorzien voor de periode vanaf 2035.
- De effecten van levensduurverlenging worden duidelijk zichtbaar vanaf 2040, waar de benodigde materiaalvraag minder hard stijgt door een lagere vervangingsvraag (ten opzichte van referentielevensduur van 16 jaar).



Figuur 17a en 17b | Materiaalvraag van systeem- en thuisbatterijen in het CT+ -scenario, in vergelijking met CT en KM



Batterijen: redox-flowbatterijen



Redox-flowbatterijen zijn een specifiek soort batterijen die relatief lang op vol vermogen kunnen leveren. Dit zijn vaak periodes van 24 tot 48 uur, in tegenstelling tot bijvoorbeeld LFP- en Na-ion-batterijen, die een veel kortere periode energie leveren. In 2050 staat in het KM-scenario in totaal 108 GWh aan redox-flow batterijen opgesteld. Ook gaat het KM-scenario uit van een sterke groei tegen het eind van het scenario. In 2030 staat pas 21 GWh opgesteld, in 2040 gaat het om 48 GWh.

Redox-flowbatterijen slaan energie op in vloeibare elektrolyten, die laden en ontladen via elektrochemische cellen. De elektrolyt kan worden opgeslagen in grote tanks, en staat los van de elektrochemische cel (die het vermogen bepaalt). Het verlengen van de opslagduur kan relatief eenvoudig en goedkoop door een extra tank met elektrolyt toe te voegen. De verwachting is dat dit type batterijen wordt gebruikt als alternatief voor lithium-ion en natrium-ion batterijen op plekken waar capaciteit belangrijker is dan vermogen. Dit is dus ook een

systeembatterij, maar wordt apart gemodelleerd omdat de onderliggende technologie anders is.

Redox-flowbatterijen worden vanuit materiaalperspectief vaak gemodelleerd als vanadium-flowbatterijen. Dit type batterij bestaat al lang, maar wordt nog nauwelijks commercieel toegepast. De grote 'verwachte' vraag naar vanadium in de modellen is dus relatief onzeker, vergeleken met bijvoorbeeld een relatief zekere vraag naar neodymium magneten in windturbines.

In deze studie is het vervangen van vanadium-flowbatterijen door organische flowbatterijen gemodelleerd. Deze organische flowbatterijen bevatten geen kritieke metalen.³⁵ Naar deze technologie vindt op dit moment veel onderzoek plaats. Er zijn echter tijdige investeringen nodig om deze technologie naar een voldoende hoog TRL-niveau te brengen om deze grootschalig toe te kunnen passen.

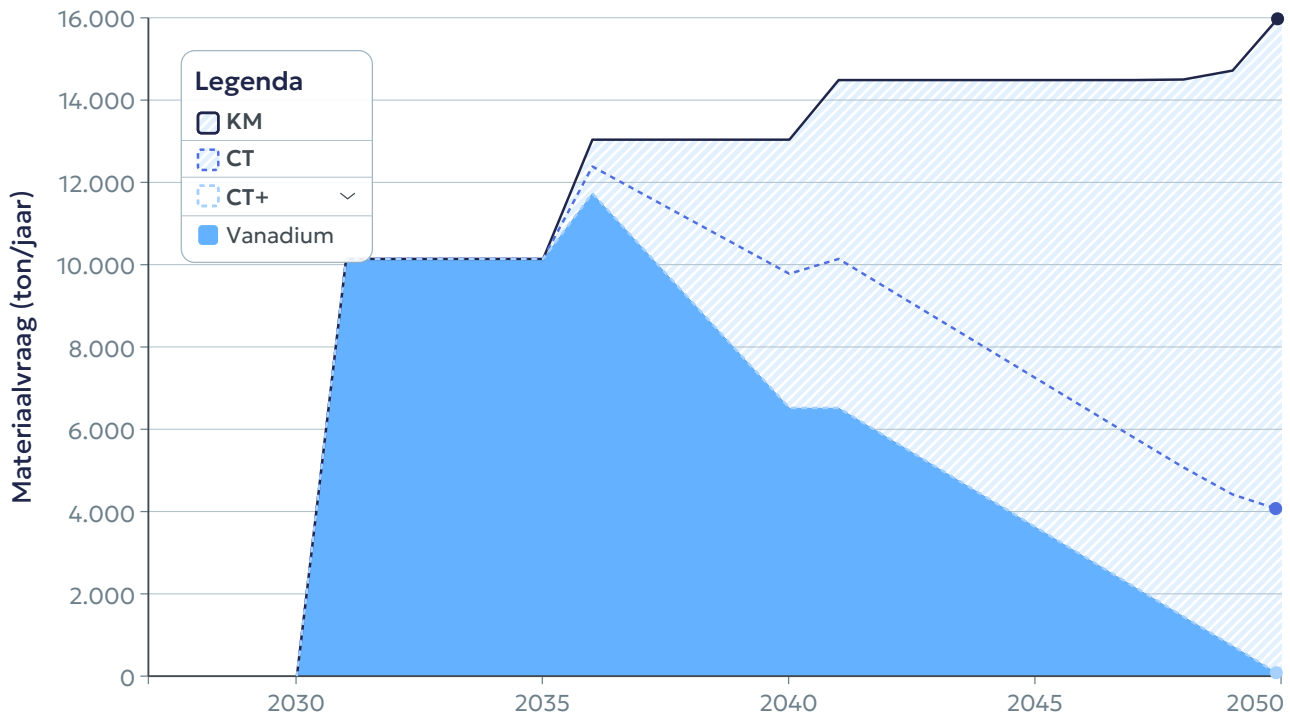
Strategie	Maatregel
Technologische maatregelen: CT-scenario	
 Substitutie	Toepassing organische flowbatterijen: <ul style="list-style-type: none"> • 25% in 2040 • 75% in 2050
Technologische maatregelen: CT+ scenario	
 Substitutie	Toepassing organische flowbatterijen: <ul style="list-style-type: none"> • 50% in 2040 • 100% in 2050

Tabel 16 | Maatregelen bij redox-flowbatterijen

Effecten op materiaalvraag

De vraag naar vanadium in het *baseline* scenario is heel groot, ten opzichte van de wereldwijde productie (~12%, zie Hoofdstuk 6). Dit is een inschatting op basis van de huidige productie, die naar verwachting door

de markt zal worden gecorrigeerd (zie tekstkader). Technisch kan grootschalige substitutie door organische flowbatterijen voor een flinke verlaging van de vraag naar vanadium zorgen: zie figuur 18.



Figuur 18 | 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 momenteel zeer hoge vraag (in het KM-scenario) 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 is 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

Ook voor de batterijen in elektrische voertuigen (auto's, bussen, vrachtwagens) liggen er mogelijkheden voor substitutie en levensduurverlenging. In het *baseline*-scenario houden NMC-batterijen een groot marktaandeel. Deze batterijtechnologie ontwikkelt zich in de loop van de tijd richting zogenoemde 8-1-1 en zelfs 9-0,5-0,5-batterijen met een sterk verlaagd

aandeel kobalt. In het verbeterde scenario wordt een groter aandeel NMC-batterijen (die relatief veel kritieke metalen bevatten) vervangen door LFP-batterijen.³⁵ In het CT+ scenario wordt richting 2050 ook een grotere inzet van Na-ion batterijen voorzien.

Strategie	Maatregel	Implementatie
Technologische maatregelen: CT-scenario		
 Levensduurverlenging	Langere levensduur gehele batterij: 24 jaar (referentie: 16 jaar)	Per direct
 Substitutie	Snellere vervanging NMC-batterijen door LFP-batterijen	Nu - 2050
Technologische maatregelen: CT+ scenario		
 Levensduurverlenging	Langere levensduur gehele batterij: 32 jaar (referentie: 16 jaar)	Per direct
 Substitutie	Grotere vervanging LFP-batterijen met natriumbatterijen, tot 49% in 2050	Nu - 2050

Tabel 17 | Overzicht maatregelen voor vehicle-to-grid

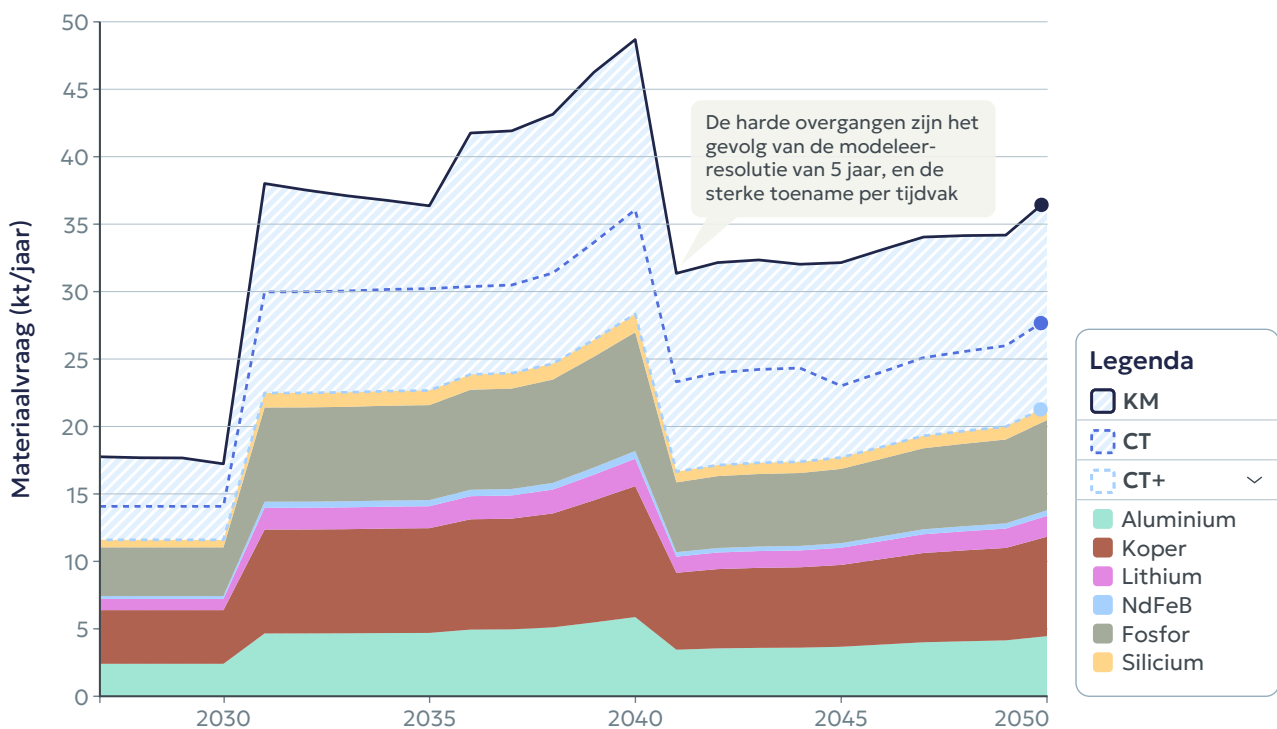
Effecten op materiaalvraag

Net als bij de systeem- en thuisbatterijen, blijft ook de vraag naar batterijcapaciteit voor elektrische voertuigen groeien (zie Figuur 19). In de scenario's zijn de volgende effecten zichtbaar:

- Substitutie heeft een zeer sterk effect. De keuze voor een specifiek batterijtype hangt sterk samen met technische competenties van de *supply chain*. Op dit moment loopt China zeer sterk voor in de ontwikkeling alle batterijtypes, inclusief Na-ion batterijen.
- Levensduurverlenging heeft vanaf 2040 effect, op basis van de langere levensduur ten opzichte van de referentie (16 jaar). Als er tijdig beleid wordt

geïmplementeerd rondom levensduurverlenging voor elektrische voertuigen die nu al op de markt zijn, heeft deze maatregel eerder effect.

De algehele afhankelijkheid van Chinese batterijtechnologie is een belangrijk aandachtspunt. Wanneer de motivatie om minder kritieke metalen te gebruiken primair voortkomt uit het willen afbouwen van de afhankelijkheid van China, vindt er in afhankelijkheid geen verschuiving plaats wanneer een batterijtype met kritieke materialen wordt vervangen door een Chinees batterijtype zonder kritieke metalen.



Figuur 19 | Materiaalvraag van de batterijen in elektrisch vervoer in CT+ in vergelijking met CT en het KM-scenario



Resultaat technologische strategieën

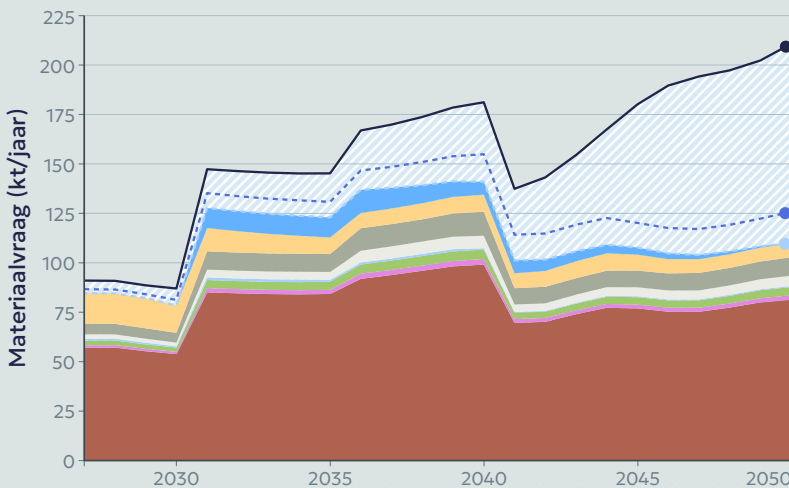
Wanneer de verschillende technologische strategieën gezamenlijk worden ingezet, is het mogelijk om de totale kritieke materiaalvraag van het energiesysteem tot en met 2050 met 21-27% te verlagen, zoals geïllustreerd in figuur 20a. Binnen de meeste duurzame technologieën – zon, wind en batterijen – zijn relatief veel technologische mogelijkheden om minder kritieke materialen te gebruiken, maar door de grote hoeveelheden die moet worden opgesteld blijft het om aanzienlijke hoeveelheden materiaal gaan.

In 2050 leiden de maatregelen ertoe dat de vraag naar kritieke en strategische materialen met zo'n 46% daalt ten opzichte van het reguliere KM-scenario. Dit is een totaal van zo'n 110 kton, verdeeld over verschillende materialen. De grote afname ten opzichte van het KM-scenario ligt in de periode vanaf 2040. Dat komt allereerst door de grotere invloed van technologische keuzes op middellange termijn: het duurt gemiddeld 10-15 jaar voor een innovatie

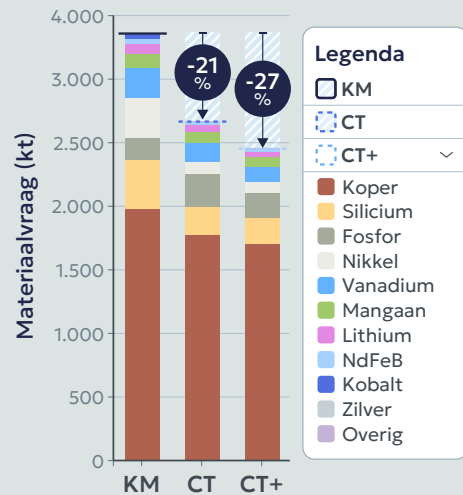
om van lab tot commerciële schaal te ontwikkelen³⁸. Daarnaast hangt het effect van levensduurverlenging op de vervangingsvraag af van de oorspronkelijke levensduur van de component. In het energiesysteem is die levensduur vaak relatief lang.

Een groot deel van de resterende vraag naar kritieke en strategische materialen bestaat uit koper. Wanneer het strategische (maar niet kritieke) koper buiten beschouwing wordt gelaten, kan de vraag naar kritieke materialen in 2050 met zo'n twee derde afnemen. Voor sommige kritieke materialen kan de vraag zelfs naar nul worden teruggebracht, waaronder neodymium (voor permanente NdFeB-magneten) en vanadium. De vraag naar koper is echter relatief moeilijk te verlagen, omdat dit gebruikt wordt voor elektriciteitsgeleiding. Aluminium is hiervoor een alternatief, maar heeft andere eigenschappen waardoor het niet voor alle toepassingen goed bruikbaar is.

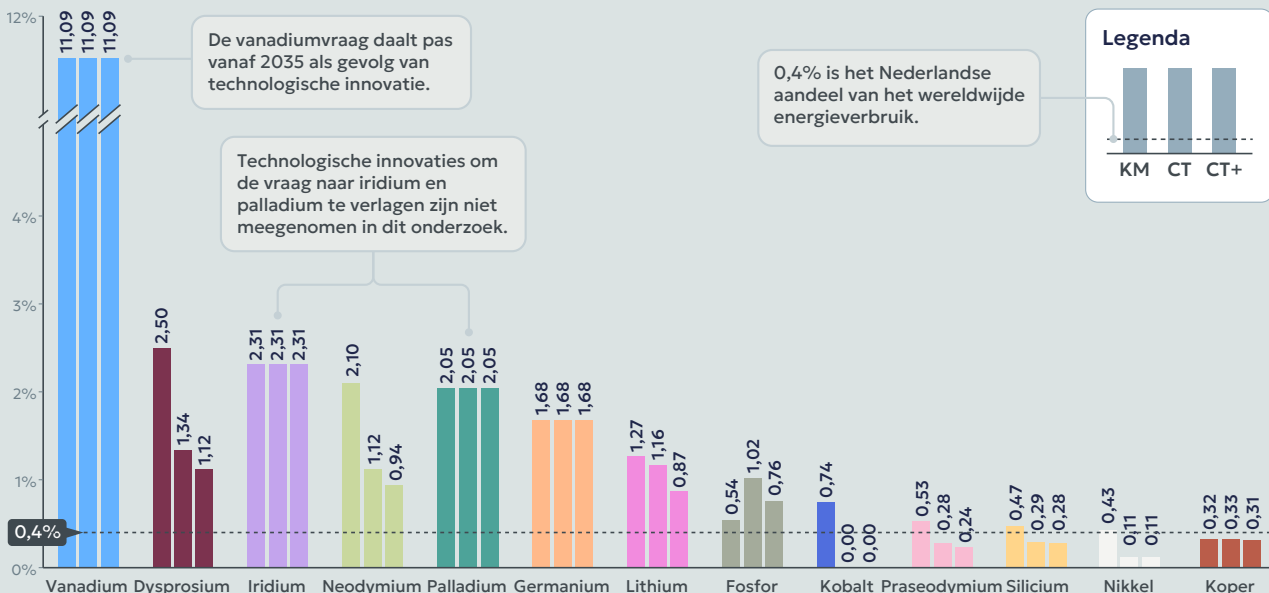
Jaarlijkse kritieke materiaalvraag CT+ in verhouding tot CT en KM (2027 t/m 2050)



Totale kritieke materiaalvraag 2027 t/m 2050



Figuur 20a | Materiaalvraag van het energiesysteem tussen 2027 en 2050 voor de scenario's CT en CT+, met ter referentie het KM-scenario



Figuur 20b | Relatieve, jaarlijkse materiaalvraag voor 2035, ten opzichte van wereldwijde mijnbouwproductie (2024)

06

Materiaalvraag Circulair Middenweg- en Technologiescenario

Om de vraag naar kritieke materialen te verlagen, kunnen zowel systeemmaatregelen (Hoofdstuk 4) als de technologische maatregelen (Hoofdstuk 5) bijdragen. Een combinatie van de verschillende circulaire maatregelen op de keuzes in het *Koersvaste Middenweg*-scenario leidt tot het Circulair Middenweg en Technologie (CMT-)scenario.





MATERIAALVRAAG CIRCULAIR MIDDENWEG- EN TECHNOLOGIESCENARIO

Over de periode 2027 – 2050 is in het CMT+ scenario ruim 30% minder kritieke en strategische materialen nodig. Omdat er een grotendeels nieuw energiesysteem moet worden neergezet zijn de benodigde hoeveelheden materialen aanzienlijk, zeker omdat koper in deze analyse wordt meegenomen. Dit getal maskeert dat voor individuele kritieke materialen veel grotere reducties te behalen zijn. Elk materiaal heeft een eigen ketendynamiek, en de verbetering in strategische autonomie zou per materiaal beter moeten worden onderzocht. De verschillende maatregelen in CMT+ leiden er toe dat als het nieuwe energiesysteem eenmaal opgebouwd is, de vraag naar kritieke materialen (in totale massa, exclusief koper), in 2050 ruim 70% lager is.

De keuzes om te komen tot een Circulair Middenweg- en technologiescenario hebben maatschappelijke effecten, afhankelijk van de specifieke maatregel. Dit geldt vooral voor de systeemmaatregelen. Deze effecten zijn uitgewerkt in Hoofdstuk 4. De effecten van technologische maatregelen zullen maatschappelijk gezien naar verwachting relatief beperkte effecten hebben. Wel zijn hier investeringen in technologische innovatie voor nodig. Deze kosten worden echter Europees (en wereldwijd) gemaakt en zijn daarom niet op een goede manier te vertalen naar de Nederlandse energietransitie.

Status: scenario

Deze materiaalvraag is een scenario, gebaseerd op inschattingen en aannames zoals vermeld in dit rapport. Naar de toekomst toe zijn er verschillende onzekerheden, die de materiaalvraag kunnen beïnvloeden: denk aan het tempo van batterijontwikkeling of veranderende omstandigheden voor wind-op-zee. Deze onzekerheden zijn nader toegelicht in Bijlage I.

Materiaalvraag energietransitie: absolute cijfers

In absolute zin vormen na koper, fosfor, vanadium, nikkel en mangaan de grootste vraag naar strategische en kritieke metalen. De hoge kopervraag komt doordat koper in vrijwel alle onderdelen van het energiesysteem gebruikt wordt. De grote nikkelvraag komt door de sterk stijgende vraag naar batterijen ten opzichte van andere componenten van het energiesysteem. Fosfor en vanadium zijn ook batterijmaterialen, respectievelijk van LFP en redox-flow batterijen. Mangaan wordt zowel in sommige batterijtypes als in staal (als legeringselement) gebruikt. Omdat staal in zeer grote volumes gebruikt wordt ten opzichte van de meeste kritieke metalen, kan een gehalte van bijvoorbeeld 1,65% mangaan in staal voor offshore windturbinepijlers al voor een relatief grote vraag zorgen.

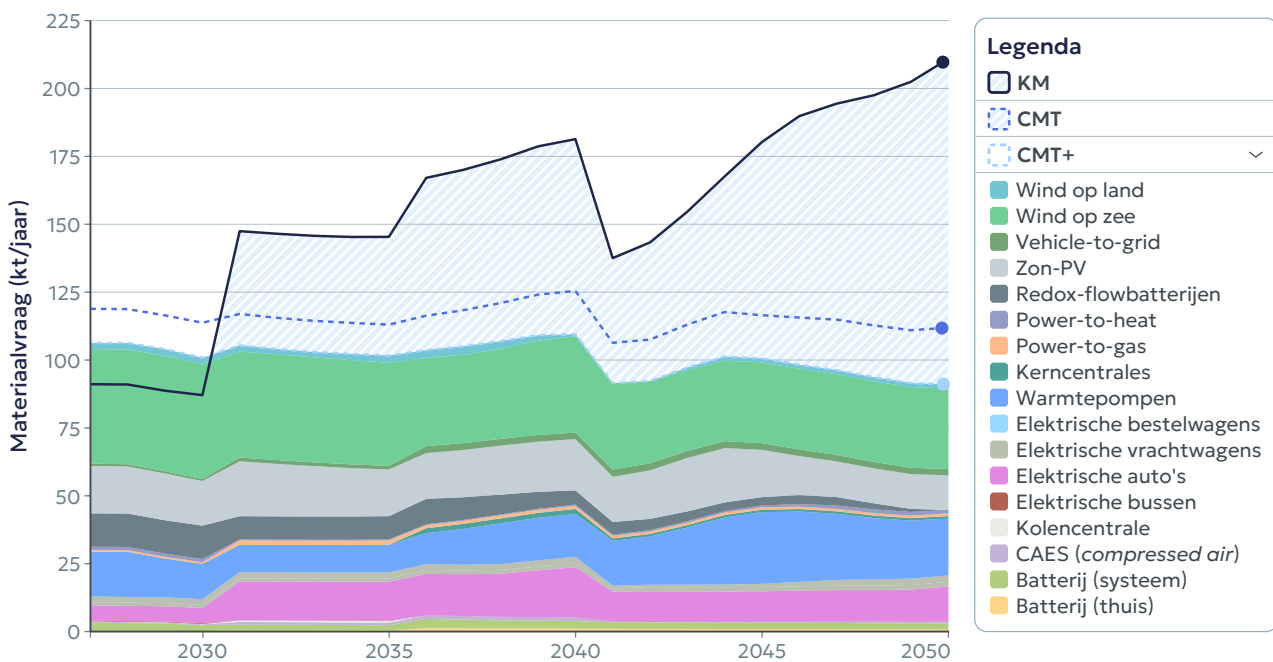
Materiaalvraag infrastructuur

Omdat in de meest recente Netbeheer Nederland scenario's (2025) geen goede doorrekening van de benodigde capaciteit aan kabels opgenomen, is het ook niet mogelijk om reducties in deze materiaalvraag mee te rekenen. De kopervraag die in deze grafieken is opgenomen, is koper die nodig is voor elektriciteitsgeleiding binnen technologieën als windturbines en zonnepanelen.

Materiaalvraag per technologie

De jaarlijkse kritieke materiaalvraag van het energiesysteem neemt in het KM-scenario (met huidige technologieën) toe in de periode tot en met 2050. Dit is het gevolg van de jaarlijkse groei in te installeren capaciteit van duurzame energietechnologieën. Als gevolg van circulaire keuzes in het energiesysteem (CM) neemt de benodigde capaciteit aan duurzame energietechnologieën af. In aanvulling daarop leidt de verlaging van de kritieke materiaalvraag van specifieke technologieën (CT) tot een lagere vraag.

Figuur 21 laat de verdeling van de kritieke materiaalvraag over de verschillende technologieën zien. In absolute zin is de grootste winst ten opzichte van het KM-scenario te realiseren in de benodigde batterijcapaciteit. Dit komt zowel door een reductie in de benodigde batterijcapaciteit – zo'n 21% (zie Hoofdstuk 4) – als een verlaging van de hoeveelheid kritieke materialen in batterijtechnologieën.



Figuur 21 | Jaarlijkse kritieke materiaalvraag, per technologie

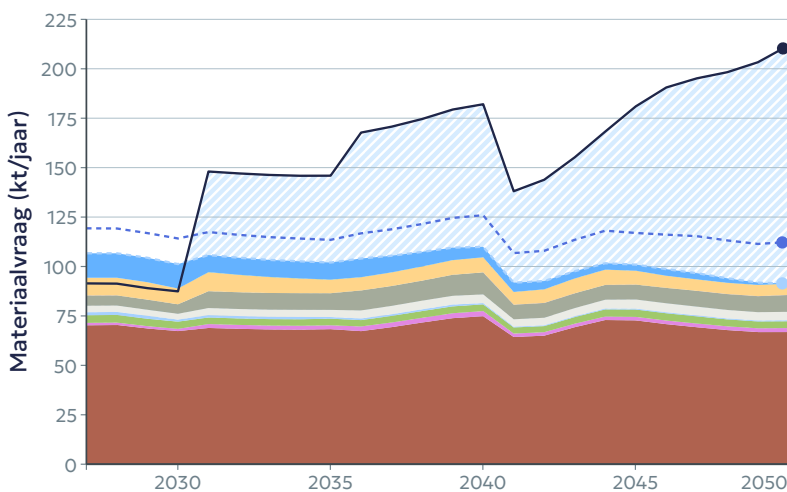
Jaarlijkse materiaalvraag

De jaarlijkse kritieke materiaalvraag van het energiesysteem neemt in het KM-scenario (met huidige technologieën) toe in de periode tot en met 2050. Door de combinatie van circulaire keuzes in zowel het energiesysteem als in technologieën, kan de jaarlijkse vraag naar kritieke metalen voor het energiesysteem in de periode tot 2050 dalen. Daarbij is er een lichte piek zichtbaar rond 2040.

Daarna beginnen de ingezette maatregelen en nieuwe technologieën de vraag naar materialen te verlagen, niet alleen ten opzichte van KM, maar ook in absolute zin. De totale, cumulatieve materiaalvraag kan met 25-34% dalen in de periode 2027-2050. Van de overgebleven vraag in het CMT+ scenario bestaat 74% uit koper. In 2050 is de vraag 57% lager dan het zou zijn in het KM scenario, en ook in 2050 bestaat de vraag voor het grootste deel uit koper (73%).

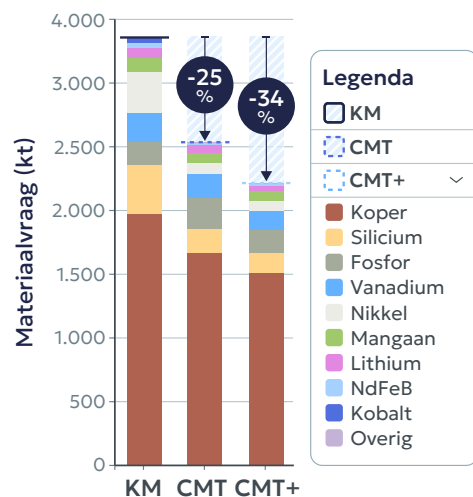
Jaarlijkse kritieke materiaalvraag

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



Totale kritieke materiaalvraag

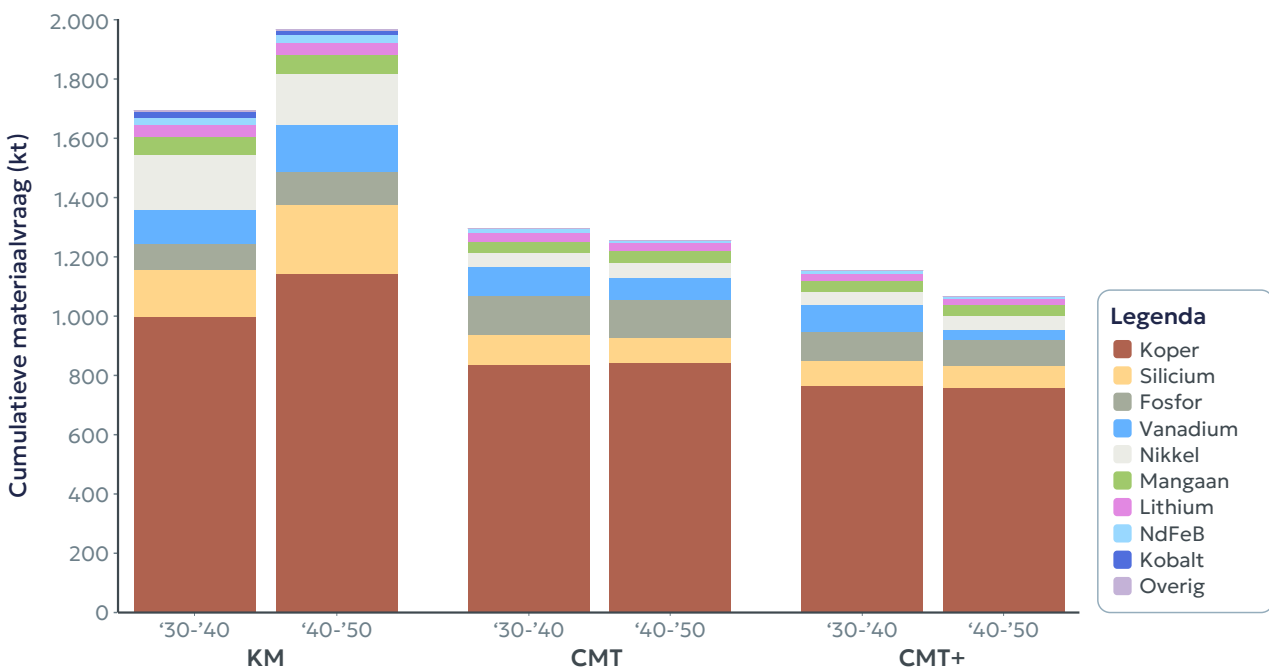
2027 t/m 2050



Figuur 22 | Materiaalvraag van het energiesysteem voor CMT+, vergeleken met CMT en het KM- scenario

Periodieke instroom

Zoals te zien in Figuur 23, is de cumulatieve instroom van kritieke materialen in de CMT en CMT+ scenario's flink lager dan in het KM-scenario. Dit is vooral het gevolg van technologische verbeteringen, zoals toegelicht in Hoofdstuk 5.



Figuur 23 | Totale kritieke materiaalvraag voor het energiesysteem in 2030-2040 en 2040-2050, per scenario

Materiaalvraag energietransitie: relatieve cijfers

Toepassing van kritieke materialen hoeft geen probleem te zijn, wanneer de wereldwijde vraag en aanbod in balans zijn én er vrije handel plaatsvindt. Bij publicatie van deze studie zijn vraag en aanbod relatief goed in balans, maar is er van vrije handel geen sprake. Dit wordt steeds duidelijker zichtbaar, vooral door verstoringen in de ketens van (producten met) kritieke materialen. De verwachting is dat de sterk groeiende vraag naar deze materialen voor onder meer de energietransitie deze problemen groter zal maken.

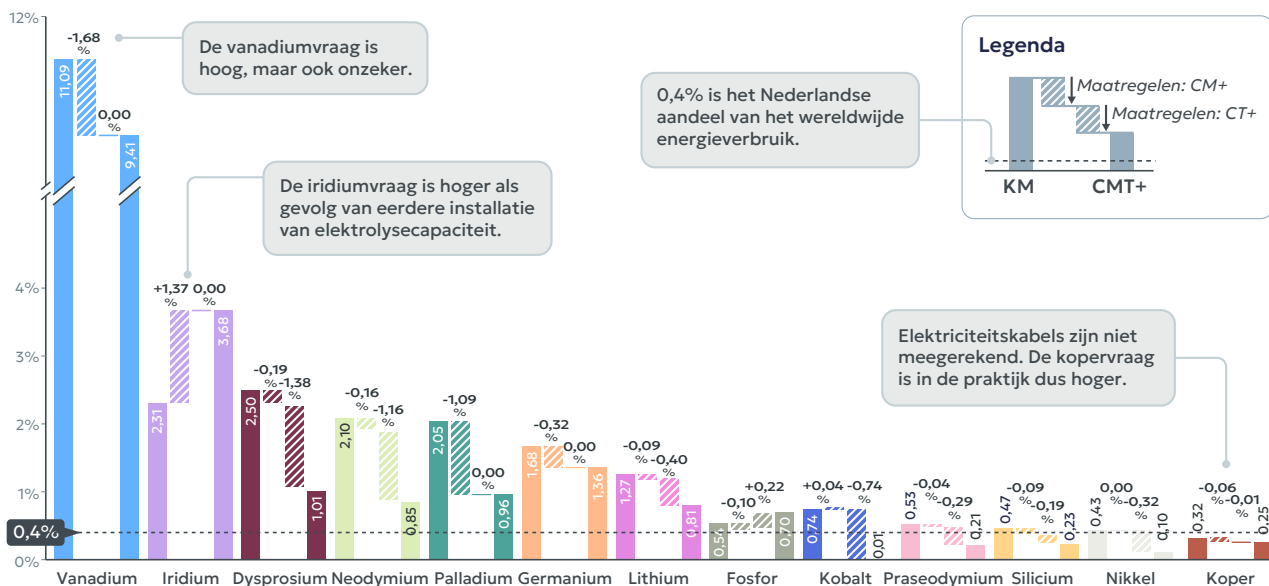
Kritieke materialen zijn grotendeels kritiek vanwege geopolitiek: China heeft een dominante positie in de verwerking (raffinage) van vrijwel alle kritieke materiaalketens, en kan daardoor invloed uitoefenen op zowel de mijnbouw als ook de eindgebruikers. Daarnaast is ook het verschil tussen het huidige aanbod vanuit mijnbouw en de verwachte marktverraag van belang. Als er meer dan voldoende aanbod van materialen is, wordt het voor een land als China moeilijker om de dominante marktpositie om te zetten in het daadwerkelijk uitoefenen van geopolitieke macht.

Om een (ruwe) indicatie te geven van de Nederlandse kritieke materiaalverraag van de energietransitie, is deze uitgezet in relatie tot de wereldwijde

mijnbouwproductie. Deze productie is in het verleden gegroeid, zo laat de toelichting in het kader zien. Eventuele toekomstige groei hangt zowel af van de marktprijs, technologische ontwikkelingen en geopolitieke dynamiek.

De relatieve Nederlandse vraag (in 2035) als aandeel van de wereldwijde winning (in 2024) is voor verschillende materialen toegelicht in figuur 24. Daarbij is een aandeel van 0,4% gebruikt als referentie: het Nederlands aandeel van het wereldwijde, finale energieverbruik.²³ Waar in het KM-scenario nog voor 11 materialen een ‘hoge’ relatieve vraag is, is dit in het CMT-scenario nog slechts voor acht materialen het geval. Wel is de vraag naar vrijwel alle kritieke materialen lager, waarmee risico's en afhankelijkheden verminderen. Zo daalt de vraag naar neodymium van 2,1% naar 0,85% en de vraag naar lithium van 1,2% naar 0,81%.

Voor lithium, zilver, koper en nikkel is de Nederlandse metaalverraag voor de energietransitie relatief beperkt, met 0,10% - 0,44% van de wereldwijde productie. In het geval van lithium en nikkel komt dit door een sterke groei van de productie in de afgelopen jaren. In het geval van koper (0,28%) komt dit doordat koper al een relatief grote markt beslaat, waardoor de Nederlandse vraag niet opvalt.



Figuur 24 | Vraag naar kritieke metalen voor de Nederlandse energietransitie (in 2035) als aandeel van de wereldwijde jaarproductie (2024), voor KM, CM+, CT+, en CMT+.

Iridium & palladium

Hoge relatieve vraag, lage absolute vraag

Voor zowel germanium als vanadium is de vraag als aandeel van de wereldproductie hoog: voor germanium 1,36% - 1,68%, voor vanadium zelfs tot 11%. Beide materialen worden gebruikt in toepassingen die op dit moment nog marginaal worden gebruikt, maar waarvan een sterke groei wordt verwacht. Voor zowel producten met germanium (in CIGS-zonnepanelen) als vanadium (in redox-flowbatterijen) zijn er goede alternatieven beschikbaar of in ontwikkeling. De verwachting is dat bij een sterk stijgende vraag de winning sterker zal stijgen, maar ook substitutie zal plaatsvinden. Het relatief hoge aandeel dat uit de modellering komt, zal dus hoogstwaarschijnlijk niet daadwerkelijk plaatsvinden.

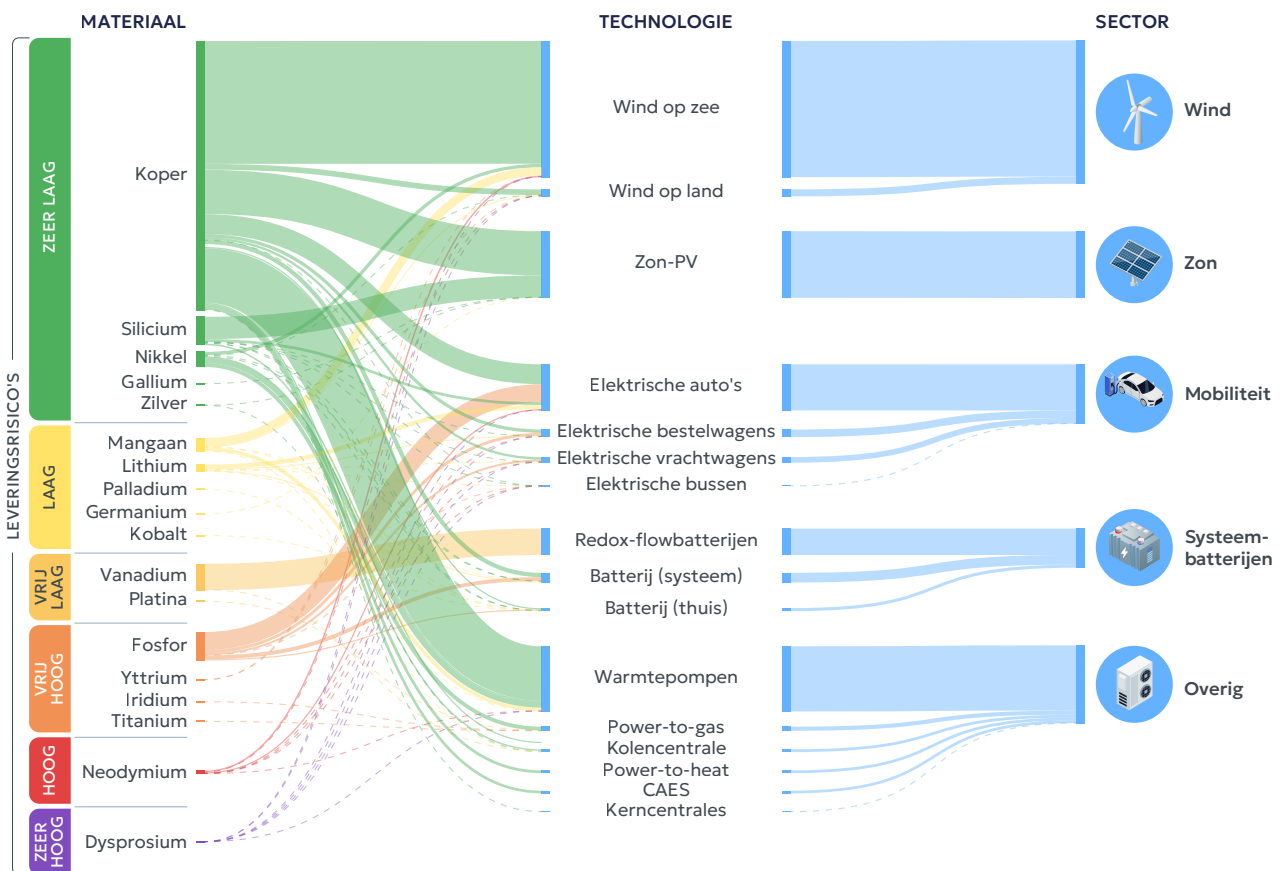
Germanium & vanadium

Hoge relatieve vraag, veel ontwikkelingen

Voor iridium (in elektrolyzers) en palladium (in warmtepompen) geldt dat de absolute jaarlijkse vraag erg laag is, maar de wereldwijde productie ook (zie tabel 18). Dit leidt nog steeds tot een relatief hoog aandeel van de wereldwijde jaarproductie van 3,68% (iridium) en 0,96% (palladium), ten opzichte van de 5-jaar-gemiddelde productie in 2020-2024. In het CMT+ scenario wordt de vraag naar palladium gehalveerd, vanwege de technische verbeteringen die warmtepompen langer in dienst houden. Iridium daarentegen gaat van 2,31% in het KM-scenario naar 3,68% in het CMT+ scenario. Dit komt enerzijds doordat de systeemmaatregelen aannemen dat er meer elektrolyzers worden neergezet, en anderzijds doordat technologiemaatregelen niet leiden tot een lagere iridiumvraag (op basis van inzichten uit de interviews).

	2020-2025 (Primaire toevoer, ton)	5-jaar gemiddeld (2020-2024, ton)	Materiaalvraag (2040, ton)	% wereldproductie
Iridium	6,2-8,1	7,0	0,258	3,68%
Palladium	185,5-212,9	200,6	1,93	0,96%

Tabel 18 | De CMT+ vraag naar 'Platina groep metalen' (in 2040), in vergelijking met de wereldproductie (in 2020-2025)⁴¹



Figuur 25 | Totale kritieke materiaalvraag van de Nederlandse energietransitie tot en met 2050 in het CMT+ scenario, met leveringsrisico per materiaal

Aandachtspunt: koper

Een belangrijk aandachtspunt is de groeiende kopervraag. De wereldwijde productie van koper neemt met 15% groei in 2019-2024 relatief veel minder sterk toe dan de wereldwijde productie van kritieke metalen. Dit komt omdat koperwinning al een volwassen markt is. Waar het relatief eenvoudig is om de productie van lithium te verdubbelen ten opzichte van de relatief kleine (eerdere) productie, is het voor koper zeer uitdagend om de aanzienlijke productie nog eens te verdubbelen. Dit is ook de reden waarom koper wel als strategisch materiaal wordt gezien, hoewel dit volgens de definities niet 'kritiek' is.

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 Tabel 19 samengevat.^{39,18} Het IEA verwacht vanwege verdere stijging van de mijnbouwproductie dat tot 2035 vraag en aanbod redelijk in evenwicht zullen blijven.¹⁹

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 Nederland⁹, Europa⁴⁰ als wereldwijd¹ – zijn die percentages inmiddels significant lager.

Metaal	2019 (ton)	2024 (ton)	Groei (%)
Koper	20.000.00	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 19 | Groei in wereldwijde productie van enkele kritieke materialen

07

Prioriteiten

De energietransitie leidt tot een grotere vraag naar kritieke materialen. Tegelijkertijd zijn er manieren om die materiaalvraag – en als gevolg daarvan de afhankelijkheden en ketenrisico's voor mens en milieu – te verlagen. Dit hoofdstuk licht de belangrijkste conclusies toe op systeemniveau en technologieniveau. Op basis daarvan ontstaan prioriteiten voor beleid.



PRIORITEITEN

Om de energietransitie op lange termijn mogelijk te maken, is structureel aandacht nodig voor de strategische en kritieke materialen die daarvoor nodig zijn. Hoofdstuk 4 laat zien dat binnen het energiesysteem vooral mogelijkheden ('knoppen') liggen om de piekvraag naar energie – en daarmee de opslagcapaciteit – te beperken. De mogelijkheden om met circulaire maatregelen de opwekcapaciteit structureel te verlagen, zijn beperkt. Dit wordt alleen mogelijk met aanvullende import van duurzame koolstofdragers of aanvullende energiebesparing bovenop het *Koersvaste Middenweg*-scenario.

De beperkte potentie op systeemniveau komt voort uit de keuzes die gemaakt zijn in het *Koersvaste Middenweg*-scenario. Dit KM-scenario – het vertrekpunt voor deze analyse – is op zichzelf al een ambitieus scenario, waarin optimalisaties ook doorwerken richting een optimaal gebruik van kritieke materialen. Dit komt vooral door de grote energiebesparing, sterke interconnectiviteit met buurlanden en de inzet van 7 GW aan kernenergie. Het verder verhogen van deze interconnectiviteit of de hoeveelheid kernenergie is niet onderzocht, omdat er al grote stappen nodig zijn om de huidige keuzes te realiseren. Ook het verder verlagen van de interconnectiviteit of hoeveelheid kernenergie is niet onderzocht, omdat dit juist leidt tot een hogere kritieke materiaalvraag.

Op technologieniveau ligt er wel veel potentie om kritieke materiaalvraag te reduceren. Zowel voor batterijen als voor windturbines zijn er technische mogelijkheden om de kritieke materiaalvraag sterk te beperken. Voor zonnepanelen en elektrolyzers lijken die mogelijkheden vooralsnog kleiner, al zijn er ook voor die technologieën verschillende innovaties.

Deze zijn echter nog minder ver in hun technologische ontwikkeling. Voor alle technologieën geldt dat grote investeringen in onderzoek en ontwikkeling nodig zijn om de potentie hiervan te realiseren.

Tegelijkertijd laat Hoofdstuk 6 zien dat met beide sporen potentiële materiaalwinst te realiseren is. Ook met technologische ontwikkelingen blijft de vraag naar kritieke materialen voor het energiesysteem groeien, omdat de benodigde capaciteit snel groeit. Om leveringsrisico's en ketenimpacts te beperken, liggen er daarom prioriteiten op twee niveaus:





Binnen het energiesysteem zijn er twee prioriteiten om de kritieke materiaalvraag te beperken. Per prioriteit zijn de belangrijkste aanbevelingen uitgewerkt.

- I **Maximale energiebesparing, op basis van strategie A ('Verdere energiebesparing')**
- II **Beter afstemmen vraag & aanbod, op basis van strategie B ('Demand side response') en strategie C ('Meer inzet op warmte').**

Naast bovenstaande prioriteiten ontstaat een dilemma: de inzet van duurzame biograndstoffen versus waterstof, op basis van strategie D ('Meer inzet op biograndstoffen'). Deze is na de twee prioriteiten uitgewerkt.

Deze twee prioriteiten sluiten ook aan bij prioriteiten vanuit andere beleidsdoelen, zoals klimaatwinst, leveringszekerheid en betaalbaarheid van het energiesysteem. De besparing van benodigde kritieke materialen – en het verlagen van de geopolitieke en ketenrisico's – is daarmee een extra argument om hierop in te zetten.

I **Maximale energiebesparing**

Alle energie die niet wordt verbruikt, hoeft niet duurzaam geproduceerd te worden. De eerste opgave is om de gemodelleerde energiebesparing in het KM-scenario te realiseren: dit is al een besparing van 22% ten opzichte van 2019. Wanneer deze besparing niet wordt gerealiseerd maar de klimaatdoelen wel overeind staan, is dus extra duurzame opwek- en opslagcapaciteit nodig. Daarmee neemt de kritieke materiaalvraag van het energiesysteem verder toe.

Wanneer de gemodelleerde besparingen wel gerealiseerd zijn, liggen er nog extra mogelijkheden tot besparing. Deze vragen echter een meer fundamentele verschuiving in beleid op dossiers buiten het energiesysteem. De grootste 'restvraag' naar energie in het KM-scenario (totaal 660 TWh) bevindt zich in de industrie (316 TWh, bijna 50%). Datacenters zijn een belangrijk onderdeel van deze industriële energievraag. Andere grote energievragers zijn internationaal transport, inclusief lucht- en scheepvaart (105 TWh) en nationaal transport (80 TWh). De resterende vraag ligt vooral bij huishoudens (77 TWh) en gebouwen (48 TWh).

Zoals toegelicht in Strategie A (Hoofdstuk 4) kan een *modal shift* in personenmobiliteit en verdere energiebesparing in gebouwen leiden tot een capaciteitsbesparing van 5-12 GW in benodigde batterijen en een besparing van 2-3 GW in opwekcapaciteit (zon, wind). Ook zorgt het voor enige reductie in de belangrijkste kritieke materialen voor zon en wind (indium, neodymium).

Benodigde inzet

De eerste stap is om de gemodelleerde energiebesparing in het KM-scenario in de praktijk te realiseren. In Strategie A (Hoofdstuk 4) is aangegeven welke mogelijkheden er zijn voor verdere energiebesparing. Daarvoor is de volgende inzet nodig:

- **Maak een *modal shift* van auto naar trein, bus en fiets aantrekkelijk.** Zo'n *modal shift* leidt allereerst tot minder autokilometers, en daarmee tot een lagere energievraag. Daarnaast leidt dit tot een verlaging van het aantal voertuigen, en daarmee de benodigde batterijcapaciteit. Investeer daarom

in goede bereikbaarheid en openbaar vervoer, juist in gebieden die nu minder goed bereikbaar zijn. Zorg dat de fysieke infrastructuur op orde is (spoor, fietsverbindingen). Zorg ook voor aantrekkelijke financiële prikkels. Daarmee ontstaat zowel een besparing in elektriciteitsvraag als een vermindering van het aantal benodigde elektrische voertuigen.

- **Werk aan verdere energiebesparing in gebouwen.** Gebouwen – zowel woningen, kantoren als maatschappelijk vastgoed – blijven een belangrijke factor in de energievraag. Als gevolg van elektrificatie zal de energievraag van steeds meer gebouwen leiden tot een grotere elektriciteitsvraag. Tegelijkertijd is een groot deel van de bestaande gebouwde omgeving straks afhankelijk van een warmtenet. Zet in op extra isolatie van gebouwen waar mogelijk, bijvoorbeeld door subsidies voor sociale huurwoningen en verouderde bedrijfsgebouwen. Maak ook heldere keuzes in de verwarmingsoptie per wijk, om toekomstige overbelasting van het elektriciteitsnet met (hybride) warmtepompen te voorkomen.

Verdere energiebesparing industrie

Bijna 50% van de resterende energievraag komt voort uit de industrie. Daarbij realiseert de industrie ‘slechts’ 9% van haar energievraag tussen 2019 en 2050. Om te komen tot een klimaatneutraal energiesysteem met minder kritieke materialen, is verdere energiebesparing in de industrie noodzakelijk. Omdat technische besparing in de bestaande industriële capaciteit lastig is, betekent dit ook een strategische keuze in welke toekomstbestendige industrie wel en niet te behouden, in lijn met het advies van de Wetenschappelijke Klimaatraad.⁴² De mogelijkheden voor verdere energiebesparing in de industrie – of het beter afstemmen van de energievraag van de industrie op beschikbaar energie-aanbod, zie prioriteit II – zijn in deze verkenning niet uitgewerkt.

II Beter afstemmen vraag & aanbod van energie

Verbetermogelijkheden binnen de randvoorwaarden van het KM-scenario liggen vooral in het beter afstemmen van de vraag en het aanbod van energie. Dit betekent allereerst het verlagen van de energievraag bij een dalanaanbod, vooral op piekmomenten in de dag. Dit draagt tevens direct bij aan het verlagen van netcongestie. Vervolgens kunnen de beschikbare batterijsystemen in voertuigen beter

worden benut. Dit is de kern van de maatregelen die zijn gemodelleerd in Strategie B (*‘Demand side response’*) en komt ook terug in Strategie C (*‘Meer inzet op warmte’*).

Alle vier de onderzochte systeemstrategieën (Hoofdstuk 4) dragen bij aan het verlagen van de benodigde capaciteit aan systeembatterijen. Dit onderzoek laat zien dat de combinatie van de vier strategieën de benodigde batterijcapaciteit met 10-12 GW kan verlagen. Zowel verdere energiebesparing, het verhogen van *demand side response* als meer inzet op warmte leveren hier een bijdrage aan. Een verdere verlaging van de batterijcapaciteit is moeilijk zonder extra import van energiedragers (biomassa, groen gas of waterstof) of andersoortige oplossingen (voorbeeld: specifieke grootgebruikers voor langere tijd afschakelen).

Aan de ene kant leidt het verlagen van de batterijcapaciteit tot reducties in de benodigde kritieke metalen voor batterijen (lithium, fosfor, koper). Aan de andere kant worden systeembatterijen in het CM-scenario eerder geïnstalleerd dan in KM, waardoor er een vervangingsvraag ontstaat in de periode 2040-2050, die de totale materiaalvraag weer omhoog brengt. Netto resulteert dit in een materiaalvraag die om en nabij gelijk is in CM en KM.

Naast een verlaging van de kritieke materiaalvraag kan deze verlaging ook leiden tot verdere CO₂-reductie. Bijvoorbeeld wanneer er minder inzet van flexcapaciteit nodig is, waar inzet van die flexcapaciteit (zoals gascentrales) nog leidt tot CO₂-uitstoot.

Benodigde inzet

In het KM-scenario wordt ingezet op flexcapaciteit om het verschil tussen vraag en aanbod te overbruggen. In Strategie B (Hoofdstuk 4) is aangegeven welke mogelijkheden er zijn om de piekvraag te verlagen op het moment dat er te weinig energie beschikbaar is. In Strategie C (Hoofdstuk 4) is aangegeven hoe meer warmte een rol kan spelen in het verlagen van de (piek)vraag. Daarvoor is de volgende inzet nodig:

- **Verken de mogelijkheden van *demand side response* in datacenters.** Datacenters zijn verantwoordelijk voor een grote baseload-vraag, die vooral in de winterperiode tot problemen kan leiden. Werk samen met datacenters aan mogelijkheden om flexibel op- en af te schakelen, waardoor de elektriciteitsvraag afneemt bij momenten van stroomtekort. Dit kan meer vragen dan financiële prikkels alleen, omdat datacenters mogelijk bereid zijn om hogere prijzen te betalen voor elektriciteit dan voor huishoudens acceptabel is.

- **Onderzoek potentie van verdere *demand side response* in de industrie.** De elektriciteitsvraag van de industrie drukt zwaar op de totale elektriciteitsvraag, zeker in periodes met beperkte beschikbaarheid. Tegelijkertijd maakt de analyse zichtbaar dat het effect van vraaguitstel op de hoeveelheid benodigde kritieke materialen voor het energiesysteem beperkt is. *Vraagverlaging* in periodes met beperkte beschikbaarheid heeft naar verwachting meer effect, maar is in deze analyse niet goed te modelleren. Eerste onderzoek laat zien dat de potentie tot 2030 vooral inzetbaar is voor kortdurende productieschaarste (minuten tot uren).⁴³ Meer langdurige vraagverlaging (dagen tot weken) vraagt om verder onderzoek naar de technische mogelijkheden en financiële prikkels om dit voor bedrijven economisch haalbaar te maken.
- **Creëer voorwaarden om elektrische auto's in te zetten als flexibele opslag.** Batterijen van elektrische voertuigen zijn goed geschikt als backup van het energiesysteem.⁴⁴ Zorg voor een brede uitrol van de mogelijkheden voor bi-directionaal laden, mogelijk via Europese ontwerprichtlijnen of via eisen bij aanleg door gemeenten. Neem dit mee in capaciteitsplannen van netbeheerders.
- **Onderzoek centrale stuurbaarheid van warmtepompen op buurtniveau.** Warmtepompen hebben op dit moment een vrijwel gelijktijdige energievraag. Een meer centrale sturing van warmtepompen kan deze gelijktijdigheid beperken en daarmee lokale pieken in de energievraag voorkomen.⁴⁵ Dat voorkomt batterijcapaciteit en netbelasting.

Dilemma: waterstofproductie versus biograndstoffen

Om de risico's en ketenimpact van kritieke materialen te verlagen, is één van de oplossingen om alternatieven te vinden voor waterstofinzet. Eén van die alternatieven is de inzet van duurzame biograndstoffen, zoals uitgewerkt in Strategie D (Hoofdstuk 4). Tegelijkertijd is er maar een beperkte hoeveelheid duurzame biograndstoffen beschikbaar, terwijl er veel verschillende mogelijke toepassingen voor duurzame biograndstoffen zijn. Toepassing van biograndstoffen voor energieproductie zijn daarbij minder hoogwaardig dan toepassing voor materiaalproductie²⁶.

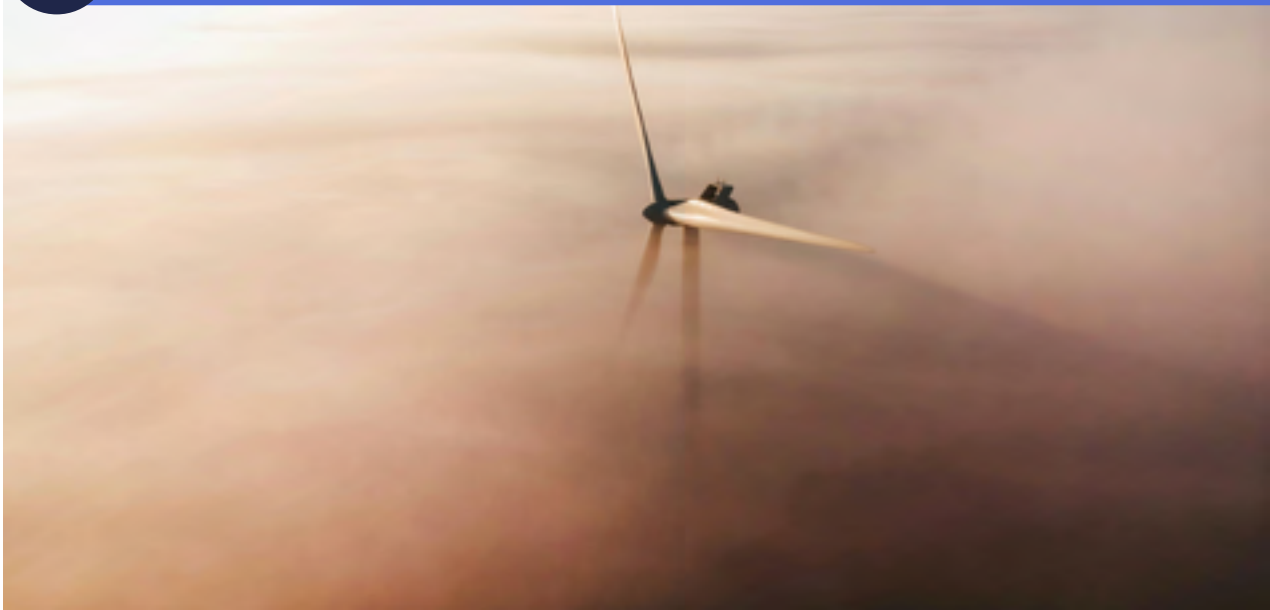
Daarmee ontstaat hier een dilemma in de energievoorziening: meer capaciteit (en daarmee meer kritieke metalen) voor schone energieproductie en elektrolyse, of meer aanspraak maken op schaarse, duurzame biograndstoffen?

Het Duurzaamheidskader Biograndstoffen stelt dat laagwaardig gebruik van biograndstoffen, waarvoor andere duurzame alternatieven beschikbaar zijn, moet worden voorkomen. In zogenoemde hard-to-abate sectoren zoals lucht- en scheepvaart, waar deze alternatieven nog niet tijdig beschikbaar en betaalbaar zijn, kunnen biograndstoffen als 'overbruggingstoepassing' worden toegepast.

Wanneer er voldoende kritieke materialen beschikbaar zijn en/of nieuwe technologieën leiden tot waterstofproductie met een lagere kritieke materiaalvraag, heeft waterstofproductie daarmee in principe de voorkeur. Wanneer opwek- of elektrolysecapaciteit simpelweg niet realiseerbaar is als gevolg van verstoringen of hoge risico's in de keten, kan de inzet van duurzame biograndstoffen een alternatief zijn.



Technologieniveau



Waar de mogelijkheden op systeemniveau relatief beperkt zijn, liggen er op technologieniveau wel veel mogelijkheden om de kritieke materiaalvraag te reduceren. De mogelijkheden verschillen per technologie. In het algemeen zijn er veel kansen voor systeem- en autobatterijen en voor windturbines. Ook zijn er mogelijkheden voor zonnepanelen, al zijn die meer beperkt. Voor elektrolyzers geldt dat de technologie op dit moment nog te vroeg in ontwikkeling is om goede inschattingen te kunnen geven. Wel lijken er technologische mogelijkheden te liggen.⁴⁶

Het realiseren van deze reducties vraagt echter om gerichte sturing met ontwerpkeuzes, onderzoek en het stimuleren van de marktvrage. De benodigde sturing is per technologie anders. Daarnaast leidt verlaging van de vraag naar een specifiek materiaal niet automatisch tot lagere afhankelijkheden. Bijvoorbeeld in de verschuiving naar natriumbatterijen – waar China ook technologisch dominant is.

Dit onderzoek leidt tot drie prioriteiten om de materiaalvraag te beperken vanuit het perspectief van technologieën:

- III **Sturen op toepassing van alternatieve technologieën**
- IV **Levensduurverlenging van bestaande capaciteit**
- V **Verbeteren van ontwerp door efficiënter materiaalgebruik**



Sturen op toepassing van alternatieve technologieën

Een belangrijke interventie is substitutie: het vervangen van technologieën met kritieke materialen door andere technologieën gebaseerd op andere, minder kritieke, materialen. Inzet op substitutie biedt vooral veel mogelijkheden voor batterijtechnologie en windturbines.



Batterijen

In de huidige modellering wordt veelal uitgegaan van NMC- en LFP-batterijen. LFP-batterijen bevatten al veel minder kritieke materialen (nikkel, mangaan en kobalt) dan NMC-batterijen, maar bevatten nog steeds lithium. Nasion batterijen zijn ook in opkomst. Deze bevatten helemaal geen kritieke materialen. Ook voor redox-flow batterijen zijn substituten mogelijk die geen kritieke materialen bevatten, bijvoorbeeld organische redox-flowbatterijen. Op basis van de modellering in dit onderzoek kan inzet op alternatieve batterijtechnologie leiden tot het geheel wegsubstitueren van een aantal metalen (kobalt, vanadium). De vraag naar lithium en fosfor kan gehalveerd worden. We merken hierbij op dat de dynamiek in batterijtechnologie zeer hoog is, dus dat langetermijnprojecties van specifieke batterij technologieën moet worden gezien als indicatief van wat er mogelijk is, en niet als een voorspelling.

In aanvulling op batterijen zijn ook andere opslagtechnologieën in opkomst. Denk bijvoorbeeld aan industriële warmte-opslag²⁵ of *compressed air energy storage* (CAES) in zoutformaties of ondergronden. Om de potentie van deze technologieën voor de Nederlandse energietransitie te bepalen, is echter meer onderzoek nodig.



Windturbines

Vrijwel alle *off-shore* windturbines die op dit moment worden geïnstalleerd zijn *direct drive* turbines met permanente neodymium-magneten. Toepassing van neodymium-magneten brengt een betere efficiëntie en significant lagere onderhoudskosten met zich mee. Deze permanente magneten bevatten echter grote hoeveelheden zeldzame aardmetalen (neodymium, dysprosium, holmium). Daarbij is het productieproces van de hoogste kwaliteit neodymium-magneten – en de daarvoor benodigde expertise – alleen in China en Japan aanwezig.

Er zijn alternatieven voor permanente magneettechnologie. Voorbeelden zijn elektrisch bekrachtigde synchrone generatoren (EESG) en tandwielgekoppelde, dubbelgevoede inductiegeneratoren (DFIG). Op langere termijn bieden ook hoge-temperatuur-supergeleider generatoren perspectief. Implementatie van deze technologieën kan de vraag naar neodymium-magneten in windturbines geheel wegnemen.

Het ontwikkelen van de competenties om nieuwe generatortypes op grote schaal te produceren, terwijl windturbines zich op hoog tempo ontwikkelen, is uitdagend. Nederland heeft een aantal internationaal goed aangeschreven onderzoeksgroepen die relevant onderzoek doen, bijvoorbeeld generatorontwerp (TU Eindhoven) en materiaalkunde (TU Delft). Deze onderzoeksgroepen hebben echter niet genoeg financiering om onderzoek en ontwikkeling te doen op de schaal en snelheid die nodig is. Op het moment van publicatie van dit rapport worden de benodigde investeringen door Europese windturbine-fabrikanten niet gedaan, omdat de industrie al te veel onder druk staat.

Benodigde inzet

Om te komen tot een bewuste toepassing van technologieën met minder kritieke materialen, is de volgende inzet nodig:

- **Stuur in aanbestedingen op beschikbare CRM-arme alternatieven.** Daarmee ontstaat een grotere markt voor al beschikbare alternatieve technologieën met andere materiaalstellingen. Zowel voor windturbines, voor grote systeembatterijen als voor zonnepanelen heeft de overheid een

rol via aanbestedingen (tenders). Organiseer marktconsultaties om de doelen en ambities neer te leggen en te verkennen welke oplossingen op het moment van de uitvraag geleverd kunnen worden. Creëer waar mogelijk volume met een Europese koploperaanpak.

- **Investeer in fundamenteel en industrieel onderzoek naar nieuwe CRM-arme technologieën.** Veel duurzame technologieën hebben op dit moment een hoge vraag naar kritieke metalen. Tegelijkertijd zijn er in potentie veel alternatieven beschikbaar. Die vragen nog wel om verder onderzoek. Denk daarbij aan organische redox-flowbatterijen of hoge-temperatuur-supergeleider-generatoren voor windturbines. Investeer daarom zowel in fundamenteel onderzoek (TRL 1-3) als industrieel onderzoek (TRL 4-6) voor CRM-arme technologieën. Werk bij voorkeur samen met andere landen in Europa en betrek kennisinstellingen en hoogtechnologische bedrijven.

IV

Levensduurverlenging van bestaande en nieuwe capaciteit

Een tweede prioriteit is het inzetten op levensduurverlenging van bestaande capaciteit, bijvoorbeeld door het repareren en hergebruiken van bestaande producten en door producten te ontwerpen op optimale levensduur zodat nieuw geïnstalleerde capaciteit en infrastructuur langer meegaat. In het rapport *Rewiring Consumer Electronics* is een overzicht opgenomen van ontwerpprincipes voor de verschillende vormen van levensduurverlenging. In onze scenario's zijn er vooral voor zonnepanelen en batterijen veel mogelijkheden voor levensduurverlenging.



Zonnepanelen

Technisch hebben zonnepanelen vaak een levensduur van 35-40 jaar, terwijl veel wordt gerekend met een levensduur van zo'n 25 jaar. Een verlenging van deze levensduur tot 40 jaar zou leiden tot ruim een derde reductie van materiaalvraag.



Batterijssystemen

Grootschalige batterijssystemen zijn relatief nieuw. Daarmee is er nog beperkte ervaring met de levensduur. Er is veel anekdotisch bewijs dat batterijssystemen langer meegaan dan voorzien. Batterijexperts geven aan dat voor LFP-batterijen een levensduur van meer dan 40 jaar haalbaar is onder optimale omstandigheden, zoals het voorkomen van te hoge temperaturen bij laden / ontladen. Vergeleken met de huidige aannames van een levensduur van 16 jaar, kan dit op termijn de vraag naar materialen met 60% verlagen.

Benodigde inzet

Om te komen tot structureel langere levensduren, is de volgende inzet nodig:

- **Stem vergunningstermijnen af op technische levensduur.** Op dit moment zijn vergunningen vaak gebaseerd op ruimtelijke keuzes en eventuele toekomstige (scenario's voor) herbestemming van grond. Hier ontstaan knelpunten, op dit moment vooral voor zonneparken. Door vergunningstermijnen af te stemmen op de technische levensduur, zowel voor batterijsystemen, zonneparken en windturbines, wordt een product gedurende de levensduur optimaal benut.
- **Scherp ontwerprichtlijnen aan om voorwaarden voor een lange levensduur te creëren.** Voor verschillende technologieën zijn er ontwerprichtlijnen beschikbaar. Voor batterijen zijn de eisen vastgelegd in de recent (2024) aangescherpte EU Battery Regulation. Daarin zijn onder meer recyclings- en demontage-eisen opgenomen. Voor zonnepanelen is een EcoDesign-richtlijn nog in ontwikkeling. Zet in om in deze ontwerprichtlijnen minimale levensduureisen op te nemen, waardoor vroegtijdige vervanging voorkomen wordt.
- **Stel levensduureisen bij aanbestedingen van energietechnologieën.** Daarbij gaat het bijvoorbeeld om prestatiegaranties, zoals behoud van piekvermogen (zonnepanelen) of het voorkomen van degradatie (batterijsystemen).



Verbeteren van ontwerp voor efficiënter materiaalgebruik

Een derde prioriteit is het verbeteren van het ontwerp voor efficiënter materiaalgebruik. Dit is een prioriteit waar marktpartijen overwegend zelf aan zet zijn. Marktpartijen hebben immers zelf een prikkel om efficiënt te produceren, wanneer zij in staat zijn om dezelfde prestaties te leveren met een lagere materiaalvraag. Om een gelijk speelveld te creëren kan de overheid hier een rol nemen door een eerlijk speelveld te ontwikkelen met uniforme, Europese ontwerprichtlijnen vanuit EcoDesign. In die ontwerpeisen kan, naast efficiëntie, ook levensduur een rol spelen (zie prioriteit IV).

Het verbeteren van technisch ontwerp vraagt wel vaak om verder onderzoek en ontwikkeling om innovaties tot het punt te brengen dat ze kunnen worden overgenomen door marktpartijen. Soms staan bepaalde technische normen innovatie in de weg, zoals het voorschrijven van de dikte in plaats van de sterkte van plaatmateriaal. Tot slot kan de overheid een informerende rol innemen om de noodzaak hiervan te benadrukken, vanuit het perspectief van een klimaatneutraal en onafhankelijk energiesysteem.

08

Aandachtspunten

Dit onderzoek laat zien dat er mogelijkheden liggen om de materiaalvraag van het energiesysteem te verminderen. Ook zijn er verschillende prioriteiten waar op gestuurd kan worden. In die beleidsmatige sturing liggen echter belangrijke aandachtspunten.



AANDACHTSPUNTEN

In de energietransitie heeft de overheid een sleutelrol. Allereerst maakt zij de strategische keuzes voor het energiesysteem. Daarnaast stuurt zij mede de ontwikkeling en toepassing van energietechnologieën, onder meer via productwetgeving (EU), onderzoeksfinanciering (EU + nationaal) en eisen in aanbestedingen (nationaal).

Om de energietransitie succesvol te realiseren en te komen tot een klimaatneutraal energiesysteem in 2050, is ook het perspectief van kritieke materialen relevant. Door kritieke materialen onderdeel te maken van beleidsinzet en -afwegingen, neemt de kans op een succesvolle energietransitie toe. Meerjarig en consistent overheidsbeleid is daarvoor essentieel, vooral om bedrijven continuïteit en investeringsperspectief te geven.

Voor verdere beleidsontwikkeling zijn er vijf aandachtspunten:

- 1 **Kritieke materiaalvraag hangt samen met ketenrisico's**
- 2 **Verbetering strategische autonomie gaat verder dan vervanging van materiaal**
- 3 **Effecten beperkt op korte termijn, groter op middellange termijn**
- 4 **Energietransitiebeleid is afhankelijk van andere beleidsterreinen**
- 5 **Afbouw van afhankelijkheid vraagt om investeringen**

1 Kritieke materiaalvraag hangt samen met ketenrisico's

In de toeleveringsketens van kritieke metalen ontstaan milieu- en mensenrechtenrisico's. Deze risico's zijn er vooral bij winning en verwerking. Milieueffecten zijn onder meer water en energieverbruik, lokale vervuiling door chemische stoffen en (mede als gevolg daarvan) biodiversiteitsverlies. Vooral in gebieden met een kwetsbare natuur kan dit tot grote risico's leiden, die de winst in toepassing voor het energiesysteem beperken.²

Daarnaast zijn er sociale risico's op het gebied van mensen- en arbeidsrecht. In verschillende ketens komen dwangarbeid, kinderarbeid en onveilige arbeidsomstandigheden voor. Dit geldt zowel voor de (informele) mijnbouw en voor de verwerking.⁴⁷

Deze milieu- en sociale impacts kunnen leiden tot risico's in de toepassing van producten met kritieke materialen. Minder gebruik van kritieke materialen leidt tot een directe verlaging van deze risico's. Tegelijkertijd leidt gebruik van deze kritieke materialen in de energietransitie tot een lagere CO₂-uitstoot, wat ook weer bijdraagt aan het voorkomen van milieu- en sociale risico's.

Een aandachtspunt bij de levering van energietechnologieën met kritieke materialen is daarom een zo verantwoord mogelijke herkomst. Dit vraagt om voldoende aandacht voor ketentransparatie, zowel vanuit producenten als hun toeleveranciers. Het vergroten van deze aandacht sluit aan bij de beleidsinzet van het Ministerie van Buitenlandse Zaken vanuit IMVO.

2 Verbetering strategische autonomie gaat verder dan vervanging van materiaal

Deze studie laat zien dat er effectieve maatregelen zijn om het verbruik van specifieke kritieke materialen – en daarmee afhankelijkheid van specifieke ketens – te verlagen. Het vervangen of verlagen van de vraag naar een kritiek materiaal is echter geen doel op zich, maar een manier om de strategische autonomie van Nederland te verbeteren.

Wanneer meerdere landen overstappen op andere materialen, kan het zo zijn dat ook deze materialen kritiek worden. Bovendien is het vaak zo dat de afhankelijkheden – en daarmee risico's voor strategische autonomie – niet alleen gaan over toegang tot materiaal, maar ook over productieprocessen en technologische *know-how*. Zo is de Chinese technologische voorsprong in de ontwikkeling van batterijen en PV-panelen zo groot, dat ook alternatieven zonder kritieke metalen vaak uit China komen.

De mate en snelheid waarmee geopolitieke risico's zich ontwikkelen maakt het lastig om een specifieke beleidsmaatregel of technologische keuze op voorhand aan te wijzen als meest kansrijk. Om voorbereid te zijn op snel veranderende omstandigheden is het verstandig om een breed en gezond technologisch ecosysteem te ontwikkelen rondom hoogtechnologische producten voor de energietransitie en kritieke materialen die daarvoor nodig zijn. Het zou logisch zijn om in te zetten op specifieke technologieën, waar nog een invloedrijke positie in wereldwijde waardeketens is in te nemen.⁴⁸

3 Afbouw van afhankelijkheid vraagt om investeringen

Veel van de afhankelijkheden zijn ontstaan vanwege een – soms expliciete, soms impliciete – sturing op laagste kosten. Mede door de lage kosten van Chinese technologie hebben Europese producenten het lastig om voldoende producten af te zetten en daarmee concurrerend te blijven. Als gevolg daarvan is de afgelopen decennia veel kennis en ervaring verloren gegaan.

De keuze voor een minder afhankelijk energiesysteem, en daarmee een minder afhankelijk economisch systeem, vraagt om wederopbouw van kennis- en industriële capaciteiten, inclusief bijbehorende randvoorwaarden zoals voldoende technisch geschoold personeel. Dit vraagt om een investeringsagenda voor technisch onderwijs, voor fundamenteel en industrieel onderzoek en voor nieuwe industrie rondom verwerking en recycling van kritieke metalen.

4 Effecten beperkt op korte termijn, groter op middellange termijn

De effecten van veranderingen op korte termijn zijn beperkt. Dit geldt zowel voor systeemkeuzes als voor technologiekeuzes. Veel maatregelen hebben een aanzienlijke doorlooptijd. Daarnaast wordt er op dit moment ook relatief weinig capaciteit geïnstalleerd in vergelijking met de geplande te installeren capaciteit voor de periode vanaf 2030. Maatregelen zullen in absolute zin dus ook meer effect hebben

als de energietransitie versnelt. Tegelijkertijd zijn de geopolitieke risico's op verstoringen vanaf vandaag al aanwezig.

Voor de systeemkeuzes gaan deze effecten spelen vanaf de momenten dat grootschalige elektriciteitsopslag van de grond komt – vanaf 2035 / 2040. Voor technologiekeuzes gaan deze effecten spelen vanaf de grote verwachte vervangingsopgave en de momenten dat nieuwe (CRM-arme) technologieën grootschaliger beschikbaar zijn. Het realiseren van deze potentie op middellange termijn vraagt echter wel op korte termijn al om actie.

5 Energietransitiebeleid is afhankelijk van andere beleidsterreinen

Het ontwerp van het energiesysteem is op dit moment dienend aan de energievraag van verschillende sectoren en de maatschappij. Tegelijkertijd is energiebesparing en het afstemmen van vraag en aanbod – zoals geschetst in Hoofdstuk 7 – van groot belang om ook de afhankelijkheid en ketenrisico's van kritieke metalen voor het energiesysteem te beperken.

Om de energietransitie als geheel succesvol te realiseren en de klimaatdoelen voor de periode tot 2050 te realiseren, ligt er daarom een sterke afhankelijkheid van keuzes op andere beleidsterreinen. De voornaamste hierin zijn de toekomst van de industrie en de toekomst van het mobiliteitssysteem. Ook op die beleidsterreinen is dus inzet aan de vraagkant nodig, wanneer de ambitie is om de kritieke materiaalvraag vanuit het energiesysteem te beperken.

Bijlagen



BIJLAGE I.

Onderzoeksmethode

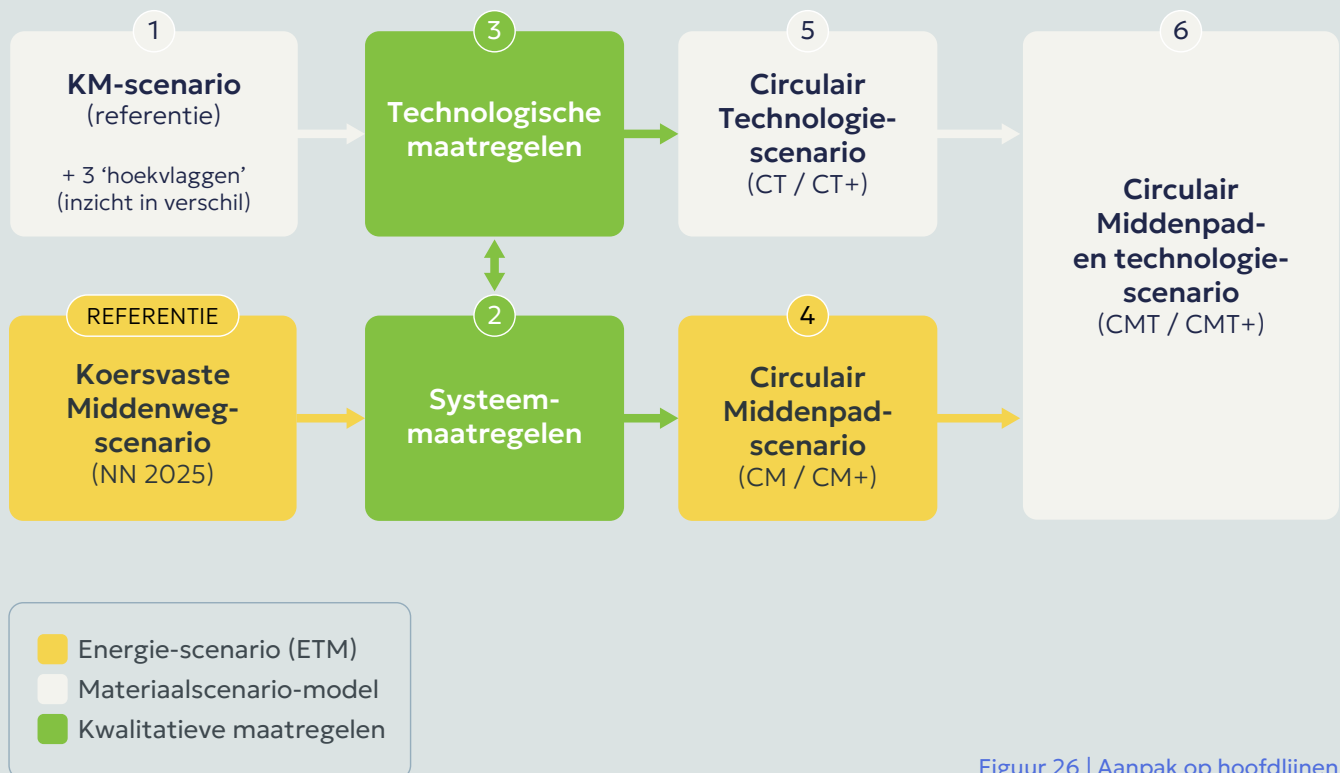
Om inzicht te creëren in de kritieke materiaalvraag van een duurzaam energiesysteem, is in dit onderzoek gebruik gemaakt van twee verschillende modellen. De resultaten van deze modellen leiden gezamenlijk tot de resultaten en conclusies.

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

- **Berekenen kritieke materiaalvraag van Koersvaste Middenweg (KM-)scenario**, op basis van geïnstalleerd vermogen in dit scenario. In deze stap is ook de kritieke materiaalvraag van de drie 'hoekvlagscenario's' berekend: *Eigen Vermogen*, *Gezamenlijke Balans* en *Horizon Aanvoer*.
- **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 en gesprekken met systeemexperts.
- **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 toegepast wetenschappelijk onderzoek en gesprekken met materiaalexperts.

- **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. Deze systeemmaatregelen zijn gemodelleerd tot twee scenario's: Circulair Middenweg (CM) en Circulair Middenweg + (CM+)
- **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+)
- **Berekenen van de kritieke materiaalvraag van het 'Circulaire Middenweg- en Technologie' (CMT-) scenario**, in twee varianten: een CMT-variant (CM plus CT) en CMT+ variant (CM+ plus CT+). Daarvoor is een dynamische materiaalstroomanalyse gebruikt. Met deze wijze van modellering is veel informatie uit het model te halen.

Deze aanpak is op hoofdlijnen geschetst in Figuur 26.



Figuur 26 | Aanpak op hoofdlijnen

BIJLAGE II.

Scenario's energietransitiemodel (ETM)

De ontwikkelde energietransitiemodellen zijn online beschikbaar. Onderstaande tabel geeft toegang tot deze modellen.

	Jaar	Scenario's
Kopie van KM	2025	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30393
	2030	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30392
	2035	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30394
	2040	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30391
	2050	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30390
Kopie van EV	2030	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30402
	2035	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30405
	2040	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30398
	2050	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30395
Kopie van HA	2030	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30404
	2035	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30407
	2040	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30399
	2050	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30397
Kopie van GB	2030	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30403
	2035	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30406
	2040	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30401
	2050	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30396

Als basis voor deze studie zijn er 1-op-1 kopieën gemaakt van de Netbeheer Nederland 2025 scenario's. Dit had een technische reden. De linkjes zijn hierboven gedeeld. De originele scenario's in het ETM zijn te vinden via de website <https://2025-01.energytransitionmodel.com/> en de scenariodocumentatie is te vinden op <https://www.netbeheernederland.nl/artikelen/nieuws/netbeheer-nederland-scenarios-editie-2025>

Tijdens deze studie zijn de volgende scenario's gemaakt. De onderliggende strategieën zijn beschreven in dit rapport. Voor verdere scenariodocumentatie kan contact worden gezocht met de auteurs.

	Jaar	Scenario's
Circulaire Middenweg (CM)	2030	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30341
	2035	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30347
	2040	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30352
	2050	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30274
Circulaire Middenweg plus (CM+)	2030	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30342
	2035	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30348
	2040	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30353
	2050	https://2025-01.energytransitionmodel.com/scenarios/30275

BIJLAGE III.

Grootste onzekerheden

De basis voor dit onderzoek wordt gevormd door 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

De grootste onzekerheden in het energiesysteem, die ook invloed hebben op de benodigde opwek-, opslag- en transportcapaciteit van elektriciteit:

- 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.
- 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. Daarbij gaat het zowel om de huidige energie-intensieve (basis) industrie als om de groeiende energievraag van datacenters.
- 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.³³

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 (2021) dat 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. N-ion batterijen komen in het JRC-rapport niet voor, maar worden anno 2025 al commercieel toegepast in Chinese elektrische auto's.⁴⁹ 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.⁵⁰ Dit betekent een mogelijk lagere energie-opwekking door wind-op-zee dan verwacht. Daarmee wordt de materiaalintensiteit per opgewekte eenheid energie hoger.
- 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.⁵¹ 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.

BIJLAGE IV.

Aanbevelingen vervolgonderzoek

Dit rapport is met beperkte middelen opgesteld. Daarom bouwt het onderzoek voort op bestaande modellen, die oorspronkelijk deels voor andere doeleinden zijn ontwikkeld. Om een zo goed mogelijk inzicht te bieden, is gebruik gemaakt van een combinatie van het energietransitiemodel en een model voor de materiaalvraag.

Een belangrijke kanttekening is dat het lastig is om dit soort onderzoeken goed te modelleren. Voor deze analyses zijn er verschillende soorten modellen beschikbaar, die ieder echter ook weer hun eigen beperking hebben om de juiste conclusies te kunnen trekken.

- Voor het soort beleidsvragen dat gesteld wordt, worden vaak macro-economische *integrated assessment* modellen gebruikt. Deze zijn echter te grofmazig richting de soorten technologie die toegepast worden, wat in dit onderzoek zichtbaar wordt door de vele mogelijkheden om de kritieke materiaalvraag te verlagen.
- Voor veel materiaalstroomanalyses worden *input-output* en *life cycle inventory* datasets gebruikt. Deze zijn echter niet geschikt om de kleine volume-metalen (zoals de meeste kritieke materialen) te analyseren, en om systeemdynamiek zoals leveringszekerheid en capaciteitsschaarste op een goede manier mee te nemen in de afweging.

Ook dit onderzoek heeft hierdoor een aantal duidelijke verbeterpunten, die om aandacht vragen in vervolgonderzoek. De belangrijkste verbeterpunten zijn:

- **Modellering van donkerluwte en afschakeling in energietransitiemodellering.** In het gebruikte energiemodel (ETM) is de modellering van leveringszekerheid zeer beperkt. Daardoor zijn de effecten op batterijen van (sectorspecifieke) afschakeling bij stroomtekort nog zeer onzeker.

Daardoor is dus ook de materiaalvraag die wordt 'bespaard' door het weghalen van batterijen onzeker. Ook voor de KM-scenario's zelf is geen diepgaande leveringszekerheidsanalyse gedaan. Hierdoor kunnen geen definitieve uitspraken worden gedaan over de uiteindelijke behoefte aan nieuwe back-up centrales of het effect op leveringszekerheid. Vervolgonderzoek moet expliciet varianten kunnen doorrekenen voor donkerluwte (duur + frequentie), prioritering van afschakelbare vraag (industrie, datacenters) en bijbehorende spelregels. De Netbeheer Nederland scenario's editie 2025 verwijst hiervoor naar de Monitor Leveringszekerheid van TenneT.

- **Recycling en hergebruik in het materiaalmodellering.** De materialenmodule is uitgebreid ten opzichte van een eerder opgesteld materialenmodel, maar neemt recycling en hergebruik nog niet mee. Om zo veel mogelijk beleidsrelevantie te hebben, is het nodig om minimaal de volgende onderdelen in een volgende stap goed op te nemen: (i) vervangingsvraag op basis van levensduurverlengingen; (ii) vrijkomende *end-of-life* materiaalstromen; (iii) mogelijkheden voor direct hergebruik; en (iv) terugwinpercentages en -verliezen.
- **Kabels & infrastructuur.** De materiaalvraag naar hoog-, midden- en laagspanningskabels is in deze studie niet meegenomen, terwijl koper in absolute zin leidt tot een grote materiaalvraag. Het beter modelleren van de kopervraag begint bij betere inschattingen vanuit netbeheerders over de benodigde hoeveelheid koper in de verschillende scenario's. In vervolgonderzoek moeten kabels daarom óf expliciet worden meegenomen in de modellering óf worden toegevoegd op basis van een orde-grootte-indicatie per scenario.

BIJLAGE V.

Bronvermelding

- [1] **International Energy Agency** (2021). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. IEA. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- [2] **Hund, K., La Porta, D., Fabregas, T., Laing, T. & Drexhage, J.** (2020). Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. The World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/4dd08d0c-ab51-4955-a464-35a95201a5eb>
- [3] **Weizman, J.** (1 november 2025). China's pause on rare earth export controls extends to EU. Politico. <https://www.politico.eu/article/china-suspension-rare-earths-export-controls-extends-to-eu/>
- [4] **RAI Vereniging** (5 juni 2025). Dringend optreden nodig nu Chinese exportbeperkingen op zeldzame aardmetalen de Europese toeleveringsketens in de auto-industrie verstoren. RAI Vereniging. <https://www.raivereniging.nl/actueel/nieuws/dringend-optreden-nodig-nu-chinese-exportbeperkingen-op-zeldzame-aardmetalen-de-europese-toeleveringsketens-in-de-auto-industrie-verstoren/>
- [5] **Europese Commissie** (2024) Verordening (EU) 2024/1252 van het Europees Parlement en de Raad van 11 april 2024 tot instelling van een kader voor het waarborgen van een veilige en duurzame voorziening van kritieke grondstoffen. Publicatieblad van de Europese Unie. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj>
- [6] **Europese Commissie** (2025). RESourceEU Action Plan. Publicatieblad van de Europese Unie. https://single-market-economy.ec.europa.eu/document/download/e9ac2181-0dc7-4e61-a964-ba0a39c2aea8_en
- [7] **Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, Ministerie van Buitenlandse Zaken, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat** (2022). Nationale Grondstoffenstrategie: Grondstoffen voor de grote transitie. Rijksoverheid. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2022/12/09/bijlage-nationale-grondstoffenstrategie>
- [8] **Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat** (2025). Nationaal Programma Circulaire Economie 2025. Rijksoverheid. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2025/10/13/bijlage-1-bij-kamerbrief-nationaal-programma-circulaire-economie-2025>
- [9] **Copper8, Metabolic, 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-energiesysteem.pdf>
- [10] **CE Delft** (2026) De bijdrage van circulariteit aan een betaalbare energietransitie
- [11] **Netbeheer Nederland** (2023). Integrale infrastructuurverkenning 2030–2050. Netbeheer Nederland. https://www.netbeheernederland.nl/sites/default/files/II3050_eindrapport__286.pdf
- [12] **Centraal Bureau voor de Statistiek** (2025). Nederlandse afhankelijkheid van kritieke materialen. CBS. <https://www.cbs.nl/nl-nl/publicatie/2025/40/nederlandse-afhankelijkheid-van-kritieke-materialen>
- [13] **Netbeheer Nederland** (2025). Netbeheer Nederland scenario's editie 2025. Netbeheer Nederland. <https://www.netbeheernederland.nl/artikelen/nieuws/netbeheer-nederland-scenarios-editie-2025>
- [14] **Ministerie van Economische Zaken en Klimaat** (2023). Nationaal Plan Energiesysteem. Rijksoverheid. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2023/12/01/nationaal-plan-energiesysteem>
- [15] **Ministerie van Klimaat en Groene Groei** (16 september 2025). Actieplan windenergie op zee [Kamerbrief]. Rijksoverheid. https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/brieven_regering/detail?id=2025Z16953&did=2025D39425
- [16] **Europese Commissie** (2023). Critical raw materials. Europese Commissie. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en
- [17] **Joint Research Centre** (2023) The European Commission's Critical Raw Material Dashboard. <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/eu-critical-raw-materials>
- [18] **U.S. Geological Survey** (2025). Mineral Commodities Summary 2025. USGS. <https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2025>
- [19] **International Energy Agency** (2025). Global Critical Minerals Outlook 2025. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025>
- [20] **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>
- [21] **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>
- [22] **Carrara, S., Baldassarre, B., Jakimow, 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. Publications Office of the European Union. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC141759>
- [23] 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>

- [24] **Potting, J., Hanemaaijer, A., Delahaye, R., Ganzevles, J., Hoekstra, R. & Lijzen, J.** (2018). Circulaire economie: wat we willen weten en wat we kunnen meten. PBL. <https://www.pbl.nl/publicaties/circulaire-economie-wat-willen-we-weten-en-wat-kunnen-we-meten>
- [25] **De Boer, R., Smeding, S.F. & Zondag, H.A.** (2025). Overzicht industriële warmteopslagtechnologie en toepassing. TNO. <https://resolver.tno.nl/uuid:7699fdc0-a724-4ed1-9fb6-5b9a5991ea7c>
- [26] **Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat** (2024). Voortgang duurzaamheidskader biograndstoffen [Kamerbrief]. Rijksoverheid, Den Haag. <https://open.overheid.nl/documenten/dpc-fead5c28fe681405f01b5eb7022779dd3cf8add8/pdf>
- [27] **Interview** met expert werkzaam in ontwerp van elektrische motoren (november 2025).
- [28] **DNV Energy Systems** (2022). Lifetime extension and optimal lifecycle offshore wind turbines. Topsector Energy. https://topsectorenergie.nl/documents/335/20220414_RAP_DNV_Lifetime_extension_and_optimal_lifecycle_offshore_wind_turbin_tUf1Zv2.pdf
- [29] **Interview** met expert werkzaam in het produceren van elektrische motoren en magnetische assemblies (november 2025).
- [30] **Gemeente Amsterdam, AMS Institute, Universiteit Leiden, & PVMD** (2025). De impact van zonnepanelen in steden. Circulaire Maakindustrie. https://circulairemaakindustrie.nl/app/uploads/2025/02/05350_levensduurverlenging_zonnepanelen_v3.pdf
- [31] **Interview** met onderzoekers in fotonvoltaïsche technologieën (oktober 2025)
- [32] **Seel, J., Kemp, J. M., 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. <https://escholarship.org/uc/item/4q73115g>
- [33] **Heynes, G.** (17 oktober 2025). Ark Energy bags state approval for 3.1GWh 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/>
- [34] **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>
- [35] **Interview** met onderzoeker op het gebied van elektrochemische energieopslag (oktober 2025)
- [36] **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/>
- [37] **Reuters** (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/>
- [38] **Maine, E., & Seegopaul, P.** (2016). Accelerating advanced-materials commercialization. Nature materials, 15(5), 487-491.
- [39] **U.S. Geological Survey** (2020). Mineral Commodities Summary 2020. USGS. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>
- [40] **KU Leuven** (2022). Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge. Eurometaux. <https://european-metals.eu/metals-for-clean-energy-ku-leuven-study/>
- [41] **Johnson Matthey** (2025). PGM Market Report. Johnson Matthey, Londen. <https://matthey.com/pgm-market-research>
- [42] **Wetenschappelijke Klimaatraad** (2026). Kiezen of verliezen: naar een industrie die past in een toekomstbestendig Nederland. WKR. <https://www.wkr.nl/documenten/2026/01/29/wkr-advies006-verduurzaming-industrie>
- [43] **TNO** (2026). Verkenning van vraagrespons in de Nederlandse energie-intensieve industrie. TNO. <https://publications.tno.nl/publication/34645565/P4OmwFqj/TNO-2026-R10158.pdf>
- [44] **ElaadNL** (2025). Bidirectioneel laden: welke kant gaat het op? ElaadNL. <https://elaad.nl/wp-content/uploads/2025/09/ElaadNL-Outlook-Bidirectioneel-laden.pdf>
- [45] **Biemans, A., Hommelberg, M., Janssen, G., Poiesz, & T.** (2025). Netimpact woningen met warmtepomp, op basis van slimme meterdata. BDH. <https://bdh-advies.nl/wp-content/uploads/2025/02/Rapportage-Netimpact-warmtepompen-in-de-gebouwde-omgeving.pdf>
- [46] **TNO** (2024). Op weg naar circulaire elektrolyzers: verkenning van scenario's en strategieën. Rijksoverheid. <https://open.overheid.nl/documenten/c7ac9c28-4087-4f5c-ac78-b2a4f3df4d04/file>
- [47] **Business & Human Rights Resource Centre** (2026). Transition Minerals Tracker. Business & Human Rights Resource Centre, Londen. <https://www.business-humanrights.org/en/from-us/transition-minerals-tracker/>
- [48] **TNO** (2025). Nederlandse control points via High-Tech Megaclusters. TNO. https://www.tno.nl/publish/pages/13234/tno_paper_high-tech_megaclustersnl_2.pdf
- [49] **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/>
- [50] **F Ferreira, C. S., Larsen, G. C., & Sørensen, J. N.** (2026). A theoretical upper limit for offshore wind energy extraction. Cell Reports Sustainability, 3(1)
- [51] **TNO** (24 oktober 2022). Breakthrough Electrolyser Development: 200 times less iridium needed. TNO. <https://www.tno.nl/en/newsroom/2022/10/breakthrough-electrolyser-development/>



Copper(8)

Quintel

