



Universiteit
Leiden

Copper8

METAALVRAAG VAN ELEKTRISCH VERVOER

Op weg naar duurzaam, eerlijk en toekomstbestendig personenvervoer

VOORWOORD

Wereldwijd werken we aan een verschuiving van een economie op fossiele brandstoffen naar een meer duurzaam economisch systeem. Dit biedt ons de mogelijkheid om opnieuw na te denken over hoe wij met grondstoffen omgaan, en hoe we een economie bouwen die onze kwaliteit van leven daadwerkelijk verbetert.

Dit onderzoek richt zich op het opnieuw ontwerpen van ons mobiliteitssysteem. In de transitie naar een klimaatneutrale economie lijken elektrische voertuigen een kansrijke oplossing voor schoner personenvervoer. Als gevolg daarvan richten zowel overheden als autoproducenten zich op de productie van elektrische auto's.

Onderzoek voor de Nederlandse situatie laat echter zien dat er beperkingen zijn in de toeleveringsketen van kritieke metalen, die nodig zijn voor elektrische voertuigen. De productie van sommige van deze metalen, zoals nikkel, praseodymium, neodymium, kobalt, dysprosium en lithium, zou de komende tien jaar moeten verdrievoudigen om te kunnen voldoen aan de verwachte vraag voor de productie van elektrische voertuigen.

Wanneer we klimaatneutraal personenvervoer ontwerpen met deze complexe ketens in ons achterhoofd, is het belangrijk om te beseffen dat hiernieuwe afhankelijkheden ontstaan. Sommige delen van ons mobiliteitssysteem zullen we opnieuw moeten ontwerpen om op lange termijn echt toekomstbestendig te kunnen zijn.

Bij een duurzame, eerlijke en veerkrachtige transportsector hoort een verminderde afhankelijkheid

van private personenauto's. Dat kan door nieuwe mobiliteitsconcepten te ontwikkelen die efficiënter gebruik maken van de al aanwezige voertuigen, en met verbeterd en meer hoogfrequent openbaar vervoer. Ook is het belangrijk om binnen de sector een circulaire economie te gaan ontwikkelen, om zo optimaal mogelijk met de beperkt beschikbare grondstoffen om te gaan.

Sinds de publicatie van dit rapport op Springtij Forum in september 2019 is dit verder uitgebreid, met onder meer een doorkijk naar Europees niveau en scherpere oplossingsrichtingen. De aanbevelingen richten zich op Nederland en Europa, maar zijn ook daarbuiten toepasbaar.

Dit is een tweede rapport in een serie van studies rondom de kritieke metaalvraag van onze nieuwe, klimaatneutrale economie. Hierbij sluiten we aan op een eerder onderzoek naar de kritieke metaalvraag van zonnepanelen en windturbines. Het doel van deze studies is om te begrijpen welke nieuwe afhankelijkheden er komen kijken bij een klimaatneutrale economie. Daarbij willen we kijken wat we kunnen doen om snel en veilig toe te werken naar deze nieuwe economie, waarbij we zowel rekening houden met maatschappelijke behoeften als met de beschikbaarheid van kritieke metalen.



SAMENVATTING

De huidige globale productie van sommige kritieke metalen moet drastisch worden opgeschaald om de grootschalige overstap naar elektrisch vervoer mogelijk te maken. Als we naar prognoses kijken, groeit de wereldwijde vraag naar een aantal specifieke metalen die nodig zijn voor het uitrollen van elektrisch vervoer tot bijna drie keer de huidige wereldwijde jaarproductie. Naast toepassing in elektrische auto's zijn deze metalen

ook nodig voor onder andere windmolens, elektronica en industriële toepassingen.

We verwachten dat er aanzienlijke inspanningen nodig zijn om de productie van een aantal kritieke metalen mee te laten schalen met de snelle groei van de vraag hiernaar. Daarbij gaan we uit van de huidige stand van de mijnbouwtechniek en de te verwachten technologische innovatie van elektromotoren en accu's in de komende tien jaar. Het gaat specifiek om de metalen nikkel, kobalt en lithium (voor de accu's) en praseodymium, neodymium en dysprosium (voor de elektromotoren).

Omdat Nederland ernaar streeft voorop te lopen met de overschakeling van fossiele auto's naar elektrische auto's zullen we ook voorop lopen bij het gebruik van deze metalen. Het Nederlandse pad is echter wel hetgeen dat nodig is om de wereldwijde klimaatdoelen te halen. In het rapport hanteren we daarom een referentiewaarde om de Nederlandse vraag in wereldwijd perspectief te plaatsen. Omdat er meerdere referentiewaarden mogelijk zijn, kijken we naar ons aandeel van zowel de autovoorraad (0,9%) als de bevolking (0,2%).

COMPLEXE KETENS VAN KRITIEKE METALEN

De ketens van kritieke metalen zijn lang en complex. Opschaling van mijnbouwproductie kost vaak een aanzienlijke hoeveelheid tijd en grote investeringen. Als een nieuwe mijn over tien jaar wil produceren, moeten investeringen nu al gedaan zijn. Veel kritieke metalen worden niet op zichzelf gewonnen, maar zijn een bijproduct in de productie van een ander metaal. Daarnaast worden kritieke metalen gebruikt om geopolitieke invloed uit te oefenen. Ook worden mijnbouwactiviteiten gelinkt aan aanzienlijke milieuschade en soms aan mensenrechtenschendingen.

Tenzij er consistent klimaatbeleid wordt gehanteerd waarin de productiecapaciteit van deze metalen op een duurzame wijze wordt uitgebreid, is er een reële kans dat de behoefte naar deze metalen de komende jaren groter zal zijn dan het aanbod. Onvoldoende aanbod of tijdelijke verstoringen in de toevoerketens van kritieke metalen zal de grootschalige implementatie van duurzame technologieën (zoals de uitrol van elektrisch vervoer) vertragen. Dit kan een rem zetten op het halen van de klimaatdoelstellingen. Daarbij geldt ook dat de wereldwijd toenemende vraag naar kritieke metalen in toenemende mate leidt tot geopolitieke spanningen.

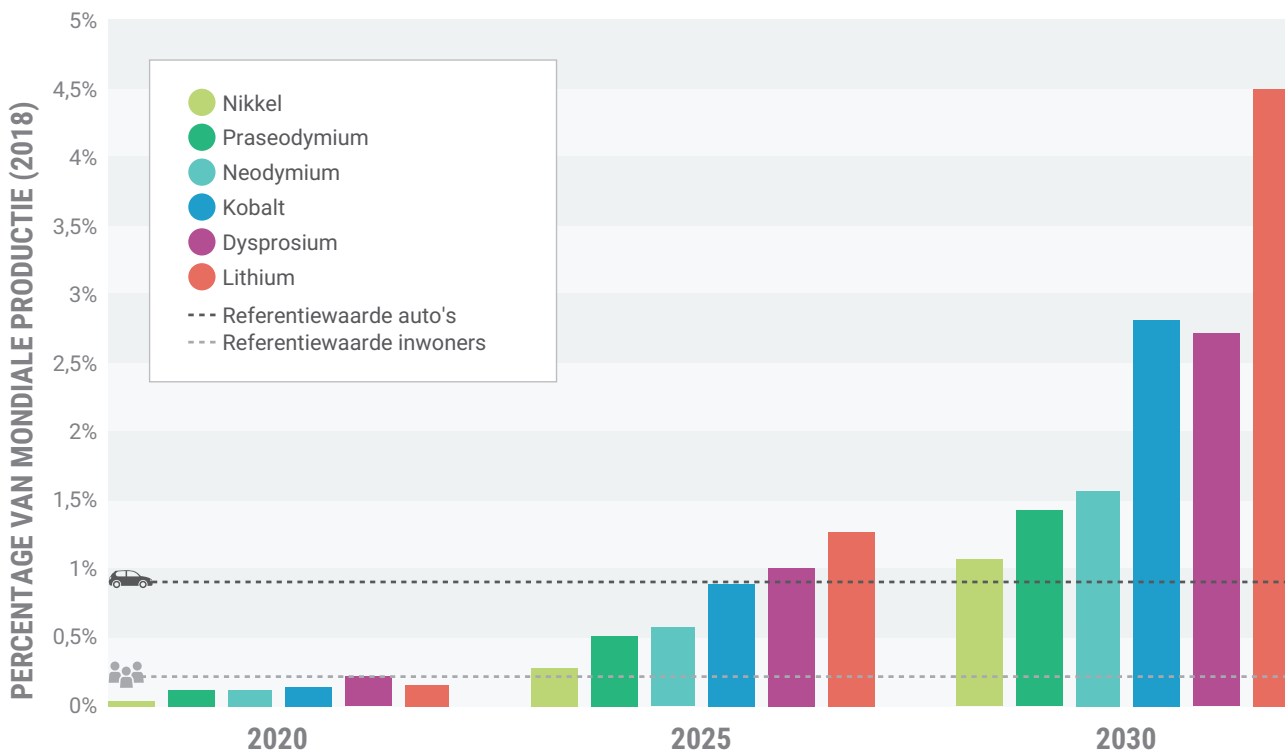


Fig. 1

Benodigde kritieke metalen voor elektrische voertuigen in Nederland in 2020, 2025 en 2030, als percentage van de huidige (2018) wereldwijde jaarproductie van deze metalen.

DUURZAME GROEI IN MIJNBOWPRODUCTIE ESSENTIEEL

Vanwege de vele factoren die de mijnbouwproductie beïnvloeden, zijn we in de analyses uitgegaan van de huidige mijnbouwproductie. Gezien de groeiende vraag is er een groei van de mijnbouwproductie te verwachten. Deze groei kan echter leiden tot aanzienlijke lokale milieuschade en toenemende sociale problemen. Met de sterke groei van de vraag naar duurzame technologieën wordt het dus belangrijker om te sturen op duurzame en eerlijke mijnbouw.

DRIE OPLOSSINGSRICHTINGEN VOOR HET VERLAGEN VAN DE VRAAG

Om de klimaatdoelen te halen is het essentieel om voertuigen op fossiele brandstoffen uit te faseren. Grootschalige uitrol van waterstofauto's lijkt voor personenvervoer geen reële mogelijkheid in de periode tot 2030, omdat duurzame waterstof beperkt beschikbaar is en hard nodig voor andere toepassingen. Om de vraag naar kritieke metalen beheersbaar te houden, zien wij op het gebied van elektrische voertuigen drie oplossingsrichtingen:

01 Technologische innovatie

Door substitutie van kritieke metalen met andere metalen kan de afhankelijkheid van specifieke metalen worden beperkt. Dit lijkt maatschappelijk de meest eenvoudige oplossing, maar is technisch uitdagend wanneer we de bestaande prestaties van elektromotoren en accu's willen behouden.

02 Kleinere accu's

Door vaker te kiezen voor voertuigen met een kleiner bereik neemt de benodigde hoeveelheid metalen voor de accu af. De metaalvraag voor de elektromotor blijft echter bestaan.

03 Minder voertuigen

Door effectiever gebruik van onze voertuigen kan het aantal voertuigen afnemen. Daarmee vermindert direct de behoefte aan kritieke metalen. Dit is verreweg de meest effectieve oplossing, maar maatschappelijk de meest complexe.

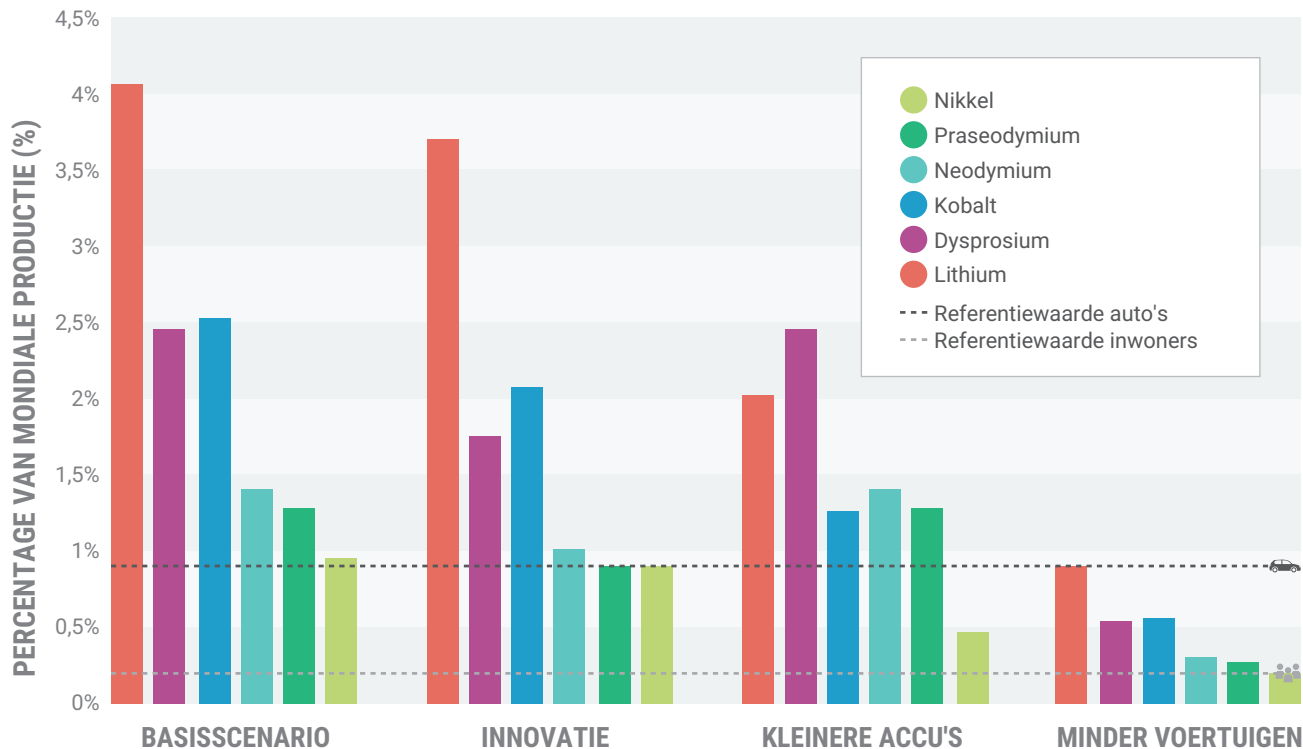


Fig.
2

Drie scenario's voor het beperken van de metaalvraag van elektrisch vervoer in Nederland, ten opzichte van de huidige wereldwijde jaarproductie van deze metalen. De lijnen geven een referentiewaarde voor het Nederlandse aandeel voertuigen (0,9%) en inwoners (0,2%).

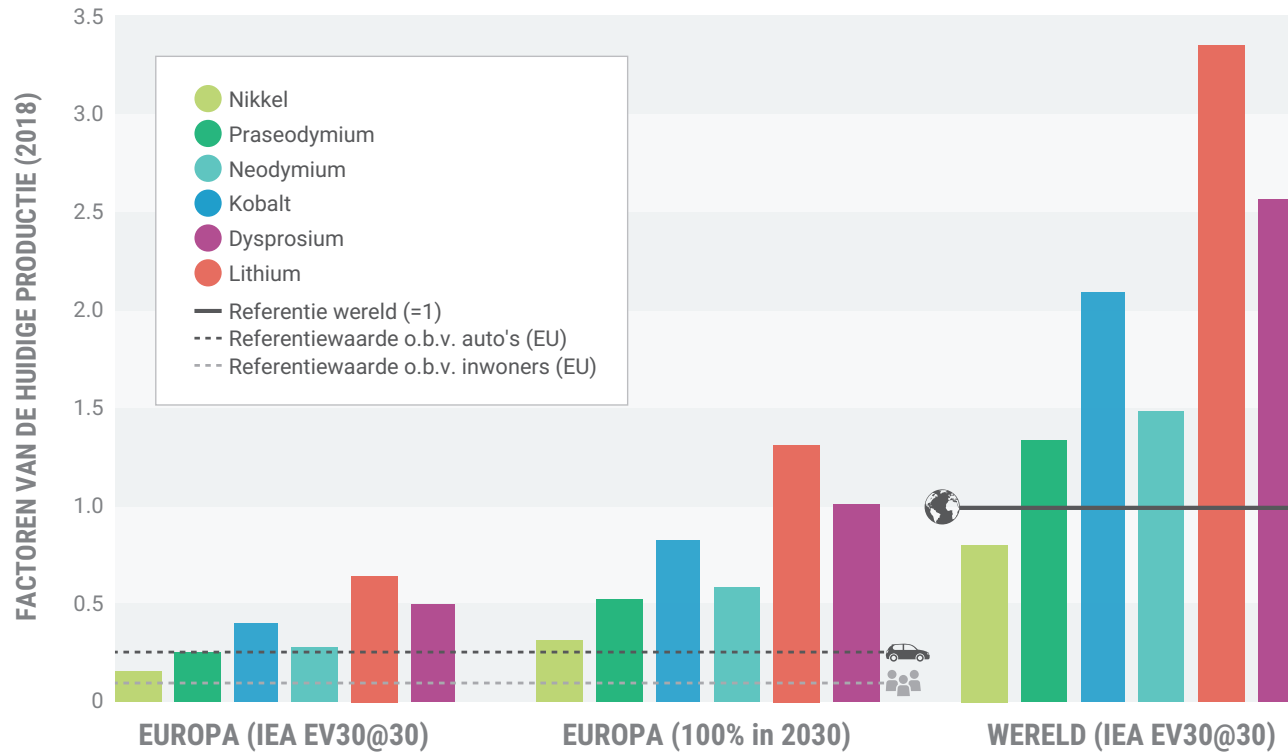


Fig. 3 Benodigde aandeel van kritieke metaalproductie voor elektrisch personenvervoer in 2030, als factor van de huidige wereldwijde jaarproductie (2018).

METAALVRAAG EUROPA EN DE WERELD

Naast Nederland hebben we ook gekeken hoe de jaarlijkse metaalvraag voor elektrische auto's zich op Europees en mondiaal niveau ontwikkelt. Op basis van IEA-scenario's heeft Europa in 2030 15% tot 70% van de huidige mondiale productie van de besproken kritieke metalen nodig. Wanneer 100% van de Europese nieuwverkoop in 2030 elektrisch is, heeft Europa voor lithium tot bijna 1,5x de huidige wereldwijde jaarproductie nodig. Op basis van de IEA-scenario's voor de wereld is er in 2030 voor sommige metalen tot ruim

het dubbele van de huidige de jaarproductie nodig voor het produceren van voldoende elektrische auto's.

AANBEVELINGEN

Om de klimaatdoelen te halen - zowel nationaal als internationaal - is een sterke groei van elektrische auto's nodig tot en met 2030. Ook na 2030 blijven nieuwe elektrische auto's nodig, als vervanging van auto's die het einde van hun levensduur hebben bereikt. Om op nationaal niveau en binnen Europa te komen tot een mobiliteitssysteem op basis van elektrische voertuigen,

dat ook qua materialen toekomstbestendig is, doen wij acht aanbevelingen: vijf voor Nederland - die tevens toepasbaar zijn op nationaal niveau in andere landen - en drie voor Europa.

Aanbevelingen voor Nederland (nationaal niveau)

AANBEVELING 1 Stimuleer nieuwe mobiliteitsconcepten met minder voertuigen

AANBEVELING 2 Stimuleer elektrische voertuigen met kleine accu's voor regionale oplossingen

AANBEVELING 3 Investeer in toekomstbestendige infrastructuur

AANBEVELING 4 Voorkom onnodige investeringen in bestaande infrastructuur

AANBEVELING 5 Ontwikkel een tweedehands markt voor batterijen

Aanbevelingen voor Europa

AANBEVELING 6 Ondersteun duurzame mijnbouwinitiatieven om de impact op mens en milieu te minimaliseren

AANBEVELING 7 Ontwikkel een Europese recycling-industrie voor kritieke metalen

AANBEVELING 8 Stimuleer de ontwikkeling van nieuwe batterijtypes

INHOUDSOPGAVE

04

00 SAMENVATTING

08

01 INTRODUCTIE

10

02 NEDERLANDSE CONTEXT
& ONTWIKKELINGEN

16

03 METAALBUDGET VOOR
ELEKTRISCH VERVOER

22

04 CONTEXT: EEN
COMPLEXE KETEN

28

05 OPLOSSINGSRICHTINGEN:
DRIE SCENARIO'S

34

06 AANBEVELINGEN

38

07 VERANTWOORDING

42

08 BIJLAGE

01

INTRODUCTIE

In 2015 is in Parijs het klimaatakkoord getekend, waarmee is afgesproken de wereldwijde opwarming van de aarde onder de 2 graden Celcius te houden. In Nederland is in juni 2019 het nationale Klimaatakkoord gepresenteerd, waarin partijen de verplichting aan zijn gegaan om in 2050 de nationale CO₂-emissies met 95% te hebben gereduceerd¹. Emissies uit mobiliteit zijn onderdeel van Parijs, en een van de vijf hoofdonderdelen van het Nederlandse akkoord.

Binnen mobiliteit wordt er voor personenvervoer vaak gekeken naar elektrische auto's als kansrijke oplossing. Elektrische auto's zijn schoner, efficiënter en kunnen gebruik maken van duurzame elektriciteit. De markt groeit gestaag: alle grote autoproducenten hebben inmiddels een elektrisch model op de markt gebracht, en alleen al in Nederland worden iedere maand bijna 2500 elektrische auto's verkocht². Nederland loopt - samen met onder andere Noorwegen - internationaal voorop in de uitrol van elektrisch vervoer.

De productie van die elektrische auto's vraagt om de toepassing van kritieke metalen (voorbeeld: kobalt), onder meer voor de elektromotor en accu's. Wereldwijd is er een groeiende afhankelijkheid van kritieke metalen, wat ook in de media het afgelopen jaar sterker zichtbaar is geworden.³ Door de handelsoorlog tussen de Verenigde Staten en China wordt de afhankelijkheid van Chinese metaalproductie duidelijk zichtbaar, bijvoorbeeld voor het metaal praseodymium.⁴ Wanneer een aantal kritieke metalen niet meer wordt geëxporteerd, kunnen bepaalde producten mogelijk niet meer gemaakt worden. Dat geldt niet alleen voor elektrische auto's, maar ook voor bijvoorbeeld zonnepanelen of industriële apparatuur.

Dit materialenvraagstuk krijgt momenteel nog maar beperkt aandacht. Voor elektrisch vervoer liggen er echter belangrijke vragen. Welke materialen zijn nodig voor de Nederlandse, Europese en wereldwijde opgave, en in welke hoeveelheden? Waar komen deze materialen

vandaan? En hoe kunnen we toekomstig hergebruik van deze materialen organiseren om afhankelijkheid van import te verminderen? Met deze studie willen we inzicht krijgen in deze vragen, en op die manier bijdragen aan een écht toekomstbestendig mobiliteitssysteem.

AFBAKENING: KRITIEKE METALEN IN PERSONENAUTO'S EN LAADINFRASTRUCTUUR

In dit onderzoek maken we de behoefte aan kritieke metalen voor elektrische personenauto's en de bijbehorende laadinfrastructuur in Nederland inzichtelijk. Daarbij kijken we zowel naar voertuigen met alleen een batterij (BEV), als naar hybride voertuigen (PHEV). Lichte, elektrische stadsdistributie valt buiten scope,

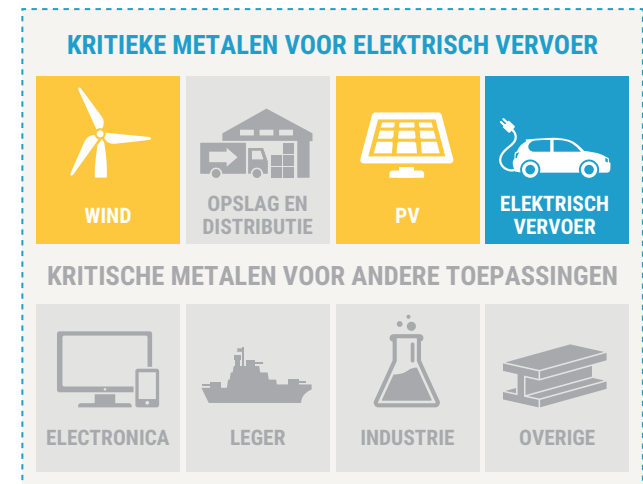


Fig. 4 Dit onderzoek richt zich op de metaalvraag van elektrisch personenvervoer, en vult aan op eerder onderzoek over de metaalvraag van windmolens en zonnepanelen.



omdat de ontwikkelingen hierop lastig voorspelbaar zijn. Ook zwaar vracht- en busvervoer blijven buiten scope: vrachtvervoer omdat andere technologieën daar naar verwachting beter geschikt voor zijn, en busvervoer omdat het een relatief klein aantal voertuigen betreft (+/- 5200).⁵ Tot slot kijken we niet naar de eventueel benodigde netverzwaring, omdat daarbij ook veel andere factoren een rol spelen (voorbeeld: elektrificatie van warmtevoorziening in de gebouwde omgeving).

NEDERLAND ALS VERTREKPUNT

In dit onderzoek nemen we de Nederlandse context als vertrekpunt. Voor de scenario's zijn dan ook het Nederlandse beleid en de doelstellingen uit het nationale klimaatakkoord als uitgangspunt genomen. Daarbij is de extrapolatie naar het Europese en wereldwijde schaalniveau gedaan op basis van inschattingen van de International Energy Agency.

HET VOLGENDE PUZZELSTUKJE

In september 2018 hebben wij de studie *Metaalvraag van de Energietransitie* gepubliceerd.⁶ Die studie liet zien dat Nederland, om haar doelen uit het klimaatakkoord op het gebied van duurzame elektriciteitsproductie te halen, veel kritieke metalen nodig heeft. Met deze studie leggen wij een volgend stukje in deze complexe puzzel van het gebruik van onze kritieke metalen: de metaalvraag van elektrisch personenvervoer.



02

NEDERLANDSE CONTEXT & ONTWIKKELINGEN

Er liggen grote uitdagingen in het halen van de wereldwijde duurzaamheidsdoelstellingen. Binnen Europa en Nederland zijn zowel op klimaat als op circulaire economie doelstellingen geformuleerd. Kijkend naar Nederland wil het land in 2050 de CO₂-uitstoot met 95% hebben verminderd ten opzichte van 1990. In 2030 moet er een reductie van 49-55% zijn gerealiseerd, mede afhankelijk van het ambitieniveau van de rest van de Europese Unie¹.

Naast doelstellingen rondom klimaat hebben zowel Europa als Nederland de ambitie om circulair te worden. De toenemende afhankelijkheid van schaarse grondstoffen is daar een van de redenen voor, naast de explosieve groei in grondstofverbruik - en de bijbehorende milieu-impact - in algemene zin⁷. Ook hiervoor zijn in Nederland doelstellingen geformuleerd: we willen 100% circulair zijn in 2050, en ons primair grondstofverbruik in 2030 met 50% hebben teruggebracht.

Ook wil Europa voorop lopen in de ontwikkeling van elektrisch vervoer. Nederland heeft in 2009 haar eigen ambitie om koploper te zijn geformuleerd.⁸ Inmiddels hebben ook landen als Noorwegen, Zweden en Duitsland hoge ambities. De Nederlandse koplopersrol heeft zich in de eerste jaren vooral gericht op de publiek gefinancierde uitrol van laadinfrastructuur. Daarnaast vallen elektrische auto's in een gunstig belastingregime, al wordt dit vanaf januari 2020 stapsgewijs afgebouwd. Tot slot heeft Nederland de afgelopen jaren ruim baan geboden voor tests met zelfrijdende, elektrische auto's.



NEDERLANDS BELEID: KLIMAAT

In het Klimaatakkoord wordt ingezet op het uitrollen van elektrisch vervoer om de nationale CO₂-emissies te verlagen. Elektrische personenauto's worden daarbij genoemd als bouwsteen van het mobiliteitssysteem van de toekomst, in combinatie met waterstofvoertuigen

voor zwaarder transport en een versterking van het openbaar vervoer. Voor mobiliteit moet dit leiden tot een emissiereductie van 7,3 Mton CO₂ in 2030 (ruim 20%), waarmee de maximale uitstoot moet uitkomen op 25 Mton¹. De doelstellingen voor de aantallen elektrische auto's voor de komende jaren zijn samengevat in tabel 1. Overigens zijn de tussendoelen in het Klimaatakkoord naar beneden zijn bijgesteld ten opzichte van eerder beleid⁹: 166.228 in 2020 (was 200.000), en 589.355 in 2025 (was 1.000.000).

Tabel 1 De doelstellingen op elektrisch vervoer, op basis van het Klimaatakkoord.²

DOELSTELLINGEN ELEKTRISCH RIJDEN			
JAAR	AUTO'S (BEV + PHEV)	LAADPUNTEN	(WAARVAN SNELLAAD)
2020	166.228	222.840	1.322
2025	589.355	678.657	3.699
2030	1.947.946	1.741.500	9.740

Noodzakelijke systeemveranderingen in mobiliteit

Het Klimaatakkoord geeft al aan dat het niet haalbaar is om alle bestaande benzine- en dieselauto's 1-op-1 te vervangen door elektrische auto's. Daarvoor zijn twee belangrijke redenen. Allereerst loopt het verkeer simpelweg vast als gevolg van het absolute aantal voertuigen: de filedruk en vertraging nemen naar verwachting de komende jaren verder toe.¹⁰ Daarnaast lopen belastinginkomsten flink terug bij een afname van fossiel aangedreven auto's: meer dan de helft van Rijksinkomsten uit mobiliteit (in 2018 zo'n € 8 miljard)¹¹ komt van accijns op brandstoffen.

Daarom schetst het Klimaatakkoord drie noodzakelijke systeemveranderingen, die op hoofdlijnen ook worden geadviseerd door de Raad voor de Leefomgeving en Infrastructuur (#1 en #2)¹², en worden onderschreven door de Mobiliteitsalliantie (#3)¹³:

1. Het omvormen van het Infrastructuurfonds naar een Mobiliteitsfonds, waardoor de financiële middelen niet meer worden verdeeld per infrastructuurtype (weg, spoor, waterweg), maar op basis van de mobiliteitsopgave.
2. Het opstellen van regionale mobiliteitsplannen voor bereikbaarheid, waarbij regionaal wordt gekeken naar de beste oplossing in samenhang met verschillende mobiliteitsdiensten.
3. Een andere belastingsystematiek, die uitgaat van 'betalen naar gebruik', eventueel gespecificeerd op basis van emissies, locatie en/of tijdstip.



NEDERLANDS BELEID: CIRCULAIRE ECONOMIE

Nederland heeft de ambitie uitgesproken voor een circulaire economie in 2050. In die ambitie wil Nederland in 2030 de helft minder primaire grondstoffen verbruiken dan in 2015. Met een circulaire economie bouwen we onze afhankelijkheid van kritieke metalen af: van de 54 kritieke metalen die Europa gebruikt, moet 90% worden geïmporteerd⁷. De Transitieagenda Circulaire Maakindustrie schetst het steeds 'slimmer' worden van auto's, waardoor deze efficiënter gebruikt kunnen worden.¹⁴ Als gevolg daarvan zijn minder voertuigen en daarmee minder grondstoffen nodig.



EUROPEES BELEID: KRITIEKE METALEN

De Europese Commissie publiceert elke drie jaar een lijst van voor de EU kritieke materialen. Sinds de introductie van de lijst groeit deze gestaag: van 14 materialen (2011) tot 20 (2014) en 27 (2017). De elementen kobalt, neodymium, dysprosium en praseodymium - die nodig zijn voor batterijen en elektromotoren van elektrische auto's - zijn onderdeel van deze lijst. De Europese Commissie heeft een eigen methode gepubliceerd voor het bepalen of een materiaal 'kritiek' is.¹⁵ Dat dit werk nog steeds gaande is, toont aan dat de Commissie de afhankelijkheid van kritieke metalen serieus neemt. Ook bij andere landen, zoals de Verenigde Staten en Japan, staat dit onderwerp hoog op de agenda.

In Europa is er een groot onderzoeksprogramma rondom batterijen: de European Battery Alliance. Daarnaast heeft het Europese EIT RawMaterials een groot consortium partijen rondom grondstoffen bij elkaar gebracht. Ook binnen het onderzoeksprogramma Horizon2020 spelen kritieke metalen een belangrijke rol. Het World Economic Forum is daarnaast gastheer van de Global Battery Alliance, waar NGO's en bedrijven samen werken aan een duurzame batterijketen.

Naast onderzoek gaat er vanaf januari 2021 Europese wetgeving in rondom de metalen tin, tantaal, wolfram, en goud ('3TG').¹⁶ Omdat deze metalen deels in dezelfde regio's worden gewonnen als kobalt, is de verwachting dat deze 'Conflict Minerals Regulation' ook van invloed gaat zijn op de productie van kobalt in conflictregio's. Naar verwachting heeft de wetgeving invloed op 600 tot 1.000 bedrijven binnen de EU, en het overgrote deel van

de 3TG-producenten buiten de EU. Deze EU-wetgeving volgt daarmee de Amerikaanse Dodd-Frank Act (2010). De Amerikaanse regulering is overigens niet geheel succesvol. Doordat Westerse bedrijven de betreffende regio's simpelweg mijden in plaats van een moeilijk en onzeker verbeteringstraject starten, stortte de lokale economie rondom mijnbouwlocaties in. Kindersterfte in nabijgelegen dorpen is meer dan verdubbeld, en geweld juist toegenomen in plaats van verminderd.¹⁷



NATIONAAL BELEID: ELEKTRISCH VERVOER

Nederland werkt al jaren aan het stimuleren van elektrisch vervoer, en is een van de internationale koplopers op dit vlak. In opeenvolgende plannen wordt het beleid op het gebied van elektrisch (personen)vervoer verder uitgewerkt. Samenvattend worden er doelstellingen geformuleerd en beleidsinstrumenten benoemd om het aantal elektrische auto's te stimuleren. Er is echter nauwelijks aandacht voor de rol van kritieke metalen. De hoofdlijnen van de meest relevante beleidsdocumenten zijn als volgt:

- In het *Plan van Aanpak Elektrisch Rijden* (2009) schetst de Rijksoverheid een eerste beeld van de toekomst van elektrisch vervoer. Voor 2015 wordt er gestreefd naar 20.000 elektrische auto's, voor 2020 naar 200.000, en in 2025 moeten dit er 1.000.000 zijn.⁸
- Het *Plan van Aanpak Elektrisch Rijden in de Versnelling* (2011) behoudt deze doelstellingen, en richt zich in de uitrol op focusgebieden voor de aanleg van laadinfrastructuur, de fiscale maatregelen voor

aanschaf van elektrische auto's (voorbeeld: nultarief voor de bijtelling) en een uniform systeem voor laad- en betaaldienstverlening.⁹

- *De Schets Mobiliteit naar 2040*: veilig, robuust, duurzaam - het meest recente toekomstbeeld van de Nederlandse mobiliteit - benoemt acht speerpunten voor de toekomstige ontwikkeling van mobiliteit, waarvan duurzaamheid er één is. Hierin is nauwelijks aandacht voor de uitrol van elektrisch personenvervoer en wordt slechts beperkt geschetst hoe ander vervoer dan met personenauto's eruit zou kunnen zien.¹⁸
- De *Nationale Agenda Laadinfrastructuur* geeft een aanpak voor de installatie van laadinfrastructuur de komende jaren, en noemt het doel van 1,7 miljoen laadpalen in 2030. Ook wordt ingezet op innovatie, waaronder smart charging, nieuwe mobiliteitsdiensten en autonoom rijden.¹⁹
- Het *Meerjarig Missiegedreven Innovatieprogramma (MMIP) Duurzame Mobiliteit*, dat voortkomt uit de Mobiliteitstafel van het Klimaatakkoord, geeft richting aan de innovatie die nodig is: zowel op de aandrijving van vervoersmiddelen en het gebruik van duurzame energiedragers, als op doelmatige vervoersbewegingen voor mensen en goederen.²⁰

Aanvullende ontwikkelingen

Naast specifiek beleid op elektrisch vervoer zijn er nog enkele aanvullende ontwikkelingen die invloed hebben op de uitrol van elektrisch vervoer. Allereerst is in afgesproken dat wordt toegewerkt naar 100% emissieloze nieuwverkoop van personenauto's in 2030.²¹ Daarnaast stellen steeds meer steden milieuzones in: na Utrecht en Amsterdam nu ook Arnhem, Nijmegen en Rotterdam. Vooralsnog kunnen schone voertuigen mét emissie hier ook naar binnen, maar het is goed denkbaar dat voertuigen met emissies op termijn worden geweerd. Ook werkt het programma 'Beter

Benutten' al sinds 2011 aan het verlagen van het aantal voertuigbewegingen, wat een basis is voor het verlagen van het totaal aantal voertuigen.²²

Tot slot werkt het Rijk aan een Nationale Batterijenstrategie, onder meer vanwege de benodigde kritieke metalen. Belangrijke vraagstukken daarin zijn onder meer de benodigde technologische innovatie, de toenemende geopolitieke afhankelijkheid en de organisatie van inzamel- en recyclingprocessen. Hierin komen ook maatschappelijke dilemma's terug, zoals brandveiligheid en toxiciteit van batterijen.

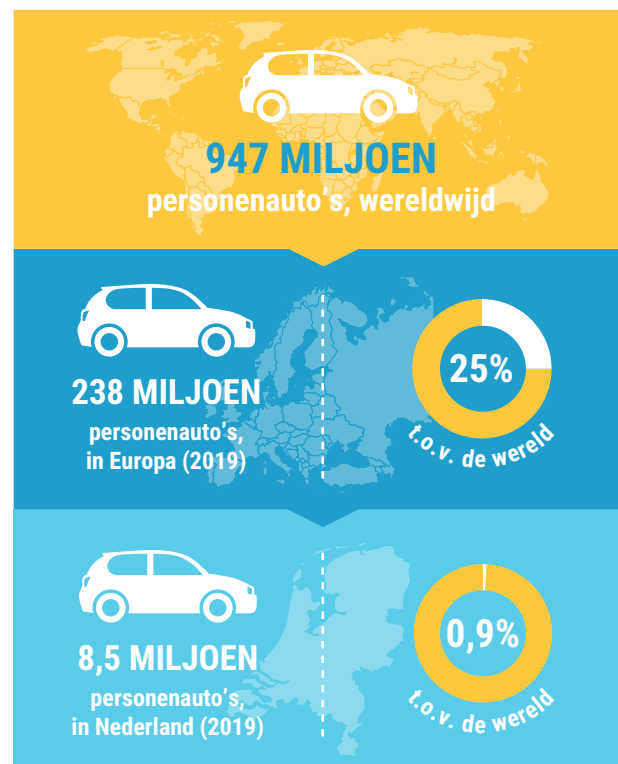


Fig. 5 **Kerncijfers Nederlands en Europees wagenpark in verhouding tot de wereld.**^{23,24}

TRENDS & CIJFERS

Het Nederlandse wagenpark groeit nog steeds, en niet alleen door het elektrische deel. Begin 2019 telde Nederland 12,7 miljoen wegvoertuigen.²³ 8,5 miljoen hiervan waren personenauto's: 0,9% van het wereldwijde totaal.²⁴ Met een Nederlandse stijging van 1,9% in het aantal voertuigen in 2018 (zo'n 160.000) was de groei van het aantal elektrische auto's beperkt: iets meer dan 20.000.²⁰ Enkele kerncijfers over het Nederlandse wagenpark zijn samengevat in figuur 5. Kerncijfers over elektrisch vervoer zijn samengevat in tabel 2.

Tabel 2 **Kerncijfers elektrisch vervoer in Nederland, eind 2018.**²

	2017	2018	GROEI
BEV	21.115	44.984	+ 23.869 (+ 113%)
PHEV	98.217	97.702	- 515 (- 0,5%)
TOTAAL	119.332	142.686	+ 23.354 (+ 20%)
REGULIERE LAADPUNTEN	32.875	35.861	+ 2.986 (+ 9%)
SNELLAAD-PUNTEN	755	1.116	+ 361 (+ 48%)
TOTAAL	33.630	36.977	+ 3.347 (+ 10%)

WATERSTOFAUTO'S: EEN BEPERKTE ROL

Waterstof duikt regelmatig op als de energiedrager van de toekomst, zo ook in personenvervoer. Zowel batterij- als waterstof aangedreven auto's staan hoog in een trendanalyse onder CEO's uit de autosector.²⁵ Technologisch liggen er zeker mogelijkheden voor waterstofauto's: meerdere producenten hebben inmiddels immers modellen gelanceerd, zoals recentelijk de Toyota Mirai en de Hyundai Nexo.

NRC omschreef de vraag of de waterstofauto gaat winnen van de batterij-aangedreven elektrische auto als een 'welles-nietes-discussie'.²⁶ Belangrijkste argumenten vóór de waterstofauto zijn de snelle technologische ontwikkeling van brandstofcellen, de energiedichtheid en de tanksnelheid. Belangrijkste argumenten tegen zijn de waterstofauto zijn de grotere energievraag per kilometer (vergeleken met een batterij-aangedreven auto) en het gebrek aan een infrastructuur om waterstof te transporteren. Overigens geldt zowel voor waterstof- als voor batterij-aangedreven auto's dat de huidige energie vooral fossiel is: waterstof wordt momenteel vooral gewonnen uit aardgas ('grijze' waterstof), en elektrische auto's worden vaak opgeladen met fossiele stroom.²⁷

Waterstof nodig voor verschillende toepassingen

In het toekomstig energiesysteem is het belangrijk om te kijken naar de mogelijke toepassingen van waterstof, waar personenvervoer er slechts één van is. Voor sommige toepassingen zijn minder of zelfs geen alternatieven beschikbaar voor waterstof: denk bijvoorbeeld aan brandstof voor hoge-temperatuurwarmte voor de industrie; aan grondstof voor onder meer kunstmest en de chemische industrie (voorbeeld: verpakkingsmateriaal, medicijnen, kleding), of aan brandstof voor vliegtuig- en scheepsverkeer.^{28,29}



Productiecapaciteit duurzame waterstof is onvoldoende

De huidige Nederlandse productie van 'groene' (uit duurzame energie) en 'blauwe' (uit aardgas, met CCS) waterstof is zo goed als nihil, het jaarlijkse verbruik is zo'n 100 PJ. Wanneer we toe willen naar duurzame waterstofproductie is het dus eerst nodig om deze basisbehoefte duurzaam te produceren, waarna er opgeschaald moet worden richting de 200 of zelfs 300 PJ in 2030.²⁶

Waterstofauto's geen prioriteit

Vanuit de beperkte beschikbaarheid van duurzame waterstof moeten er dus keuzes gemaakt worden in de toepassing. Over waarvoor waterstof het beste ingezet kan worden, bestaat nog geen wetenschappelijke consensus. Er lijken - in ieder geval tot 2030 - echter andere functies dan personentransport te zijn waar waterstof harder nodig is voor een klimaatneutrale economie, vooral omdat goede alternatieven daar ontbreken. Dit is gevisualiseerd in de prioriteitenladder voor de toepassing van waterstof (figuur 6): auto's voor personenvervoer hebben daar een lage prioriteit. Mochten er toch waterstofauto's worden geïntroduceerd, dan is het aantal waarschijnlijk relatief beperkt ten opzichte van het benodigde aantal emissievrije auto's. Voor deze studie laten we waterstofauto's daarom buiten beschouwing in het toekomstig personentransport per auto.

De CO₂-winst van elektrisch rijden



Elektrische auto's hebben een flink lagere CO₂-uitstoot dan fossiel aangedreven auto's. Het IEA heeft recent een overzicht gepubliceerd op basis waarvan we kunnen stellen dat - voor de Nederlandse situatie - een elektrische auto over zijn hele levensduur zo'n 50% minder CO₂ uitstoot, ten opzichte van een gelijksoortige benzineauto. De CO₂-besparing kan oplopen tot 70% als de Nederlandse energiemix verder decarboniseert, en kan nog verder verbeteren bij bij schonere productie en een langere levensduur van batterijen.³⁰

Er is echter regelmatig discussie over de duurzaamheid van EVs. Verschillende LCA-studies zouden naar verwachting ruwweg dezelfde resultaten moeten laten zien. Dat is echter niet het geval. Hoe komt dit?

LCAs nemen diverse variabelen mee, zoals de impact bij de productie van de auto en hoe duurzaam de gebruikte electriciteit is. Voor het bovenstaande getal van 50% CO₂ besparing zijn we uitgegaan van een elektrische

auto met een relatief grote batterijcapaciteit (58 kWh), de Nederlandse energiemix van 2017, en een gemiddelde milieuschade bij de batterijproductie. Daar zijn echter keuzes in te maken. Twee voorbeelden:

- **Batterij:** een auto met een relatief kleine batterij heeft een ongeveer ~10% lagere milieu-impact dan een auto met een relatief grote batterij.³⁰ Daarbij heeft een grotere batterij als voordeel dat de levensduur langer is, omdat de batterij minder vaak volledig ontladen wordt. Met een schoon batterijproductieproces is de milieu-impact van een elektrische auto over de hele levenscyclus 35-40% lager dan bij een vervuilend productieproces. Bovendien is hier recycling van de batterij niet meegenomen, wat de milieu-impact verder zou verlagen.³¹
- **Energiemix:** de emissies van een elektrische auto zijn bij een schone energiemix flink lager dan bij een meer vervuilende energiemix. In Nederland is de CO₂-intensiteit van de energiemix over de periode 2000-2017 gedaald van 550 gram/kWh naar 450 gram/kWh. De verwachting is dat deze in de toekomst sterk zal dalen, mede als gevolg van de grote hoeveelheid windenergie, met een CO₂-intensiteit van zo'n 12 gram/kWh.³²

Dit soort methodologische keuzes zijn belangrijk voor de interpretatie van de uitkomsten van een LCA, maar de nuances hiervan raken vaak verloren in het maatschappelijk debat.



03

METAALBUDGET VOOR ELEKTRISCH VERVOER

In de huidige discussies rondom elektrisch vervoer lijkt de aanname te zijn dat er altijd kan worden voldaan aan de vraag naar elektrische auto's. Immers: we moeten alle doelstellingen halen, willen we de ambities uit het Klimaatakkoord realiseren. De praktijk zal naar verwachting weerbarstiger zijn: onder meer de beschikbaarheid van kritieke metalen is met de huidige mijnbouwproductie

simpelweg beperkt. Dit hoofdstuk presenteert een basisscenario voor de metaalvraag van onze elektrische auto's, wanneer we sturen op de doelstellingen uit het Klimaatakkoord (voor Nederland) en de IEA-scenario's (voor Europa en de wereld). Daarnaast wordt een indicatie gegeven van de metaalvraag van laadinfrastructuur.

BASISSCENARIO: METAALVRAAG EV IN NEDERLAND

Opbouw basisscenario: groei elektrische auto's

In 2018 reden er ruim 142.000 elektrische auto's (BEV + PHEV) op de weg in Nederland: 23.000 meer dan het jaar ervoor.² Waar de hoeveelheid PHEV's in 2018 licht daalde (-0,5%), groeide het aantal BEV's met maar liefst 113%. De opgave is echter een stuk groter wanneer we dit vergelijken met het totaal aantal verkochte auto's in 2018: 447.000.³³ Het aantal nieuw te verkopen elektrische auto's moet de komende jaren dus behoorlijk groeien.

Op basis van de doelstellingen uit het Klimaatakkoord (voor 2020, 2025 en 2030) en de huidige hoeveelheid elektrische auto's hebben we een exponentieel groeiscenario gemodelleerd voor het aantal nieuwe elektrische auto's. In dit scenario neemt het aantal nieuwe elektrische auto's per jaar toe van bijna 29.000 in 2020 tot 131.000 in 2025 en 414.000 in 2030. Door de sterke ontwikkeling van BEV gaan we ervan uit dat in 2030 90% van het nieuwe wagenpark bestaat uit volledig elektrische auto's en nog maar 10% uit hybrides. De bronnen voor het scenario zijn verder toegelicht in de verantwoording.

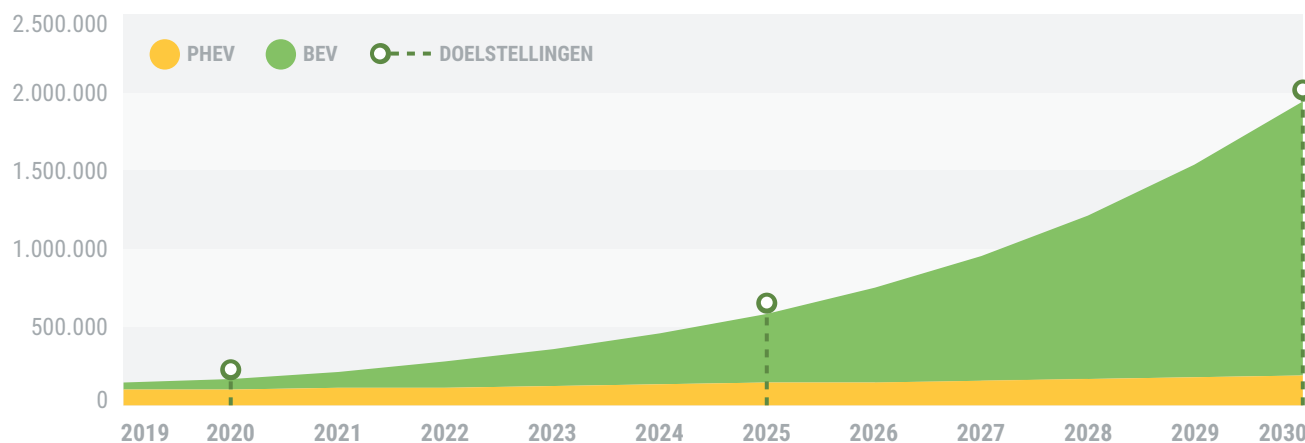


Fig. 7 Het aantal elektrische auto's in Nederland tot 2030, inclusief de verhouding tussen BEV en PHEV. De stipjes zijn de doelstellingen uit het Klimaatakkoord.

JAARLIJKSE METAALVRAAG ELEKTRISCH PERSONENVERVOER IN NEDERLAND

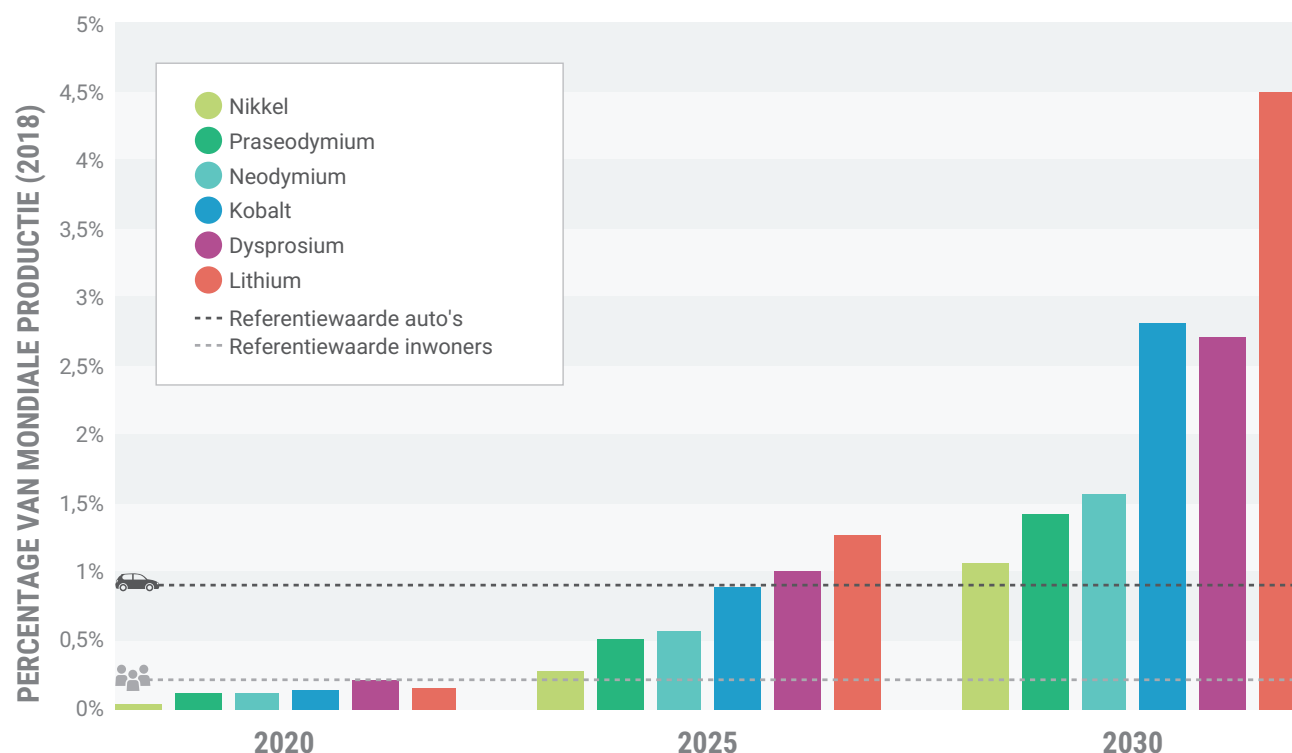


Fig. 8 Basisscenario voor de benodigde hoeveelheid kritieke metalen per jaar tussen 2020 en 2030 voor elektrisch personenvervoer in Nederland, als percentage van de huidige wereldwijde jaarproductie (2018).

Figuur 8 toont de verwachte jaarlijkse behoefte aan een aantal kritieke metalen, die nodig zijn voor het elektrificeren van het wagenpark. Deze hoeveelheid is uitgedrukt als percentage van de huidige jaarproductie van deze metalen. De grafiek toont de behoefte voor de jaren 2020, 2025 en 2030, waarbij er in 2030 zo'n 414.000 elektrische auto's per jaar bij komen.

CONCLUSIES

- Voor vijf verschillende metalen hebben we in 2030 voor elektrisch vervoer ruim meer dan 1% van de huidige wereldwijde jaarproductie nodig. Dit is meer dan het Nederlandse aandeel van het wereldwijde wagenpark (0,9%) of het Nederlandse aandeel van de wereldwijde bevolking (0,2%).

- De elementen neodymium, dysprosium en praseodymium - die in elektrische auto's nodig zijn voor elektromotoren - zijn ook nodig voor het produceren van windmolens. Deze schaarste zorgt voor spanning tussen verschillende duurzame technologieën.

METHODE

- Voor het aantal auto's gaan we uit van een exponentiële groei van het huidige aantal elektrische voertuigen (eind 2018) en de beleidsdoelstelling van 1,9 miljoen elektrische voertuigen in 2030.
- Voor de batterijcapaciteit gaan we uit van een stijging van 58 kWh (2019) naar 75 kWh (2030) voor BEV's, en van 10 kWh (2019) naar 12,5 kWh (2030) voor PHEV's, op basis van de projecties van de International Energy Agency.³⁴
- Voor het bepalen van de metaalvraag per voertuig (batterij + elektromotor) gaan we uit van prognoses voor batterijtechnologie van McKinsey 2018³⁵, die overeenkomen met projecties van de *Benchmark Minerals Intelligence*.³⁶ Volgens deze prognoses is 77% van de nieuwe auto's voorzien van NMC811-batterijen, die aanzienlijk minder kobalt per kWh bevatten.
- Voor de elektromotor gaan we uit van substitutie van neodymium, dysprosium en praseodymium uit van een substitutiegraad die gelijk is aan de substitutie van kobalt in batterijen. In 2030 is de vraag per voertuig daarmee 30% lager dan in 2020.
- Voor het bepalen van de metaalproductie is gebruik gemaakt van de productiecijfers van de USGS.³⁷ Omdat de groei van productiecapaciteit van deze kritieke metalen vaak complex en tevens lastig te voorspellen is, zijn de productiecijfers over 2018 als uitgangspunt genomen.

BASISSCENARIO EUROPA EN MONDIAAL

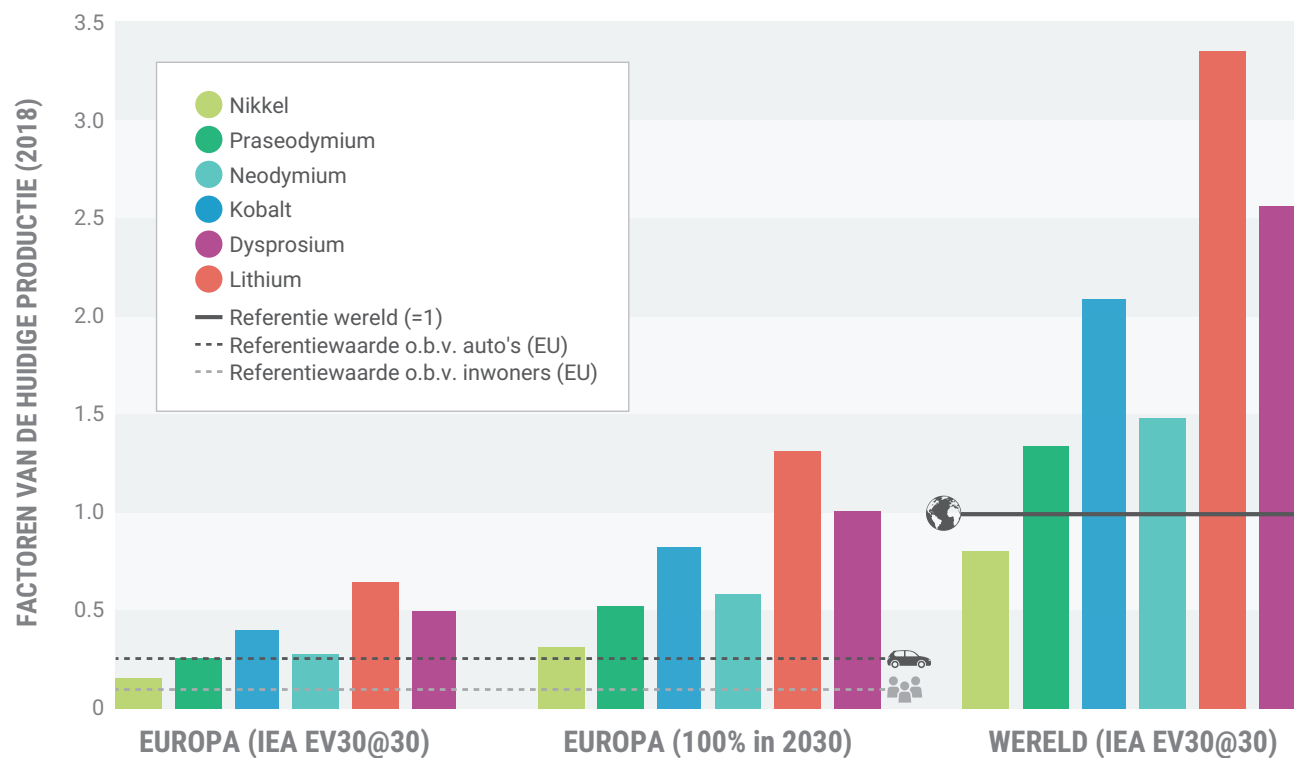


Fig. 9

Basisscenario voor de benodigde hoeveelheid kritieke metalen per jaar (in 2030) voor elektrisch personenvervoer, als percentage van de huidige wereldwijde jaarproductie (2018). Dit is weergegeven voor Europa op basis van het IEA EV30@30-scenario (links), voor Europa op basis van het Nederlandse ambitieniveau (midden) en voor de wereld op basis van het IEA EV30@30-scenario (rechts).

Naast Nederland is ook gekeken hoe de jaarlijkse metaalvraag voor elektrische auto's er op Europees en mondiaal niveau uit ziet. In de Global EV Outlook³⁴ werkt het IEA met een aantal scenario's. Voor de jaarlijkse verkoopcijfers hebben wij het EV30@30-scenario als vertrekpunt genomen, waarin wereldwijd 30% van de nieuw verkochte auto's in 2030 elektrisch. Voor Europa is dat iets meer dan de helft.

Daarnaast hebben we een tweede Europees scenario uitgewerkt waarin in 2030 100% van de nieuw verkochte auto's elektrisch is. Daarmee zou Europa de ambitie van koplopers als Nederland, Noorwegen, Slovenië, Ierland en Denemarken volgen, die vanaf 2030 de verkoop van auto's op fossiele brandstoffen willen verbieden.

CONCLUSIES

- In het EV30@30-scenario heeft Europa in 2030 15% tot 70% van de huidige mondiale productie van kritieke metalen nodig. Voor vijf van de zes metalen is dit meer dan het Europese aandeel van het wereldwijde wagenpark (25%) en aanzienlijk meer dan het Europese aandeel van de wereldwijde bevolking (9,4%).
- In het ambitieuze scenario heeft Europa in 2030 voor dysprosium en lithium meer metaal nodig dan de totale huidige wereldproductie en voor de overige metalen significant meer dan de referentiewaarde op basis van auto's.
- In het mondiale EV30@30-scenario is er in 2030 voor sommige metalen ruim twee keer de huidige mondiale productie nodig voor het produceren van voldoende elektrische auto's.

METHODE

- Voor het Europese en het mondiale scenario is uitgegaan van dezelfde technologie-ontwikkeling als voor het scenario van Nederland. Daarbij zijn ook dezelfde ontwikkeling in batterijcapaciteit en dezelfde productiecijfers van metalen gebruikt.
- De verkoopaantallen van elektrische auto's in 2030 zijn afkomstig van de groeiprognozes van het EV30@30-scenario uit de Global EV Outlook.²⁷
- In het Europese scenario op basis van de Nederlandse ambitie is de aanname dat in 2030 de volledige nieuwverkoop van auto's elektrisch is (BEV of PHEV). Dat komt neer op circa 18 miljoen auto's in 2030.

HERKOMST & TOEPASSING

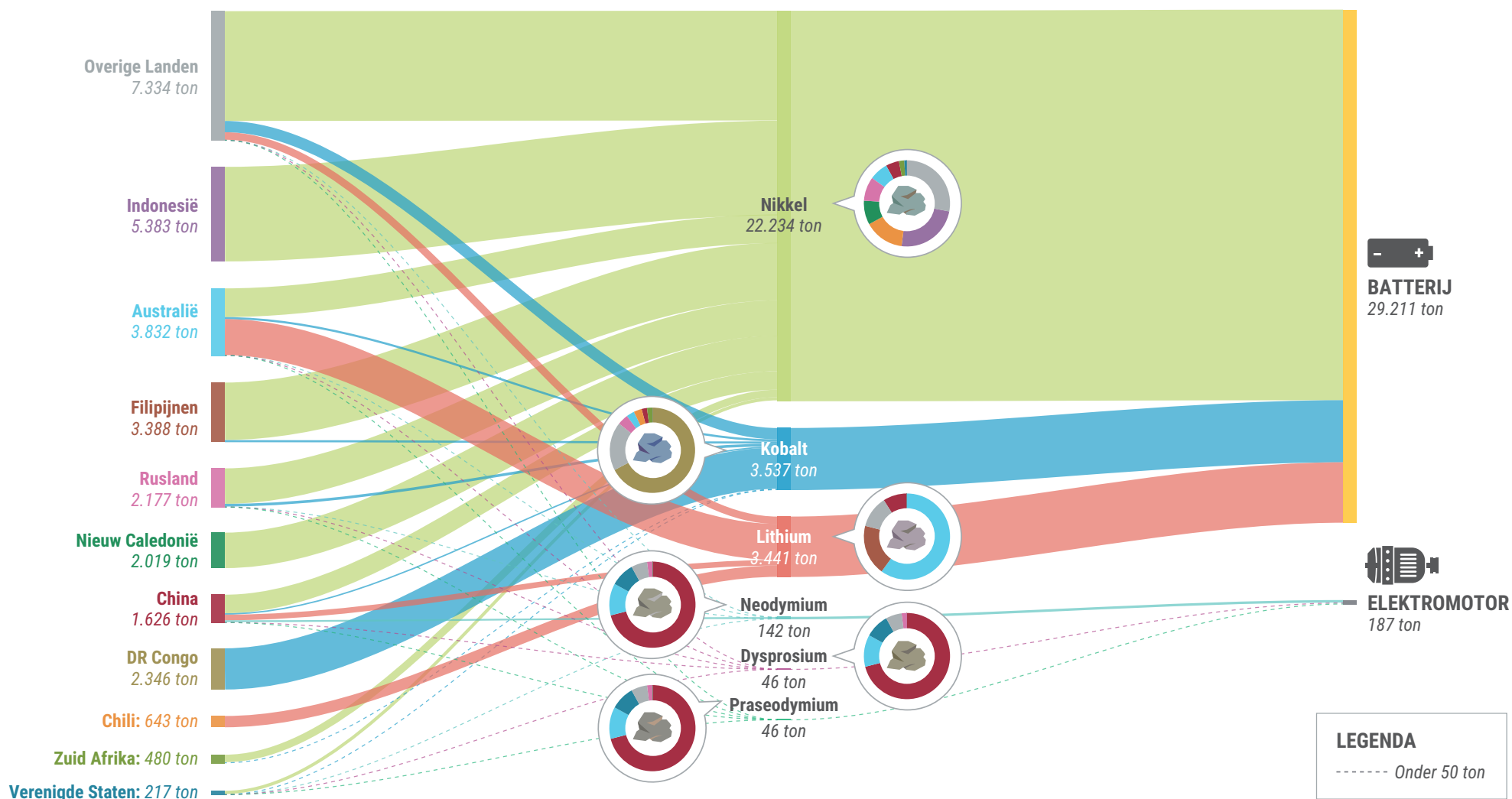


Fig. 10 De herkomst van kritieke metalen in het basisscenario, uitgaande van de metaalvraag in 2030 en de wereldwijde jaarproductie in 2018.³⁴ Het stroomdiagram toont de herkomst van de metalen (links) en hun toepassing (rechts). De taartdiagrammen laten de productieverhoudingen van deze metalen tussen verschillende landen zien.

Van de zes kritieke metalen die zijn besproken in dit rapport, is in kaart gebracht waar deze op dit moment worden gewonnen. Voor de meeste ertsen is dat in een beperkt aantal landen. Europa delft op dit moment nauwelijks grondstoffen voor batterijen en elektromotoren. Belangrijk is dat deze ertsen - na winning - ook nog moeten worden verwerkt tot componenten en producten. Hierbij kan ook afhankelijkheid ontstaan.

CONCLUSIES

- Elf landen zijn samen goed voor 72% tot 94% van de huidige wereldproductie van deze zes kritieke metalen. Dit maakt de toelevering gevoelig voor geopolitieke ontwikkelingen.
- In absolute zin (massa) is nikkel van deze zes metalen het meeste nodig. In relatieve zin (verhouding tot totale productie) is nikkel echter veel minder kritisch. Ook is de productie van nikkel verspreid over meerdere landen.
- China controleert ruim 70% van de mondiale productie van neodymium, praseodymium en dysprosium. Hoewel kobalt voornamelijk in Congo wordt gewonnen, vindt 80-90% van de wereldwijde raffinage plaats in China. Ook bijna de helft van de wereldwijde lithiumproductie is in handen van China.³⁸ China is dus een dominante speler.

METHODE

- De productiegegevens zijn afkomstig van de United States Geological Survey (USGS).³⁷ Omdat de groei van productiecapaciteit van deze kritieke metalen vaak complex en tevens lastig te voorspellen is, zijn de productiecijfers over 2018 als uitgangspunt genomen.



Bouw van een nikkelmijn in Nieuw-Caledonië. Bron: Barsamuphe wikipedia.org

- De benodigde hoeveelheden metalen per land (linkerzijde figuur) is vervolgens bepaald op basis van de aandelen van deze landen in de wereldwijde jaarproductie.
- Per metaal zijn de productieverhoudingen tussen de verschillende landen (ook over 2018) weergegeven in de taartdiagrammen.

Metaalvraag van laadinfrastructuur

De metaalvraag voor de laadinfrastructuur, de laadpalen en eventuele netverzwaring die nodig is om de laadpalen aan te sluiten, is niet meegenomen in dit rapport omdat de benodigde hoeveelheid kritieke metalen in verhouding tot de metalen in elektrische auto's beperkt is. De samenstelling van laadpalen is divers en afhankelijk van onder andere het type aansluiting, aantal aansluitingen en leverancier. De meeste laadpalen bestaan tenminste uit de volgende componenten:

- Behuizing (vaak van aluminium)
- Controle- en besturingssysteem
- Hoofdschakelaar en zekeringen
- Een elektriciteitsmeter (intern of extern)

Het is lastig om een kwantitatieve inschatting te maken van de precieze metaalvraag van de laadpalen in Nederland. Dit heeft onder meer te maken met de steeds groter wordende diversiteit in laadpalen, met de grote diversiteit aan metalen in de componenten binnen een laadpaal, en met het verschillende aantal laadpunten ('stopcontacten') per laadpaal. Ter illustratie: alleen al voor een elektriciteitsmeter, waarvan er één in iedere laadpaal zit, is de exacte samenstelling tot op metaalniveau nauwelijks aan te tonen.³⁹

Een laadpaal bevat een kleine hoeveelheid kritieke metalen in de elektronische componenten. Gezien het gemiddelde gewicht van een (semi)publieke laadpaal, variërend tussen de 30 en 80 kilogram,



nemen we aan dat het volume kritieke metalen in een laadpaal in verhouding tot het volume kritieke metalen in een elektrische auto verwaarloosbaar is. Ter illustratie: voor koper - het meest voorkomend metaal in een laadpaal - gaat het hier om zo'n 147.000 kg⁴⁰ voor bijna 41.000 laadpalen, zo'n 3,5 kilo per laadpaal.

Op dit moment is het aantal (semi-)publieke laadpunten in Nederland ongeveer gelijk aan het aantal elektrische auto's.² De verwachting is dat deze verhouding verschuift van 1:1 (laadpunten: auto) naar 1:2.¹⁹ Daarmee neemt de relatieve bijdrage in de metaalvraag van laadpunten verder af.

04

CONTEXT: EEN
COMPLEXE KETENFig.
11

De keten van een kritiek metaal, van mijnbouw tot en met recycling.

De beschikbaarheid van kritieke metalen gaat gepaard met grote onzekerheden. Dit komt voort uit een aantal aspecten, waaronder onduidelijkheid over de voorraden van metalen; de samenhang met andere metalen in de winning van grondstoffen; de complexiteit rondom substitutie; en verschillende sociale en geopolitieke aspecten. Het scenario zijn nog verder toegelicht in de verantwoording.

Een veelgestelde vraag over deze kritieke metalen is of er voldoende voorraad beschikbaar is. De *identified reserves* zijn over het algemeen meer dan voldoende om aan de toekomstige vraag te voldoen. De daadwerkelijke productiecapaciteit en de opschaling hiervan kent echter technische grenzen (wat kan er gewonnen worden met de huidige techniek?), economische grenzen (wat is winstgevend om te winnen?) en maatschappelijke grenzen (wat is de sociale- en milieu-impact?).

Zowel opschaling van bestaande productielocaties als ook het openen van nieuwe mijnen zijn lange en kapitaal-intensieve processen. Als gevolg van onder meer exploratie, vergunningaanvragen en de aanleg van infrastructuur kan het openen van een nieuwe mijn zo'n 10-20 jaar duren. Deze lange tijdshorizon vraagt grote private investeringen tegen hoge economische risico's voor mijnbouwbedrijven. Alleen al daardoor is een snelle toename van de wereldwijde mijnbouwproductie in de komende tien jaar uitdagend. Hieronder bespreken we een aantal andere aspecten die samenhangen met mijnbouwproductie.



Verschillende definities van reserves

In de literatuur over beschikbaarheid van metalen worden vier definities gebruikt:⁴¹

- **Reserves:** de ertsen die bij huidige marktomstandigheden kunnen worden gewonnen.
- **Reserve base:** alle ertsen die met bestaande technologieën gedolven kunnen worden, inclusief ertsen die op dit moment marginaal of deels niet rendabel zijn.
- **Identified reserves:** alle bekende ertsen, inclusief ertsen die op dit moment niet rendabel te delven zijn. Deze categorie omvat ook een schatting van aannemelijke, maar niet 100% bewezen onrendabele ertsen.
- **Crustal abundance:** de statistisch gemiddelde hoeveelheid van een element in de gehele aardkorst, inclusief in niet-windbare gesteentes, zoals graniet. De concentratie metalen in de meeste gesteentes is overigens veel te laag voor commerciële mijnbouw.

Nieuwsberichten over materiaalschaarste gaat vaak uit van de reserves of de reserve base. Deze inschattingen geven echter geen accuraat beeld over de hoeveelheid metaal die er nog kan worden gewonnen. Door hogere prijzen of innovatie kan de reserves en de reserve base toenemen. Ook stoppen mijnbouwbedrijven vaak met (kostbare) exploratie als ze voldoende reserves hebben geïdentificeerd voor de komende twintig jaar.

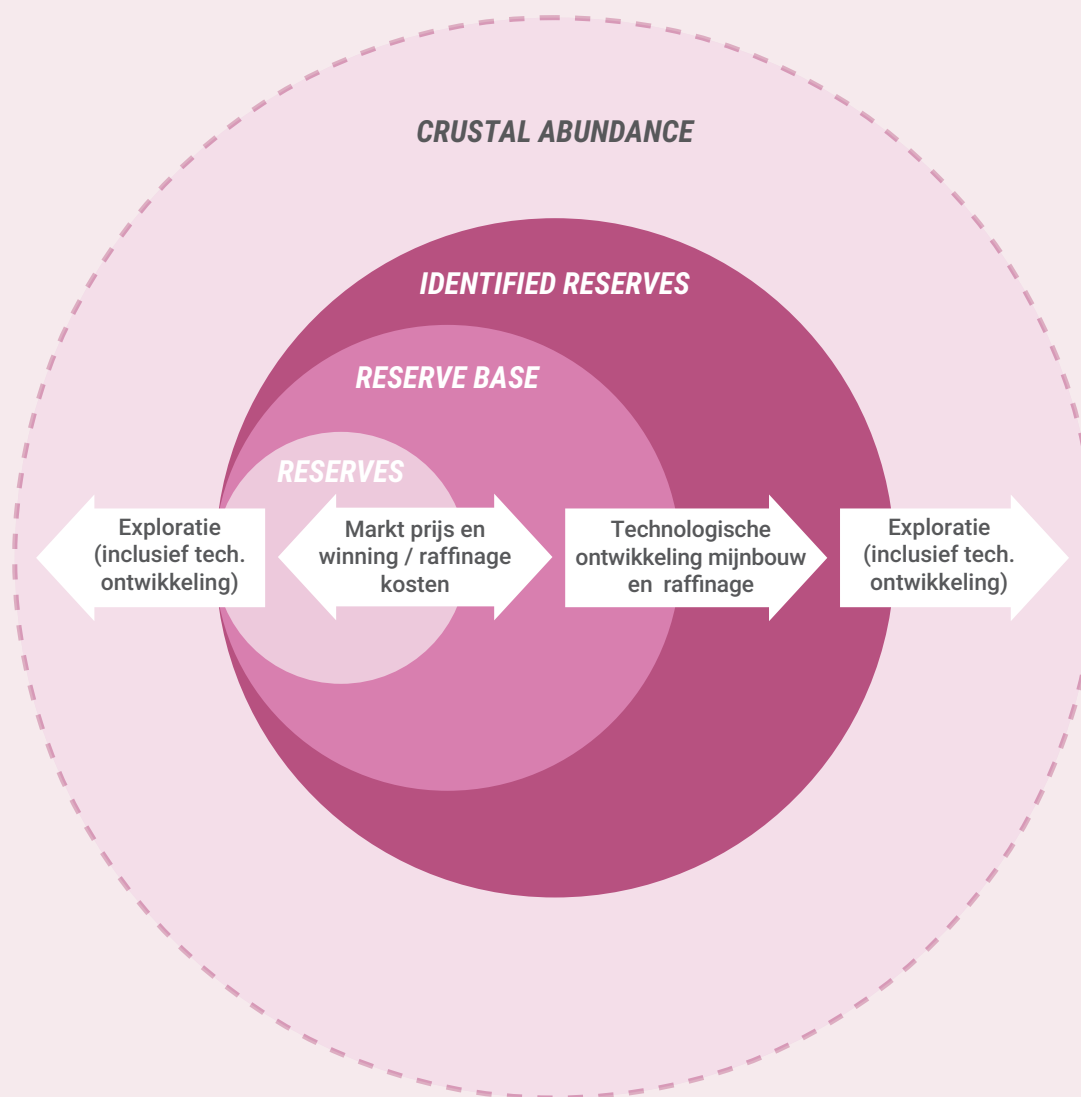


Fig. 12 Vier definities op de beschikbaarheid van metalen: van reserves tot en met de Crustal abundance.



MIJNBOUW

Samenhang in grondstoffenwinning

Kritieke metalen worden vaak niet zelfstandig gewonnen. Het zijn in dat geval zogeheten *companion metals*: een bijproduct bij de productie van *major metals* als koper, ijzer en zink. Ter illustratie: de Katanga-mijn van Glencore produceerde één ton kobalt per 55 ton koper in het eerste kwartaal van 2018. Meer dan 90% van de kobaltproductie wordt geproduceerd als 'bijproduct'.⁴²

De prijs van een *companion metal* zal extreem moeten stijgen voordat het winstgevend is om een kleine hoeveelheid extra bijproduct te winnen, met overproductie van het hoofdproduct. Ook is de prijs van een *companion metal* soms zo laag dat een mijnbouwbedrijf niet de moeite neemt om het *companion metal* volledig te winnen. Als de vraag naar een *companion metal* stijgt, kan in zo'n geval de productie in eerste instantie relatief eenvoudig worden verhoogd. Echter, als deze extra productiecapaciteit volledig benut is, wordt verdere opschaling praktisch veel ingewikkelder en kan de prijs plots extreem stijgen. Omdat er weinig informatie beschikbaar is over de onbenutte productiecapaciteit is het voorspellen van prijsniveaus van *companion metals* erg moeilijk.

Niet alle kritieke metalen in dit rapport zijn *companion metals*: zo worden lithium en nikkel op zichzelf gewonnen. Zeldzame aardmetalen (REE) en kobalt zijn vaak een bijproduct, maar niet altijd. Ter illustratie: De Chinese Bayan Obo mijn, die momenteel een groot deel van de wereldproductie van zeldzame aardmetalen voor haar rekening neemt, was oorspronkelijk een ijzermijn, die toevallig ook REEs produceerde. Door de sterk stijgende prijs van REEs en de dalende concentratie ijzer in het erts veranderde de Bayan Obo in een mijn die primair REEs produceert, met ijzer als bijproduct.

Geopolitieke, ecologische en sociale impact

Aanvullend zijn er verschillende factoren die het winnen van kritieke metalen lastig maken:

- **Protectionisme:** Producerende landen kunnen bepalen of zij een metaal exporteren of besluiten om export van de ruwe grondstof te verbieden. De transformatie van grondstoffen tot producten leidt immers tot een hogere exportwaarde. China heeft haar export verlaagd om meer hoogwaardige industrie aan te trekken. Ook Indonesië heeft onlangs besloten om de export van onbewerkt nikkelerts te verbieden.
- **Milieufactoren:** Mijnbouw heeft aanzienlijke lokale milieu-effecten. Wettelijke standaarden rondom gezondheid en milieu werken kostenverhogend voor mijnbouwbedrijven, of maken mijnbouw zelfs onmogelijk. Door verschillen in milieuwetgeving kunnen dus productieverschillen ontstaan. Ter illustratie: China is praktisch monopolist in de productie van zeldzame aardmetalen (REEs). Er is regelmatig gepoogd het Chinese monopolie te doorbreken. Voor de opkomst van China was 's werelds grootste REE-mijn de Mountain Pass Mine in Californië. Deze is toentertijd om milieuredenen gesloten. Ook de grootste (niet-Chinese) REE-productielocatie, Lynas (Maleisië), ligt onder vuur bij de lokale bevolking wegens vermeende milieuproblemen.⁴³ Overigens worden ook in China regelmatig kleinere REE-mijnen gesloten wegens het veroorzaken van milieuschade.
- **Sociale problematiek:** Een belangrijk aandachtspunt in de productieketen van kritieke metalen is de arbeidsomstandigheden waaronder metalen worden gewonnen. De mijnbouw rond sommige kritieke metalen staat bekend om kinderarbeid, slechte arbeidsomstandigheden, geweld en corruptie. Recent onderzoek laat zien dat 20 van de

23 grootste mijnbouwbedrijven hier de afgelopen tien jaar mee te maken heeft gehad - ook specifiek rondom kobalt en lithium.⁴⁴ Mijnbouwbedrijven lijken echter steeds gevoeliger voor de publieke opinie rondom deze thema's.



RAFFINAGE

Geopolitieke dominantie China

Vaak wordt bij een analyse van geopolitieke afhankelijkheid alleen gekeken naar de locatie van de mijn. Kobalt wordt vooral in de Democratische Republiek Congo geproduceerd (>50%). Echter, de hele keten is van belang. Een studie van *Benchmark Mineral Intelligence*³⁶ stelt dat China 68% van de Li-ion batterijen produceert (tegenover 6,7% in Europa), en bovendien ~80% van de overige individuele processtappen in de productieketen. Europa is dus zowel van de DRC als van China afhankelijk voor de toevoer van kobalt.



PRODUCTIE COMPONENTEN

Complexiteit en gevolgen van substitutie

Bij plotseling stijgende materiaalprijzen wordt veel aandacht gevraagd voor het openen van nieuwe mijnen. Deze nieuwe mijnen komen echter vaak te laat om acute leveringsproblemen op te lossen. Bij disrupties in de levering zet de industrie daarom vooral in op substitutie. Substitutie kan plaatsvinden op het niveau van materialen (voorbeeld: vervanging van kobalt door nikkel in lithium-ionbatterijen), of het niveau van een technologie (voorbeeld: vervanging van neodymium-gebaseerde magneetmotoren door koper-gebaseerde inductiemotoren). Substitutie is vaak reactief en wordt pas ingezet nadat er een verstoring is ontstaan.

Substitutie kent vaak echter wettelijke beperkingen. Bij consumentenelektronica kan substitutie heel snel worden geïmplementeerd, omdat de veiligheidsvoorschriften relatief soepel zijn. In de auto-industrie duurt het toepassen van een nieuwe component al snel vijf jaar; in de defensie- en vliegtuigindustrie kan dit oplopen tot tien jaar.⁴⁵



RECYCLING

Potentie

Op het moment dat er voldoende metalen van een specifieke soort in een economie in omloop zijn, kan het aanbod uit recycling een bijdrage leveren aan de vraag naar deze metalen. Een indicatieve berekening

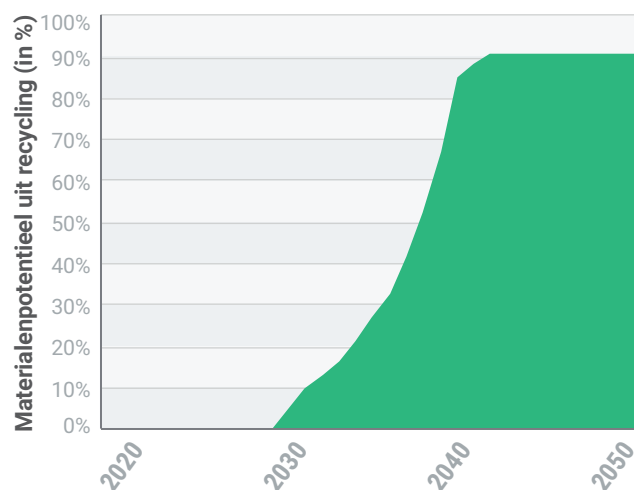


Fig. 13

Indicatief aanbod van herbruikbare kritieke metalen uit elektrische voertuigen, bij een theoretisch recyclingpercentage van 90% en een levensduur (van zowel auto's als batterijen) van 15 jaar.



(figuur 13) laat zien dat de materiaalstroom uit recycling pas vanaf 2030 op gang komt, en pas vanaf 2040 een serieus aandeel in de totale metaalvraag kan vormen. Dat serieuze aandeel geldt alleen op het moment dat het recyclingpercentage voldoende hoog is: deze indicatie gaat uit van 90%. Tot die tijd is er - door de snel stijgende vraag - onvoldoende aanbod om zelfs bij volledige recycling aan de vraag te kunnen voldoen. Voorlopig blijft de afhankelijkheid van nieuwe metalen dus bestaan.

Recycling is essentieel voor een duurzame EV-strategie voor de langere termijn. Helaas liggen de huidige recyclingpercentages van zeldzame aardmetalen nog onder de 1%. Nikkel presteert wel beter met een recyclingpercentage van gemiddeld 68%.⁴⁷ Deze lage recyclingpercentages hebben meerdere oorzaken. Zo is soms de concentratie van een metaal in een product te laag om te kunnen recycleren. Ook worden producten vaak bewaard in plaats van gerecycled (denk aan oude telefoons). Ten derde zijn sommige metalen vaak zo met elkaar vermengd, dat het lastig is om grondstoffen zuiver terug te winnen.

Mogelijkheden van substitutie

Om snelle innovatie (scenario 1) mogelijk te maken, is substitutie nodig. Substitutie kan plaatsvinden op twee niveaus:⁴⁶

- **Materiaalniveau:** Voor een specifieke toepassing is een metaal vaak te vervangen. Zo kan voor roestvrij staal zowel nikkel, chroom als vanadium worden gebruikt. In lithium-ion batterijen kan kobalt deels worden vervangen door nikkel. Bij katalysatoren zijn de platinum group metals relatief goed inwisselbaar. Dit type substitutie kent echter ook haar grenzen: in een katalysator kan bijvoorbeeld wel platinum door palladium worden vervangen, maar niet door een metaal als ijzer of koper. Bij grootschalige substitutie kan vervolgens een tekort ontstaan van het alternatieve materiaal.
- **Technologieniveau:** Elektromotoren in elektrische voertuigen maken vaak gebruik van grote hoeveelheden zeldzame aardmetalen in hun magneten, mede voor hogere efficiëntie. Dit geldt echter niet voor alle modellen: Tesla gebruikt in haar Model S bijvoorbeeld koper-gebaseerde inductiemotoren, maar in haar Model 3 neodymium-magneet motoren. Voor de batterij zijn nieuwe technologieën zoals bijvoorbeeld Li-Air heel kansrijk in het verhogen van de energiedichtheid van batterijen, en daarmee het verlagen van de metaalvraag. Omdat deze technologieën pas na 2030 worden verwacht, is de potentie daarvan niet meegenomen in deze studie.

STAND VAN ZAKEN RONDOM BELANGRIJKSTE METALEN



Lithium

Lithium wordt voornamelijk gewonnen in Australië (uit het rotsachtige materiaal spodumeen) en Chili en Argentinië (uit zoutmeren). Daarnaast wordt lithium vaak ook gerecycled uit bestaande Li-ion batterijen. De recyclingpercentages zijn echter onzeker en schommelen tussen de 5% en 50%. Bijna de helft van de wereldwijde lithiumproductie is op dit moment in Chinees eigendom, ondanks dat veel van de mijnen niet in China staan.⁴⁸

Australië kan haar productie nog aanzienlijk uitbreiden zonder al te grote negatieve effecten. In Zuid-Amerika vindt de productie plaats in zoutmeren, wat veel water kost en leidt tot conflicten tussen de lokale bevolking en mijnbouwbedrijven. Daarnaast leiden deze zoutmeren tot grote aantasting van het landschap, omdat deze open moeten worden gebroken om 'baden' te creëren waarin het water kan verdampen zodat het lithium kan worden gewonnen.⁴⁹ Lithiumproductie uit zeewater wordt vaak genoemd als oplossingsrichting voor de toekomst, maar vraagt veel energie per gram lithium.



Kobalt

Ruim 60% van de wereldwijde productie vindt plaats in de Democratische Republiek Congo. De mijnbouw daar is berucht om zijn slechte arbeidsomstandigheden, kinderarbeid en corruptie.⁵⁰ Dit is zeer lastig om te voorkomen. Zelfs FairPhone, die alleen kobalt zonder conflict- en kinderarbeid wil gebruik, heeft moeite deze keten transparant te krijgen.⁵¹

In de DRC is kobalt vooral een bijproduct bij de productie van koper en nikkel. In theorie is het mogelijk om de productie van kobalt in andere landen uit te breiden, maar zijn mijnbouwbedrijven huiverig om investeringen in aanvullende kobaltproductie te doen, omdat deze qua productiekosten moeilijk kunnen concurreren met Afrikaanse kobalt. Deze afhankelijkheid van artisanale kobalt productie in de DRC is niet alleen een humanitair probleem. Instabiliteit heeft in het verleden geleid tot prijspieken en tijdelijke haperingen van de toelevering.



Nikkel

Nikkel wordt grootschalig gewonnen en toegepast, onder meer in roestvrij staal. Bij het mijnen van nikkel komen relatief veel waardevolle bijproducten vrij. Nikkel is vooral problematisch omdat de productie gepaard kan gaan met grote milieuschade.

Norilsk, de thuisstad van een van 's werelds grootste nikkelproducenten (Norilsk Nickel), is tevens een van de meest vervuilde steden ter wereld.⁵³ Ook werden in de Filipijnen in 2017 23 mijnen - overwegend nikkelmijnen - gesloten als gevolg van hun milieuschade.⁵²



Zeldzame aardmetalen: Neodymium, Dysprosium, Praseodymium

De winning van de zeldzame aardmetalen neodymium, dysprosium en praseodymium vindt voor het grootste deel plaats in China (zo'n 70% in 2018), en voor een klein deel in Australië. China controleert het grootste deel van de keten, van mijnbouw tot en met raffinage, en in toenemende mate ook de productie van onderdelen waar deze metalen in zitten.⁶



Onder de Uyuni-zoutvlakte
in Zuid-Amerika ligt een
van de grootste lithium-
voorraden van de wereld.

05

DRIE SCENARIO'S VOOR ELEKTRISCH VERVOER IN NEDERLAND



De klimaatopgave is een wereldwijd vraagstuk, waar Nederland niet alleen in staat. Nederland is dus ook niet het enige land dat de overstap van fossiel aangedreven auto's naar elektrische auto's zal moeten maken. Voor deze studie hebben we de Nederlandse situatie als vertrekpunt voor de scenario's genomen. Wanneer we voorop willen lopen in de transitie naar elektrisch vervoer, maar onze afhankelijkheid van kritieke metalen willen beperken, zijn er andere oplossingen nodig dan het 1-op-1 vervangen van fossiel

aangedreven auto's door elektrische voertuigen. Daarmee wordt tevens voorkomen dat door een plotse disruptie of onvoldoende opschaling van het aanbod de doelstellingen op elektrisch vervoer onder druk komen te staan.

Er lijken drie oplossingsrichtingen te zijn om de vraag te reduceren. Voor iedere oplossingsrichting hebben wij één mogelijk scenario geschetst.

DRIE OPLOSSINGSRICHTINGEN



SCENARIO

01

SNELLE TECHNOLOGIE-ONTWIKKELING

Technologische innovatie

Door andere metalen toe te passen, neemt de druk op de nu vaak gebruikte kritieke metalen af. Deze 'substitutie' is sociaal-maatschappelijk de meest eenvoudige oplossing gezien, maar is technisch uitdagend. De vraag naar metalen neemt maar beperkt af, en de metalen die nu gebruikt worden, leveren vaak betere prestaties dan de metalen waarmee deze vervangen worden. In deze richting zullen echter ook oplossingen gevonden moeten gaan worden. Dit is uitgewerkt in het scenario 'technologische innovatie'.



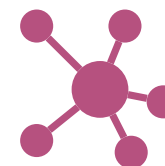
SCENARIO

02

IEDEREEN EEN EIGEN KLEINE ELEKTRISCHE AUTO

Kleinere accu's

Een ontwikkeling waar leveranciers al hard aan werken. Er is nog wat winst te behalen in het efficiënter gebruik van metalen, maar die winst is naar verwachting beperkt. Een manier waarop dit ingevuld kan worden, is door de accucapaciteit per auto te verkleinen. Dit is uitgewerkt in het scenario 'kleinere accu's'.



SCENARIO

03

NIEUWE MOBILITEITSCONCEPTEN

Minder voertuigen

Technisch de meest eenvoudige optie, sociaal-maatschappelijk de meest complexe. Wanneer we het aantal voertuigen verminderen, neemt de hoeveelheid kritieke metalen die we nodig hebben het snelst af. Ook zijn er allerlei positieve neveneffecten, zoals meer leefruimte in steden en minder vertraging door filevorming. Dit is uitgewerkt in het scenario 'minder voertuigen'.



Fig.
14

Drie toekomstscenario's voor de opschaling van elektrisch vervoer in Nederland.



SCENARIO

01

TECHNOLOGISCHE INNOVATIE

In het eerste scenario zal 'technologie ons redden': het eenvoudigste toekomstbeeld, omdat er geen verandering in gedrag of leefstijl nodig is. In het geval van elektrisch vervoer is dit sterk afhankelijk van de ontwikkeling van nieuwe batterij- en motortechnologie.

In elektrische auto's worden verschillende soorten batterijen toegepast. De meeste auto's hebben nikkel-mangaan-kobalt (NMC) batterijen, met een hoge energiedichtheid. Modernere NMC-batterijen, die de komende jaren op de markt komen, bevatten over het algemeen minder kobalt en lithium. In het basisscenario nemen we deze ontwikkelingen al mee, maar in dit scenario simuleren we een versnelde overgang naar deze nieuwe NMC-batterijen. Hierbij gaan we ervan uit dat er in 90% van de nieuwe BEV's kobalt-arme NMC811 wordt gebruikt (t.o.v. 75% in het basisscenario). Daarnaast gaan we er vanuit dat silicium-anodemateriaal (zie tekstbox op volgende pagina) wordt toegepast in 50% van de batterijen, waarmee de energiedichtheid van een batterij met 15% toeneemt.

Verder gaan we uit van een versnelde substitutie van zeldzame aardmetalen in de elektromotor. Uit onderzoek in de automotive-industrie blijkt dat het minimaal een jaar duurt om een essentiële component van de motor te vervangen, zelfs als alle technologie daarvoor gereed is.⁵⁴ Bij een heftige verstoring van de markt - bijvoorbeeld een blokkade van China - is er in het verleden per jaar maximaal 10% gesubstitueerd. In dit versnelde scenario gaan we uit van een halvering van de hoeveelheid zeldzame aardmetalen in de gemiddelde elektromotor.



SCENARIO

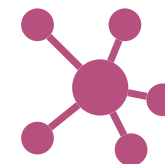
02

KLEINERE ACCU'S

In het tweede scenario kijken we naar het effect van het verkleinen van de gemiddelde capaciteit van batterijen. In het basisscenario gaan we uit van een gemiddelde capaciteit van 75 kWh voor BEV en 12,5 voor PHEV. Daarmee haalt een BEV meer dan 500 kilometer op een volledig opgeladen accu. Veel van het verkeer in Nederland zijn echter korte afstanden naar werk, sport, en recreatie in de buurt.

In scenario 2 gaan we uit van een halvering van de gemiddelde batterijcapaciteit. Met een batterij van 37,5 kWh is de actieradius nog steeds circa 250 kilometer. Naast auto's met kleinere batterijen voor kortere afstanden in gebieden met veel laadpunten, zijn er nog steeds BEV's met accu's van meer dan 80 kWh voor particulieren die lange afstanden moeten afleggen voor hun werk of om mee op vakantie te gaan. Deelconcepten kunnen helpen om van batterij-grootte te wisselen naar gelang de behoefte.

Dit scenario heeft een gedeeltelijk effect. De vraag naar kobalt, lithium en nikkel halveert tot zo'n 2% van de huidige productie. Maar dit heeft geen effect op de hoeveelheid kritieke metalen die er toegepast zijn in de elektromotor. De hoeveelheid metalen per elektromotor is ongeveer gelijk voor iedere elektrische auto: in de elektromotor van een Volkswagen E-Up zit dus ongeveer dezelfde hoeveelheid kritieke metalen als in een Tesla Model X.⁵⁵



SCENARIO

03

MINDER VOERTUIGEN

In het derde scenario onderzoeken we hoe in 2030 de vraag van alle metalen onder de 0,9% van de huidige jaarlijkse productie kan komen. Hierbij zetten we volledig in op nieuwe mobiliteitsconcepten zoals zelfrijdende auto's. Daarin gebruiken we een zo klein mogelijk aantal voertuigen, die een maximaal bereik hebben. Ook vanuit een breder perspectief op benodigde materialen - voor de rest van een auto's en de benodigde infrastructuur - verlaagt dit de materiaalbehoefte.

Zo'n beperkt aantal auto's betekent een ander soort mobiliteitssysteem, waarin we intensief inzetten op elektrische, zelfrijdende deelauto's. Daarbij zijn er voor dit scenario wel flinke investeringen nodig in zowel sociale aspecten (gedragsverandering en acceptatie) als technologie (zelfrijdende auto's en digitale platformen voor het aanbieden van mobiliteitsdiensten). Op termijn staan daar baten tegenover in de vorm van dalende kosten als gevolg van effectiever voertuiggebruik.

In dit scenario zijn er in 2030 een miljoen elektrische auto's op de weg. Dit is bijna de helft van de doelstelling van 1,9 miljoen auto's in het Klimaatakkoord (en het basisscenario). In 2030 worden er in deze optie 92.000 elektrische auto's verkocht, in vergelijking met de 414.000 die er naar schatting nodig zijn om de doelstellingen te halen.

Het voordeel van dit scenario is dat - als gevolg van de vermindering van het aantal auto's - zowel de benodigde kritieke metalen voor de batterijen als voor de elektromotoren afnemen.

AANNAMES VOOR SCENARIO'S

Bij het ontwikkelen van deze scenario's hebben wij drie aannames gehanteerd:

1 We gaan er van uit dat er op termijn géén fossiel aangedreven auto's meer in Nederland rijden.

2 In scenario's 1 en 2 proberen we de Nederlandse referentiewaarde op basis van ons aandeel personenauto's te benaderen: 0,9%.

3 In scenario 3 nemen we de Nederlandse referentiewaarde op basis van ons aandeel personenauto's als harde grens, waarbinnen we het maximale aantal voertuigen bepalen.

Let op: het gebruik van grondstoffen voor andere producten - zoals bijvoorbeeld windmolens of industriële componenten - is in het bepalen van de referentiewaarde niet meegenomen.

EFFECT VAN DRIE TOEKOMSTSCENARIO'S OP DE METAALVRAAG

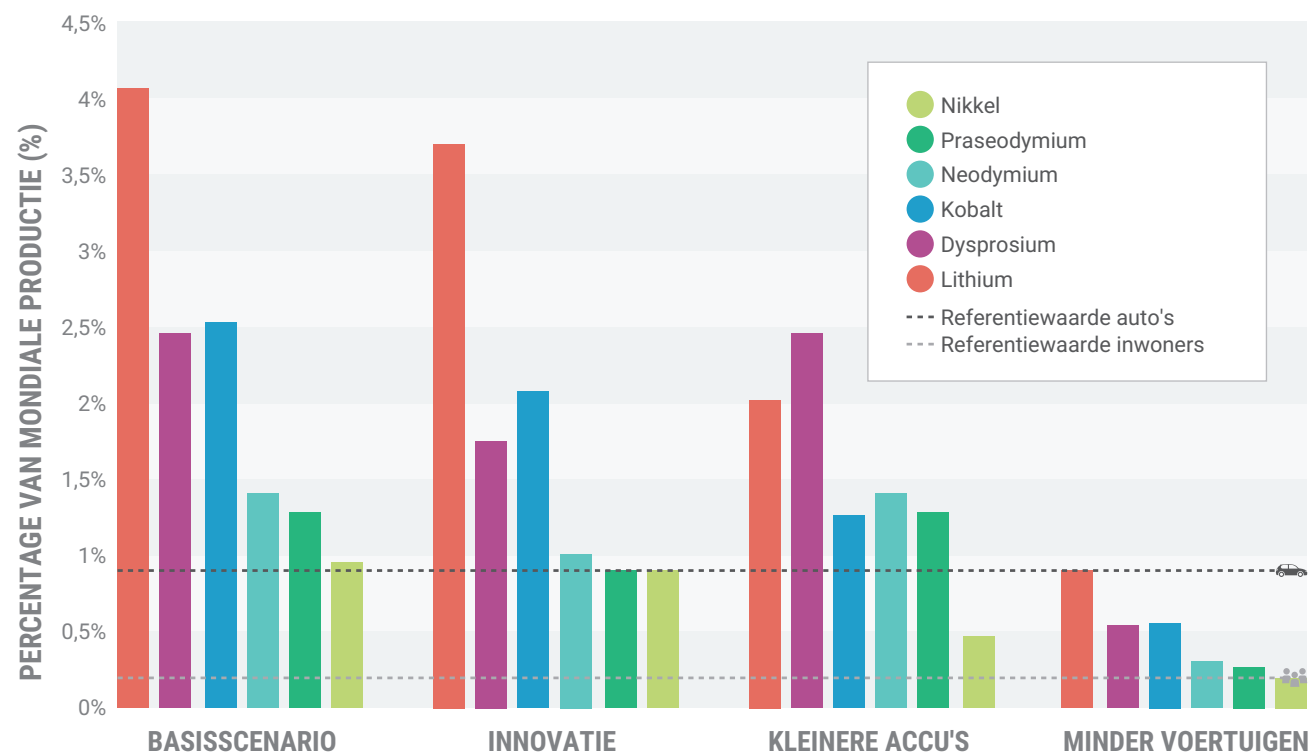


Fig.
17

De benodigde hoeveelheid kritieke metalen per jaar (in 2030) voor elektrisch personenvervoer in Nederland, als percentage van de huidige wereldwijde jaarproductie (2018) onder verschillende scenario's.

Toekomstige batterij-ontwikkelingen

Naast verwachte ontwikkelingen in bestaande batterij-technologie zijn er alternatieven die nog minder kritieke metalen bevatten, of zelfs hele andere materialen gebruiken. Daarbij zijn er twee mogelijk kansrijke technologieën, die op dit moment nog niet (commercieel) beschikbaar zijn, maar op termijn een verschil zouden kunnen maken:

- **Silicium anode materiaal:** De op dit moment meest marktrijpe batterij-innovatie is het (gedeeltelijk) vervangen van de grafiet anode met een anode-materiaal op basis van silicium. Hierdoor is veel minder grafiet nodig, waarbij dit tevens zorgt voor een hogere energiedichtheid van de batterij, waarbij schattingen uiteenlopen van 10% tot 40%.^{55,56} Onder meer Sila Nanotechnologies, Enevate en Enovix werken hier aan.
- **Solid state** batterijen hebben op langere termijn veel potentie. In een solid state batterij wordt de vloeibare elektrolyt vervangen door bijvoorbeeld glas of een polymeer. Deze hebben de potentie om twee à drie keer meer energie op te slaan dan huidige batterijen. Deze technologie bevindt zich op dit moment echter nog in het laboratorium, en zal naar verwachting niet binnen tien jaar commercieel beschikbaar komen. Daarom zijn deze technologieën niet meegenomen in dit scenario.

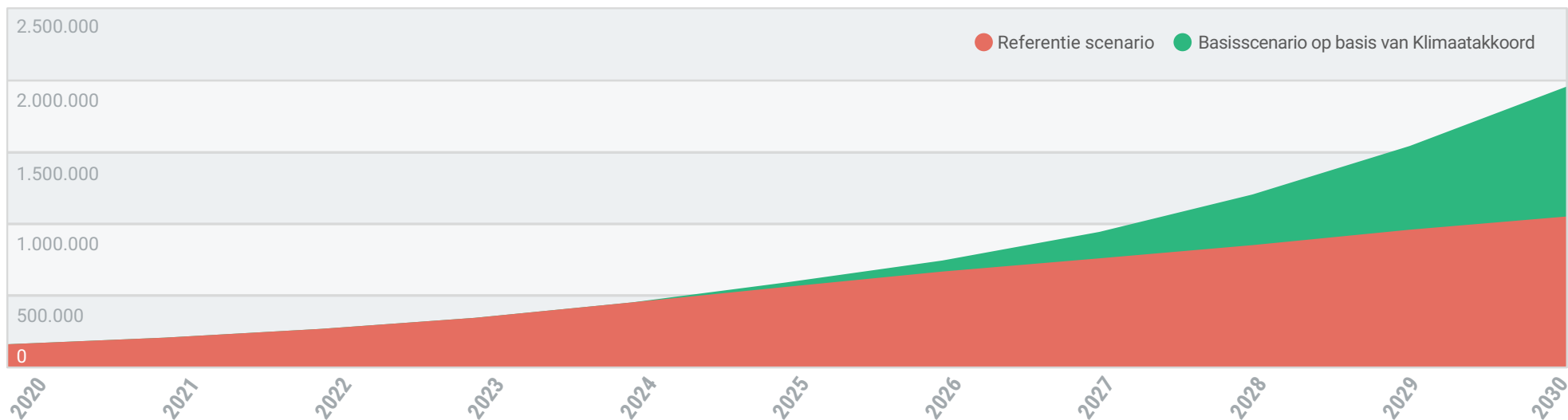
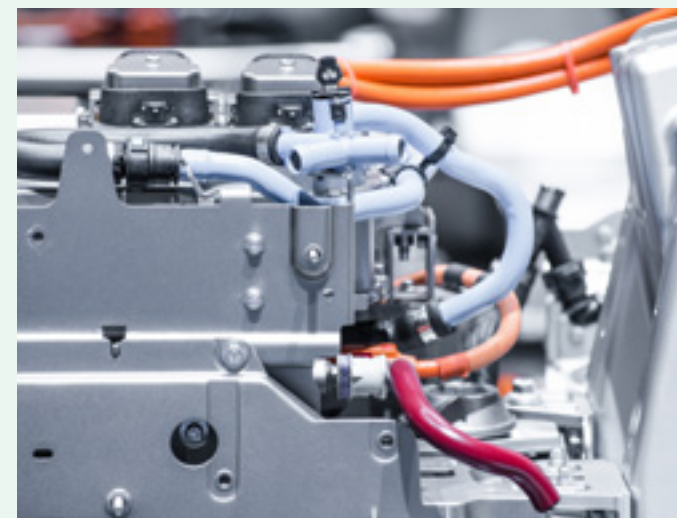


Fig.
15

Totaal aantal elektrische auto's in Nederland, op basis van het basisscenario (groene vlak) en scenario 3 met nieuwe mobiliteitsconcepten (rode vlak).

Gecombineerde metaalvraag voor duurzame elektriciteitsproductie en elektrisch transport

Niet alleen elektrisch vervoer creëert een vraag naar kritieke metalen: ook zonnepanelen en windmolens doen dat. Uit *Metaalvraag van de Nederlandse energietransitie* bleek dat voor de productie van duurzame elektriciteit voor meerdere kritieke metalen al een paar procent van de huidige wereldwijde jaarproductie nodig is. Voor een deel zijn dit dezelfde metalen als voor elektrisch vervoer.

In beide rapporten wordt een Nederlandse referentiewaarde bepaald, op basis van ons mondiale aandeel. Voor elektriciteit is dit 0,5%: het Nederlandse percentage van het finale elektriciteitsverbruik. Voor elektrische auto's is dit 0,9%: het Nederlandse aandeel van de wereldwijde autovoorraad. Wanneer we naar het inwoneraantal zouden kijken, is onze referentiewaarde 0,2%.

Het optellen van beide uitkomsten geeft een totaalbeeld van de metaalvraag van zonnepanelen, windmolens en elektrisch vervoer. Met deze gecombineerde vraag is de metaalbehoefte van Nederland flink hoger dan de verschillende referentiewaarden. De grootste uitdagingen lijken te ontstaan bij neodymium, dysprosium, praseodymium, lithium, kobalt en nikkel. Wanneer we naar de wereld als geheel kijken, zien we dat de metaalvraag voor vijf metalen in 2030 een aantal factoren hoger is dan de wereldwijde jaarproductie in 2018.

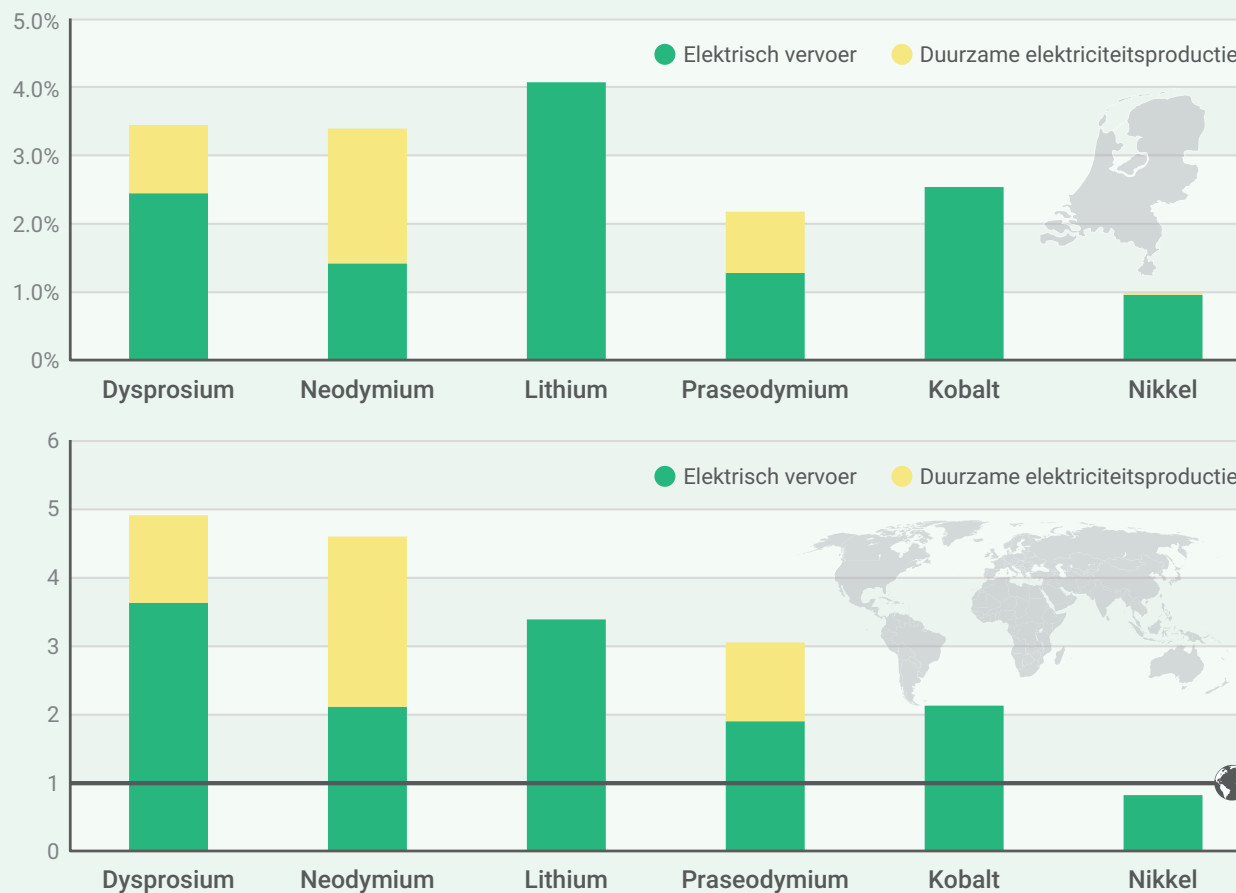


Fig.
16

De gecombineerde metaalvraag van elektrisch transport en duurzame elektriciteitsproductie in 2030 in Nederland (boven) en de wereld (onder), in factoren van de huidige mondiale jaarproductie.

06

AANBEVELINGEN

Voor het realiseren van de beleidsdoelstellingen uit het Nederlandse klimaatakkoord (1.900.000 elektrische auto's in 2030) is een flinke hoeveelheid kritieke metalen nodig. Voor zes specifieke metalen is dat 1,5 tot 2,5% van de huidige wereldwijde jaarproductie van deze metalen - ruim boven de referentiewaarde van 0,9%. Voor Europa is dat zelfs tot 1,5x de huidige wereldwijde jaarproductie - ten opzichte van een referentiewaarde van 25%. De mijnbouwproductie zal groeien, maar de snelheid van de benodigde groei lijkt uitdagend.

Wanneer we uitgaan van een toekomst zonder auto's op fossiele brandstoffen, en ervan uitgaan dat we waterstof tot 2030 niet grootschalig kunnen toepassen voor personenauto's, zijn er daarom andere soorten oplossingen nodig dan het simpelweg vervangen van elektrisch aangedreven auto's door fossiel aangedreven auto's.

De drie toekomstscenario's uit hoofdstuk 5 schetsen drie oplossingsrichtingen, die ieder voor zich meer verandering vragen dan waar maatschappelijk nu rekening mee gehouden wordt. Desondanks lijkt een combinatie van de drie oplossingsrichtingen voor de hand te liggen: we zullen door middel van substitutie in moeten gaan zetten op andere batterijtypen, we zullen typen elektrische auto's meer moeten gaan koppelen aan de specifieke behoeften van gebruikers en we zullen meer gebruik gaan maken van deelauto's in plaats van eigen autobezit om het totaal aantal auto's te verminderen.

Om die andere soorten oplossingen mogelijk te maken is een meer pro-actieve houding nodig. Zowel vanuit mobiliteits- en duurzaamheidsbeleid van de overheid, als vanuit de bedrijfsstrategieën van bijvoorbeeld autoproducenten en recyclingpartijen. Om toe te werken naar een mobiliteitssysteem dat duurzaam, eerlijk en toekomstbestendig is, doen wij acht aanbevelingen: vijf op nationaal niveau en drie op Europees niveau.



AANBEVELINGEN VOOR NEDERLAND (NATIONAAL NIVEAU)

Het meeste mobiliteits- en klimaatbeleid wordt op nationaal niveau vormgegeven. Dit schaalniveau is daarom het meest relevant voor de ontwikkeling van een duurzaam mobiliteitssysteem. De aanbevelingen voor Nederland kunnen ook door andere landen op nationaal niveau worden toegepast.

AANBEVELING 1 **Stimuleer nieuwe mobiliteitsconcepten met minder voertuigen**

De meest effectieve manier om de behoefte aan kritieke metalen af te laten nemen is het flink verminderen van het aantal benodigde elektrische voertuigen. Als het uitgangspunt blijft om de fossiel aangedreven voertuigen te vervangen, vraagt dit nieuwe mobiliteitsconcepten die uitgaan van veel minder voertuigen. Op basis van de scenario's zien wij een reductie van minimaal 900.000 voertuigen (11% van het huidige wagenpark) in Nederland voor 2030 als een reëel streven.

Een afname in het aantal voertuigen vraagt sterke aanvullende inzet op andere mobiliteitsoplossingen. Deze andere mobiliteitsoplossingen gaan onder meer over effectiever gebruik van bestaande voertuigen (voorbeeld: deelauto's), een verschuiving naar andere modaliteiten (fiets, spoorvervoer) en in de ontwikkeling van nieuwe technologieën (voorbeeld: zelfrijdende auto's) en de bijbehorende regelgeving en digitale infrastructuur.



Ontwikkelingen deelauto's en spoorvervoer

Voor het stimuleren van deelauto's zijn er reeds verschillende initiatieven, zowel publiek als privaat. De op dit moment verwachte groei richting 80.000 business-to-consumer deelauto's in 2030¹ lijkt echter niet voldoende om de benodigde reductie in het aantal voertuigen te realiseren.

Daarnaast verwacht ProRail vanuit een autonome groei van het aantal reizigers reeds capaciteitsproblemen op het spoor.⁵⁸ Een verdere verschuiving richting meer treinvervoer vraagt een sterkere beleidsinzet om de groei op te kunnen vangen en spoor als aantrekkelijk alternatief te behouden.



Bron: autodelen.info

AANBEVELING 2 Stimuleer elektrische voertuigen met kleine accu's voor regionale oplossingen

Kleine accu's bevatten in verhouding minder kritieke metalen dan grotere accu's met een langere actieradius. Op dit moment worden elektrische auto's vaak aangeschaft op basis van hun bereik, en daarmee hun batterijcapaciteit. Het gemiddelde bereik van de verkochte auto's neemt dus gestaag toe. Een uitgangspunt voor veel kopers blijft immers dat een auto overal voor gebruikt moet kunnen worden, ook voor autovakanties met het gezin. Veel vervoersbewegingen betreffen echter relatief korte afstanden, waar een voertuig met een kleinere batterij prima geschikt voor is. Daar komt bij dat er in Nederland veel auto's zijn, die als 'tweede auto' worden gebruikt, en dus goed vervangen zouden kunnen worden door een auto met een meer beperkte actieradius.

Mede gezien de toenemende vergrijzing – waarbij de wens om langere afstanden te reizen daalt – is de verwachting dat de vraag naar korte vervoersbewegingen per auto groeit. Auto's met een kleine accu zijn hier uitstekend voor geschikt. Stuur bij het stimuleren van elektrische auto's daarom ook op een diversiteit in type auto's: niet alleen de voertuigen met een groot bereik, maar ook auto's met een kleiner bereik en daarmee een kleinere accu.

AANBEVELING 3 Investeer in toekomstbestendige infrastructuur

Het opschalen van nieuwe mobiliteitsconcepten die uitgaan van minder voertuigen stelt nieuwe eisen aan onder meer de fysieke infrastructuur. Denk daarbij bijvoorbeeld aan plekken waar zelfrijdende auto's automatisch op kunnen laden, of snelwegen met inductiezones waar auto's al rijdend kunnen opladen. Slimme investeringen in dit soort infrastructuur zijn nodig om tegemoet te komen aan de veranderende manieren van vervoer.

AANBEVELING 4 Voorkom onnodige investeringen in bestaande infrastructuur

Op dit moment worden veel financiële middelen besteed aan de aanleg en het onderhoud van bestaande weginfrastructuur. Wanneer we uitgaan van een toekomstbeeld met minder voertuigen, neemt de noodzaak voor de aanleg of uitbreiding van bestaande weginfrastructuur af. Op nationaal niveau gaat dat om aanleg en uitbreiding van snelwegen; op lokaal niveau gaat dat bijvoorbeeld over de aanleg van parkeerplaatsen bij nieuwbouwwijken, waar nu vaak nog hoge normen gelden.

Meer asfalt en meer parkeerplekken leiden tot meer voertuigen die daar gebruik van maken. Door uitbreiding hiervan te voorkomen, wordt de geleidelijke overstap naar een systeem met minder voertuigen eenvoudiger. Daarbij kan de financiële ruimte worden gebruikt om te investeren in bijvoorbeeld nieuwe mobiliteitsconcepten (aanbeveling 1) of nieuwe infrastructuur (aanbeveling 3).

AANBEVELING 5 Ontwikkel een tweedehands markt voor batterijen

Er ligt een grote kans voor het toepassen van tweedehands batterijen uit elektrische auto's in de opslag van elektriciteit. Alleen al voor de gebouwde omgeving ligt er een grote opgave: de verwachting is dat op termijn zo'n 1,5 tot 3 miljoen woningen all-electric moeten gaan worden.⁵⁹ Op dit moment wordt de vraag naar deze stationaire opslagcapaciteit vaak ingevuld met nieuwe batterijen (voorbeeld: Tesla Power Wall), onder meer omdat er nog onvoldoende tweedehands batterijen uit elektrische auto's beschikbaar zijn.

Om te voorkomen dat er een situatie ontstaat waar voor stationaire opslag gebruik wordt gemaakt van nieuwe batterijen, terwijl vrijkomende batterijen uit elektrisch vervoer op materiaalniveau moeten worden gerecycled, is het belangrijk om een tweedehands markt voor batterijen te ontwikkelen. Daarin zouden batterijen uit elektrische auto's door kunnen stromen naar bijvoorbeeld de gebouwde omgeving.

Afnemende batterij-prestatie

De prestatie van batterijen neemt af naarmate een batterij meer gebruikt is (doorlopen van meer laadcycli). Voor toepassing in een elektrische auto betekent dit dat het bereik van een auto afneemt naarmate de batterij vaker is gebruikt, en dat de batterijen op een gegeven moment vervangen moeten worden wanneer het bereik van de auto te beperkt is. Deze batterijen zijn echter nog goed toepasbaar in de gebouwde omgeving, waar het gewicht van de batterijen geen rol speelt. Een voorbeeld hiervan is een testlocatie in de Johan Cruyff ArenA, waar 148 accu's uit elektrische auto's samen een 3MW-batterij vormen.⁶⁰



Bron: Johan Cruyff Arena

AANBEVELINGEN VOOR EUROPA

Op internationaal niveau is stabiel en eenduidig klimaatbeleid de belangrijkste succesfactor voor zowel de ontwikkeling van elektrisch vervoer als de noodzakelijke uitbreiding van de productie van kritieke metalen. Gezien de urgentie van de klimaatcrisis en de actie die nodig is in de komende tien jaar is het daarom belangrijk dat de Europese Unie actief aan de slag gaat. Onderstaande drie aanbevelingen geven daarbij richting.

AANBEVELING 6 Ondersteun duurzame mijnbouwinitiatieven om de impact op mens en milieu te minimaliseren

Ondanks de verwachte reductie in materiaalintensiteit voor elektrische auto's en andere sectoren, is opschaling van mijnbouw de komende decennia waarschijnlijk hard nodig. Consistent klimaatbeleid is daarbij belangrijk om investeringszekerheid te bieden aan mijnbouwbedrijven, zodat zij hun productie daadwerkelijk uit kunnen breiden. De sterk stijgende vraag naar metalen legt echter grote druk op de ecologische en sociale context in (verwachte) mijnbouwgebieden. Meer mens- en milieuvriendelijke mijnbouw is mogelijk, maar vraagt een verandering in houding van de mijnbouwindustrie en verbeterde samenwerking in de keten.

Voor nieuwe mijnbouwlocaties in Europa geldt strenge wet- en regelgeving: *responsible sourcing* zal binnen Europa geen probleem zijn. Bij nieuwe mijnbouwlocaties in ontwikkelingslanden, waar geen sterke overheid is die kan toezien op het naleven van sociale en ecologische wet- en regelgeving, kunnen echter grote uitdagingen ontstaan. Er zijn echter diverse positieve ontwikkelingen. Vanaf 2021 geldt Europese wet- en regelgeving die het voor verschillende conflictmetalen verplicht om de herkomst inzichtelijk te maken. Ook de Wereldbank is betrokken bij het verduurzamen van mijnbouw, onder meer vanuit hun *Climate Smart Mining* initiatief.

AANBEVELING 7 Ontwikkel een Europese recycling-industrie voor kritieke metalen

Recycling van batterijen is belangrijk om de toekomstige vraag naar kritieke metalen voor de productie van nieuwe batterijen te verminderen. Binnen Europa is ruimte voor enkele van deze recycling-locaties. In de Benelux is het Belgische Umicore hiervoor het beste gepositioneerd: zij investeren op dit moment reeds om het toenemende aanbod aan her te gebruiken metalen te kunnen verwerken. Een recycling-faciliteit binnen Nederland lijkt daarmee niet noodzakelijk vanuit volumes, maar mogelijk wel interessant vanuit economisch perspectief. Om in 2030 de vrijkomende materialen optimaal te kunnen recyclen, is het nodig om deze recyclingcapaciteit voor die tijd gereed te hebben.

Ter illustratie van de volumes: in 2030 komt in Nederland naar verwachting zo'n 7.400 ton batterijen vrij uit zo'n 20.000 auto's (+/- 370 kilogram per auto). De huidige capaciteit van Umicore is zo'n 7.000 ton per jaar.⁶¹ Behalve batterijen uit elektrische auto's vraagt ook het terugwinnen van grondstoffen uit batterijen van andere toepassingen, zoals consumentenelektronica, aandacht: *urban mining*.

Recyclinginstallatie Lelystad

In Lelystad wordt komend jaar een recyclinginstallatie in gebruik genomen door Battery Safety Solutions. Hier worden gebruikte accu's van afgeschreven auto's gescheiden tot op materiaalniveau. Door gebruik van oplossing in zwavelzuur wordt het mogelijk om onder andere veel meer Lithium terug te winnen, dan bij een regulier proces met verhitting het geval is. Daarmee kunnen batterijen die niet meer geschikt zijn voor een tweede leven in Nederland worden verwerkt. De capaciteit van deze installatie gaat zo'n 5.000 ton per jaar bedragen. Wanneer deze capaciteit volledig benut wordt en er behoefte is aan een grotere capaciteit, kan een tweede installatie elders worden ontwikkeld.

AANBEVELING 8 Stimuleer de ontwikkeling van nieuwe batterijtypes

Het ontwikkelen van nieuwe batterijtechnologieën op basis van niet-kritieke metalen wordt vaak als mogelijke oplossing genoemd. Er vinden al veel ontwikkelingen plaats, waarbij er een nadruk ligt op het terugbrengen van de hoeveelheid kobalt. Li-Air wordt hierbij op dit moment gezien als meest kansrijke technologie, maar komt naar de huidige verwachting pas na 2030 commercieel beschikbaar.⁶²

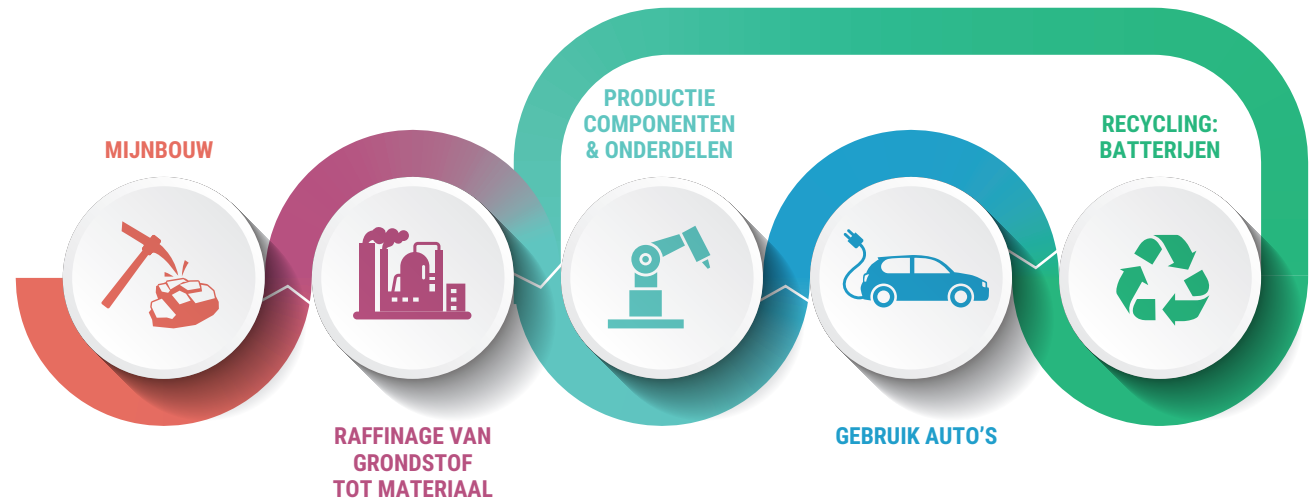
In de periode tot 2030 worden weinig technologische doorbraken verwacht die commercieel opschaalbaar zijn, omdat het opschalen van nieuwe productiefaciliteiten voor nieuwe batterijen een kostbaar en tijdrovend

proces is. Daarbij kunnen met nieuwe batterijtypen ook nieuwe risico's ontstaan, zowel technologisch als qua beschikbaarheid van andere toegepaste metalen. Om te zorgen dat er technologische alternatieven beschikbaar

zijn met minder kritieke metalen, blijft inzetten op onderzoek naar nieuwe batterijtypes dus van groot belang.



07

VERANTWOORD-
INGFig.
18

Systeemgrens van het onderzoek, waarbij er vanaf mijnbouw tot en met gebruik van de auto's wordt gekeken.

Deze studie is op eigen initiatief uitgevoerd door Metabolic, Copper8 en het Centrum voor Milieuwetenschappen van de Universiteit Leiden. Het doel is om inzichtelijk te maken wat de invloed gaat zijn van de groei van elektrisch vervoer in Nederland op de behoefte naar kritieke metalen. In deze verantwoording lichten we de methode van de studie verder toe.

SYSTEEMGRENS

Voor deze studie hebben wij uitsluitend gekeken naar elektrische personenauto's: zowel personenauto's met batterij (BEV) als plug-in hybride auto's (PHEV). Voor de benodigde kritieke metalen kijken we naar de volledige keten: van mijnbouw via raffinage en productie tot en met gebruik en recycling aan het einde van de levensduur. Deze systeemgrens is samengevat in figuur 18.

Voor dit onderzoek zijn verschillende berekeningen en aannames gedaan. Daarbij kijken we naar drie aspecten:

- Groeiscenario's elektrische auto's
- Metaalvraag in technologie elektrische auto's
- Gebruikte definities

GROEISCENARIO'S ELEKTRISCHE AUTO'S

Voor de groeiscenario's van de aantallen elektrische auto's zijn we uitgegaan van de doelen in het Klimaatakkoord: 1,9 miljoen elektrische auto's in 2030. Daarvoor hebben we een groeiscenario gemaakt met het huidige aantal elektrische auto's (januari 2019) als vertrekpunt.

Tabel 3 Aangenomen jaarlijkse aantal verkochte elektrische auto's (BEV en PHEV) tot en met 2030.

	2020	2025	2030
BEV	17.217	123.146	402.414
PHEV	6.325	8.655	11.844
TOTAAL	23.542	131.801	414.258

METAALVRAAG IN TECHNOLOGIE ELEKTRISCHE AUTO'S

Voor de metaalvraag van elektrische auto's hebben we uitsluitend gekeken naar de metalen die nodig zijn voor de batterijen en de elektromotor. Voor alle andere metalen verschilt de vraag niet van een reguliere, met fossiele brandstoffen aangedreven auto. Daarbij hebben we ons uitsluitend gericht op kritieke metalen, en niet op kritieke *materialen* (voorbeeld: rubber).

Metaalvraag batterijen

In elektrische auto's worden verschillende soorten batterijen toegepast. De meeste auto's zijn zogenaamde nikkel-mangaan-kobalt (NMC) batterijen, met een kathode van deze drie metalen. Modernere NMC-batterijen bevatten over het algemeen minder kobalt en lithium. De verwachte metaalvraag per type batterij is weergegeven in tabel 4.

Tabel 4 Metaalvraag per type batterij, in kg/kWh.⁶³

	LITHIUM	KOBALT	NIKKEL	MANGAAN	KOOLSTOF
LCO	0,113	0,959	0	0	1,2
NCA	0,112	0,143	0,759	0	1,2
NMC-622	0,126	0,214	0,641	0,2	1,2
NMC-811	0,111	0,094	0,75	0,088	1,2

In scenario 1 gaan we uit van technologische ontwikkeling van de batterijen. De nieuwe auto's zijn daarbij uitgerust met moderne batterijen (zoals de NMC-811), die per kWh minder kobalt en lithium bevatten. De verwachte verhouding tussen deze technologieën voor de komende jaren is weergegeven in tabel 5.

Tabel 5 Verwachte ontwikkeling aandeel batterijtypes in verkochte elektrische auto's.⁶⁴

	2019	2025	2030
LCO	2%	0	0
NCA	26%	16%	7%
NMC-622	40%	28%	16%
NMC-811	32%	56%	77%

Metaalvraag elektromotoren

Elektromotoren bevatten een sterke permanente magneet waarin verschillende kritieke metalen verwerkt zijn. Anders dan bij batterijen is de hoeveelheid gebruikte kritieke metalen niet afhankelijk van de eigenschappen van de auto. De elektromotor van de Tesla bevat dus evenveel neodymium als die van een hybride Toyota Prius. De metaalvraag voor een elektromotor is weergegeven in tabel 6.

Tabel 6 Metaalvraag voor een elektromotor, in kg / voertuig.⁵⁷

METAAL	VRAAG (KG / VOERTUIG)
Neodymium	0,34
Dysprosium	0,11
Praseodymium	0,11

Tabel 7 Overzicht van alle aannames voor elk van de verschillende scenario's.

AANNAMES SCENARIO NEDERLAND				
	BASISSCENARIO	SCENARIO 1: TECHNOLOGISCHE INNOVATIE	SCENARIO 2: KLEINERE ACCU'S	SCENARIO 3: MINDER VOERTUIGEN
TOTAAL AANTAL ELEKTRISCHE AUTO'S IN 2030				
BEV	1.753.151	1.753.151	1.753.151	884.036
PHEV	194.795	194.795	194.795	160.994
AANTAL VERKOCHTE ELEKTRISCHE AUTO'S IN 2030				
BEV	402.414	402.414	402.414	89.470
PHEV	11.844	11.844	11.844	2.633
BATTERIJCAPACITEIT 2030				
BEV	75 KWH	75 KWH	37,5 KWH	75 KWH
PHEV	12,5 KWH	12,5 KWH	6,25 KWH	12,5 KWH
AANDEEL BATTERIJTECHNOLOGIE 2030				
NCA	7%	3%*	7%	7%
NMC-622	17%	7%*	17%	17%
NMC-811	77%	90%*	77%	77%

* Wij nemen aan dat in 2030 50% van de batterijen silicium-anodes hebben, waarmee de energiedichtheid met 15% verbetert.

AANNAMES EUROPA EN MONDIAAL SCENARIO

Voor de metaalvraag van Europa en de wereld hebben we drie scenario's verkend. Twee scenario's zijn gebaseerd op het IEA EV30@30 scenario. Specifiek voor Europa hebben we nog een ambitieuzer scenario meegenomen, waarbij alle nieuwe personenauto's in 2030 elektrisch zijn. De aantallen elektrische auto's in deze scenario's zijn opgenomen in tabel 8.

Tabel 8 Overzicht van de aantal verkochte elektrische auto's in 2030 voor de drie Europese en mondiale scenario's.

	EUROPA IEA EV30@30	EUROPA 100% IN 2030	MONDIAAL IEA EV30@30
AANTAL VERKOCHTE ELEKTRISCHE AUTO'S IN 2030			
BEV	6.079.198	12.391.430	31.524.640
PHEV	2.260.950	4.608.570	11.724.516

Verder gaan we in deze scenario's uit van dezelfde ontwikkelingen rondom technologie en batterijcapaciteit als in het basisscenario voor Nederland (zie tabel 7).

GEBRUIKTE DEFINITIES

Metalen worden in veel categorieën ingedeeld: voornamelijk op basis van chemische eigenschappen, maar ook op prijs en universele beschikbaarheid. In dit onderzoek kiezen we voor de term **kritieke metalen** (niet te verwarren met zeldzame aardmetalen): dit is geen groep op zich, maar een verzamelnaam van de lastig vindbare of winbare metalen.⁶⁵ In figuur 19 wordt aangegeven welke metalen zijn onderzocht en de groep waarin ze toebehoren.

Zeldzame aardmetalen ("Rare Earth Elements" (REE))

De term 'rare earth elements' wordt gebruikt als verzamelnaam voor een aantal elementen met gelijksoortige eigenschappen (roze in figuur 19). Deze categorie omvat zowel de 'lichte' REE's (LREE) als de 'zware' REE's (HREE). De elementen worden gewonnen in een geoxideerde vorm, en heten bij hun winning 'rare earth oxides' (REO). Tijdens het raffinageproces worden deze elementen omgezet in hun pure vorm: een metaal. In dit rapport wordt geen onderscheid gemaakt tussen LREE's en HREE's.

BETROKKENHEID EXPERTS

Voor het valideren van deze studie is veel gebruik gemaakt van externe expertise, zowel vanuit de wetenschap als vanuit het bedrijfsleven. Hierbij zijn onder meer de methode, aannames en aanbevelingen besproken. Onder deze experts zijn zowel wetenschappers, beleidsmedewerkers, betrokkenen van kennisinstituten en enkele relevante private partijen. Wij zijn deze experts veel dank verschuldigd.

Legend:

- Niet-metalen
- Alkalimetalen
- Aardalkalimetalen
- Overgangsmetalen
- Metalen
- Metalloïden
- Halogenen
- Actiniden
- Edelgassen
- Zeldzame aardmetalen

Fig.
19

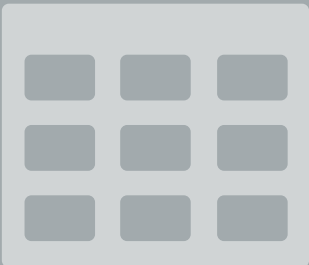
Periodiek systeem der elementen, waarbij de zwarte omlijsting geeft weer welke elementen zijn meegenomen in de studie.

07

BIJLAGE

Eigenschappen
elektrische auto's

TOP 10 ELEKTRISCHE AUTO'S IN NL NU (BEV)					
TYPE AUTO	TOTAAL 2018 ²	AANTAL VERKOCHT 2018 ²	BATTERIJCA- PACITEIT ⁶⁶	RANGE ⁶⁷	PRIJS VANAF ⁶⁷
TESLA MODEL S	12.990	4.962	100 KWH	510 KM	€ 87.020
NISSAN LEAF	5.398	3.275	40,0 KWH	230 KM	€ 36.990
TESLA MODEL X	4.625	2.956	100 KWH	460 KM	€ 98.070
RENAULT ZOE	3.586	1.282	44,1 KWH	260 KM	€ 27.190
VOLKSWAGEN E-GOLF	3.516	2.296	35,8 KWH	190 KM	€ 39.680
JAGUAR I-PACE	3.501	3.501	90,0 KWH	380 KM	€ 80.330
BMW I3	3.433	1.657	42,2 KWH	235 KM	€ 41.995
HYUNDAI IONIQ ELECTRIC	2.415	1.422	38,3 KWH	265 KM	€ 33.995
OPEL AMPERA-E	1.111	882	60,0 KWH	345 KM	€ 46.699
SMART FORTWO ELECTRIC DRIVE	615	149	17,6 KWH	105 KM	€ 23.669



LITERATUURLIJST

1. **Rijksoverheid** (2019) Klimaatakkoord
2. **RVO** (2019) Stand van zaken elektrisch vervoer - online available at <https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/energie-en-milieu-innovaties/elektrisch-rijden/stand-van-zaken/cijfers>
3. **World Bank** (2017) The growing role of minerals and metals for a low carbon future
4. **NRC Handelsblad** (7 juni 2019) China's troefkaart: Praseodymium - online beschikbaar via <https://www.nrc.nl/nieuws/2019/06/07/chinas-troefkaart-praseodymium-a3963073>
5. **RVO** (2018) De milieuprestatie van openbaar vervoer bussen en ontwikkelingen rondom elektrische openbaar vervoer bussen in Nederland
6. **Metabolic, Copper8 & Universiteit Leiden** (2018) Metaalvraag van de Nederlandse Energietransitie
7. **Rijksoverheid** (2016) Rijksbreed Programma Circulaire Economie
8. **Rijksoverheid** (2009) Plan van Aanpak Elektrisch Rijden
9. **Rijksoverheid** (2010) Plan van Aanpak Elektrisch Rijden in de Versnelling 2011-2015
10. **Kennisinstituut voor Mobiliteit** (2018) Kerncijfers Mobiliteit 2018
11. **CBS** (2018) Kwartaalmonitor Overheidsinkomsten | 4e kwartaal 2018
12. **Raad voor Leefomgeving en Infrastructuur** (2018) Van B naar Anders: Investeren in mobiliteit voor de toekomst
13. **Mobiliteitsalliantie** (2019) Deltaplan 2030: Hoog tijd voor Mobiliteit
14. **Rijksoverheid** (2018) Transitieagenda Circulaire Economie: Maakindustrie
15. **Blengini et al.** (2017) EU methodology for critical raw materials assessment: Policy needs and proposed solutions for incremental improvements. Resources Policy 53 (2017): 12-19.
16. **European Commission** (2018) Conflict Minerals Regulation explained - online beschikbaar via <https://ec.europa.eu/trade/policy/in-focus/conflict-minerals-regulation/regulation-explained/>
17. **Parker** (2018) The Unintended Consequences of U.S. Conflict-Mineral Regulation Perc Policy Series | No. 58
18. **Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat** (2019) Schets Mobiliteit naar 2040: veilig, robuust, duurzaam
19. **Rijksoverheid** (2019) Nationale Agenda Laadinfrastructuur: achtergrondnotitie voor het Klimaatakkoord
20. **Ministerie Infrastructuur & Waterstaat** (2019) Meerjarige Missiegedreven Innovatieprogramma Duurzame Mobiliteit (2020 – 2024): Van petropolis naar ecopolis
21. **Rijksoverheid** (2017) Regeerakkoord Vertrouwen in de Toekomst
22. **Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat** (2018) Programma Beter Benutten Vervolg: Eindrapportage
23. **CBS Statline** (2019) - Motorvoertuigenpark; type, leeftijdsklasse, 1 januari - online beschikbaar via <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/82044NED/table?ts=1563713829569>
24. **OICA** (2015) Motorization rate worldwide - online beschikbaar via <http://www.oica.net/category/vehicles-in-use/>
25. **KPMG** (2018) Global Automotive Executive Survey
26. **NRC Handelsblad** (13 januari 2019), Veelbelovende waterstofauto komt eraan, maar blijft-ie? - online beschikbaar via <https://www.nrc.nl/nieuws/2019/01/13/veelbelovende-waterstofauto-komt-eraan-maar-blijft-ie>
27. **Agora Energiewende and Sandbag** (2019): The European Power Sector in 2018. Up-to-date analysis on the electricity transition
28. **Ten Brink** (10 februari 2019), De waterstofladder van Watt is Duurzaam: wat 'mag' nog op waterstof? - online beschikbaar via <https://www.wattisduurzaam.nl/17479/energie-beleid/de-waterstofladder-van-wattisduurzaam-wat-mag-op-waterstof/>
29. **Van Soest & Warmerhoven** (2019), Waterstof in het Klimaatakkoord: rapportage van de cross-sectorale werkgroep Waterstof aan de Klimaattafels Elektriciteit en Industrie
30. **International Energy Agency** (2018) Global EV Outlook 2018
31. **Euan Mearns** (2017) CO₂ intensity of electric cars - online beschikbaar via <http://euanmearns.com/co2-intensity-of-electric-cars/>
32. **CBS** (2 februari 2019) Rendementen en CO₂-emissie van elektriciteitsproductie in Nederland, update 2017 - online beschikbaar via <https://www.cbs.nl/nl-nl/achtergrond/2018/04/rendementen-en-co2-emissie-van-elektriciteitsproductie-in-nederland-update-2017>
33. **Autoweek** (2019) Verkoopcijfers – online beschikbaar via <https://www.autoweek.nl/verkoopcijfers/>
34. **International Energy Agency** (2018) Global Electric Vehicle Outlook 2018
35. **McKinsey** (2018) Metal mining constraints on the electric mobility horizon
36. **Benchmark Material Intelligence** (2019) Megafactory Assessment
37. **34: US Geological Survey** (2019) Mineral Commodity Summaries 2018

38. **Reuters** (28 januari 2019) In the new lithium 'Great Game,' Germany edges out China in Bolivia - online beschikbaar via <https://uk.reuters.com/article/us-bolivia-lithium-germany/in-the-new-lithium-great-game-germany-edges-out-china-in-bolivia-idUKKCN1PM1LS>
39. **Metabolic** (2015) Proposed Resource Identification Tool Framework
40. **Ecoinvent Database** (2019) - online beschikbaar via <https://www.ecoinvent.org/home.html>
41. **United States Geological Survey** (1980) Principles of a Resource/Reserve Classification For Minerals
42. **Katanga Mining** (15 mei 2018) Katanga Mining Announces 2018 First Quarter Production and Financial Results, online beschikbaar via <http://www.katangamining.com/media/news-releases/2018/2018-05-15.aspx>
43. **Öko-Institut** (2013) Description and critical environmental evaluation of the REE refining plant LAMP near Kuantan/Malaysia
44. **The Guardian** (5 september 2019) 'Most Renewable Energy Companies' linked with claims of abuses in mines - online beschikbaar via <https://www.theguardian.com/global-development/2019/sep/05/most-renewable-energy-companies-claims-mines>
45. **Sprecher, B., Daigo, I., Murakami, S., Kleijn, R., Vos, M., & Kramer, G. J.** (2015) Framework for resilience in material supply chains, with a case study from the 2010 rare earth crisis. *Environmental science & technology*, 49(11), 6740-6750.
46. **Sprecher, B., Daigo, I., Spekkink, W., Vos, M., Kleijn, R., Murakami, S., & Kramer, G. J.** (2017). Novel indicators for the quantification of resilience in critical material supply chains, with a 2010 rare earth crisis case study. *Environmental science & technology*, 51(7), 3860-3870.
47. **UNEP** (2011) Recycling rates of metals: a status report
48. **Reuters** (28 januari 2019) In the new lithium 'Great Game,' Germany edges out China in Bolivia - online beschikbaar via <https://uk.reuters.com/article/us-bolivia-lithium-germany/in-the-new-lithium-great-game-germany-edges-out-china-in-bolivia-idUKKCN1PM1LS>
49. **National Geographic** (februari 2019) This metal is powering today's technology—at what price?
50. **SOMO** (2017) Human Rights in the Wind Turbine Supply Chain: Towards a truly sustainable energy transition
51. **FairPhone** (2017) Smartphone Material Profiles: Opportunities for improvement in ten supply chains
52. **The Guardian** (24 augustus 2017) Nickel mining: the hidden environmental cost of electric cars - online beschikbaar via <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/aug/24/nickel-Mining-hidden-environmental-cost-electric-cars-batteries>
53. **Reuters** (2 februari 2017) Philipines to shut half of mines, mostly nickel, in environmental clampdown - online beschikbaar via <https://www.reuters.com/article/us-philippines-mining-idUSKBN15H0BQ>
54. **Copper8, Metabolic & Universiteit Leiden** (2018) Metaalvraag van de Energietransitie
55. **The Wall Street Journal** (29 augustus 2019) The Battery Boost we've been waiting for is only a few years out - online beschikbaar via <https://www.wsj.com/articles/the-battery-boost-weve-been-waiting-for-is-only-a-few-years-out-1521374401>
56. **MIT Technology Review** (11 april 2018) This battery advance could make electric vehicles far cheaper - online beschikbaar via <https://www.technologyreview.com/s/610792/this-battery-advance-could-make-electric-vehicles-far-cheaper/>
57. **JRC** (2016) Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector
58. **ProRail** (26 maart 2019) Meer en snellere treinen - online beschikbaar via <https://www.prorail.nl/nieuws/meer-en-snellere-treinen>
59. **CE Delft** (2016) Een klimaatneutrale warmtevoorziening voor de gebouwde omgeving: De route naar een klimaatneutraal Nederland (update 2016)
60. **Johan Cruyff ArenA** (2018) Mega batterij in de Johan Cruyff ArenA - online beschikbaar via <https://www.johancruyffarena.nl/article-tonen-op-pagina/mega-batterij-in-de-johan-cruyff-arena-.htm>
61. **Liu et al.** (2019) Recycling of spent lithium-ion batteries in view of lithium recovery: A critical review. *Journal of Cleaner Production*
62. **InsideEVs.com** (14 november 2018) NCM 811: The Future Of Electric Car Batteries? - online beschikbaar via <https://insideevs.com/news/341168/ncm-811-the-future-of-electric-car-batteries/>
63. **Olivetti et al.** (2017) Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals
64. **McKinsey** (2018) Metal mining constraints on the electric mobility horizon
65. **European Commission** (2010) Critical raw materials for the EU
66. **EV-Database.org** (2019), Compare Hybrid and electric vehicles - online beschikbaar via <https://ev-database.org>
67. **ANWB** (2019) Welke elektrische auto's zijn er? - online beschikbaar via <https://www.anwb.nl/auto/themas/elektrisch-rijden/elektrische-autos/welke-autos-zijn-er>

COLOFON

Auteurs en onderzoek

Sybren Bosch (Copper8)
Pieter van Exter (Metabolic)
Dr. Benjamin Sprecher (CML)
Hendrik de Vries (Copper8)
Noortje Bonenkamp (Copper8)

Design en layout

Cassie Björck (Metabolic)

Aanleiding

Dit rapport is opgesteld in het kader van Springtij Forum 2019.



+31 (0) 203690977
info@metabolic.nl
www.metabolic.nl



+31 (0) 202610289
info@copper8.com
www.copper8.com



Universiteit
Leiden

+31 (0) 715277461
secretariaat@cml.leidenuniv.nl
www.universiteitleiden.nl



Universiteit
Leiden

Copper8

