

# OP WEG NAAR EEN GROENE TOEKOMST:

DEEL 2: HOE WE GRONDSTOFFEN-  
SCHAARSTE KUNNEN VOORKOMEN  
EN ONZE AMBITIES VOOR  
GROENE WATERSTOF KUNNEN  
VERWEZENLIJKEN

**TNO** innovation  
for life

TNO.NL

# OP WEG NAAR EEN GROENE TOEKOMST:

## DEEL 2: HOE WE GRONDSTOFFEN-SCHAARSTE KUNNEN VOORKOMEN EN ONZE AMBITIES VOOR GROENE WATERSTOF KUNNEN VERWEZENLIJKEN

Ten aanzien van technologieën voor groene waterstof is er nader onderzoek nodig om de afhankelijkheid van essentiële grondstoffen te verminderen, en is er nationaal en Europees beleid nodig om de beschikbaarheid van deze grondstoffen veilig te stellen.

Om met de thans beschikbare elektrolysetechnologieën (zoals PEM en AEL) aan de toekomstige Europese vraag naar waterstof (volgens het ambitieuze FCH-scenario van 8100 PJ in 2050) te kunnen voldoen, zijn er waarschijnlijk meer zeldzame grondstoffen nodig dan er beschikbaar zijn, zo hebben we in het vorige artikel laten zien. De vraag naar iridium zal de huidige wereldwijde jaarlijkse productie overstijgen (122%) en ook de behoefte aan essentiële grondstoffen (oftewel CRM: critical raw materials) zal aanzienlijk zijn. Bij platina gaat het bijvoorbeeld om 25% van de huidige wereldwijde jaarlijkse productie. En alle andere producten waarvoor deze materialen nodig zijn, komen daar nog bij. Het tekort aan essentiële grondstoffen kan de energietransitie vertragen en kan het voor de EU lastig maken om de doelstellingen van het Klimaatakkoord van Parijs te halen

In dit artikel gaan we in op oplossingen voor dit probleem. We bekijken negen mogelijke mitigatiestrategieën rond de ontwikkeling van elektrolysetechnologie. Deze strategieën zijn gericht op verschillende onderdelen van de elektrolyseketen:

- vermindering van de hoeveelheid CRM of vervanging van CRM door minder essentiële grondstoffen in de ontwerpfase;
- verlenging van de levensduur van stacks of verbetering van hun productiviteit;
- toepassing van diverse recyclingtechnieken om CRM terug te winnen aan het einde van de levensduur van elektrolytische cellen.

Wij bespreken elk van deze strategieën en beschrijven welk effect ze kunnen hebben op een beter evenwicht tussen vraag en aanbod. Vervolgens schetsen we wat de verschillende stakeholders moeten doen om deze strategieën uit te voeren. Aangezien technologische ontwikkeling tientallen jaren kan duren, is het van cruciaal belang om *nu* te kijken naar de rol die essentiële grondstoffen spelen in de transitie naar een emissievrij energiesysteem—en in de toekomstige waterstofeconomie in Europa in het bijzonder. Net zo belangrijk is dat voorzieningen snel en op duurzame wijze worden opgeschaald en dat er passend beleid is om de beschikbaarheid van dergelijke maatschappelijk essentiële grondstoffen te garanderen.



## HOE DE EU EEN DUURZAME WATERSTOFECONOMIE KAN OPBOUWEN BIJ EEN BEPERKT AANBOD VAN ESSENTIËLE GRONDSTOFFEN: VRAAGGESTUURDE STRATEGIEËN ZIJN CRUCIAAL

Europa staat voor de uitdaging om een duurzaam energiesysteem te ontwikkelen. Zoals het vorige artikel duidelijk heeft gemaakt, is een van de knelpunten om de vereiste CRM op duurzame wijze te verkrijgen. Het tekort aan CRM kan worden opgevangen door **het aanbod te vergroten**, of **de vraag te verminderen**, of beide. Net als in het vorige artikel gaan wij bij het bespreken van het effect van verschillende oplossingen alleen uit van de vraag naar CRM voor de waterstofeconomie *in de EU*. Maar de duurzame-energie doelstellingen van andere landen en continenten zullen deze schaarste aan grondstoffen zeker nog verergeren en de vraag naar CRM nog veel sterker doen toenemen.

Het **vergroten van het aanbod** van primaire<sup>1</sup> grondstoffen om aan de groeiende vraag te voldoen, lijkt een eenvoudige en logische oplossing. In de praktijk zou dit wereldwijd zorgen voor een intensivering van de winning uit bestaande mijnen en de exploratie naar nieuwe reserves. Er zijn echter drie redenen waarom het niet meevalt om het aanbod op deze manier te vergroten. Ten eerste: het opvoeren van de mijnproductie kost tijd, want het openen van een nieuwe mijn kan wel tien jaar duren<sup>2</sup>. Het aanbod van grondstoffen is dus weinig elastisch. Elke technologie die snel wordt opgeschaald en afhankelijk is van specifieke grondstoffen, kan dan ook te maken krijgen met leveringsproblemen of concurrentie met andere toepassingen. Technologieën in het kader van de energietransitie vormen hierop geen uitzondering<sup>3</sup>.

Ten tweede: veel essentiële grondstoffen voor duurzame energietechnologieën zijn bijproducten of 'companions' (term van Thomas Graedel<sup>4</sup>) van de winning van andere grondstoffen (de zogenoemde 'hosts'). Het aanbod van dergelijke bijproducten is dus minder gevoelig voor schommelingen in de marktprijs en wordt vooral bepaald door de hoeveelheid 'host'-metaal die ieder jaar wordt gedolven. Materialen als iridium en kobalt ontstaan bijvoorbeeld als bijproducten van de winning van andere metalen: iridium is een bijproduct van de winning van platina<sup>5</sup> en nikkel<sup>6</sup>, en kobalt is een bijproduct van de koperwinning<sup>7</sup>. In de totale omzet van de mijnbouw heeft de productie van iridium en kobalt slechts een klein aandeel. Ondanks de toenemende marktvraag naar deze materialen ligt het daarom niet voor de hand dat er nieuwe mijnen zullen worden geopend<sup>8</sup>.

Ten derde: maatschappelijke druk—van mensen die in de buurt van de productielocatie wonen en ook van eindconsumenten die zich zorgen maken over milieuschade en mensenrechtenschendingen—kan het lastig maken om de winning uit te breiden. In Spanje was bijvoorbeeld veel publieke tegenstand tegen plannen voor lithiummijnen vanwege zorgen om het milieu<sup>9</sup>. Maar als nieuwe mijnbouwprojecten worden uitgesteld of afgeblazen, nemen de leveringsrisico's voor producenten van lithiumbatterijen en -accu's verder toe<sup>10</sup>. Om dit soort problemen in de toekomst te vermijden, is er behoefte aan een goed beheer en bestuur van de mijnbouwactiviteiten en ook aan transparantie over de herkomst van de grondstoffen. Daarmee zou beter kunnen worden gegarandeerd dat de mijnbouw op duurzame wijze plaatsvindt, met oog voor de belangen van de lokale bevolking.

1 Grondstoffen die zijn gewonnen en nog niet zijn gebruikt/gerecycled.

2 Sveinson F. (24 maart 2017). *How to build a mine*. Mining.com. Zie <https://www.mining.com/web/how-to-build-a-mine/>

3 World Bank (2020). *Minerals for Climate Action*

4 Graedel T. et al. (2015). *Criticality of metals and metalloids*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112 (14), 4257–4262

5 Iridium is samen met andere platina-groep metalen aanwezig in het erts (zie <https://ipa-news.de/index/platinum-group-metals/the-six-metals/iridium.html>)

6 Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020) [https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRM\\_2020\\_Report\\_Final.pdf](https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRM_2020_Report_Final.pdf)

7 Nazarewicz T. (2016, aug-sep). *Cobalt: a critical commodity*. *Resource World Magazine*. Zie [https://s1.q4cdn.com/337451660/files/doc\\_downloads/articles/160811-Resource-World-Cobalt-a-critical-commodity.pdf](https://s1.q4cdn.com/337451660/files/doc_downloads/articles/160811-Resource-World-Cobalt-a-critical-commodity.pdf)

8 Nassar, N.T., Graedel, T.E., & Harper, E.M. (2015). *By-product metals are technologically essential but have problematic supply*. *Science advances*, 1(3), e1400180

9 Macintosh E. (13 februari 2018) *Thousands take to streets to protest Spanish mining boom*. META. Zie <https://meta.eeb.org/2018/02/13/public-outcry-over-spanish-mining-boom/>

10 Lithium is wereldwijd voor het grootste deel afkomstig uit Chili en Australië (zie USGS 2020 Data Sheet on lithium, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-lithium.pdf>). Maar ook daar kan de productie worden verstoord door protesten. Zie bijvoorbeeld het artikel van Reuters over protesten van de inheemse bevolking in Chili (<https://www.reuters.com/article/us-chile-protests-lithium-idUSKBN1X42B9>)

De dreigende onbalans tussen vraag en aanbod kan ook worden opgevangen door **de vraag** naar nieuwe CRM voor elektrolytische cellen **te verminderen**. In het geval van groene waterstof kan dit worden bereikt door de ontwikkeling van technologie om met behulp van minder of andere materialen meer waterstof te produceren, en door middel van recycling. De technologische ontwikkeling zou zich vooral moeten richten op de meest essentiële grondstoffen en op die grondstoffen waarvan de grootste hoeveelheden nodig zijn. Om deze grondstoffen te identificeren, dient nader te worden ingegaan op de samenstelling van elektrolytische cellen, net als in de vorige publicatie.

### Technische aannames en globale aanpak

Evenals in de vorige publicatie gaan wij uit van twee commercieel beschikbare technologieën voor de productie van groene waterstof: elektrolyse op basis van PEM (polymeerelektrolytmembraan) en AEL (alkaline). Ook SOE (solid oxide electrolysis) is een veelbelovende technologie, maar deze wordt op dit moment nog niet commercieel toegepast en blijft daarom buiten beschouwing. Wanneer we inzoomen op de PEM- en de AEL-technologie, ligt de nadruk op de CRM die nodig zijn voor de elektrolysestack, de 'kern' van de elektrolytisch cel waar de splitsing van water in waterstof en zuurstof plaatsvindt. De meeste essentiële grondstoffen zijn in dit gedeelte van de elektrolytische cel nodig om de reactie mogelijk te maken.

De CRM<sup>11</sup> in de AEL- en PEM-stacks zijn:

PEM		AEL		
Iridium (Ir)	Platinum (Pt)	Cobalt (Co)	Platinum (Pt)	Nikkel (Ni) <sup>12</sup>

**Tabel 1**

Voor de samenstelling van elektrolytische cellen in de uitgangssituatie gebruiken we waarden uit de literatuur, namelijk Smolinka et al. (2015)<sup>13</sup>. Informatie over de samenstelling en belading van de stacks in de industrie is commercieel gevoelig en daarom niet zo eenvoudig te verkrijgen. In het kader van deze studie zijn diverse fabrikanten van AEL en PEM benaderd, die in grote lijnen hebben aangegeven of bepaalde CRM inderdaad worden gebruikt. Deze informatie is meegenomen in de berekening van het effect van de strategieën. Als bijvoorbeeld een bepaalde grondstof door één of meerdere fabrikanten niet bleek te worden gebruikt, werd dit beschouwd als een succesvolle strategie voor 100% vervanging.

Zoals in het vorige artikel is uiteengezet, zal voor de productie van groene waterstof waarschijnlijk een aanzienlijk deel van de jaarlijks geproduceerde CRM nodig zijn, met name iridium en platina. Om na te gaan hoeveel essentiële grondstoffen de EU jaarlijks nodig zou hebben voor de productie van groene waterstof in 2050 (8100 PJ volgens het ambitieuze scenario van de FCH<sup>14</sup>), hebben we aannames gemaakt over het type elektrolytische cellen en hun technische specificaties, levensduur en belading met essentiële grondstoffen.

11 De essentiële grondstoffen voor deze studie zijn gekozen op basis van de Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020), zie [https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRM\\_2020\\_Report\\_Final.pdf](https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRM_2020_Report_Final.pdf)

12 Nikkel omvat zowel klasse 1-nikkel als Raney-nikkel. Hoewel nikkel door de EU niet als essentiële grondstof wordt aangemerkt, is het in dit artikel toch aan het overzicht toegevoegd omdat het in verschillende onderdelen van een AEL-stack zit. Bovendien hangt de beschikbare hoeveelheid Raney-nikkel af van de capaciteit van productie-faciliteiten, en het kan extra tijd kosten om deze uit te breiden.

13 Smolinka, T., Ojong, E.T. & Garche, J. (2015). Hydrogen Production from Renewable Energies—Electrolyzer Technologies. *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, 103–128

14 In het ambitieuze FCH-scenario is de voorspelde vraag naar waterstof relatief hoog in vergelijking met andere EU-scenario's. In dit artikel is uitgegaan van het ambitieuze scenario om de omvang van het potentiële CRM-probleem te bepalen oftewel 'de grenzen te verkennen'. Verder is ervan uitgegaan dat deze 8100 PJ geheel wordt geproduceerd als groene waterstof, dus met behulp van PEM- of AEL-technologie, omdat we dan kunnen berekenen hoeveel CRM er nodig zouden zijn voor een volledig duurzaam waterstofsysteem met inzet van de modernste technologie.

Wat het type elektrolytische cellen betreft, zal in het toekomstige energiesysteem waarschijnlijk zowel het PEM-type als het AEL-type worden gebruikt omdat ze verschillende voor- en nadelen hebben<sup>15</sup>. Daarom is aangenomen dat 50% van de totale groene waterstof (4050 PJ) zal worden geproduceerd via PEM-elektrolytische cellen en de overige 50% via AEL-elektrolytische cellen. De capaciteit van de elektrolytische cellen (in MW ingangsvermogen) en de hoeveelheid essentiële grondstoffen (in g/m<sup>2</sup>) in de cellen zijn gebaseerd op literatuur, kennis van deskundigen en navraag bij marktpartijen.<sup>16</sup> Alle belangrijke technische aannames en bronnen zijn weergegeven in Tabel 5 aan het einde van dit artikel.

Aangenomen wordt dat de opschaling naar een capaciteit van 8100 PJ de komende tien jaar (2021–2030) zal versnellen en vervolgens in de periode van 2030 tot 2050 gelijkmatig zal verlopen. Wanneer elektrolytische cellen het einde van hun levensduur naderen (uitgaande van zeven jaar voor PEM en tien voor AEL), zijn er ook CRM nodig om de stacks te vervangen. Daarom bestaat de totale jaarlijkse vraag naar CRM uit de benodigde hoeveelheid voor nieuwe elektrolytische cellen om de totale capaciteit te vergroten, plus de benodigde hoeveelheid voor het vervangen van bestaande stacks. Bij de presentatie van de resultaten concentreren wij ons op het vervangingsgedeelte om te laten zien hoeveel CRM nodig zijn om het systeem in stand te houden wanneer de vereiste capaciteit is bereikt.

Als voorbeeld kijken we naar iridium in PEM-systemen, dat als het grootste CRM-knelpunt wordt beschouwd bij de schaalvergroting van elektrolyse. Voor het vervangen van de stacks die nodig zijn om alleen al in de EU jaarlijks 8100 PJ groene waterstof te produceren (dus om 'het systeem in stand te houden'), zou de benodigde hoeveelheid iridium 22% méér zijn dan de huidige wereldwijde jaarlijkse productie van iridium. Tabel 1 laat vergelijkbare percentages zien voor alle hierboven genoemde essentiële grondstoffen ten opzichte van de huidige wereldwijde jaarlijkse productie. Naast iridium vereist de productie van groene waterstof ook nog een aanzienlijk deel van de wereldwijde jaarlijkse platinaproductie (25%). Bij nikkel (zowel klasse 1- als Raney-nikkel) en kobalt lijkt de vraag minder onder druk te zullen staan omdat de wereldwijde jaarlijkse productie van deze metalen veel groter is. Deze cijfers geven de hoeveelheden grondstoffen weer die *alleen in Europa* nodig zullen zijn voor de productie van groene waterstof.

	CRM	Nodig voor groene waterstof, 2050, ton	Huidige wereldwijde jaarlijkse productie	% van huidige wereldwijde jaarlijkse productie	Wereldwijde jaarlijkse productie – bron
PEM	Iridium	7,4	6,1	122%	Gemiddelde 2012–2106, EU Critical Material Factsheets, 2020
	Platina	48	190	25%	BGS, 2018
AEL	Raney-Ni	91	26.000	0,4%	BGS, 2018
	Nikkel (klasse 1)	22.753	1.150.000*	2%	USGS, 2018
	Kobalt	70	168.000	0,1%	BGS, 2018

\* Klasse 1 en klasse 2 geven verschillende zuiverheidsgraden weer. Aangenomen is dat de totale productie (2,3 Mt) voor de helft bestaat uit klasse 1 en voor de helft uit klasse 2.

**Tabel 2.** Hoeveelheid benodigde essentiële grondstoffen voor waterstofproductie in de EU in 2050 ten opzichte van de wereldwijde jaarlijkse productie in 2018

15 Yujing Guo et al. 2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 371 042022

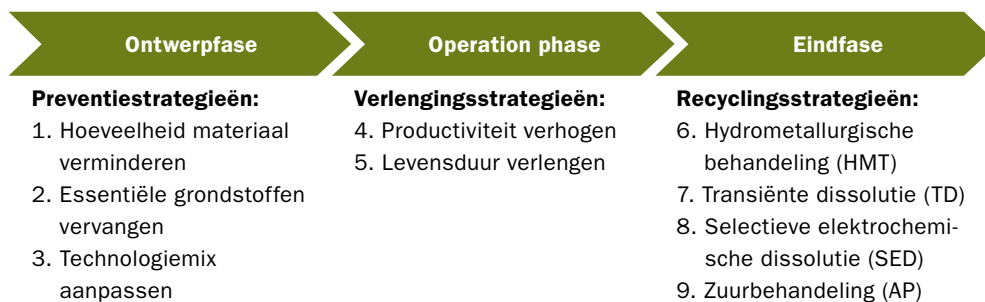
16 De exacte hoeveelheden en aannames zijn te vinden in Tabel 5 aan het einde. Voor meer informatie kunt u contact opnemen met de auteurs.

Zoals Tabel 1 laat zien, kan de beschikbaarheid van de essentiële grondstoffen voor elektrolytische cellen een knelpunt gaan vormen in de opschaling van de groene waterstofproductie. Het aanbod van sommige materialen, zoals iridium, moet wellicht drastisch worden vergroot om aan de vraag te voldoen. Bij andere materialen, zoals kobalt, komt het wereldwijde aanbod niet direct onder druk te staan omdat de vereiste hoeveelheden voor deze technologieën relatief klein zijn, maar de beschikbaarheid ervan is onzeker vanwege risico's in de toeleveringsketen<sup>17</sup> en de grote vraag ten behoeve van andere toepassingen. Onderzoek naar mogelijkheden om de hoeveelheden van alle bovengenoemde CRM te verminderen, zou daarom oplossingen kunnen opleveren waardoor de schaalvergroting van groene waterstof wél tijdig mogelijk wordt.

### TECHNOLOGIE ALS MITIGATIESTRATEGIE

Technologische innovatie kan een belangrijke rol spelen in het verminderen van de vraag naar grondstoffen per eenheid energie. Om de vraag naar essentiële grondstoffen voor elektrolytische cellen te verminderen, zijn er drie fasen te onderscheiden in de levensduur van elektrolytische cellen: ontwerp, gebruik en einde van de levensduur. Op basis daarvan worden drie verschillende soorten strategieën geformuleerd (zie ook Figuur 1):

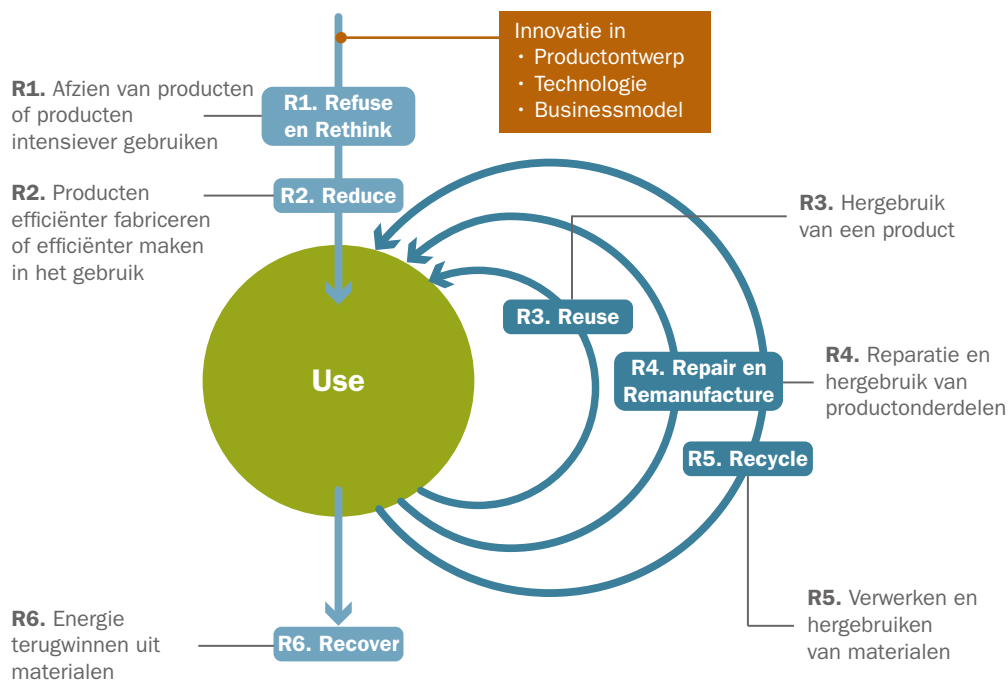
- preventie: het beperken van de toepassing van CRM in de ontwerpfase door ofwel dunnere lagen CRM te gebruiken ofwel deze (gedeeltelijk) te vervangen door minder essentiële grondstoffen
- verlenging: het langer of productiever gebruiken van stacks
- recycling: het toepassen van diverse recyclingtechnieken om CRM uit afgedankte stacks te extraheren en te hergebruiken in nieuwe stacks of in andere toepassingen waarvoor dezelfde CRM nodig zijn



**Figuur 1.** Strategieën voor CRM-reductie in elke fase van de levensduur van elektrolytische cellen

Direct hergebruik en reparatie zouden ook een rol kunnen spelen maar zijn in deze studie niet meegenomen, omdat verwacht wordt dat het rendement van onderdelen van elektrolytische cellen de komende decennia flink zal verbeteren, waardoor het gebruik van oudere componenten economisch minder aantrekkelijk wordt.

<sup>17</sup> Ongeveer 68% van alle kobalt wereldwijd wordt gedolven in Congo (USGS factsheets, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-cobalt.pdf>).



**Figuur 2.** R-ladder zoals uitgewerkt door het PBL<sup>18</sup>. Preventie hoort bij 'Reduce', verlenging bij 'Refuse en Rethink'.

Er kunnen specifieke strategieën worden uitgewerkt om aan te tonen welke stappen precies de CRM-voetafdruk van elektrolyse verkleinen. Wij wijzen erop dat wij hier de onderlinge afhankelijkheid tussen de strategieën negeren om het effect van elke afzonderlijke strategie op de vraag naar CRM te isoleren en te kwantificeren. Op basis daarvan kunnen we dan de meest veelbelovende strategieën vaststellen en verder technisch onderzoek daarop afstemmen. In werkelijkheid hangen ze natuurlijk vaak wél met elkaar samen: een dunnere laag materiaal kan bijvoorbeeld leiden tot een kortere levensduur van de stack of tot minder rendabele en complexere recyclingprocessen. Om deze onderlinge afhankelijkheden volledig in kaart te brengen en te kwantificeren is diepgaander technisch onderzoek vereist.

Hieronder gaan we nader in op elk van de strategieën.

## Preventie

### S1: Vermindering van de hoeveelheid CRM

Er wordt veel onderzoek gedaan naar vermindering van de hoeveelheid iridium per geometrisch celoppervlak voor PEM-elektrolyse, waarbij wordt gestreefd naar een orde van grootte van 0,1 mg Ir/cm<sup>2</sup> vergeleken met de huidige belading van 1,5–2 mg Ir/cm<sup>2</sup>. De meest gangbare aanpak is om het elektrochemisch actieve oppervlak te vergroten door iridium meer uit te spreiden over stabiele<sup>19</sup> dragermaterialen met een groot oppervlak<sup>20</sup> en gunstige elektronrooster-interacties<sup>21</sup>. Iridium wordt toegepast om de stabiliteit en de intrinsieke zuurstofevolutiereactie (OER) verder te verbeteren, waardoor lagere iridiumbeladingen mogelijk worden. Voorbeelden zijn de atoomlaagdepositie van iridium op gedoteerd tinoxide<sup>22</sup> en de nanostructureerde dunne film (NSTF) van 3M<sup>23</sup>, die bestaat uit een ultradunne continue film van iridium afgezet op reeksen organische nanokristallen, resulterend in beladingen van

<sup>18</sup> Planbureau voor de Leefomgeving (2019). *Circulaire economie in kaart*

<sup>19</sup> de Leefomgeving (2019). *Circulaire economie in kaart* Benck JD, Pinaud BA, Gorlin Y, Jaramillo TF (2014) Substrate Selection for Fundamental Studies of Electrocatalysts and Photoelectrodes: Inert Potential Windows in Acidic, Neutral, and Basic Electrolyte. *PLoS ONE* 9(10): e107942

<sup>20</sup> Karimi F., Peppley B.A. (2017). Metal Carbide and Oxide Supports for Iridium-Based Oxygen Evolution Reaction Electrocatalysts for Polymer-Electrolyte-Membrane Water Electrolysis. *Electrochim. Acta.* 246, 654–670

<sup>21</sup> Oh H.S., et al. (2016). Electrochemical Catalyst-Support Effects and Their Stabilizing Role for IrOx Nanoparticle Catalysts during the Oxygen Evolution Reaction. *Am. Chem. Soc.* 138 12552–12563

<sup>22</sup> Ledendecker, M., Geiger, S., Hengge, K. et al. Towards maximized utilization of iridium for the acidic oxygen evolution reaction. *Nano Res.* 12, 2275–2280 (2019)

<sup>23</sup> Lewinski, Krzysztof & Vliet, Dennis & Luopa, S. (2015). NSTF Advances for PEM Electrolysis – the Effect of Alloying on Activity of NSTF Electrolyzer Catalysts and Performance of NSTF Based PEM Electrolyzers. *ECS Transactions.* 69. 893–917

0,25 mg/cm<sup>2</sup>. Het is nog niet gelukt om de iridiumbelading te verlagen tot circa 0,1 mg/cm<sup>2</sup> met voldoende katalytische activiteit en stabiliteit. Op dit moment wordt het meeste onderzoek verricht op laboratoriumschaal en geldt de vervanging van iridium als een doelstelling voor de lange termijn<sup>24</sup>.

Naast iridium wordt er ook gewerkt aan vermindering van de hoeveelheid platina in zowel AEL als PEM<sup>25</sup>. Voor AEL gaven diverse fabrikanten aan dat zij geen platina gebruiken in hun stacks. In de berekening van de strategieën wordt er daarom van uitgegaan dat reductie tot nul mogelijk is.

Tot slot kan ook het gebruik van Raney-nikkel in AEL-systemen worden verminderd, zo blijkt uit de literatuur<sup>26</sup>.

### S2: Vervanging van CRM

In sommige gevallen is het mogelijk om essentiële grondstoffen te vervangen door andere materialen met vergelijkbare eigenschappen. In Tabel 2 is aangegeven welke vervangingsopties in deze studie zijn meegenomen. De vervanging van de meest essentiële grondstof—iridium—vormt nog steeds een uitdaging vanwege de unieke combinatie van hoge katalytische activiteit en stabiliteit voor de zuurstofevolutiereactie in PEM-systemen. Bij AEL verbeteren platina of kobalt in de elektrolyse de elektrolytische activiteit en stabiliteit voor zowel waterstof- als zuurstofevolutiereacties. Platina en kobalt zijn echter niet vereist voor de AEL-functionaliteit en kunnen worden weggelaten of vervangen door Raney-nikkelkatalysatoren met een groot katalytisch oppervlak. Voor de essentiële grondstoffen Raney-nikkel of klasse 1-nikkel is nog geen vervanger gevonden.

Technologie	CRM uitgangssituatie	Vervanger	Bron	Haalbaar
PEM	Ir	–		Nee – nog geen vervanger gevonden
PEM	Pt	Mo-sulfide	Zie referentie <sup>27</sup>	Ja – volledige vervanging van Pt door Mo-sulfide lijkt mogelijk. Hoeveelheid Mo niet in de analyse meegenomen omdat deze minder essentieel lijkt in vergelijking met andere materialen.
AEL	Pt	Raney-Ni	Fabrikanten van AEL-apparatuur	Ja – volledige vervanging
AEL	Co	Raney-Ni	Fabrikanten van AEL-apparatuur	Ja – volledige vervanging
AEL	Ni (klasse 1)	–		Nee – nog geen vervanger gevonden
AEL	Raney-Ni	–		Nee – nog geen vervanger gevonden

Tabel 2. Vervangingsmogelijkheden voor bepaalde CRM in AEL- en PEM-stacks

24 P. Shirvanian, F. van Berkel (2020). Novel components in Proton Exchange Membrane (PEM) Water Electrolyzers (PEMWE): Status, challenges and future needs. A mini review. *Electrochemistry Communications*, 114

25 Maximilian Bernt et al. (2018) *J. Electrochem. Soc.* 165 F305.

26 Santos, D. & Sequeira, César & Figueiredo, José. (2012). Hydrogen production by alkaline water electrolysis. *Química Nova*. 36. 1176–1193

27 Tachmajal C., Ampurdanes J., Urakawa A. (2014). MoS<sub>2</sub>-based materials as alternative cathode catalyst for PEM electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, pp 20837–20843



### S3: Technologiemix

In plaats van één technologie te ontwikkelen (AEL of PEM) kunnen ze ook allebei op grote schaal worden toegepast om de vraag naar CRM op te vangen. Vanuit CRM-oogpunt is AEL een betere keuze: platina is het enige knelpunt, en de voornaamste producenten van elektrolyseapparatuur schijnen platina reeds te kunnen vervangen door andere materialen (informatie afkomstig van fabrikanten van AEL-apparatuur). AEL biedt echter minder operationele flexibiliteit en is veel minder compact in vergelijking met PEM<sup>28</sup>, waardoor het minder aantrekkelijk is voor bepaalde toepassingen zoals offshore waterstofproductie. Daarom lijkt PEM op dit moment geschikter voor afgelegen kleinschalige toepassingen, en AEL interessanter voor lokale grootschalige toepassingen. Dus hoewel een mix van technologieën de afhankelijkheid van bepaalde CRM kan helpen verminderen, zal de keuze van de technologie vooral worden bepaald door de behoeften van de eindgebruiker.

### Verlenging

#### S4: Productiviteitsverhoging

Een voor de hand liggende manier om het grondstoffenverbruik te verminderen is het verhogen van de productiviteit van de stacks per m<sup>2</sup> membraan (d.w.z. de stroomdichtheid), waardoor hetzelfde stackoppervlak effectief meer waterstof zou opleveren. Voordat deze strategie op grote schaal kan worden toegepast, moet echter nog worden onderzocht welke invloed een hogere stroomdichtheid kan hebben op de totale levensduur van elektrolytische cellen. Voor een blijvende productiviteitsverhoging kunnen er ook wijzigingen in het ontwerp nodig zijn. Overigens stelde een van de leveranciers van AEL-apparatuur dat productiviteitsverhoging en vervolgens opschaling van AEL alleen interessant is als er geen platinagroepmetalen meer worden gebruikt, omdat die waarschijnlijk het knelpunt zullen vormen. Volgens deze leverancier is dit de enige haalbare manier om AEL-elektrolytische cellen naar een GW-schaal te tillen, en moet productiviteitsverhoging hand in hand gaan met substitutie. Gezien deze opvatting is bij de berekeningen voor een productiviteits-verhogingsstrategie uitgegaan van een nulgebruik van platina.

#### S5: Levensduurverlenging

Door het maximale aantal effectieve bedrijfsuren van de stacks te verhogen, worden grondstoffen beter gebruikt en zal de totale vraag naar CRM afnemen. Betrouwbare schattingen van de levensduur kunnen echter alleen worden gemaakt op basis van ervaring met de inzet van elektrolytische cellen op een relevante schaal. Bijvoorbeeld, op dit moment wordt de levensduur van een PEM-stack op MW-schaal geschat op 40.000 à 50.000 uur<sup>29</sup> (en PEM-fabrikanten verwachten dat die zal toenemen). Er zijn echter nog geen elektrolysestacks op MW-schaal die al daadwerkelijk zo veel bedrijfsuren hebben gemaakt. De eerste stacks op MW-schaal zijn in 2015–2016 geïnstalleerd maar zijn niet continu operationeel geweest. Toch is dit een haalbare strategie om de vraag naar CRM voor elektrolyse te verminderen, en deze zal dan ook in deze studie zal worden meegenomen. Zie tabel 6 aan het einde voor details van de berekeningsaannames.

### Recycling

Recycling is een belangrijke strategie die de afhankelijkheid van primaire CRM fors kan verminderen. Op dit moment zijn er diverse mogelijke recyclingtechnologieën in beeld voor het terugwinnen van CRM uit elektrolysestacks. Daarbij is echter van belang zich te realiseren dat de recyclingtechnologieën voor elektrolysestacks nog niet uitontwikkeld zijn en alleen op laboratoriumschaal zijn bewezen. Voor alle gemelde terugwinningstechnologieën geldt dat er nader onderzoek nodig is naar schaalvergroting voor grotere hoeveelheden grondstoffen, zeker gezien de beoogde opschaling van elektrolyse in de komende decennia. Er moet nog worden onderzocht welke terugwinningstechnologie het best werkt voor elektrolytische cellen, aangezien de technologieën verschillende voor- en nadelen hebben. De betreffende technologieën worden hieronder kort beschreven.

In deze studie maken wij gebruik van aangeleverde gegevens over mogelijke recyclingtechnologieën voor elektrolysestacks. Net als bij de samenstelling van elektrolytische cellen bleek het lastig om van fabrikanten informatie te verkrijgen over levensvatbare recyclingprocessen en de bijbehorende terugwinningspercentages.

<sup>28</sup> Sun et al. (2018). *Earth-Abundant Electrocatalysts in Proton Exchange Membrane Electrolyzers*. 10.20944/preprints201811.0077.v1

<sup>29</sup> IRENA (2018). *Hydrogen from Renewable Power*

**S6: Hydrometallurgische behandeling (hydrometallurgical treatment – HMT)**

Hydrometallurgie geldt als een modern proces voor de terugwinning van platinagroepmetalen (PGM). Hierbij worden de doelelementen opgelost uit vaste matrices met behulp van bijtende of zure stoffen. Het proces omvat de volgende stappen: i) uitloging, ii) concentratie, zuivering en precipitatie van de oplossing, en iii) terugwinning/raffinage van metalen<sup>30</sup>. Voor platina zijn terugwinningspercentages van >95% aangetoond<sup>31</sup>. Het hydrometallurgische proces geeft veelbelovende terugwinningsrendementen en een laag energieverbruik te zien. Het grootste bezwaar van deze methode is het gebruik van grote hoeveelheden oplosmiddelen en de milieubelasting door giftig afvalwater. Een ander cruciaal aspect dat aandacht behoeft is de mogelijkheid om het zeer stabiele iridium(oxide) op te lossen.

Een hiermee verwante terugwinningstechnologie is pyrohydrometallurgie. Die behandeling omvat een calcinatiestap voor de gasdiffusielagen, de elektroden en het membraan om het oplossen van essentiële grondstoffen tijdens het hydrometallurgische proces te vergemakkelijken.

**S7: Transiënte dissolutie (TD)**

Transiënte dissolutie wordt meestal gebruikt voor het oplossen van PGM, zoals platina, iridium en ruthenium. Het oplossen van de PGM vindt plaats door middel van een cyclische verandering in de oxidatietoestand van het platinaoppervlak<sup>32</sup>. De tijdelijke verandering in de oxidatietoestand van het edelmetaaloppervlak komt tot stand door het switchen van oxiderende en reducerende stoffen, waardoor het edelmetaal volledig kan oplossen. Het voordeel is dat dit kan resulteren in een hoge mate van terugwinning onder relatief milde bedrijfsomstandigheden. Het voornaamste bezwaar tegen deze technologie is het gebruik van gevaarlijke reactanten, die een probleem zouden kunnen vormen in verband met de steeds strengere milieuvoorschriften. Hoewel de technologie op laboratoriumschaal in batchreactoren is bewezen, blijft het een uitdaging om deze op grotere schaal toe te passen voor de terugwinning van CRM uit elektrolysestacks.

**S8: Selectieve elektrochemische dissolutie (SED)**

Deze methode is gebaseerd op het elektrochemisch oplossen bij verschillende spannings- en pH-bereiken van zowel koolstofdrager- als katalysatormaterialen uit zogenaamde 'catalyst-coated membranes' (CCM), die met name worden gebruikt in PEM-elektrolytische stacks<sup>33</sup>. Het verschil met de TD-technologie is dat er gelijkspanning op de CCM wordt toegepast in plaats van een variatie in de toegepaste spanning via oxiderende en reducerende reagentia. De eerste fase van de SED-technologie bestaat uit een elektrochemische reiniging van de CCM. Vervolgens wordt het systeem gespoeld met zuurstof terwijl het spannings- en pH-bereik worden gewijzigd, waardoor de edelmetaalkatalysator oplost. Dankzij de flexibiliteit in het toegepaste spannings- en pH-bereik zou SED mogelijk kunnen worden uitgebreid naar de terugwinning van materialen voor verschillende elektrolysetechnologieën. De voordelen van SED zijn het hoge terugwinningsrendement en de mogelijkheid om meer stackcomponenten terug te winnen. Een nadeel is de energie die nodig is voor het terugwinningsproces. Hoewel de technologie op laboratoriumschaal is bewezen, blijft het een uitdaging om deze op grotere schaal toe te passen voor de terugwinning van CRM uit elektrolysestacks.

30 Duclos L. et al. (2016). Process development and optimization for platinum recovery from PEM fuel cell catalyst. *Hydrometallurgy* 160 79–89

31 Jha, M.K., Lee, J.C., Kim, M.S., Jeong, J., Kim, B.S. & Kumar, V. (2013). Hydrometallurgical recovery/recycling of platinum by the leaching of spent catalysts: A review. *Hydrometallurgy* 133 22–32

32 Hodnik, N., Baldizzone, C., Polymeros, G. et al. Platinum recycling going green via induced surface potential alteration enabling fast and efficient dissolution. *Nat Commun* 7, 13164 (2016)

33 Latsuzbaia R., Negro E., Koper G.J.M. (2015). Environmentally friendly carbon-preserving recovery of noble metals from supported fuel cell catalysts. *ChemSusChem* vol.8, 11, pp 1926–1934

**S9: Zuurbehandeling (acid process – AP)**

Met deze methode kunnen zowel PGM als de ionomeer efficiënt uit membranen met katalysatorcoating of uit membraan elektrodesamenstellingen worden teruggewonnen door gebruik te maken van sterke zuren om de koolstofdrager te oxideren, gevolgd door scheidingsstappen (filtreren en centrifugeren). De methode is op laboratoriumschaal bewezen door Xu et al. voor membranen met katalysatorcoating in PEM-brandstofcellen.<sup>34</sup> Een van de grote pluspunten van dit proces is de mogelijkheid om het membraan te regenereren voor nieuwe stacks met een goede elektrochemische prestatie in combinatie met een efficiënte terugwinning van PGM. De voornaamste nadelen van deze technologie zijn de agressieve pH-omstandigheden, de betrekkelijk complexe keten en de lange duur van het proces. Evenals bij andere recycling-technologieën geldt voor AP dat toepassing voor de terugwinning van CRM en membranen uit elektrolysestacks op grotere schaal een uitdaging blijft.

Tabel 3 geeft een overzicht van al deze mitigatiestrategieën.

Type	Strategie	Korte omschrijving	Betrokken grondstoffen	
			PEM	AEL
Preventie	S1: Vermindering	Vermindering van de gebruikte hoeveelheid CRM (in kg)	Ir, Pt	Pt, Ni (Raney)
	S2: Vervanging	Vervanging van CRM door andere materialen	Pt	Pt, Co
	S3: Technologiemix	Combinatie van AEL, PEM en (later) SOEC	Ir, Pt	Pt, Co, Ni (zowel klasse 1 als Raney)
Verlenging	S4: Productiviteitsverhoging	Verhoging van de productiviteit van de elektrolysestack (minder stackoppervlak nodig)	Ir, Pt	Pt, Co, Ni (zowel klasse 1 als Raney)
	S5: Levensduurverlenging	Verlenging van de (verwachte) levensduur van de stack	Ir, Pt	Pt, Co, Ni (zowel klasse 1 als Raney)
Recycling	S6: Hydro-metallurgische behandeling (HMT)	Zie toelichting hierboven	Pt, Ir (geen terugwinningspercentages voor Ir; recycling van Ir niet aan de orde)	Ni (Raney)
	S7: Transiënte dissolutie (TD)	Zie toelichting hierboven	Pt, Ir (geen terugwinningspercentages voor Ir; recycling van Ir niet aan de orde)	n.v.t.
	S8: Selectieve elektrochemische dissolutie (SED)	Zie toelichting hierboven	Pt	n.v.t.
	S9: Zuurbehandeling (AP)	Zie toelichting hierboven	Pt	n.v.t.

34 Xu F., Mu S., Pan M. (2010). Recycling of membrane electrode assembly of PEMFC by acid processing. *International Journal of Hydrogen Energy* vol.35, 7, pp 2976–2979

Om het mogelijke effect van elke strategie te berekenen, zijn—op basis van literatuurbronnen, eigen onderzoek van TNO en input van diverse fabrikanten—de volgende parameters vastgesteld:

- voor preventiestrategieën:
  - lagere belading met grondstoffen
  - mogelijke vervangers voor CRM, indien relevant
  - technologiemix AEL/PEM volgens aanname 50/50; zie verderop voor meer informatie over de technologiemix-strategie
- voor verlengingsstrategieën:
  - mogelijke toename van de stroomdichtheid
  - verlenging van de levensduur van stacks
- voor recyclingstrategieën:
  - terugwinningspercentages voor elke strategie; vervolgens zijn de strategieën met de hoogste terugwinningspercentages geselecteerd (hydrometallurgische behandeling voor Raney-nikkel en transiënte dissolutie voor platina uit AEL-stacks)

De uitgangswaarden en streefwaarden voor elke strategie staan (samen met de bronnen) in Tabel 5 aan het einde van dit artikel. Aan de hand van deze parameters is voor elk van de strategieën afzonderlijk de hoeveelheid CRM berekend die nodig is voor de productie van 8100 PJ groene waterstof. Om een idee te geven van de schaalgrootte, zijn deze getallen gedeeld door de huidige wereldwijde jaarlijkse productie van elke CRM.

Elk van deze strategieën helpt in meer of mindere mate om de CRM-voetafdruk te verkleinen. Onderstaande tabel toont het percentage van het huidige wereldwijde aanbod van diverse CRM dat bij elk van de strategieën nodig zal zijn om voor 2050 het ambitieuze EU-waterstofscenario van 8100 PJ te realiseren. Met andere woorden: hoe hoger het percentage, hoe groter de uitdaging voor elke essentiële grondstof na toepassing van een bepaalde strategie. Strategie 3, technologiemix (aandeel PEM t.o.v. AEL) is niet expliciet vermeld omdat deze een van de uitgangspunten vormt voor deze berekeningen; aanpassing van de mix heeft dus navenant effect op alle CRM in de uitgangssituatie. Voor platina geldt bijvoorbeeld dat ~96% van de totale hoeveelheid wordt gebruikt voor AEL. Als er minder AEL-elektrolytische cellen worden gebruikt, zal dat dus een significante invloed hebben op de vraag naar platina. En omdat iridium alleen wordt gebruikt voor PEM, kan de totale hoeveelheid iridium worden teruggedrongen door meer AEL-elektrolytische cellen te gebruiken. Bij recycling zijn hydrometallurgische behandeling en transiënte dissolutie geselecteerd, omdat deze de hoogste terugwinningspercentages opleveren (respectievelijk 100% voor Raney-nikkel in AEL en 98,6% voor platina in PEM).

% van wereldwijde jaarlijkse aanbod van CRM gebruikt als gevolg van elke strategie							
	CRM	uitgangssituatie	S1: vermindering	S2: vervanging	S4: productiviteitsverhoging*	S5: levensduurverlenging	S6–S7: recycling
PEM	Iridium	122%	6%	122%	81%	91%	122%
	Platina	25%	0,1%	0%	1%	21%	24%
	Raney-Ni	0,4%	0%	0,8%	0,1%	0,3%	0,0%
AEL	Nikkel (klasse 1)	2%	2%	2%	0,6%	2%	2%
	Kobalt	0,1%	0,1%	0%	0%	0%	0,1%

**Tabel 4.** Effect van elke strategie op vereiste hoeveelheid CRM voor opschaling

\* bij productiviteitsverhoging wordt uitgegaan van geen gebruik van PGM, zie beschrijving van strategieën



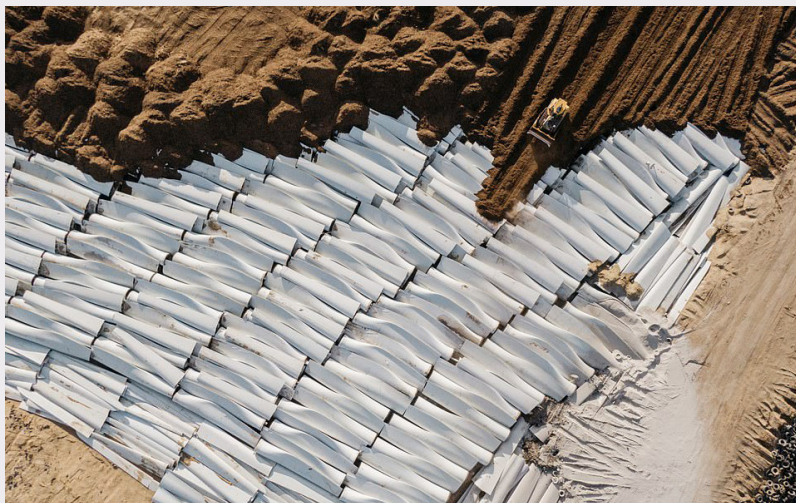
## Resultaten

Zoals blijkt uit Tabel 4, lijkt vermindering de meest doeltreffende strategie, aangezien de vraag naar CRM daardoor daalt tot enkele procentpunten van de wereldwijde jaarlijkse productie. Vervanging lijkt tot dusver geen mogelijkheden te bieden om de meest essentiële grondstof—iridium—uit de PEM-stack te verwijderen. De voordelen van **productiviteitsverhoging** en **levensduurverlenging** zijn dat ze de relatieve hoeveelheid van alle materialen in de stack per geproduceerde eenheid waterstof verminderen en dat het mogelijk moet zijn om ze met andere strategieën te combineren.

### Kan recycling alléén een tekort aan essentiële grondstoffen voorkomen?

Het probleem van de beschikbaarheid van CRM is niet louter door recycling van elektrolysestacks op te lossen, omdat de vraag naar CRM voor diverse toepassingen nog steeds toeneemt. Bovendien zit er altijd enige tijd tussen het moment dat materialen nodig zijn en het moment dat ze door recycling beschikbaar komen. Bijvoorbeeld, om elektrolyse op te schalen zal er in de komende decennia veel iridium nodig zijn, dat afkomstig moet zijn van ofwel mijnbouw ofwel recycling van andere producten. Omdat PEM-stacks ongeveer zeven jaar na installatie worden vervangen, komt het iridium uit de stacks pas op dat moment beschikbaar.

Het opschalen van recyclingtechnologieën zelf moet hand in hand gaan met het opschalen van de infrastructuur voor hernieuwbare energie, zodat er een duurzame nieuwe infrastructuur ontstaat die geen grote hoeveelheden afval oplevert. Helaas is de businesscase voor recycling niet altijd positief. Zo zijn glasvezelversterkte kunststoffen in de wieken van windturbines bijvoorbeeld lastig te hergebruiken of te recyclen, waardoor ze momenteel op stortplaatsen belanden of worden verbrand, wat bij opschaling van windenergie een aanzienlijk milieueffect zou kunnen hebben<sup>35</sup>.



Bron: <https://www.wind-watch.org/news/2020/05/07/not-so-green-energy-hundreds-of-non-recyclable-fiberglass-wind-turbine-blades-are-pictured-piling-up-in-landfill/>

Tot slot is het effect van recycling op de vraag naar en het aanbod van essentiële grondstoffen moeilijk in te schatten. Brandstofcellen en waterstoftechnologieën zijn momenteel in ontwikkeling en uit de literatuur blijkt dat zeker sommige daarvan zich nog op een laag 'technology readiness level' (TRL) bevinden (zie bijvoorbeeld de nieuwe technieken in Valente et al. (2019)<sup>36</sup>). Bovendien kunnen de door Valente et al. beschreven recyclingtechnieken weliswaar worden toegepast om diverse CRM terug te winnen uit de stack, maar de terugwinningspercentages zijn moeilijk te vinden. In deze studie zijn alleen de terugwinningspercentages van platina uit PEM (geëxtrapoleerd uit recyclingtechnieken voor brandstofcellen) verkregen op basis van de literatuur<sup>37</sup>. De mogelijkheid van volledige terugwinning van Raney-nikkel uit AEL-stacks was aangegeven door verscheidene fabrikanten van elektrolytische cellen.

<sup>35</sup> Larsen K., *Recycling wind turbine blades* (2009). *Renew Energy Focus*, 9 (7), 70–73

<sup>36</sup> Valente A., Iribarren D., Dufour J. (2019). *End of life of fuel cells and hydrogen products: From technologies to strategies*. *International Journal of Hydrogen Energy*. 38, 20965–20977

<sup>37</sup> Hodnik, N., Baldizzone, C., Polymeros, G. et al. (2016). *Platinum recycling going green via induced surface potential alteration enabling fast and efficient dissolution*. *Nat Commun* 7, 13164

### GEEN ENKELE STRATEGIE IS ZALIGMAKEND

Hoewel strategieën zoals vermindering en technologiemix op basis van de resultaten in Tabel 4 het meeste effect lijken te hebben, kunnen ze in werkelijkheid het CRM-probleem niet in hun eentje oplossen. Op dit moment vereisen alle technische strategieën nog jarenlang onderzoek voordat ze kunnen worden geïmplementeerd, waarna de opschaling van infrastructuur en processen nog moet volgen. De technologiemix is in dit opzicht de meest volwassen strategie, omdat de AEL- en de PEM-technologie beide reeds commercieel beschikbaar zijn en worden opgeschaald. De technologiekeuze berust echter vaak op technische en economische overwegingen, zodat er geen garantie is dat alleen technologieën met de minste essentiële grondstoffen zullen worden gebruikt. Daarom moet het onderzoek naar alle voorgestelde strategieën worden voortgezet om binnen afzienbare tijd tot haalbare oplossingen voor het CRM-probleem te komen.

De meeste van de hier beschreven strategieën bevinden zich nog in een vroeg stadium van technologische ontwikkeling. Het onderzoek naar iridiumreductie vindt bijvoorbeeld nog steeds plaats op laboratoriumschaal om geen concessies te doen aan de stabiliteit en de prestaties. Als de tests succesvol zijn, zal het nog enige tijd kosten om het ontwerp van elektrolysestacks te wijzigen en de vraag naar CRM te verminderen, en om aan te tonen dat de prestaties inderdaad op het gewenste niveau blijven met elektrolytische cellen op GW-schaal. De aanname achter de cijfers in Tabel 4 is dat de strategieën onafhankelijk van elkaar worden toegepast en dat de prestaties van de stacks hetzelfde zijn als in de uitgangssituatie. Bovendien zal de vermindering van CRM in nieuwe elektrolysestacks waarschijnlijk beter verlopen naarmate onderzoekers en fabrikanten meer ervaring opdoen volgens een bepaalde leercurve. Dit betekent dat de vermindering in het begin relatief gering kan zijn en later kan versnellen wanneer de technologie verder is ontwikkeld. Op korte termijn zou dit zich vertalen in meer druk op de CRM-markten doordat de opschaling van elektrolyse de vraag naar CRM opdrijft voordat er voldoende tijd is geweest om het aanbod uit te breiden.

Nadat de technologieën zijn ontwikkeld, is de volgende stap en de volgende uitdaging om de vereiste recyclinginfrastructuur te bouwen en de nodige processen en richtlijnen vast te stellen, vooral voor recycling. Uit onderzoek van HyTechCycling blijkt dat recycling van brandstofcellen en waterstofapparatuur momenteel economisch niet haalbaar is vanwege de hogere logistieke en recyclingkosten<sup>38</sup>. Hoewel recycling vanuit maatschappelijk oogpunt waarde creëert door de milieurisico's te verminderen en te waarborgen dat CRM ook op lange termijn beschikbaar zijn voor zowel duurzame energievoorzieningen als consumptiegoederen, is schaalvergroting niet waarschijnlijk zolang de businesscase voor fabrikanten en recyclingbedrijven negatief is. Bijvoorbeeld, wanneer elektrolyse wordt opgeschaald en de te recycleren hoeveelheden stacks relatief klein zijn, zal de businesscase voor recycling naar verwachting negatief blijven. Dit kan ertoe leiden dat de opschaling van de recyclinginfrastructuur vertraging oploopt, waardoor het tekort aan CRM en de milieuschade nog zullen toenemen. Hier ligt een essentiële taak voor de overheid, namelijk om ervoor te zorgen dat de recycling wél wordt opgeschaald samen met de afvalstromen. De in 2003 ingevoerde AEEA-richtlijn (betreffende afgedankte elektrische en elektronische apparatuur) is een goed voorbeeld van deze publieke taak: de richtlijn werd ingevoerd toen duidelijk werd dat deze afvalstromen zouden blijven toenemen maar de recyclingpercentages achterbleven, waardoor er problemen ontstonden met gevaarlijke stoffen op stortplaatsen en grondstoffen werden verspild.<sup>39</sup>

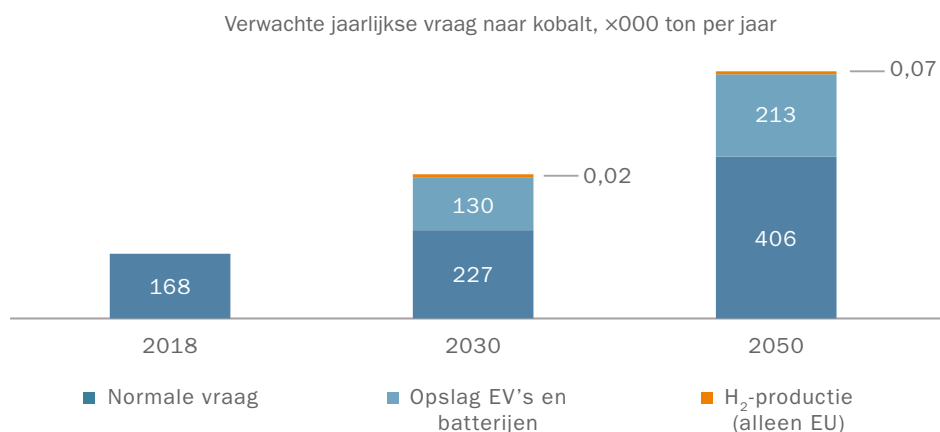
<sup>38</sup> HyTechCycling (2019). D6.2 Roadmap for recycling and dismantling strategies and technologies within FCH technologies

<sup>39</sup> Europese Commissie (z.d.). Waste from Electrical & Electronic Equipment (WEEE). Zie [https://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index_en.htm)

### BELEID EN TOEZICHT OP CRM ZIJN VOORWAARDEN VOOR EEN SUCCESVOLLE ENERGIETRANSITIE

De productie van groene waterstof is slechts één voorbeeld van een energietransitietechnologie waarvoor CRM nodig zijn. Materialen als kobalt zullen waarschijnlijk ook in grote hoeveelheden nodig zijn voor batterijen en accu's, onder meer in EV's. Vanwege de algemene bevolkingsgroei en stijgende levensstandaard zullen er bovendien grotere hoeveelheden nodig zijn voor niet-energiegerelateerde toepassingen. Daarom zal de vraag naar kobalt tegen 2050 naar verwachting bijna vier keer zo groot zijn als de huidige (zie onderstaande grafiek).

Waterstofproductie zal daarin slechts een zeer klein aandeel hebben, maar zal om kobalt moeten concurreren met andere duurzame energiebronnen en ook met niet-energiegerelateerde producten. Dit laat duidelijk zien dat de energietransitie in gevaar kan komen door de beperkte beschikbaarheid van grondstoffen. Afstemming tussen klimaatonderzoekers, technologie-instituten, handelsorganisaties en mijnbouwinstaties is dan ook noodzakelijk.



Bron: BGS 2018, TNO-analyse

**Figuur 3.** Verwachte wereldwijde jaarlijkse vraag naar kobalt in 2030 en 2050

De opschaling van duurzame energie is een ongekende opgave, die op mondiaal niveau wordt gemonitord door het IPCC en het IEA. Klimaatdoelstellingen worden vertaald in nationaal en internationaal beleid, dat het bedrijfsleven moet stimuleren om duurzame energiebronnen op te schalen. Voor de beschikbaarheid van grondstoffen die cruciaal zijn voor het bouwen van deze voorzieningen, ontbreekt echter een dergelijk mechanisme. Momenteel zijn slechts enkele landen bezig om het probleem op nationaal niveau in kaart te brengen, veelal in het kader van geologische onderzoeken, zoals in Duitsland, het VK, de VS en Japan. Er is geen beleid om materialen veilig te stellen voor toepassingen die van algemeen maatschappelijk belang worden geacht, met (deels) een uitzondering hierop in de VS, waar het Defense Agency strategische voorraden aanhoudt van materialen die essentieel worden geacht voor de nationale veiligheid.

In de EU begint langzaam een supranationaal niveau tot stand te komen: in september 2020 werd de oprichting van de European Raw Materials Alliance (ERMA) aangekondigd<sup>40</sup>, maar van dit soort initiatieven is op korte termijn geen beleidsmatige oplossing voor het falen van de vrije markt te verwachten. Markten kunnen weliswaar zorgen voor evenwicht tussen vraag en aanbod om grote verstoringen te voorkomen, maar hebben weinig invloed op prijs- en beschikbaarheidsrisico's en kunnen ook niet garanderen dat materialen op duurzame wijze worden gewonnen.

Het schoolvoorbeeld van het prijsrisico van essentiële grondstoffen was het gewapende conflict in Zaïre (Democratische Republiek Congo) in 1978, waardoor de kobalt prijzen in een paar maanden met 450% stegen<sup>41</sup>. Leader et al. (2019)<sup>42</sup> stellen dat als iets dergelijks zich nu zou voordoen, de kosten van sommige duurzame energietechnologieën zodanig zouden kunnen stijgen dat ze economisch onhaalbaar worden. Hieruit blijkt dat prijsvolatiliteit—als de risico's niet worden onderkend en mitigatiestrategieën ontbreken—invloed kan hebben op het tempo van de energietransitie.

40 About us – European Raw Material Alliance. Zie <https://erma.eu/about-us/>

41 Shedd, K.B. & McCullough, E.A. & Bleiwas, D.I. (2017). Global trends affecting the supply security of cobalt. *Mining Engineering*. 69. 37–42

42 Leader, A., Gaustad, G. & Babbitt, C. The effect of critical material prices on the competitiveness of clean energy technologies. *Mater Renew Sustain Energy* 8, 8 (2019)

Beschikbaarheids- of leveringsrisico's lijken zich overigens nu reeds voor te doen. In 2019 maakte Tesla bekend dat het in de toekomst 'leveringsproblemen' verwachtte voor grondstoffen zoals nikkel, lithium en koper, die onmisbaar zijn voor elektrische voertuigen (EV's)<sup>43</sup>. Vanwege problemen met de aanlevering van accu's moesten Jaguar Land Rover en Audi de productie van hun EV's eerder in 2020 al tijdelijk stilleggen en hun productiedoelstellingen voor dat jaar verlagen<sup>44</sup>. Deze voorbeelden laten zien welke impact een verstoring in de toeleveringsketen van essentiële componenten en grondstoffen kan hebben op de toekomstige energie-infrastructuur. Als Europa de klimaatdoelen wil halen, kan het zich dergelijke verstoringen niet veroorloven. Daarom is er behoefte aan adequaat beleid en toezicht om marktschokken als gevolg van structurele mismatches te voorkomen.

### TIJD VOOR ACTIE

Een aantal maatregelen kan helpen om het dreigende tekort aan CRM voor de energietransitie op te lossen. Althans, als we nu in actie komen.

#### Bewustwording en onderzoek

Op dit moment begint men zich langzaam bewust te worden van het verband tussen grondstoffen en onze klimaatdoelstellingen. Het grondstoffenvraagstuk is echter nog niet verankerd in de huidige plannen voor de opschaling van duurzame energie. Het besef dient door te dringen dat de energietransitie en de grondstoffenvoorziening nauw met elkaar samenhangen en dat de eerste niet mogelijk is zonder de tweede. Bewustwording is de eerste stap, gevolgd door een grondige analyse van de lacunes in onze kennis. Zo is bijvoorbeeld de literatuur over de benodigde grondstoffen voor elektrolytische cellen nog zeer beperkt, en buigen organisaties als de Wereldbank en het GCO zich pas sinds kort over de behoefte aan CRM voor energietransitie-technologieën. Tot slot moeten dan prognoses worden gemaakt van de vraag en het aanbod van CRM. **Bewustwording en onderzoek zullen zorgen voor de urgentie om het CRM-vraagstuk op de (politieke) agenda te plaatsen.**

#### Institutionalisering van continue beoordeling en actie

De beschikbaarheid van CRM is een maatschappelijk probleem waaraan we niet voorbij mogen gaan. Het is een complex probleem waarbij wereldwijde toeleveringsketens zijn betrokken en dat grote geopolitieke risico's en implicaties met zich meebrengt. Daarom moet eerst in kaart worden gebracht wat de belangrijkste risico's voor het bedrijfsleven zijn en met welke kwetsbaarheden in de toeleveringsketens de EU te maken heeft. Vervolgens moeten er op nationaal en Europees niveau maatregelen worden genomen om vraag en aanbod in evenwicht te brengen. Gezien de complexiteit van het CRM-probleem en de relevantie voor tal van producten, zijn incidentele maatregelen niet voldoende. Toekomstgerichte analyse en risico-beheer dienen te worden geïnstitutionaliseerd als formele, continue processen die door overheden worden uitgevoerd. In andere landen zijn hiervan reeds voorbeelden: het Amerikaanse Defense Logistics Agency houdt toezicht op markten voor diverse materialen die als 'strategisch' worden aangemerkt voor de defensiesector en komt in actie zodra er signalen zijn van mogelijke verstoringen in de toeleveringsketen<sup>45</sup>. Zo worden er binnenlandse voorraden aangelegd zodra er schaarste lijkt te dreigen, bijvoorbeeld omdat producenten bepaalde mijnen sluiten en de productie verlagen.

De EU en de lidstaten hebben het probleem van de leveringszekerheid reeds in 2010 onderkend<sup>46</sup>, maar er is nooit een concrete strategie uitgewerkt om de noodzakelijke aanvoer voor energietechnologieën en andere producten veilig te stellen. In september 2020 zijn er EU-maatregelen aangekondigd om een duurzaam aanbod van grondstoffen te garanderen, waaronder de oprichting van een Europese 'Critical Materials Alliance'<sup>47</sup>. Het is een dringende noodzaak om essentiële grondstoffen op deze manier op de agenda te zetten.

43 Scheyder E. (2 mei 2019). *Exclusive: Tesla expects global shortage of electric vehicle battery minerals – sources*. Reuters. Zie <https://www.reuters.com/article/us-usa-lithium-electric-tesla-exclusive-idUSKCN1S81QS>

44 Cohen A. (25 maart 2020). *Manufacturers are struggling to supply electric vehicles with batteries*. Forbes. Zie <https://www.forbes.com/sites/arielcohen/2020/03/25/manufacturers-are-struggling-to-supply-electric-vehicles-with-batteries/?sh=199755341ff3>

45 Defense Logistics Agency (z.d.). *Strategic materials*. Zie: <https://www.dla.mil/HQ/Acquisition/StrategicMaterials.aspx>

46 *Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials (juni 2010)*

47 [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_20\\_1542](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1542) en <https://www.crmalliance.eu/>



#### **Voorbeeld: toekomstgerichte analyse en overheidsingrijpen**

Wanneer het voorspelde aanbod van bepaalde CRM ontoereikend is om aan de verwachte vraag voor alle toepassingen te voldoen, kan een andere benadering van de grondstoffenmarkt noodzakelijk worden. Het kan nodig zijn om de toewijzing van CRM te reguleren zodat de beschikbare CRM worden gebruikt voor die toepassingen die de meeste maatschappelijke en milieuvoordelen opleveren. Om te beoordelen waar de risico's zitten, stellen wij voor om door middel van een 'merit order'-analyse na te gaan welke toepassingen het meest bereid zijn om voor een bepaalde CRM te betalen en welke toepassingen vermoedelijk achter het net zullen vissen. Als veel duurzame energiebronnen in die laatste categorie vallen, zijn de vrije CRM-markten wellicht aan herziening toe.

#### **Gerichte onderzoeksinspanningen**

Zoals in dit artikel is besproken, kan onderzoek helpen om de vraag naar CRM aanzienlijk te verminderen. Dergelijk onderzoek kost doorgaans tijd. Zo wordt al tien jaar gewerkt aan de vervanging van iridium in PEM-elektrolytische cellen, en toch is de TRL van deze technieken nog altijd laag. Onlangs is echter gebleken dat de mens in staat is om in zeer korte tijd opvallende resultaten te boeken als er maar voldoende aandacht en geld voor is: normaal duurt het jaren om een vaccin te ontwikkelen, maar in het geval van COVID-19 was het er binnen negen maanden. **De komende decennia zal een doorbraak nodig zijn in de afstemming tussen vraag en aanbod van CRM, en die vereist maximale aandacht en middelen.**

#### **Belangrijkste aannames in onze studie:**

- De samenstelling van elektrolytische cellen in de uitgangssituatie is gebaseerd op Smolinka et al. (2015).
- De bedrijfsuren van AEL en PEM zijn niet gekoppeld aan de hoeveelheid en het productieprofiel van hernieuwbare energie. In de praktijk zal dit een belangrijke bepalende factoren zijn voor de schaal van waterstofproductie.
- De strategieën staan los van elkaar; er is meer onderzoek nodig naar de onderlinge wisselwerking, bijvoorbeeld welke invloed een dunnere laag materiaal heeft op de productiviteit.
- Omwille van de vergelijkbaarheid is bij de berekening van het effect van alle strategieën uitgegaan van een technologiemix van 50% PEM en 50% AEL.
- Aangenomen is dat in de vraag naar waterstof in de EU (8100 PJ) volledig wordt voorzien met groene waterstof, zodat de grenzen van de productie van groene waterstof kunnen worden verkend. In lagere scenario's zal de benodigde hoeveelheid CRM worden vermindert in verhouding met de hoeveelheid groene waterstof.

Technologie	Criteria	Eenheden	Uitgangswaarde	Streefwaarde	Referentie
<b>Vermindering</b>					
PEM	Gebruik van Ir in stack	[g/m <sup>2</sup> ]	10	0,5	Bernt, M., Siebel, A., & Gasteiger, H.A. (2018). Analysis of Voltage Losses in PEM Water Electrolyzers with Low Platinum Group Metal Loadings. Journal of The Electrochemical Society, 165(5), F305–F314
PEM	Gebruik van Pt in stack	[g/m <sup>2</sup> ]	3	0,25	Maximilian Bernt et al. 2018 J. Electrochem. Soc. 165 F305
AEL	Gebruik van Pt in stack	[g/m <sup>2</sup> ]	13	0	Info van een leverancier van AEL-apparatuur
AEL	Gebruik van Raney-Ni in stack	[g/m <sup>2</sup> ]	26	0	Santos, D. & Sequeira, César & Figueiredo, José. (2012). Hydrogen production by alkaline water electrolysis. Química Nova. 36. 1176–1193.
<b>Vervanging</b>					
AEL	Gebruik van Pt in kathode	[g/m <sup>2</sup> ]	13	0	Info van een leverancier van AEL-apparatuur
AEL	Gebruik van Co in anode	[g/m <sup>2</sup> ]	20	0	Info van een leverancier van AEL-apparatuur
<b>Levensduurverlenging</b>					
PEM	Levensduur	[uren]	60.000	80.000	Info van een leverancier van PEM-apparatuur
AEL	Levensduur	[uren]	85.000	100.000	Info van een leverancier van AEL-apparatuur
<b>Productiviteitsverhoging</b>					
PEM	Celspanning	[V]	1,8	1,7	Info van een leverancier van PEM-apparatuur
PEM	Stroomdichtheid	[A/cm <sup>2</sup> ]	2	3	Info van een leverancier van PEM-apparatuur
AEL	Celspanning	[V]	1,9	1,7	Info van een leverancier van AEL-apparatuur
AEL	Stroomdichtheid	[A/cm <sup>2</sup> ]	0,3	1,0	Info van een leverancier van AEL-apparatuur; geen gebruik van PGM is essentieel voor opschaling, daarom is uitgegaan van 0 gebruik van Pt
<b>Recycling</b>					
PEM	Recycling van Pt	[%]	0%	99%	Hodnik, N., Baldizzone, C., Polymeros, G. et al. Platinum recycling going green via induced surface potential alteration enabling fast and efficient dissolution. Nat Commun 7, 13164 (2016).
AEL	Recycling van Raney-Ni	[%]	0%	100%	Info van twee leveranciers van AEL-apparatuur

**Tabel 6.** Aannames en bronnen voor de berekening van het effect van de strategieën

### **DANKBETUIGINGEN**

Wij danken onze collega's Frans van Berkel, Octavian Partenie, Elmer Rietveld, Robin White, Ton Bastein en Willem ter Horst voor hun steun en bijdragen aan dit artikel en het onderliggende onderzoek.

Het in dit artikel gepresenteerde onderzoek is opgezet binnen het VoltaChem Shared Innovation Program, waarin de beperkte beschikbaarheid van essentiële grondstoffen werd aangemerkt als een van de potentiële hindernissen voor grootschalige implementatie van Power-2-X-technologieën.

### **AUTEURS**

**Anastasia Gavrilova**

anastasia.gavrilova@tno.nl

Consultant bij TNO

**Sara Wieclawska**

sara.wieclawska@tno.nl

Consultant bij TNO

**TNO** innovation  
for life

**TNO.NL**