

Op weg naar circulaire elektrolyzers: verkenning van scenario's en strategieën.

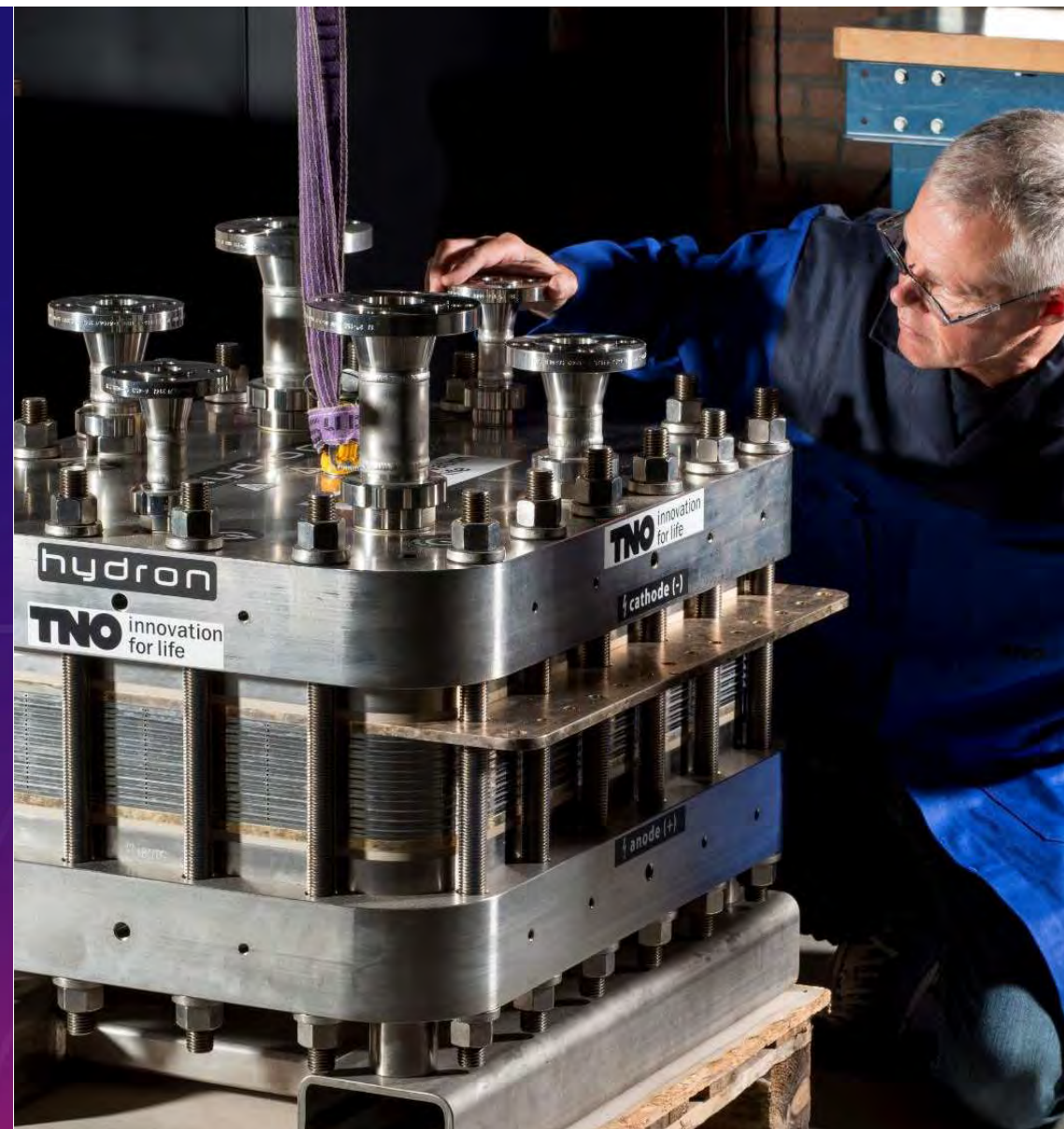
Casestudie over de opschaling van elektrolyse-technologieën in de EU en bijbehorend handelingsperspectief voor private en publieke organisaties om tot een minimale grondstofvraag te komen.

Auteurs: Roald Suurs (projectleider)
Thomas Hajonides van der Meulen
Benjamin Schoemaker

TNO Rapport no.: TNO 2024 R10600

Datum: Mei 2024

Classificatie: TNO Publiek



Inhoudsopgave

Kern



1

Introductie



2

Resultaten en
Conclusies

Inhoudelijke diepgang



3

Toekomstbeelden



4

Materiaalvraag



5

Strategie



6

Methode

1

Introductie

Achtergrond en doelstelling



Achtergrond

De productie van groene waterstof, met behulp van zogenaamde elektrolysetechnologie, vormt in vrijwel alle beschikbare scenario's, een essentiële rol in de transitie naar een klimaatneutrale economie. Om te voldoen aan de geplande vraag naar groene waterstof in de EU en in Nederland moet een nu nog nauwelijks bestaande productiecapaciteit worden opgeschaald.



Probleemstelling

Met de opschaling van elektrolysecapaciteit, wordt een beslag gelegd op de wereldwijde kritieke materialen-reserves. De voorgenomen ontwikkelingen leggen dus potentieel een enorm beslag op wereldwijde reserves van Critical Raw Materials. Zonder beleid en strategie gericht op efficiënt en circulair materiaalgebruik dreigen ontwikkelingen tegen planetaire grenzen aan te lopen en/of te stagneren.



De elektrolysetechnologie en het bijbehorende ecosysteem bevindt zich nog in een 'emergent' ontwikkelingsstadium en ontwikkelingen worden daarmee gekenmerkt door dynamiek en onzekerheid. Het is dus de vraag, voor beleidsmakers en andere strategische actoren, welke beleidsinterventies en welke strategieën wenselijk en haalbaar zijn in de komende jaren.

Onderzoeksvraag

Wat zijn passende strategische (beleids)interventies voor het mitigeren van de afhankelijkheid van kritieke materialen ten gevolge van de opschaling van elektrolyser-capaciteit in de EU?

Doelstellingen in de context van nationaal beleid

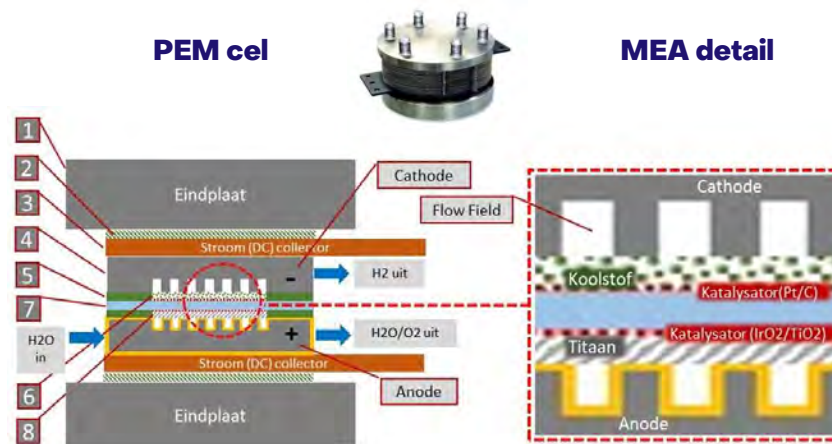
Doelstelling 1: Inzichten en strategische (beleids)aanbevelingen leveren voor het *bevorderen van ontwikkeling en opschaling van circulaire en materiaalefficiënte elektrolyzers*. Deze dienen als startpunt en contouren voor een door het Ministerie EZK te ontwikkelen *Routekaart Circulaire Elektrolyzers*.

Doelstelling 2: Ontwikkelen van *algemene onderzoeks- en interventiemethoden* gericht op het systemisch kunnen analyseren en begrijpen van strategisch relevante *CRM-intensieve emergente en / of snel opschalende technologieën*. Deze dienen als basis voor aanvullende case studies onder andere in het kader van het TNO-programma *Nationaal Materiaal Observatorium*.

Wat zijn elektrolyzers en over welke materialen hebben we het?

- De essentie van de elektrolysetechnologie wordt gevormd door basiseenheden, zogenaamde **cellen**, die elk afzonderlijk de basisfunctie, het splitsen van water, kunnen uitvoeren. Het hart van de cel wordt gevormd door een **membraan** of diafragma met daarop aangebrachte **elektrodes**, ingekapseld tussen twee metalen platen, waar water en reactiegassen langs gevoerd kan worden. Het geheel staat onder elektrische spanning en hoge mechanische druk. Meerdere gestapelde cellen vormen samen een **stack**. Naarmate er grotere en meerdere cellen op elkaar gestapeld worden, neemt het vermogen van de elektrolyzer-stack toe.
- Een **groene-waterstoffabriek**, of elektrolyzer-systeem, bestaat uit meerdere stacks, ingebed in een systeem van zogenaamde **Balance of Plant (BoP)**-componenten. Deze omvatten vermogenselektronica, waterbehandeling, gasbehandeling, koeling, sensoren en leidingen.
- De **Critical Raw Materials** van de elektrolyzers bevinden zich hoofdzakelijk in de bipolaire plaat of in de katalysatorlagen aangebracht op de positieve (anode) en negatieve (katode) elektroden. We hebben het dan, afhankelijk van de technologie, over voornamelijk titanium, nikkel, platina en iridium.

1. **Eindplaat**
2. **Separator**
3. **Stroomcollector**
4. **Bipolaire plaat**
5. **Afdichting**
6. **GDL (Anode)**
7. **Membraan + katalysatorlagen**
8. **GDL (Cathode)**

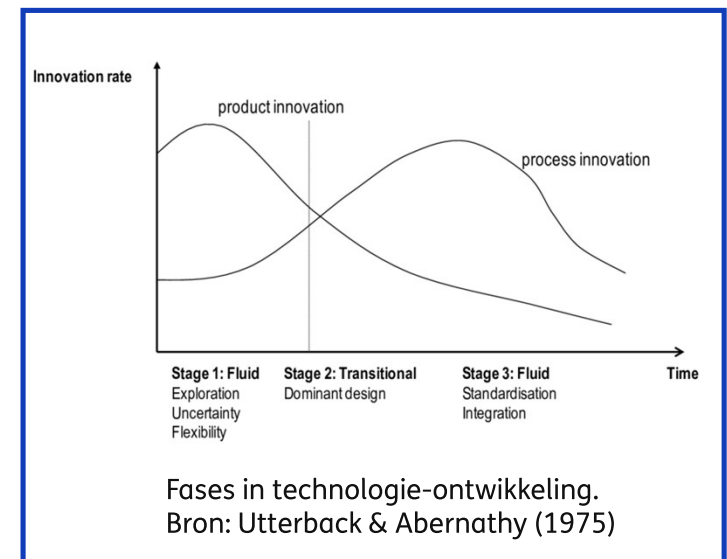


Bron: Suurs et al. (2021)

Enkele kenmerken van de ‘productgroep’ elektrolyzers maken dat dit een belangrijke case is voor het begrijpen en kunnen implementeren van circulaire strategieën in de context van de energietransitie

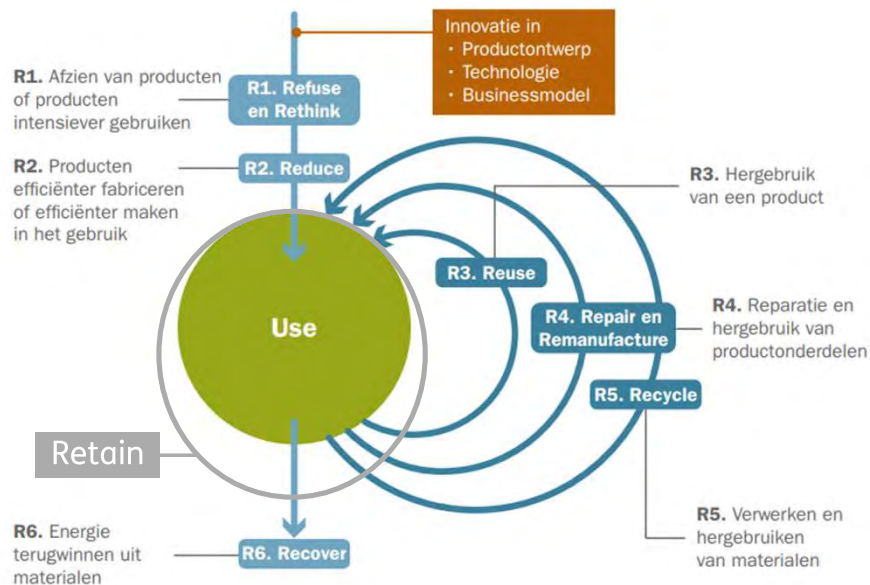
- **Beleidsgedreven:** Ontwikkeling en opschaling van elektrolysetechnologie is ingegeven door strategische beleidsdoelstellingen. De markt moet nog gecreëerd worden.
- **Emergent.** Elektrolyzers zijn technologisch niet uitontwikkeld en de uitwerking van materiaal-efficiëntie en circulariteit zal hand in hand moeten gaan met productinnovatie, procesinnovatie en opschaling.
- **Energie-intensief.** Elektrolyzers verbruiken grote hoeveelheden stroom. Hierdoor kunnen materiaal-efficiëntie en energie-efficiëntie op gespannen voet met elkaar staan. Hier spelen trade-offs. Het verlengen van de elektrolyserlevensduur kan bijvoorbeeld tot een lagere materialenvraag leiden, maar leidt tot een hoger energieverbruik vanwege de achteruitgang van prestaties over de levensduur.
- **Industriële equipment.** Elektrolyzers betreffen een B2B-markt en vormen een systemische bouwsteen van de energietransitie. Bestaand circulair beleid is gericht op e-waste en veelal huishoudelijke producten.
- **Critical Raw Materials:** Elektrolyzers bevatten relatief lage hoeveelheden kritieke materialen (CRMs) die essentieel zijn voor het langdurig efficiënt functioneren en tegelijkertijd specifieke uitdagingen met zich meebrengen waar het gaat om circulariteit.

Voor andere technologieën die voldoen aan bovenstaande kenmerken zal deze studie mogelijk bruikbare inzichten opleveren.



De bepaling welke strategieën effectief zijn om tot circulaire elektrolysers te komen vraagt om een grondige analyse

Een selectie van strategieën uit het R-ladder denkkader wordt verkend in deze studie zoals ook gebruikt door Gavrilova & Wieclawska (2021): zie onderstaand figuur.



De R-ladder.
Bron: Rood & Kishna (2019).

<p>Refuse</p> <p>Aandeel van elektrolysers met problematische CRMs beperken door technologie te vermijden.</p>	<p>Reduce</p> <p>Stapsgewijze vermindering van materialenvraag van elektrolysers door innovatie of optimalisatie.</p>
<p>Retain</p> <p>Verlengen van de operationele levensduur van elektrolysers.</p>	<p>Recycle</p> <p>Stapsgewijs meer secundair materiaal gebruiken in productieproces. En verhoogde terugwinning van materialen uit oude elektrolysers.</p>

Aanpak en resultaten

Toekomstbeelden

Op basis van literatuurstudie zijn enkele **brede toekomstbeelden van belangrijke systemische ontwikkelingen** geschetst.

Materiaalvraag

De scenario's bieden de context voor een **analyse met behulp van een kwantitatief model** dat op EU-niveau een inschatting geeft van de **vraag naar virgin kritieke materialen** als gevolg van:

- (a) het opschalen van elektrolyser-capaciteit;
- (b) de effectiviteit van zogenaamde R-strategieën.

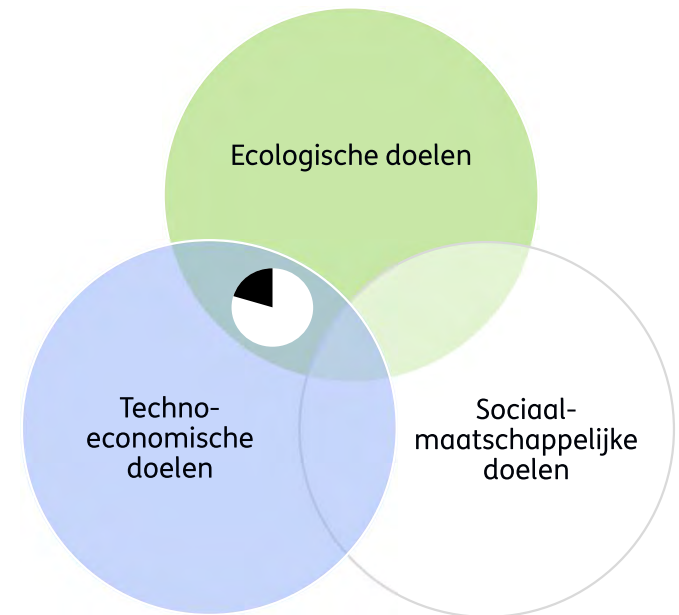
Strategie

Op basis van **interviews** is in onderzocht wat de huidige positie van bedrijven is ten opzichte van R-strategieën en welk strategisch perspectief zij zien in termen van innovatie en overheidsinterventies.

Methode: Ontwikkelen *algemene onderzoeks- en interventiemethoden*.

De scope in dit onderzoek is ‘circulariteit’ in relatie tot opschaling en materiaalvraag. Andere duurzaamheidsaspecten zijn relevant maar blijven voor deze studie buiten beschouwing.

- Het realiseren van de energie- en materialentransitie binnen planetaire grenzen, impliceert de noodzaak om te balanceren en soms ook compromissen te zoeken over verschillende aspecten van duurzaamheid.
- **Focus van deze studie ligt op het snijvlak van techno-economische (opschaling) en ecologische doelen (materiaalvraag).**
- **Techno-economische doelen** worden voor deze studie gereduceerd tot de ontwikkeling van voldoende productiecapaciteit en ontwikkeling van circulaire technologische oplossingen. Zaken als kostenreductie, energiebalansen of comparatieve voordelen van technologieën worden niet geanalyseerd.
- Wat betreft **Ecologische doelen** wordt in deze studie ingezoomd op de eliminatie van grondstoffen (e.g. platina, iridium en nikkel) verkregen via mijnbouw. Andersoortige ecologische doelen, aanvullend op grondstof-extractie, worden niet binnen dit onderzoek geadresseerd. Denk aan:
 - Watergebruik
 - Ecologische impact van mijnbouw en raffinage
 - Aandeel risicogebieden biodiversiteit
- Het meenemen van bredere **sociaal-maatschappelijke doelen** is essentieel bij het ontwikkelen van beleid maar deze aspecten worden in deze studie buiten beschouwing gelaten.
- Milieukundige aspecten rondom productie, gebruik en ontmanteling van elektrolyzers die niet gerelateerd zijn aan materiaalgebruik vallen eveneens buiten de scope van deze studie. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de zorgen rondom PFAS. Hier wordt momenteel separaat TNO-onderzoek naar verricht. Zie Löbbecke et al. (2024).



Deze studie is mede tot stand gekomen dankzij de bijdragen en feedback van de volgende personen.

Interviewrespondenten

Geert Wassens – Battolyser Systems

Rokus van Iperen – Bosch Tilburg

Diederik Jaspers – Circonica

Jan Jaap Aué – EnTranCe

Marel Galjee – HyCC

Peter Ellis – Johnson Matthey

Adriaan Jeremiasse – Magneto

Jerome van Beek – MTSA

Till Bullman – Schaeffler

Leo Freriks – Siemens Energy

Peter Visser – SALD bv

Christopher Frey & Tilo Suckow – Sunfire

Mark Breed – Tejin Aramid

Marius Ponten – VDL Energy Systems

Ahmadreza Rahbari – XinTC

Experts TNO

Arend de Groot – TNO

Marco Wonink – TNO

Kieran Campbell-Johnston – TNO

Lennart van der Burg – TNO

Eduardo Da Rosa Silva – TNO

Michiel Langerman – TNO

Marcelle Potgieter – TNO

Ministerie van EZK

Mattheus van de Pol

Paul Verbraak

Jarno Dakhorst

Reviewers TNO

Ton Bastein – TNO

Elmer Rietveld – TNO

2

Resultaten en Conclusies

Toekomstbeelden

Op basis van literatuurstudie zijn enkele **brede toekomstbeelden van belangrijke systemische ontwikkelingen** geschetst.

Materiaalvraag

De scenario's bieden de context voor een **analyse met behulp van een kwantitatief model** dat op EU-niveau een inschatting geeft van de **vraag naar *virgin* kritieke materialen** als gevolg van:

- (a) het opschalen van elektrolyser-capaciteit;
- (b) de effectiviteit van zogenaamde R-strategieën.

Strategie

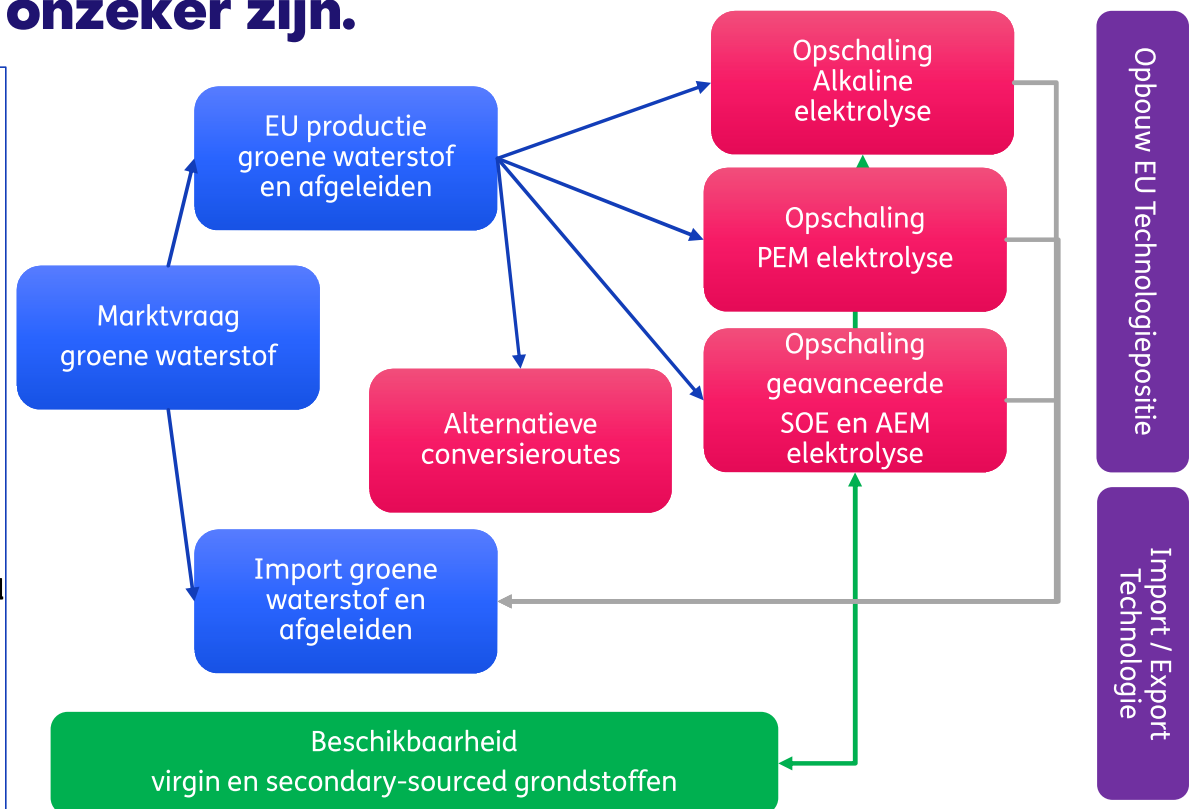
Op basis van **interviews** is in onderzocht wat de huidige positie van bedrijven is ten opzichte van R-strategieën en welk strategisch perspectief zij zien in termen van innovatie en overheidsinterventies.

Methode: Ontwikkelen *algemene onderzoeks- en interventiemethoden*.

Hoofdboodschap:

Ontwikkeling en opschaling van een circulaire Europese elektrolyser-industrie hangt qua omvang en timing af van vier systemische ontwikkelingen die inherent onzeker zijn.

- De **eerste ontwikkeling** is de ontwikkeling van de **marktvraag naar groene waterstof (en afgeleiden daarvan)** zowel voor Europa als voor de wereldeconomie.
- Een **tweede ontwikkeling** is de ontwikkeling van een **Europese productiecapaciteit voor groene-waterstofproductie**. Welk aandeel van het groene-waterstofaanbod wordt geproduceerd in Europa en welk aandeel wordt geïmporteerd?
- Een **derde ontwikkeling** is het **tijdig beschikbaar komen van marktrijpe elektrolysetechnologie met de bijbehorend productieketens**. Worden deze productieketens en innovatie-ecosystemen in Europa gevestigd of voornamelijk in China of de VS?
- De **vierde ontwikkeling** betreft de **tijdige beschikbaarheid van virgin en 'secondary sourced' materialen** en halffabricaten voor de productie van componenten en systemen.
- Iedere analyse of strategische overweging zal rekening moeten houden met deze ontwikkelingen door middel van gevoeligheidsanalyses of scenario-denken.



Toekomstbeelden

Op basis van literatuurstudie zijn enkele **brede toekomstbeelden van belangrijke systemische ontwikkelingen** geschetst.

Materiaalvraag

De scenario's bieden de context voor een **analyse met behulp van een kwantitatief model** dat op EU-niveau een inschatting geeft van de **vraag naar *virgin* kritieke materialen** als gevolg van:

- (a) het opschalen van elektrolyser-capaciteit;
- (b) de effectiviteit van **zogenaamde R-strategieën**.

Strategie

Op basis van **interviews** is in onderzocht wat de huidige positie van bedrijven is ten opzichte van R-strategieën en welk strategisch perspectief zij zien in termen van innovatie en overheidsinterventies.

Methode: Ontwikkelen *algemene onderzoeks- en interventiemethoden*.

Hoofdboodschap:

De Europese groene H₂-doelstellingen komen zonder inzet van circulair beleid in de knel met doelstellingen om afhankelijkheid van primaire grondstoffen te minimaliseren.

- Het opschalen van groene-waterstofproductie in Europa naar 11 Mton/jaar (1322 PJ/jaar) in 2050 zal leiden, onder de aannames van ons model, tot een **significante vraagtoename naar CRMs**.
- Voor platina tussen de 1.3 en 3.3 ton/jaar; dit is 0.8% tot 2.0% van de huidige wereldproductie)
- Voor iridium tussen de 0.4 en 1.4 ton/jaar; dit is 7% tot 22% van de huidige wereldproductie.
- **Voor nikkel is de vraagtoename als gevolg van elektrolyserproductie marginaal**. Omgekeerd geldt wel dat de nikkelprijs naar verwachting zal toenemen als gevolg van toenemende vraag voor andere toepassingen.
- De **piekvraag naar CRMs als gevolg van opschaling ligt naar verwachting al rond 2035**. Deze piekvraag zal met name voor iridium en platina een groot effect hebben op prijs en beschikbaarheid.
- **In dit scenario komen de Europese opschalingsdoelen al op relatief korte termijn in de knel met de doelstelling om afhankelijkheid van primaire grondstoffen te minimaliseren**.
- Onzekerheidsanalyse laat zien dat deze materiaalvraag nog 100% groter kan uitpakken. Maar dat er een piekvraag te verwachten is, is evident. **Het belang om R-strategieën te introduceren in de levenscyclus van elektrolyzers is daarmee cruciaal voor het mitigeren van dit risico**.

De **effectiviteit van R-strategieën** om tot eliminatie van grondstofvraag te komen **zal sterk verschillen** en vereist de overtuigende inzet van publieke en private organisaties.

- **Reduce** heeft de grootste impact en is al op korte termijn te implementeren. Dit vereist focus op snelle innovatie en strenge eisen aan materiaalefficiëntie van componenten.
- Een **Recycle-strategie** impliceert het switchen naar CRMs van secundaire oorsprong. Dit kan zeer effectief zijn maar hangt af van de beschikbaarheid van voldoende gerecycled materiaal. Met name voor iridium is deze materiaalstroom op korte termijn niet voor handen. Substantiële input uit gerecycleerde elektrolyzers is pas na 2040 te verwachten.
- De **Refuse-strategie** laat zien dat minimaliseren van het gebruik van PEM-technologie weliswaar leidt tot reductie van de vraag naar virgin iridium, maar tegelijkertijd zorgt voor een toename in de vraag naar virgin platina.
- **Retain**, ofwel levensduurverlenging, leidt tot efficiënter gebruik van de grondstoffen. De verwachting is dat dit effect marginaal is en deels overrechs werkt omdat het de vervangingsvraag naar efficiëntere elektrolyzers vertraagt.

Conceptueel model voor modellering van materiaalvraag in relatie tot opschaling groene waterstofproductie.

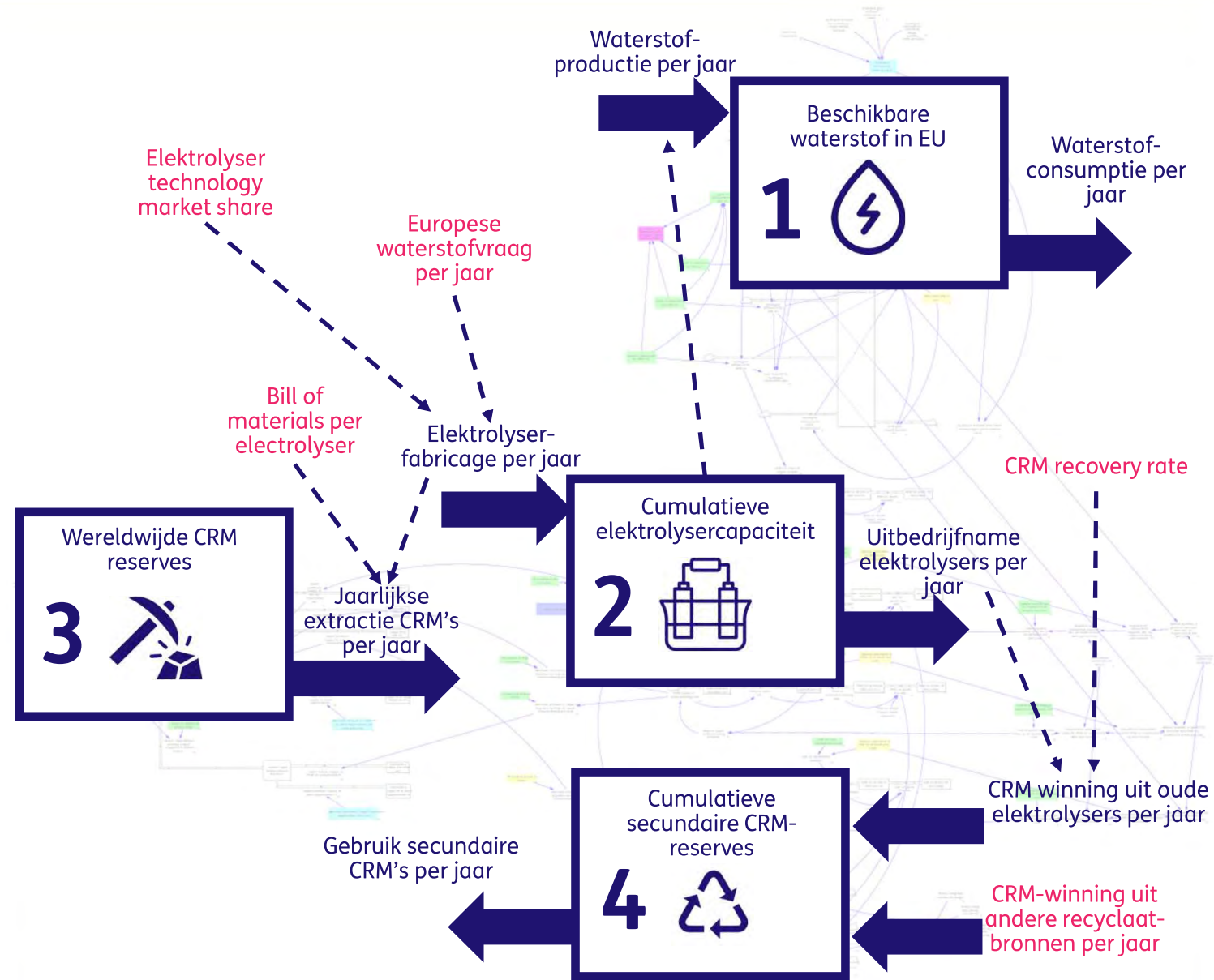
De vraag naar groene waterstof is het startpunt van het model. Deze vraag bepaalt hoeveel additionele elektrolyzers door de tijd heen worden bijgebouwd (*flow*).

Deze worden toegevoegd aan de bestaande **elektrolysercapaciteit** (*stock*).

Via de zogenaamde **bill of materials** (de kritieke-materialenvraag van elk type elektrolyser) leidt de bouw van nieuwe elektrolyzers tot de **winning van virgin kritieke materialen**.

Tegelijkertijd worden in het model elektrolyzers die het einde van hun levensduur hebben behaald, uit de bestaande capaciteit gehaald (*flow*). Hierdoor komen er **gerecyclede kritieke materialen** beschikbaar, die kunnen worden gebruikt voor de bouw van nieuwe elektrolyzers, in plaats van virgin kritieke materialen.

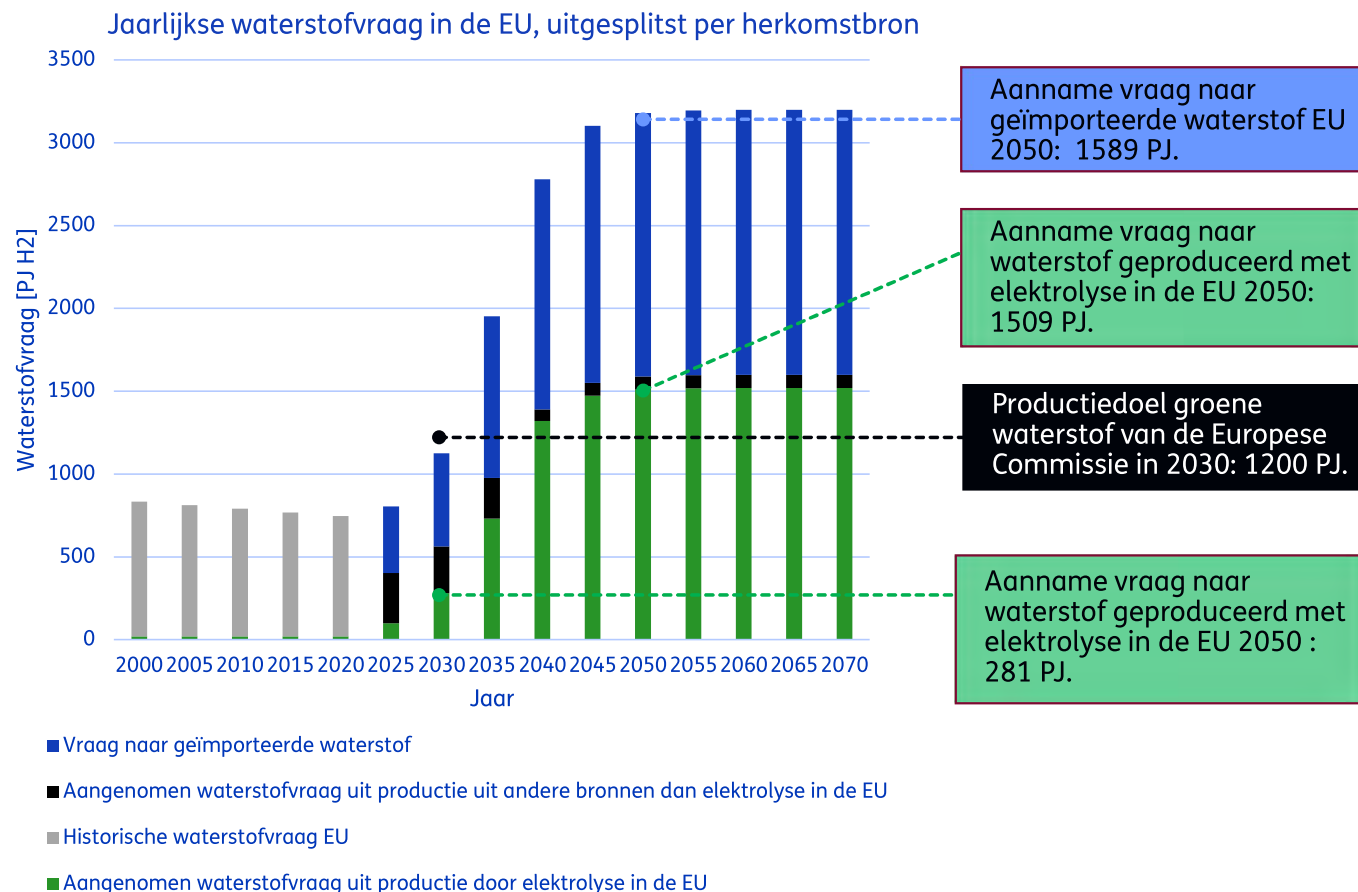
De dynamische simulaties die we met deze modelopzet hebben uitgevoerd noemen we de base case.



Snelle opschaling elektrolyzers nodig om aan groene waterstofvraag te voldoen

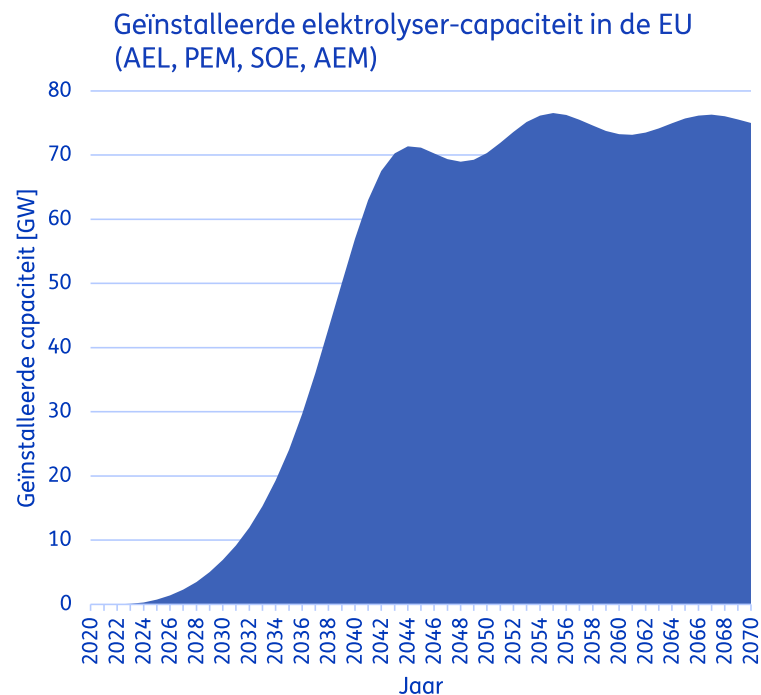
In het base case-scenario nemen we een waterstofvraagprojectie in de EU aan op basis van het Net Zero Emissions (NZE) Scenario van de IEA (International Energy Agency, 2023a & International Energy Agency, 2023b). Uit de data in deze rapportages volgt een waterstofvraag in de EU van 9.3 Mton (1116 PJ) in 2030 en 26.7 Mton (3199 PJ) in 2050. We gaan ervanuit dat de helft van die vraag wordt ingevuld door waterstofproductie in de EU en de helft door waterstofimport.

Wat betreft de waterstofproductie in de EU gaan we ervanuit dat het aandeel groene waterstof daarin lineair ingroeit van 0% in 2020 tot 50% in 2030 (EU-doelstelling, zie Erbach & Svensson, 2023) en daarna lineair verder stijgt tot een maximum van 95%.

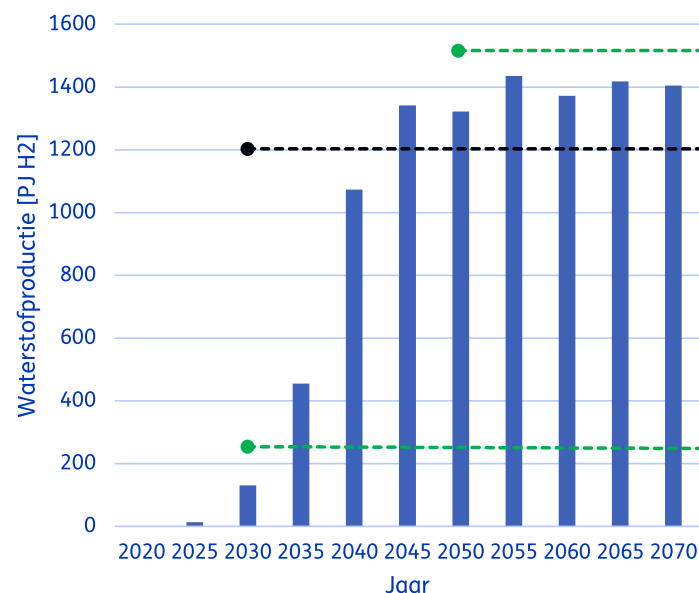


Snelle opschaling elektrolyzers nodig om aan groene waterstofvraag te voldoen

De simulatie van de resultaten met ons systeemdynamisch model leidt tot onderstaande resultaten. In 2030 bedraagt de geïnstalleerde elektrolysercapaciteit 6.9 GW, in 2050 70 GW. Deze capaciteit zorgt voor een productie van 130 PJ groene waterstof in 2030 en 1322 PJ in 2050. Er is dus een snelle opschaling van de elektrolysercapaciteit nodig om aan de vraag naar groene waterstof te voldoen. Er blijft een gat bestaan tussen vraag en aanbod van elektrolyse door tijdvertragingen in het model.



Jaarlijkse waterstofproductie uit elektrolyse in de EU



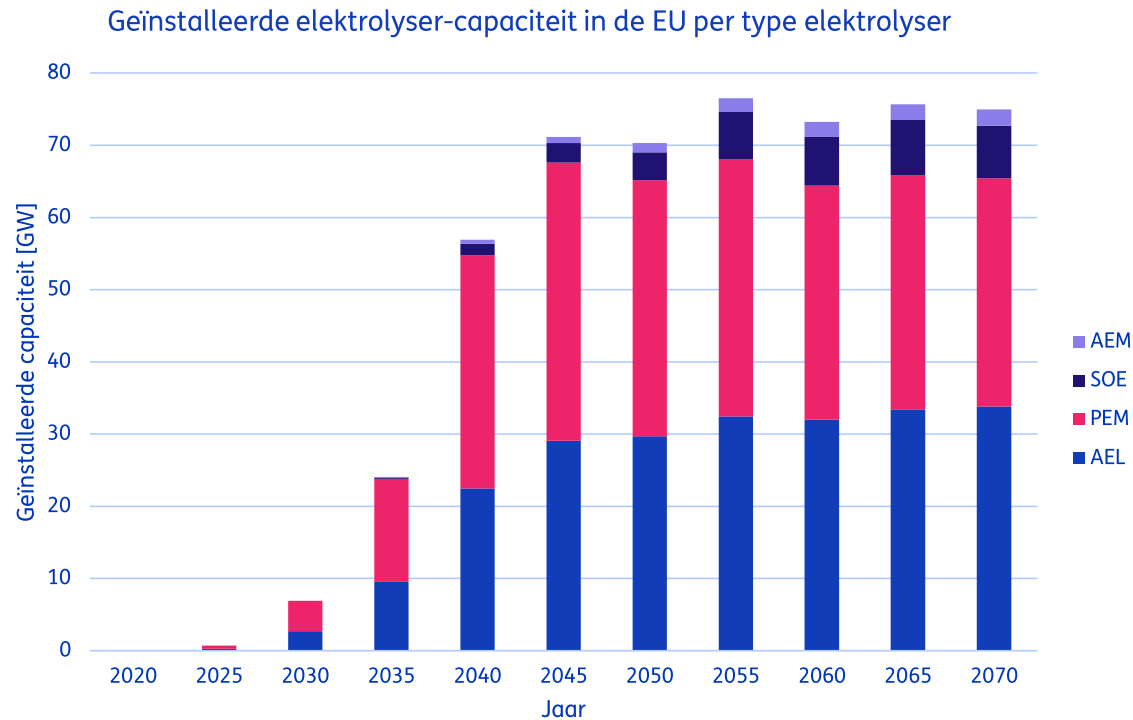
Aanname groene waterstofvraag uit elektrolyse EU 2050: 1509 PJ.

Productiedoel groene waterstof van de Europese Commissie in 2030: 1200 PJ.

Aanname groene waterstofvraag EU uit elektrolyse 2030: 281 PJ.

Technologiemix elektrolyzers is niet statisch; nieuwe technologieën SOE en AEM groeien in

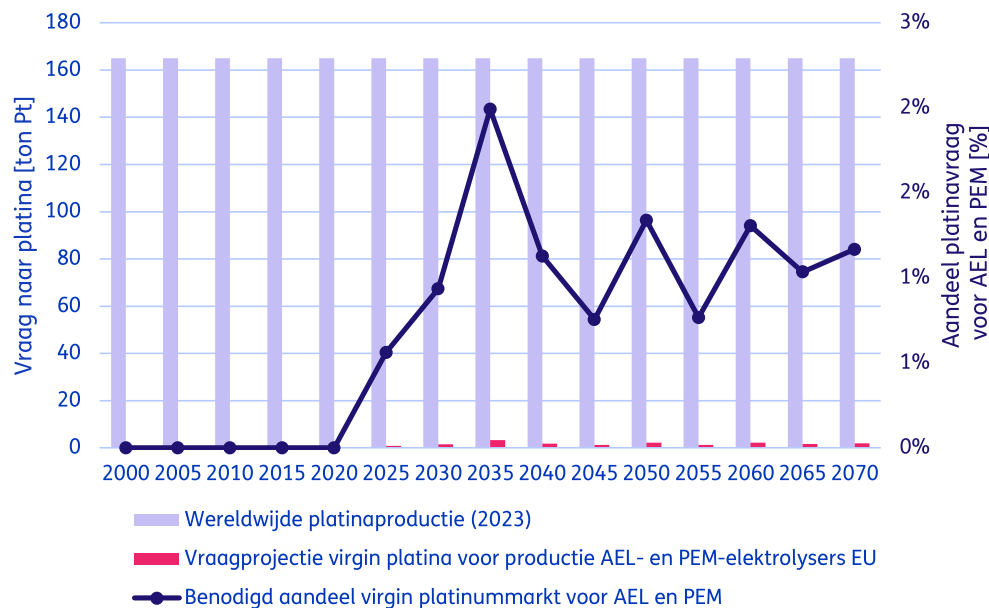
In onze simulaties nemen we aan dat de verhouding tussen verschillende elektrolysertypen (de technologiemix) in nieuw te installeren elektrolyzers door de tijd heen verandert. De verhouding van AEL ten opzichte van PEM neemt toe en nieuwe technologieën, SOE en AEM, groeien in.



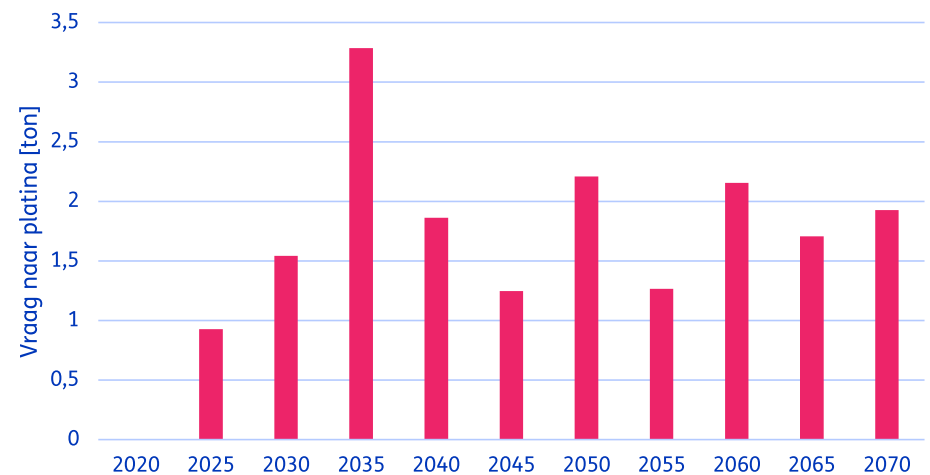
Vraag naar PGM's voor elektrolyzers neemt een vlucht; vooral iridiumvraag legt groot beslag op wereldmarkt

Als gevolg van de opschaling van de elektrolyser-capaciteit neemt in het base case-scenario de jaarlijkse vraag van de elektrolyser-industrie naar platina toe tot 3.3 ton in 2035. Daarna daalt de jaarlijkse vraag doordat de snelheid van de opschaling van de elektrolyser-capaciteit afvlakt na 2035. Echter, tussen 2043 en 2049 stijgt de vraag weer vanwege het uit bedrijf raken van bestaande elektrolyzers. Dit zorgt voor een golfpatroon in de vraag. In 2050 bedraagt de vraag naar virgin platina 2.2 ton. Ter vergelijking: de totale platinacconsumptie in de EU in 2021 was 40.4 ton, waarvan 55% vanuit de automotive-industrie (Georgitzikis et al., 2023). De wereldwijde platinaproductie in 2021 was 165 ton (SCREEN, 2023). De vraag naar virgin platina voor electrolyser-productie in de EU zou dus in het base-case scenario in 2035 uitkomen op 2.0% van de huidige wereldwijde productie en 1.3% in 2050.

Vraag naar virgin platina voor AEL- en PEM-elektrolyzers is marginaal in vergelijking met de huidige markt.



Jaarlijkse vraag naar virgin platina voor elektrolyserproductie in de EU

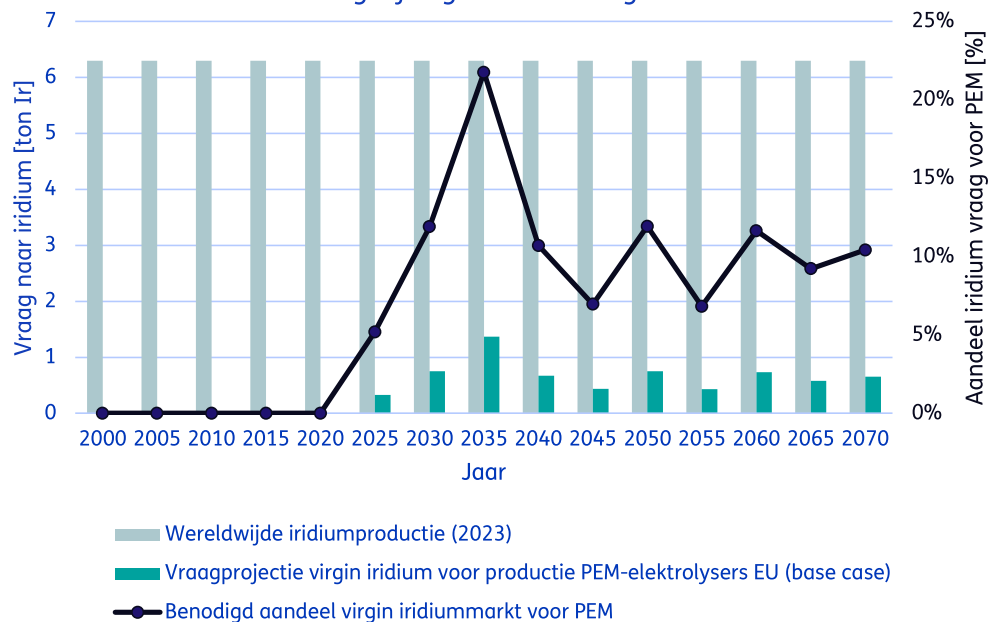


Vraag naar PGM's voor elektrolyzers neemt een vlucht; vooral iridiumvraag legt groot beslag op wereldmarkt

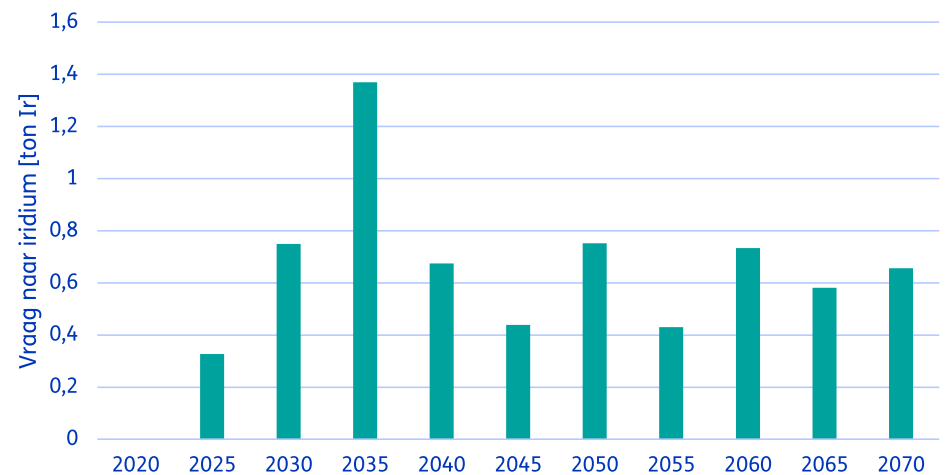
Ten opzichte van platina legt de iridiumvraag van elektrolyserproductie in de EU een veel groter beslag op de wereldmarkt. De piekvraag in 2035 van 1.37 ton is maar liefst 22% van de huidige wereldwijde productie (6.3 ton [SCREEN, 2023]). In 2050 bedraagt de vraag naar iridium voor de productie van elektrolyzers 0.75 ton, dit is 12% van de huidige wereldwijde productie.

Gezien het significante aandeel van de vraag naar virgine platina en iridium voor de opschaling van elektrolyzers, nemen wij deze materialen mee in de rest van ons onderzoek.

Vraag naar virgine iridium voor PEM-elektrolyzers is substantieel in vergelijking met de huidige markt



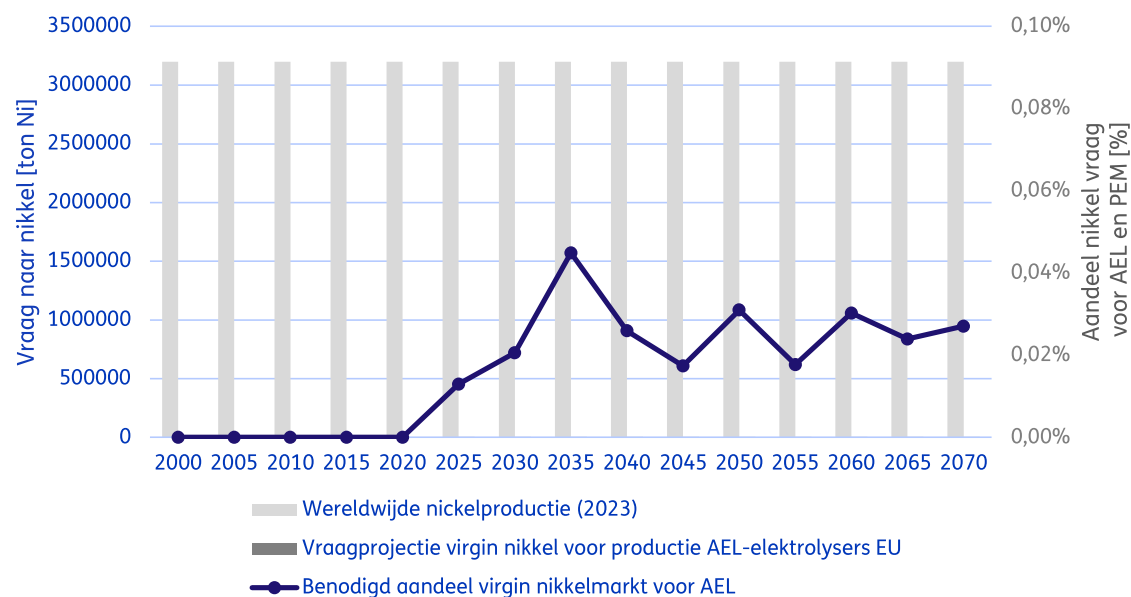
Jaarlijkse vraag naar virgine iridium voor PEM elektrolyserproductie in de EU



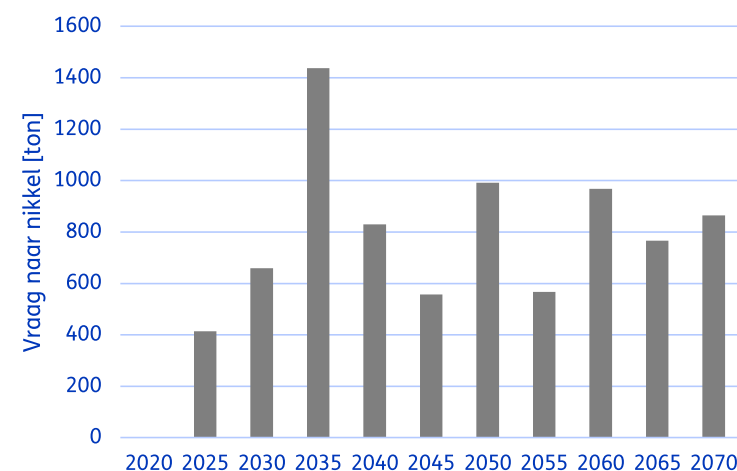
Nikkelvraag elektrolyserproductie EU is veel kleiner deel van wereldwijde vraag

Naast de vraag van elektrolyserproductie in de EU naar PGM's, hebben we ook de vraag naar nikkel onderzocht. De resultaten voor de base case zijn hieronder weergegeven. De geschatte wereldwijde nikkelconsumptie was 3.2 miljoen ton in 2023 (Manthey, 2023). Hiermee komt de piekvraag naar virgin nikkel voor elektrolyserproductie in de EU in 2035 uit op 0.04% van de wereldwijde consumptie. Omdat dit aandeel gering is, laten wij nikkel buiten beschouwing in de rest van onze analyse.

Vraag naar virgin nikkel voor AEL-elektrolyzers is verwaarloosbaar in vergelijking met de huidige markt.



Jaarlijkse vraag naar virgin nikkel voor AEL-elektrolyserproductie in de EU



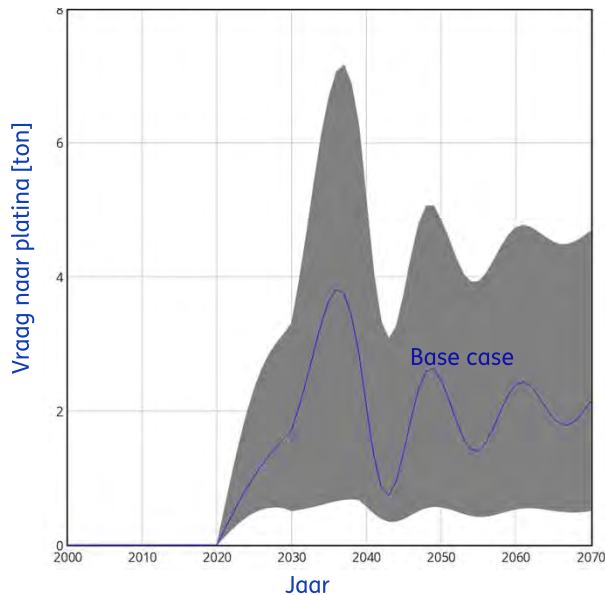
Onzekerheden zorgen voor grote spreiding in uitkomsten

De voorgaande resultaten zijn geproduceerd door een modelsimulatie die uitgaat van een bepaald base case-scenario. Echter, de toekomst is onzeker en daarom is het goed te beseffen dat de vraag naar kritieke materialen veel hoger of veel lager uit kan vallen dan voorgesteld in deze analyse. Als de vraag naar groene waterstof achterblijft, dempt dit de vraag naar kritieke materialen. Als de beoogde technologieverbeteringen tegenvallen zullen er juist meer kritieke materialen nodig zijn. Bij de beoordeling van de impact van R-strategieën is het dus van belang vooral op de relatieve impact te letten en de absolute effecten niet als voorspelling te zien.

In dit kader hebben wij ook een onzekerheidsanalyse uitgevoerd, die inzicht biedt in de bandbreedte van de uitkomsten. Ook hebben wij een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, die aangeeft welke inputparameters het meest van invloed zijn op de uitkomsten.

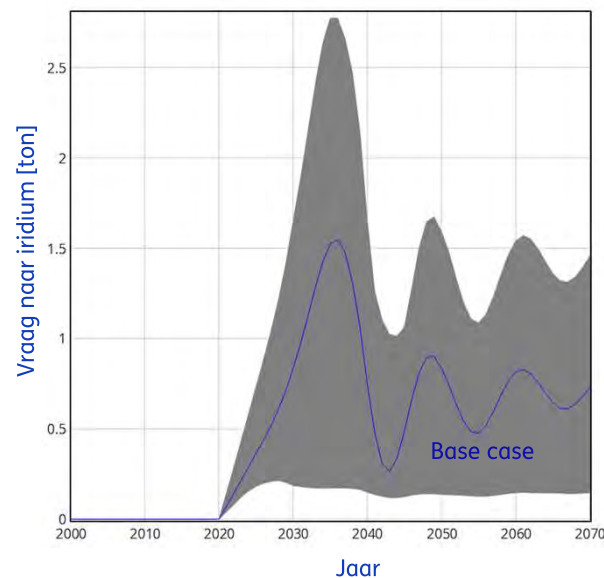
Onzekerheidsanalyse base case:

Jaarlijkse vraag naar virgin platina voor AEL en PEM elektrolyser-productie in de EU



Onzekerheidsanalyse base case:

Jaarlijkse vraag naar virgin iridium voor AEL en PEM elektrolyser-productie in de EU



De uitkomsten vertonen een spreiding door onzekerheden in input-parameters. De virgin platinavraag is het meest gevoelig voor de volgende parameters:

1. **Stroomdichtheid AEL-elektrolyzers:** deze verschilt per elektrolyser en daarom hanteren we hiervoor een bandbreedte. Voor PEM-elektrolyzers geldt dat op dit vlak technologieverbeteringen worden verwacht; hiervoor hanteren we ook een onzekerheidsmarge.
2. **Vraag naar groene waterstof:** we hanteren een bandbreedte met aan de onderkant een vraagprojectie die uitgaat van het *stated policies*-scenario uit de World Energy Outlook 2023 (International Energy Agency, 2023c) en aan de bovenkant een projectie op basis Net Zero Emissions scenario (International Energy Agency, 2023a), die tevens een uitgangspunt vormt van het base case-scenario.
3. **Hoeveelheid platina in AEL-stack:** in de literatuur variëren deze getallen. Ook is het onzeker in hoeverre technologieverbetering deze hoeveelheid zal reduceren.

R-strategieën kunnen bijdragen aan het verminderen van de vraag naar kritieke materialen

Uit voorgaande resultaten blijkt dat het opschalen van elektrolyser-capaciteit een aanzienlijk beslag legt op de vraag naar kritieke materialen. Vooral voor iridium lijkt de schaarste nijpend. De uitrol van de groene-waterstofproductie in de EU lijkt dus op gespannen voet te komen staan met de EU-doelstelling om geen grondstoffenextractie nodig te hebben vanaf 2050. We hebben dus te maken met conflicterende doelstellingen op het gebied van enerzijds klimaat en anderzijds circulaire economie.

Om de vraag naar kritieke materialen te reduceren maar tegelijkertijd de groene-waterstofdoelstellingen te halen, zijn circulariteitsstrategieën nodig. Voor deze strategieën worden in de literatuur negen verschillende strategieën onderscheiden (Vollebergh et al., 2017). In dit onderzoek hebben wij Refuse, Reduce en Recycle onderzocht. Retain als R-term voor levensduurverlenging hebben wij toegevoegd omdat elektrolyser-experts verwachten dat deze voor elektrolyzers een rol zal gaan spelen.

Wij hebben deze strategieën op het base case-scenario toegepast. Alle overige aannames van het base case-scenario blijven dus in stand. Bijvoorbeeld: Als wij in het vervolg spreken van resultaten van bijvoorbeeld de Refuse-strategie, bedoelen wij daarmee het base case-scenario met toepassing van de Refuse-strategie.



Refuse

Aandeel van PEM elektrolyzers beperken tot 25% in 2050 om vraag naar iridium te reduceren.



Reduce

Stapsgewijze vermindering van materialenvraag van elektrolyzers (AEL & PEM) door technologische innovatie of optimalisatie.



Retain

Verlengen van de operationele levensduur van elektrolyzers met 20% door technologische innovatie of optimalisatie.







Recycle

Stapsgewijs meer secundair materiaal gebruiken in productieproces: van 0% in 2030 naar 90% in 2050. En verhoogde terugwinning van materialen uit oude elektrolyzers.

Er zijn verschillende interacties te verwachten tussen de diverse R-strategieën. Een selectie is gesimuleerd.

Onze hypothese is dat er in de realiteit nog meer interacties zijn tussen R-strategieën die moeilijk te vatten zijn in ons huidige model. Hieronder hebben wij een eerste aanzet gedaan tot een kwalitatieve analyse van dergelijke interacties. Let wel: deze veronderstelde interacties zijn slechts hypothesen die verdere uitwerking en validatie behoeven. Het raamwerk dient met de klok mee gelezen te worden. Bijvoorbeeld: het veronderstelde effect van *Reduce* op *Recycle* luidt: “Reduce verkleint het schaalvoordeel van recycling”.

 <p>Refuse Aandeel PEM-elektrolyzers afbouwen</p>	<p><i>Refuse</i> maakt <i>Reduce</i> effectiever vanwege gerichtere R&D en technologiefocus en daardoor schaalvoordelen</p>	<p><i>Refuse</i> maakt <i>Retain</i> effectiever vanwege gerichtere R&D en technologiefocus en daardoor schaalvoordelen</p>	<p><i>Refuse</i> maakt <i>Recycle</i> effectiever vanwege gerichtere R&D en technologiefocus en daardoor schaalvoordelen</p>
<p><i>Reduce</i> veroorzaakt indien het gevolg van procesinnovaties mogelijk lock-in van bewezen elektrolyser-typen</p>	 <p>Reduce Kritieke-materialenvraag verminderen door innovatie</p>	<p><i>Reduce</i> staat op gespannen voet met <i>Retain</i> omdat het CRM-gebruik bepalend is voor de robuustheid van de elektrolysertechnologie</p>	<p><i>Reduce</i> verkleint concentraties van CRMs in componenten en heeft daarmee een negatief effect op de business case voor <i>Recycle</i>.</p>
<p>Focus op <i>Retain</i> vertraagt de implementatie van innovaties op het gebied van <i>Reduce</i>, <i>Retain</i>, <i>Recycle</i>.</p>	<p>Focus op <i>Retain</i> vertraagt de implementatie van innovaties op het gebied van <i>Reduce</i>, <i>Retain</i>, <i>Recycle</i>.</p>	 <p>Retain Verlengen levensduur elektrolyzers</p>	<p>Focus op <i>Retain</i> vertraagt de implementatie van innovaties op het gebied van <i>Reduce</i>, <i>Retain</i>, <i>Recycle</i>.</p>
<p><i>Recycle</i> beweegt, bijvoorbeeld via design-for-repair-richtlijnen de technologiemix in het voordeel van elektrolyzers geschikt voor recycling</p>	<p>Gebruik van secundaire materiaalstromen door <i>Recycle</i> brengt uitdagingen met zich mee voor <i>Reduce</i>. Bijvoorbeeld door afwijkingen in puurheid of kwaliteit</p>	<p>Gebruik van secundaire materiaalstromen door <i>Recycle</i> brengt door afwijkingen in puurheid of kwaliteit uitdagingen met zich mee voor <i>Retain</i></p>	 <p>Recycle Terugwinnen materialen uit ontmantelde elektrolyzers</p>

Toekomstbeelden

Op basis van literatuurstudie zijn enkele **brede toekomstbeelden van belangrijke systemische ontwikkelingen** geschetst.

Materiaalvraag

De scenario's bieden de context voor een **analyse met behulp van een kwantitatief model** dat op EU-niveau een inschatting geeft van de **vraag naar *virgin* kritieke materialen** als gevolg van:

- (a) het opschalen van elektrolyser-capaciteit;
- (b) de effectiviteit van zogenaamde R-strategieën.

Strategie

Op basis van **interviews** is in onderzocht wat de huidige positie van bedrijven is ten opzichte van R-strategieën en welk strategisch perspectief zij zien in termen van innovatie en overheidsinterventies.

Methode: Ontwikkelen *algemene onderzoeks- en interventiemethoden*.

Hoofdboodschap:

Ontwikkeling van circulaire elektrolyzers vraagt op korte termijn ondersteuning voor marktintroductie van elektrolysetechnologie in brede zin. Parallel is het zaak om stapsgewijs te streven naar ontwikkeling en implementatie van circulaire standaarden.

Circulariteit en materiaal-efficiëntie worden als strategisch belang erkend door de elektrolyser-maakindustrie maar heeft nog geen urgentie. Eerste prioriteit is om de eerste technisch werkende commerciële systemen in de markt te zetten. Bedrijven en bedrijfsonderdelen actief op het gebied van elektrolyse zijn voor hun voortbestaan afhankelijk van deze eerste stappen in de richting van een markt.

De commercialisatie van elektrolyzers is ook een voorwaarde voor het kunnen experimenteren en implementeren van innovaties op het gebied van circulariteit en materiaalefficiëntie. Voor de Reduce- en Retain-strategie is het bijvoorbeeld essentieel om betrouwbare data te kunnen verzamelen over de prestaties van systemen en componenten in het veld.



Zodra er een betrouwbare en veilige base line is 'neergezet' is de weg vrij voor **allerhande vormen van business-gedreven innovatie**. Met name het reduceren van PGM's in PEM is topprioriteit vanwege kostenreductie. Tegelijkertijd bestaat er een **risico op suboptimale technologische lock-in**. **Radicale innovaties gericht op circulariteit en materiaalefficiëntie zullen hierdoor moeten concurreren met eerste-generatiesystemen.**

Over de **geavanceerde technologische opties, bijvoorbeeld substitutie, design-for-repair, design-for-recycle en gebruik van secundaire materialen hebben slechts enkele bedrijven een aanpak voor ogen**. De koplopers op dit vlak zijn de componentenleveranciers (coatings, elektrodes).

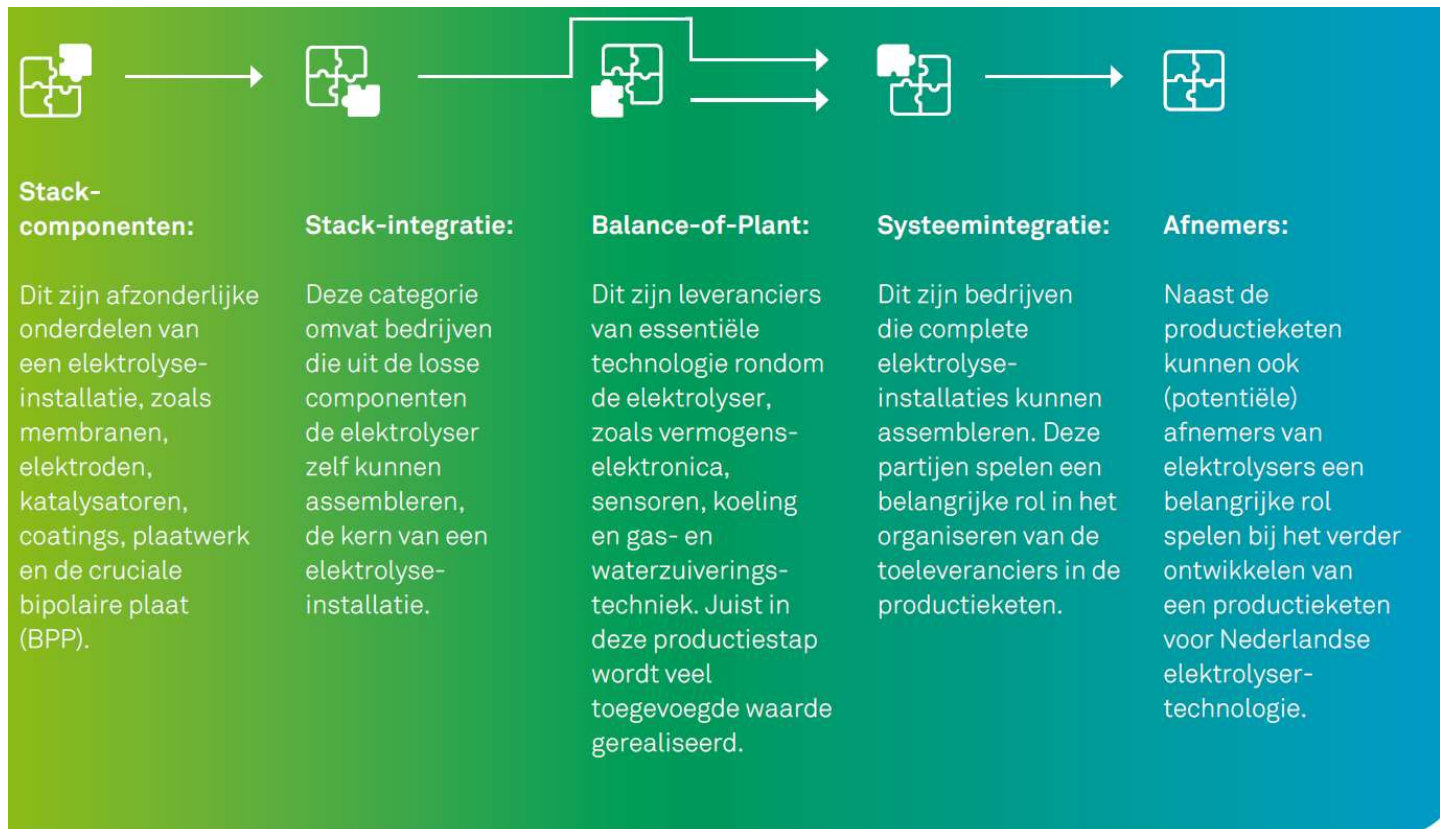
Bedrijven met een geavanceerde technologiepositie stellen dat stapsgewijs introduceren van regelgeving op het gebied van circulariteit hen zou kunnen helpen om vernieuwing in de richting van materiaalefficiëntie te versnellen.

- De **Refuse-strategie**: Qua technologiemix op systeemniveau is de verwachting dat vooral de marktontwikkelingen en kenmerken van elektrolysertoepassingen bepalend zullen zijn voor de toekomstige verhoudingen tussen PEM, Alkaline en SOE. **Er is bij bedrijven wel behoefte aan inzicht in kwetsbaarheden en afhankelijkheden van hun technologiepositie**. Dit zou de technologiemix kunnen beïnvloeden.
- De **Retain-strategie**: Het verlengen van de levensduur heeft de komende jaren hoge prioriteit voor alle ontwikkelaars en producenten in de toeleveringsketen voor elektrolyzers. De sleutel voor levensduurverlenging ligt bij het verbeteren van de elektrodes met daarin de CRM's. De industrie heeft behoefte aan inzicht in het verloop van slijtageprocessen over de tijd als gevolg van gebruikscondities. **Deze inzichten moeten komende jaren worden opgedaan door monitoring van de eerste systemen in het veld.**
- De **Reduce-strategie**: Op het moment dat eerste systemen in het veld robuust blijken te zijn en prestaties bekend zijn, kan er worden ingezet op stapsgewijze reductie van 'CRM-loadings'. Bedrijven hebben er zelf commercieel belang bij dit te doen. **Voor het versneld naar de markt brengen van geavanceerde oplossingen is innovatiebeleid van belang**. Voor overheden is het cruciaal erop toe te zien dat er een wettelijk kader is voor het collecteren en concentreren van CRM-rijke componenten aan het einde van de levensduur. **Op deze manier blijven de kostbare en strategisch kritische CRM's behouden voor het Europese industriële ecosysteem.**
- De **Recycle-strategie**: Bedrijven houden rekening met de end-of-life-fase in het ontwerp en ontwikkelproces. Ofwel omdat hun klanten er naar vragen, ofwel omdat ze hier zelf business-kansen zien. De ervaring en kennispositie wisselt sterk per bedrijf. **Er zal geen substantiële stroom end-of-life elektrolyser-materialen vrijkomen vóór 2040. Overheden zullen hier vanaf 2030 op moeten anticiperen.**

Op basis van interviews is onderzocht wat de bestaande positie van bedrijven is in relatie tot de R-strategieën en welk perspectief zij zien in overheidsinterventies.

	PEM	Alkaline	SOE
	Bosch Tilburg (Stack, Bipolaire plaat) Tejin Aramid (Membranen) Magneto (Elektrodes) MTSA (Stack, Systeem) SALD (Coatings)	VDL (Stack) Battolyser Systems (Stack, Systeem) HyCC (Gebruiker, Projectontwikkelaar) XiNTC (Stack, Systeem)	Circonica (Stack, Systeem)
	Siemens (Systeem, Stack) Schaeffler (Stack, Bipolaire plaat) Johnson Matthey (MEA)	Sunfire (Stack, Systeem)	Sunfire (Stack, Systeem)

Bedrijven in de productieketen voor elektrolyzers hebben verschillende kennisposities en belangen.



Bron: Suurs et al. (2021)

Overwegingen over overheidsinterventies (1/3)

Eerste fase 2025-2030

Voor de R-strategieën die op korte termijn aan de orde zijn (met name Reduce en Retain) geldt dat **technologieverbetering, marktintroductie en toepassing in de praktijk** de belangrijkste voorwaarden zijn voor succes.

Het pleidooi naar overheden toe is om er vooral alles aan te doen om de marktintroductie van elektrolyzers vlot te trekken. En om **geen additionele eisen te stellen in termen van circulariteit**.

Het is voor het **stimuleren van versneld en effectief kunnen leren** wel cruciaal dat de eerste projecten goed worden gemonitord en dat de opgedane kennis ten goede komt van het hele ecosysteem.

Een dergelijke monitoring zou onderdeel kunnen vormen van een brede **programmatische samenwerking in de sector** die als doel heeft om een gezamenlijke circulaire standaard te definiëren die rekening houdt met stand van de techniek en complexe trade-offs waar het gaat om het definiëren van circulariteit.

In het kader van anticiperen op Refuse- en Recycle-strategieën is het de komende tien jaar zaak om **technologieontwikkeling door te zetten zodat alternatieve componenten en systemen tijdig beschikbaar komen**.

Hetzelfde geldt voor het **ontwikkelen van inzicht in en overzicht over de wereldwijde materiaalketens**. Het zou helpen om het bewustzijn en kennisniveau van bedrijven over materiaalafhankelijkheden te vergroten zodat zij zelf hun afwegingen scherper kunnen maken inzake 'Refuse'.

Quotes

No additional restrictions on a market that doesn't exist. Let's first build the market and projects. On the back of these projects, then do the next things. We haven't even started the scale up. An electrolyser is extremely modular, thus, easy to disassemble. We all see the material value. Let's please get started with existing projects.

We don't need more regulations. Industry can handle important subjects by themselves. No more regulations from National / EU. For example, the eco-design act shouldn't be applied to electrolysers.

Samen ontwerpen brengt de noodzaak om ketenafspraken te maken.

Bedrijven kijken naar de overheid waar het gaat om het behartigen van belangen in het kader van strategische autonomie.

On PGMs, we should strengthen ties with South-Africa. We should secure our supply by strategic alliances.

Overwegingen over overheidsinterventies (2/3)

Tweede fase 2030-2040

Op de middellange is het bij uitstek **de rol van overheden om een sub-optimale lock-in van eerste-generatie technologieën te voorkomen**. Het risico bestaat dat bij een succesvolle marktintroductie van de eerste PEM- en Alkaline-systemen de opschaling doorzet op basis van incrementele door kostenreductie gedreven innovatie.

Om ervoor te zorgen dat de Reduce- en Retain-strategieën ook na 2040 effectief blijven is het van belang dat **nieuwe systemen en geavanceerde technieken worden in versneld naar de markt worden gebracht**.

Dit kan door op Europees **niveau progressieve standaarden af te spreken voor nieuw te realiseren elektrolyzers**. Frontrunners krijgen daarmee de kans en de legitimiteit om door te zetten met hun innovaties.

Met name ook voor de Recycle-strategie is het kritiek om in deze fase van opschaling zo vroeg mogelijk de **voorwaarden te scheppen voor het succesvol ontmantelen van systemen, het verzamelen van componenten en het recyclen van CRMs**.

Voor overheden is het cruciaal er op toe te zien dat er een wettelijk kader is dat ervoor zorgt dat CRM-rijke componenten end-of-life worden geïncubated en geconcentreerd. Op deze manier blijven de kostbare en strategisch kritische materialen behouden voor het Europese industriële ecosysteem.

Zodra de materiaalstromen kunnen bedrijven investeren in geavanceerde recyclingtechnologie.

Quotes

Zorg voor geleidelijke invoer van targets. Denk aan een minimum percentage recycling.

Er moeten meerdere zaken op orde zijn: standaarden, certificering, etc.

For refurbishing of products, one of the hurdles we face is guarantees for product safety and regulations that you have to face when you refurbish products.

Regulation that incentivizes local sourcing of materials is good for us. On the CRM side, we are in a good position. Bigger players have a cost advantage. Regulation can be stricter and we will be fine. We have a quality product that can comply with the stricter regulations.

CBAM will contribute to having a level playing field between low cost vs recycled materials from the EU market with EU standards. Maybe this is a solution for incentivizing the use of secondary materials.

Overwegingen over overheidsinterventies (3/3)

Derde fase 2040 – 2050

De beleidsinterventies voor deze periode zullen grotendeels afhankelijk zijn van het verloop van de ontwikkelingen hiervoor. **Zeker is dat het niet voor 2040 zal zijn dat er een substantiële stroom end-of-life elektrolyzers materialen vrij komt.**

Voor bedrijven en overheden is dit de fase waarin volledig circulaire materiaalketens voor elektrolyzers geïmplementeerd zouden kunnen worden. Dit is daarom het moment voor bedrijven om met circulaire businessmodellen te experimenteren.

Overheden zullen hier tijdig op moeten anticiperen. **Het is zaak om markten voor secundaire materialen nauwlettend te volgen.** En erop toe te zien dat collectie van CRM-houdende componenten zoveel mogelijk upstream plaatsvindt.

Beleid is bij voorkeur gericht op het end-of-life collecteren en terugwinnen. Beleid gericht op het gedwongen gebruik van (een percentage van) secundaire inputstromen is alleen daar effectief waar deze materiaalstromen er in voldoende volume zijn.

Quotes

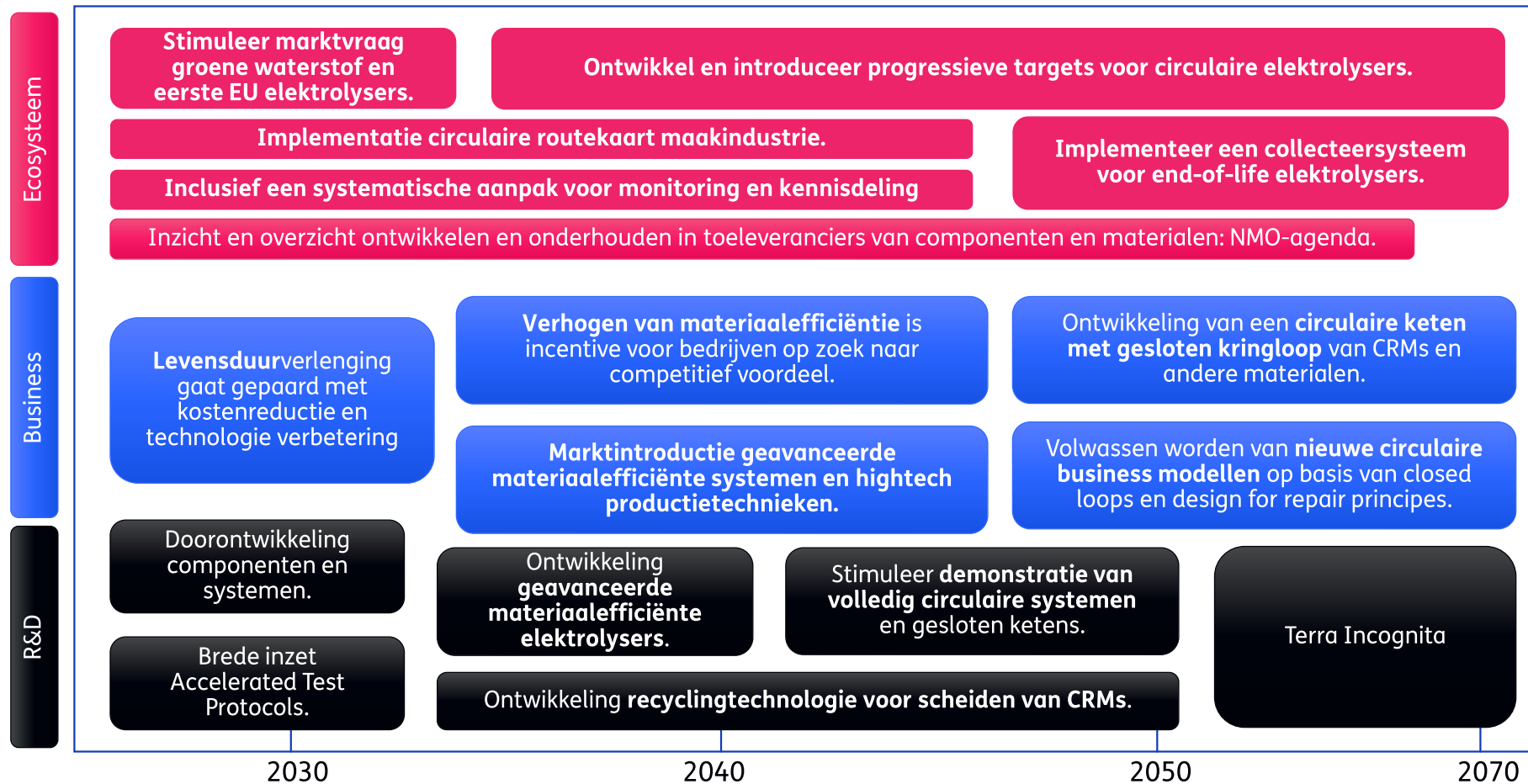
The further upstream materials are recycled the better it is for the environment. If there are take-back programs where we engage with Tier-1-suppliers to get the original quality back this might be something that's good for the environment.

The challenge for PGM recycling is the collection and separation. The only thing we need to establish is a responsibility to recycle CRMs.

Setting a obligation for non-virgin input of PGMs would hurt PGM miners in South-Africa. Actually, for Ir these mines are in need a replacement market when car catalysts are phased out.

Contouren van een routekaart circulaire elektrolyzers op basis van strategische vooruitblik EU maakbedrijven.

Deze conceptroutekaart vormt de basis voor de routekaartstructuur van het uitvoeringsprogramma circulaire maakindustrie.



Toekomstbeelden

Op basis van literatuurstudie zijn enkele **brede toekomstbeelden van belangrijke systemische ontwikkelingen** geschetst.

Materiaalvraag

De scenario's bieden de context voor een **analyse met behulp van een kwantitatief model** dat op EU-niveau een inschatting geeft van de **vraag naar *virgin* kritieke materialen** als gevolg van:

- (a) het opschalen van elektrolyser-capaciteit;
- (b) de effectiviteit van zogenaamde R-strategieën.

Strategie

Op basis van **interviews** is in onderzocht wat de huidige positie van bedrijven is ten opzichte van R-strategieën en welk strategisch perspectief zij zien in termen van innovatie en overheidsinterventies.

Methode: Ontwikkelen *algemene onderzoeks- en interventiemethoden*.

Methodische aanbeveling:

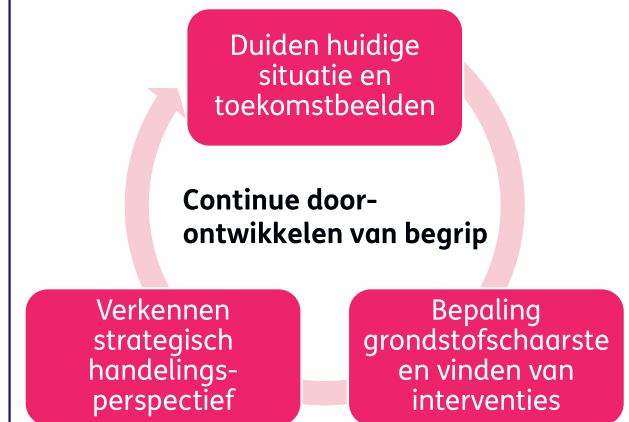
De gevolgde werkwijze is breed inzetbaar voor productgroepen gekenmerkt door een dynamiek van innovatie en opschaling.

Het doorgronden van complexe problemen en het verkennen van oplossingen vereist een werkwijze die voorziet in een combinatie van toekomstgericht systeemdenken, kwantitatief modelleren van dynamiek en interventies en het ontwikkelen van een strategisch handelingsperspectief dat recht doet en rekening houdt met betrokken stakeholders.

- Toekomstgericht systeemdenken is cruciaal voor het ontwikkelen van begrip van het voorliggende probleem met alle relevante invloedsfactoren. Deze stap is een vereiste om de condities en onzekerheden te begrijpen waarbinnen planmatige activiteiten, inclusief beleidsinterventies, moeten worden begrepen.
- De modelmatige verkenning biedt een solide basis voor het conceptueel en kwantitatief verkennen van specifieke relaties tussen belangrijke variabelen in het systeem. In deze casus lag de focus op de toename van CRM-vraag als gevolg van technologische opschaling. De kracht van de methode ligt in het kunnen spelen met de verschillende variabelen, ofwel het draaien aan de knoppen van het systeem. Hiermee kunnen effecten van verschillende interventies worden 'doorgerekend' en onderworpen aan gevoeligheidsanalyses.
- Het onderzoek naar perspectieven van stakeholders, in dit geval voornamelijk bedrijven, biedt een verrijking, en in zekere zin een reality check, doordat het inzicht biedt in bestaande uitgangspunten, ambities en belangen die uiteindelijk met alle nuances een basis vormen voor haalbaar en effectieve beleidsinterventies.

Deze drie methodieken worden idealiter samen ingezet om continue drie stappen te doorlopen: **1) duiden van de situatie op systeemniveau en in termen van toekomstbeelden, 2) modelleren materiaalvraag en mogelijke interventies en 3) verkennen van stakeholderperspectieven en handelingsperspectief.** Deze vorm van probleemanalyse en verkenning wordt een krachtig hulpmiddel voor beleids- en strategievorming wanneer er **continue bijstelling** plaatsvindt. Het inrichten als programmatische activiteit in tegenstelling tot eenmalige analyses is daarmee een wenselijke vervolgstap.

De synergieën tussen de methodieken kunnen verder uitgewerkt worden door **aanvullende casuïstiek** waar vier elementen samen komen: **Opschalende (nieuwe) technologieën die bijdragen aan (2) maatschappelijke doelstellingen waarvoor (3) schaarsten van middelen tot belemmeringen kan leiden en (4) tijdig mitigerend handelen essentieel is.**



De volgende casuïstiek lijkt relevant om soortgelijk (continue) onderzoek naar in te richten:

- Offshore windturbines, waarbij er schaarste is aan bijvoorbeeld installatieschepen, neodymium
- Grootschalige batterijsystemen, waar er schaarste is aan bijvoorbeeld kobalt.

3

Toekomstbeelden

Toekomstbeelden

Op basis van literatuurstudie zijn enkele **brede toekomstbeelden van belangrijke systemische ontwikkelingen** geschetst.

Materiaalvraag

De scenario's bieden de context voor een **analyse met behulp van een kwantitatief model** dat op EU-niveau een inschatting geeft van de **vraag naar *virgin* kritieke materialen** als gevolg van:

- (a) het opschalen van elektrolyser-capaciteit;
- (b) de effectiviteit van zogenaamde R-strategieën.

Strategie

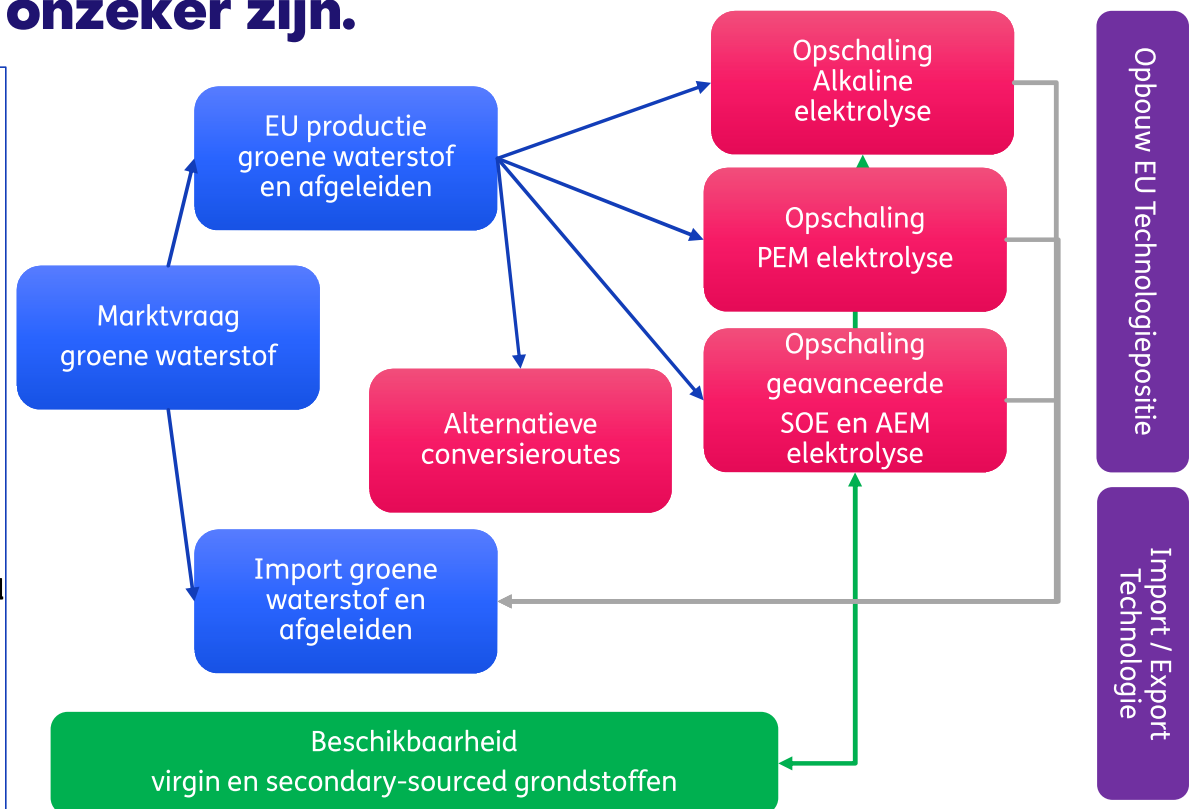
Op basis van **interviews** is in onderzocht wat de huidige positie van bedrijven is ten opzichte van R-strategieën en welk strategisch perspectief zij zien in termen van innovatie en overheidsinterventies.

Methode: Ontwikkelen *algemene onderzoeks- en interventiemethoden.*

Hoofdboodschap:

Ontwikkeling en opschaling van een circulaire Europese elektrolyser-industrie hangt qua omvang en timing af van vier systemische ontwikkelingen die inherent onzeker zijn.

- De **eerste ontwikkeling** is de ontwikkeling van de **marktvraag naar groene waterstof (en afgeleiden daarvan)** zowel voor Europa als voor de wereldeconomie.
- Een **tweede ontwikkeling** is de ontwikkeling van een **Europese productiecapaciteit voor groene-waterstofproductie**. Welk aandeel van het groene-waterstofaanbod wordt geproduceerd in Europa en welk aandeel wordt geïmporteerd?
- Een **derde ontwikkeling** is het **tijdig beschikbaar komen van marktrijpe elektrolysetechnologie met de bijbehorend productieketens**. Worden deze productieketens en innovatie-ecosystemen in Europa gevestigd of voornamelijk in China of de VS?
- De **vierde ontwikkeling** betreft de **tijdige beschikbaarheid van virgin en 'secondary sourced' materialen** en halffabricaten voor de productie van componenten en systemen.
- Iedere analyse of strategische overweging zal rekening moeten houden met deze ontwikkelingen door middel van gevoeligheidsanalyses of scenario-denken.

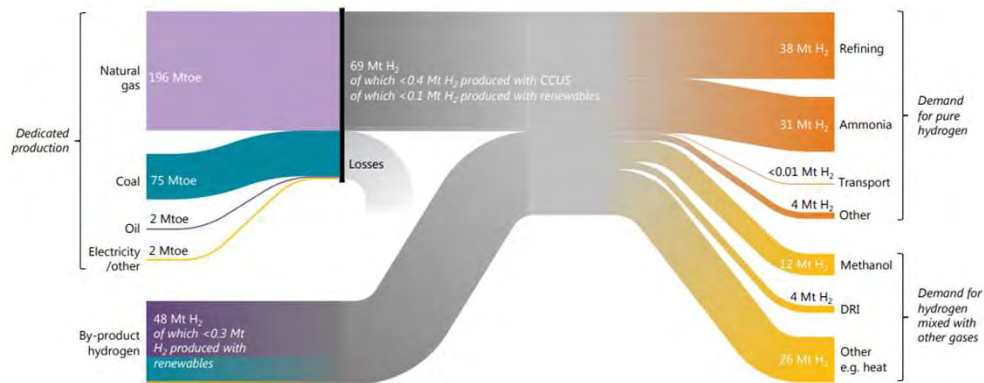


Systemische ontwikkelingen marktvaart groene waterstof (1/2)

De ontwikkeling van de marktvaart naar groene waterstof (en afgeleiden daarvan) loopt zeer uiteen. Een aanname voor toenemende vraag is noodzakelijk als startpunt van de studie.

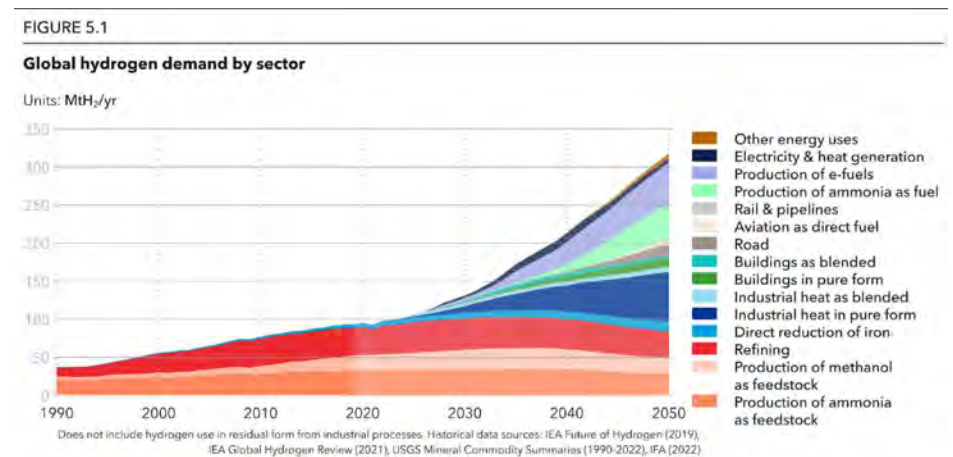
Waterstof in gasvorm wordt op dit moment wereldwijd gebruikt voor met name olieraffinageprocessen en kunstmestproductie op basis van ammonia. De noodzaak om waterstof op fossiele grondstofbasis te vervangen met hernieuwbare waterstof is evident. De toekomstvoorspellingen voor waterstofvolumes lopen zeer uit. Zie bijvoorbeeld de recente projectie van DNV (2022) in de rechtergrafiek. In deze studie nemen we de vraagtoename van 800 PJ in 2020 naar 3200 PJ in 2050 en verder aan. Zie sectie 4 voor details.

Mondiale huidige waterstofvraag en productie



Bron: International Energy Agency (2019).

Mondiale waterstofvraag projectie 2020-2050



Bron: DNV (2022).

Systemische ontwikkelingen markt vraag groene waterstof (2/2)

Vraagontwikkeling groene waterstof is volledig gedreven door klimaatbeleid (ETS). Zie IEA scenario's. Steeds meer ook door energieonafhankelijkheid en industriebeleid in het kader van strategische autonomie (Inflation Reduction Act, Green Deal Industrial Plan).

Projecties van vraagtoename over de tijd, met bijbehorende doelstellingen voor productiecapaciteit van elektrolyzers, zijn veelal het resultaat van wensdenken.

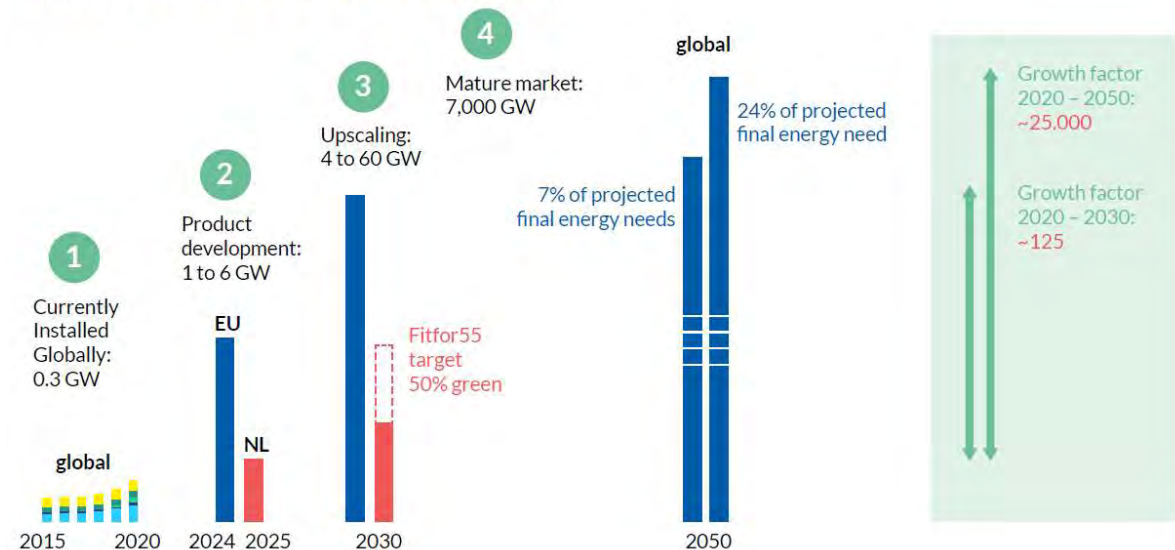
Daadwerkelijke ontwikkeling van de markt vraag naar groene waterstof zal de komende jaren afhankelijk zijn van business cases voor grootschalige toepassing van groene waterstof die nog grotendeels ontwikkeld moeten worden.

Meerdere factoren zijn hierbij relevant:

- Aanbod van voldoende laaggeprijsde hernieuwbare elektriciteit als gevolg van opschaling van bijvoorbeeld wind-op-zee. Zonder grote hoeveelheden groene stroom zijn elektrolyzers niet op grote schaal doelmatig inzetbaar.
- Kostenreductie van de technologie.
- Financiering voor de onrendabele top of ander marktinstrumenten om de afname van groene waterstof door de eerste gebruikers te bevorderen.

Zie navolgende slides voor meer inzichten in de noodzakelijke opschaling van de elektrolysetechnologie door de maakindustrie.

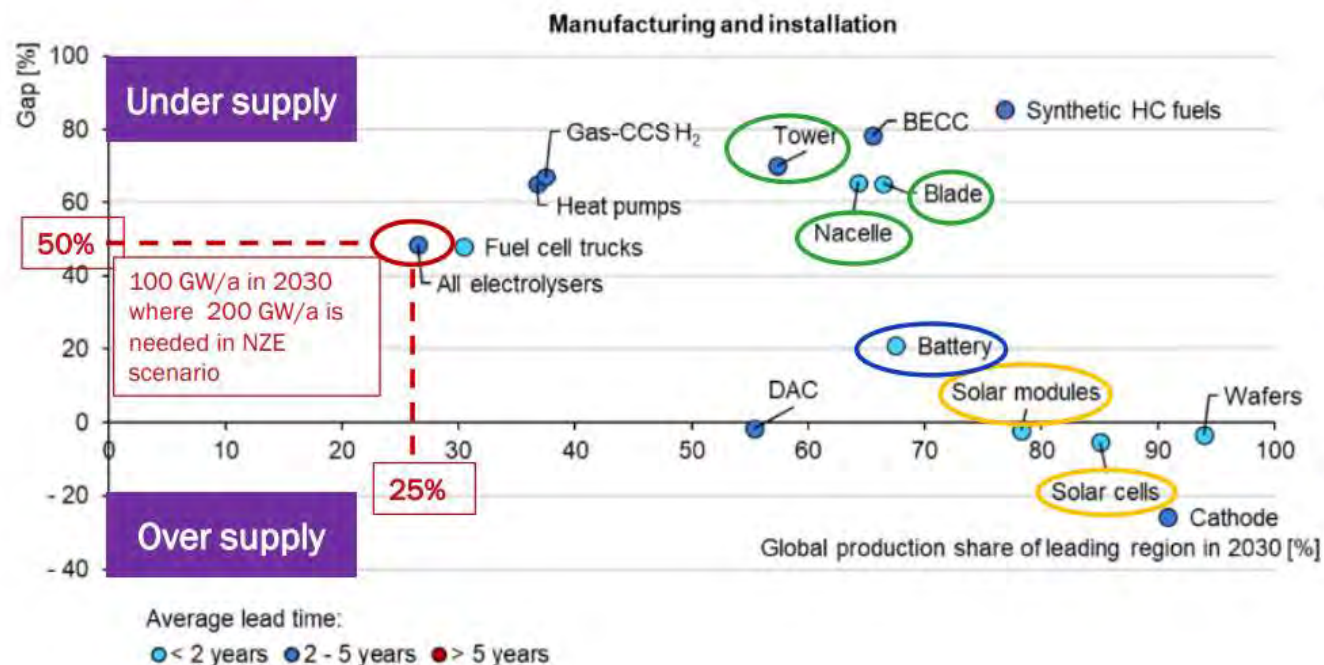
MARKET DEVELOPMENT FORECAST



Projecties voor de marktontwikkeling van elektrolyzers wereldwijd. Bronnen: IEA (2021), Global installed electrolysis capacity by region , 2015-2020 ([link](#)), Bloomberg, Hydrogen Economy Outlook – Key messages, March 2020 ([link](#)), bewerking door TNO.

Systemische ontwikkelingen opschaling (1/4)

Electrolyser production share is balanced around the world (For how long?)

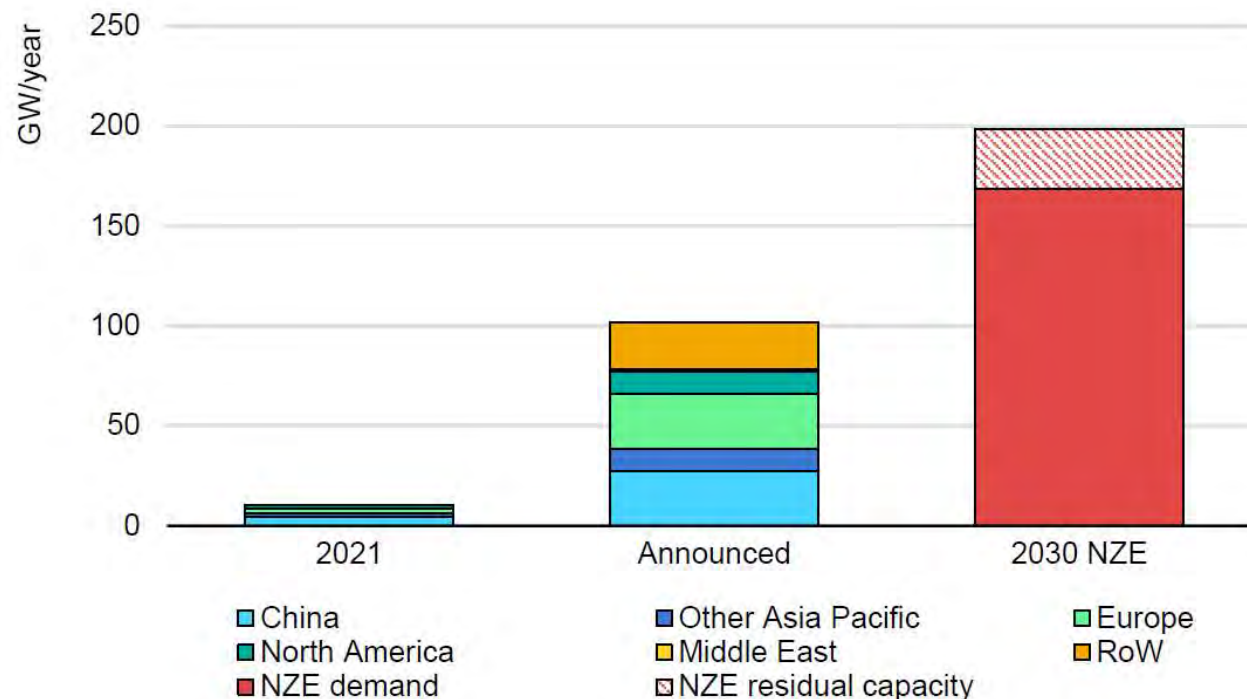


- China accounts for most of the current announced manufacturing capacity expansion plans to 2030 for **solar PV components** (around 85% for cells and modules, and 90% for wafers)
- For **onshore wind components** (around 85% for blades, and around 90% for nacelles and towers)
- For **EV battery components** (98% for anode and 93% for cathode material).
- **Hydrogen electrolyzers** (still less mature market) are the main exception, with around one-quarter of manufacturing capacity announcements for 2030 being in China and the European Union, respectively, and another 10% in the United States.
- The gap is defined as the difference between required production in the **Net Zero Emission Scenario** and projected production taking into account current production and announced expansion plans, expressed as a share of the former.

Bron: IEA (2023d).

Systemische ontwikkelingen opschaling (2/4)

As electrolyser manufacturing is expected to be located **close to future demand centres** and a significant number of global announcements **are not linked yet to a specific location**, the adoption of policies to boost renewable hydrogen production could modify this picture as we approach 2030



- Only around 8% of announced electrolyser manufacturing capacity expansion has reached **final investment decision**
- Historically relatively **short lead times** are involved in building electrolyser factories: 2-3 years (i.e. ITM, PLUG) Expanding existing facilities could be much quicker
- Companies from other sectors have also announced plans to manufacture electrolysers. i.e. top global manufacturers of **solar PV panels** (i.e. LONGi and Sungrow) and **automotive** (Bosch, Schaeffler, Toyota)
- Manufacturing capacity needed to meet projected demand in the NZE Scenario (NZE demand) is estimated assuming a utilisation rate of 85%.

Bron: IEA (2023d).

Systemische ontwikkelingen opschaling (3/4)

Three green hydrogen projects drop out of first UK production subsidy round ahead of negotiations

The government plans to award operational support to 250MW by end of year, but 262MW is still in the running

10 Apr **French hydrogen firm McPhy saw electrolyser orders halve in 2023, but massive factory expansion will continue**

Company saw revenue growth in 2023 as it worked through shrinking backlog of orders

8 February 2024 10:28 GMT | UPDATED: 8 February 2024 10:34 GMT

Engie delays 4GW green hydrogen target by five years, due to slower-than-expected industry progress

French energy company admits market for H2 and its derivatives is emerging more slowly than it had forecast

28 February 2024 15:20 GMT | UPDATED: 28 February 2024 15:20 GMT

HydrogenPro puts 500MW Texas factory on hold amid clean hydrogen tax credit uncertainty

First manufacturing site outside of China delayed, as electrolyser manufacturer prepares for decreased production at Tianjin factory

27 February 2024 14:07 GMT | UPDATED: 27 February 2024 14:07 GMT

Also large wind projects are under pressure

Vattenfall zet streep door groot Brits windpark

Vattenfall zet een streep door de bouw van een groot offshorewindpark in het Verenigd Koninkrijk. Het Zweedse energiebedrijf kampt met te hoge kosten, waardoor de aanleg van Norfolk Boreas (1,4 GW) financieel niet meer uit kan.

Grote aanbesteding voor wind op zee flopt in Groot-Brittannië

Een grote aanbesteding voor hernieuwbare energie in Groot-Brittannië is vrijdag geflopt. Geen enkel bedrijf bracht een bod uit om een groot windpark in zee te bouwen. Voor de Deense windturbinebouwer Vestas is de flop aanleiding om uitbreiding van productiecapaciteit in het VK te heroverwegen. Voor Nederland, dat later dit jaar ook weer een grote veiling begint, lijken de effecten vooralsnog beperkt.

Koers Ørsted hard omlaag na miljardenafschrijving op windparken

De aandelenkoers van Ørsted is woensdag met ruim 20% gekelderde, nadat het Deense energiebedrijf waarschuwde mogelijk ruim \$2 mrd te moeten afschrijven op een aantal Amerikaanse windparken. Die rodig, omdat de hoge rente en haperingen in de levering en kunnen leiden tot oplopende kosten en vertraging

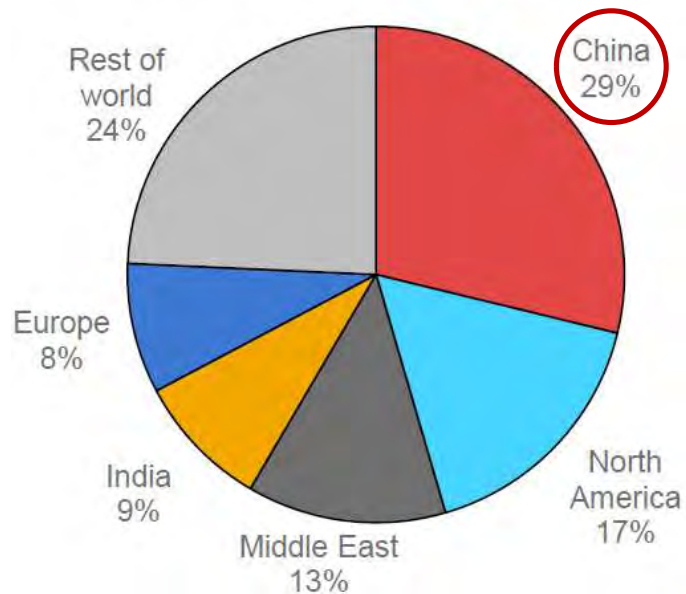
The year 2024 will be a critical year to prove the economics and observe the continuing policy dynamic changes.

- Many H2 projects in the pipeline
- Risk (IPCEI) H2 production projects are delaying with FID.
- Possible reasons:
 1. Higher Cost of capital
 2. Parties more focus on higher return on investment / short term fossil profits (esp. Oil & Gas)
 3. Competitions of first H2 projects in other regions outside EU (US, India, China, Middle East)
 4. Increase cost of materials and electricity price volatility
 5. Delay in execution due to permitting, available materials, technologies and experienced people
 6. Delay in subsidies and regulation (i.e. hourly matching)
 7. More technical challenges leading to higher risk margins → suppliers are over promising
 8. 1st large projects, many learnings which are not shared unfortunately

Source: HydrogenInsight ([link](#)), ([link](#)), ([link](#)), ([link](#)), ([link](#)), ([link](#)) Energeia ([link](#)), ([link](#)), ([link](#))

Systemische ontwikkelingen opschaling (4/4)

Hydrogen use by region, 2022



Bron: IEA (2023b)

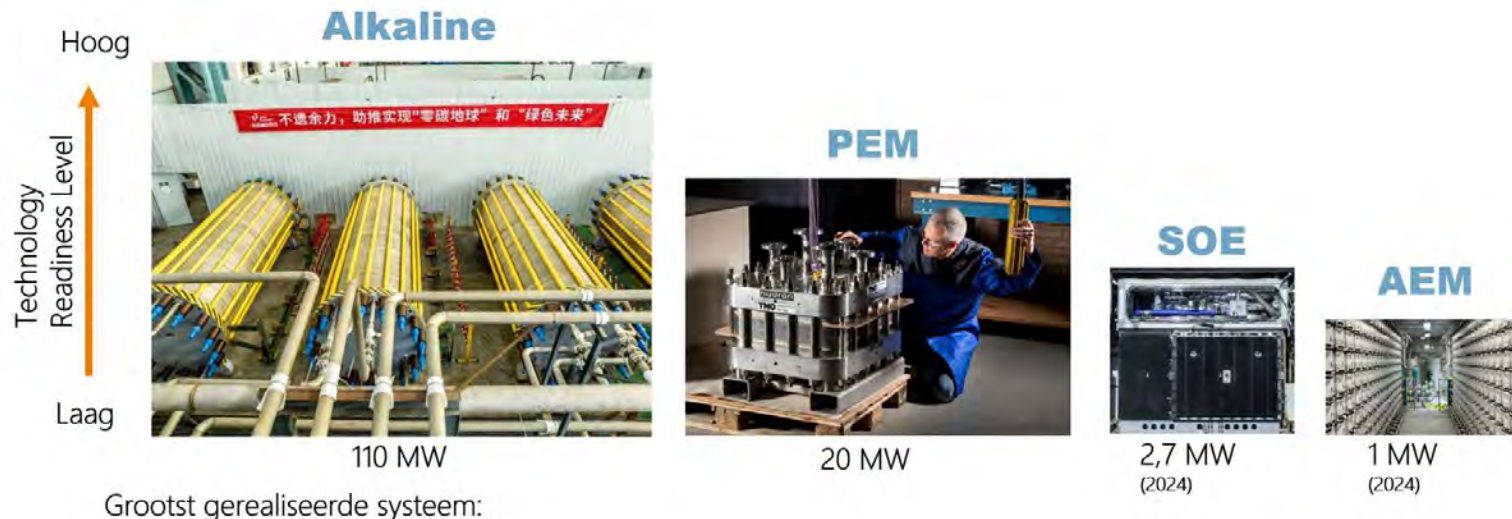
- 95 Million ton global hydrogen production (2022)
- 29% of **hydrogen is produced** in China
- 50% of global **installed electrolyser capacity** in China (End of 2023, total 2,4 GW)
- 50% of **electrolyser manufacturing capacity** based in China (in 2022, total 14 GW)
- Most of the electrolyser manufactures are **state owned**
- Foreign companies like John Cockerill and Cummins active in China experience **market barriers**
- Electricity prices in China lower than EU, so efficiency of electrolysers less important (**focus on low CAPEX**)

Bronnen: IEA (2023b), TNO & HCSS (2024) and IEA Global Hydrogen Review 2023 ([link](#)); TNO- HCSS (2024); China Hydrogen Bulletin (2023).

Systemische ontwikkelingen elektrolysetechnologie (1/3)

Er zijn diverse elektrolyse-technologieën beschikbaar. De technologieën die in de komende 5-10 jaar in aanmerking komen voor opschaling zijn de zogenaamde Proton Exchange Membrane (PEM) Elektrolyser en de Alkaline Elektrolyser (AE). De PEM- en Alkaline-technologie zijn commercieel beschikbaar en klaar voor grootschalige toepassing. Andere technologieën, zoals de Solid Oxide Elektrolyser of de Anion Exchange Membrane Elektrolyser, bevinden zich nog in het R&D-stadium.

Technologische innovaties zijn voor al deze technologieën noodzakelijk om tot implementatie en opschaling te kunnen komen. Ontwikkelingen zijn er o.a. op gericht om de energie efficiency van de elektrolyser te vergroten; om levensduur te verlengen ook onder extreme condities; om het gebruik van schaarse 'critical raw materials te verlagen; om recycleerbaarheid van materialen en componenten mogelijk te maken; om het systeem (semi-) autonoom te kunnen opereren; om toxische stoffen als PFAS te reduceren.



Bron: John Cockerill's Chinese subsidiary Cockerill Jingli Hydrogen in Sinopec China ([link](#)); Sunfire Solid Oxide Electrolysis in MultiPLHY project ([link](#)), Enapter AEM Nexus ([link](#))

Systemische ontwikkelingen elektrolysetechnologie (2/3)

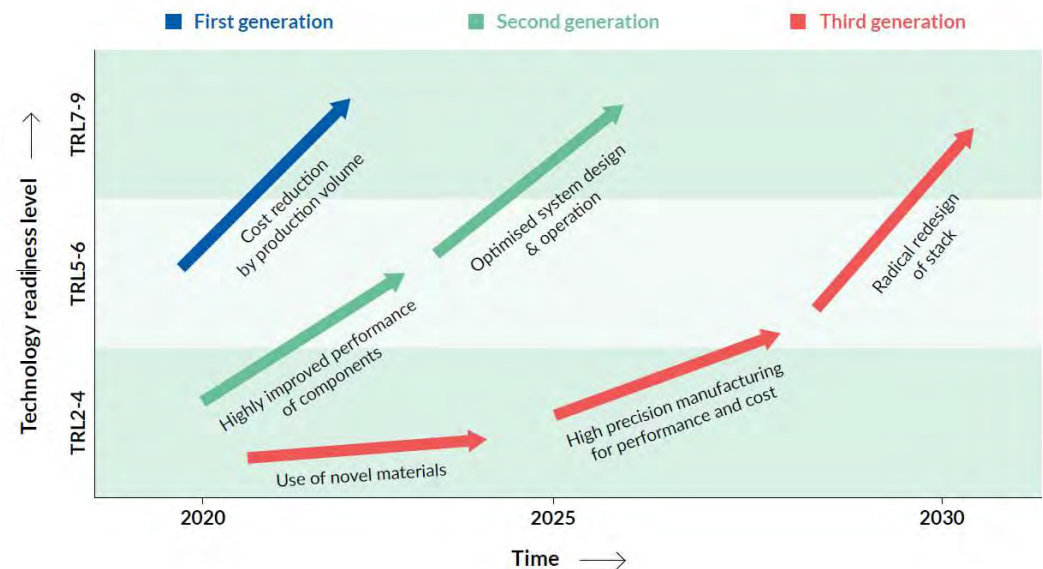
Het is waarschijnlijk dat de eerste gigawatts aan PEM-elektrolysecapaciteit zullen worden geproduceerd door het opschalen van de nu beschikbare **eerste-generatie technologie**.

Naar verwachting zal een **tweede-generatie elektrolyzers gebruik maken van meer geavanceerde componenten**. Deze zullen qua materiaal-efficiëntie grote voordelen hebben.

- Het is bijvoorbeeld mogelijk om de prestaties van de PTL-laag te optimaliseren door speciale microstructuren toe te passen met behulp van lithografisch en additief printen.
- Ook kan de samenstelling van de katalysator worden gewijzigd om de hechting aan het membraan te verbeteren, corrosie te minimaliseren of iridiumbelastingen te verminderen.
- Voor de bipolaire plaat is het mogelijk om titanium componenten te vervangen door stalen componenten bedekt met micronlagen titanium, waardoor kosten en materiaalgebruik worden verlaagd.

Een **derde-generatie technologie** omvat radicale innovaties die de systeemarchitectuur veranderen.

Bijgevoegd schema schetst op basis van technische mogelijkheden de mogelijke ontwikkelingen van PEM-technologie. De SOE zou een vergelijkbare ontwikkeling kunnen doorlopen. Ook Alkaline-systemen zijn nog volop in ontwikkeling.



Bron: Suurs et al. (2023)

Systemische ontwikkelingen elektrolysetechnologie (3/3)

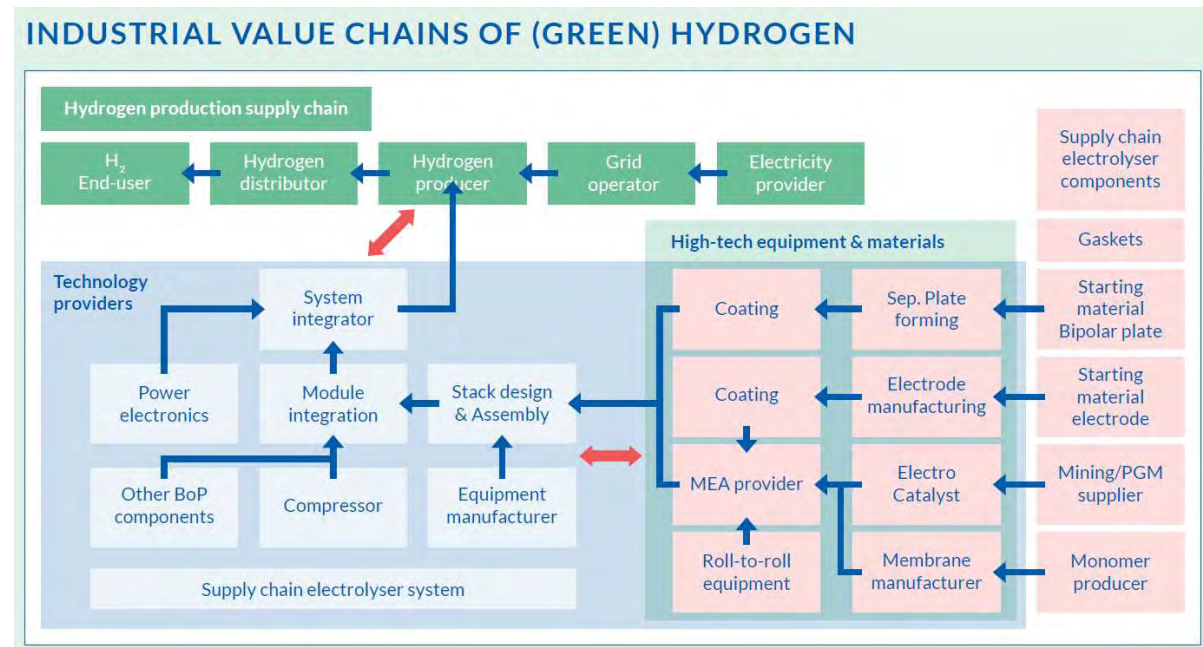
De supplychain voor elektrolyzers moet grotendeels nog worden ontwikkeld en geautomatiseerd.

Succesvolle technologieontwikkeling en opschaling vereist nog de nodige innovatie, organisatie en samenwerking in de hele productieketen.

- **Systemen:** Ontwerp en integratie van systemen voor de productie van groene waterstof.
- **Stacks:** producenten van stacks beschikken over IP en onderscheidende technologische know-how op het gebied van elektrolyzers.
- **Equipment & Materialen:** Bedrijven actief met de ontwikkeling en productie van MEAs, mebranen, elektrodes, coatings en productietechnologie.
- **Balance of Plant:** producenten van essentiële 'randapparatuur' als vermogenselectronica, compressoren.

Succesvolle technologieontwikkeling en opschaling vereist innovatie en samenwerking tussen maakindustrie, procesindustrie en energiesector.

De productieketen voor elektrolyzers is in zijn geheel toeleverend – en dus afhankelijk – aan de partijen die groene waterstof produceren of afnemen ten behoeve van industrie of 'green energy hubs'.



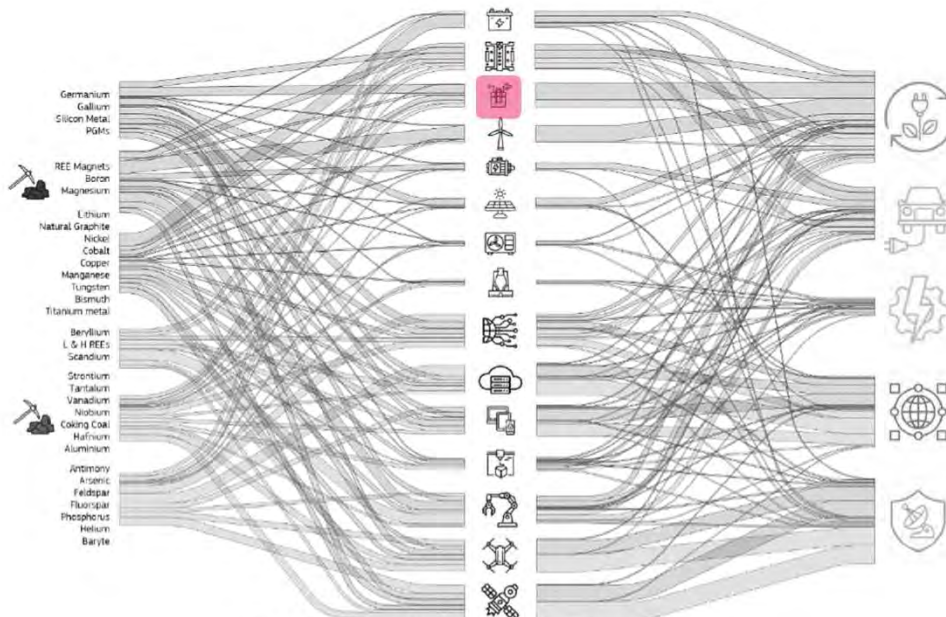
Bron: Suurs et al. (2023).

Beschikbaarheid virgin en secondary-sourced grondstoffen

De beschikbaarheid van grondstoffen en specifiek CRMs wordt regelmatig als stremmende reden van de energietransitie aangehaald. Hierbij dient een belangrijk onderscheid gemaakt te worden tussen de **absolute aanwezigheid** van grondstoffen in de aardkost, en de **toegankelijkheid van grondstoffen** voor, in het geval van deze casus, de elektrolyser maakindustrie.

Absolute geologische beschikbaarheid is geen reden tot zorg maar de economische beschikbaarheid als gevolg van geopolitiek en marktwerking is dit in toenemende mate wél. CRMs, waaronder PGMs, zijn in uiteenlopende toepassingen nodig (linker figuur) wat tot toenemende schaarste leidt. Deze markt is bovendien, qua prijsvorming, gevoelig voor disrupties (rechter figuur). In deze studie worden versimpelde aannames rondom de markt gedaan.

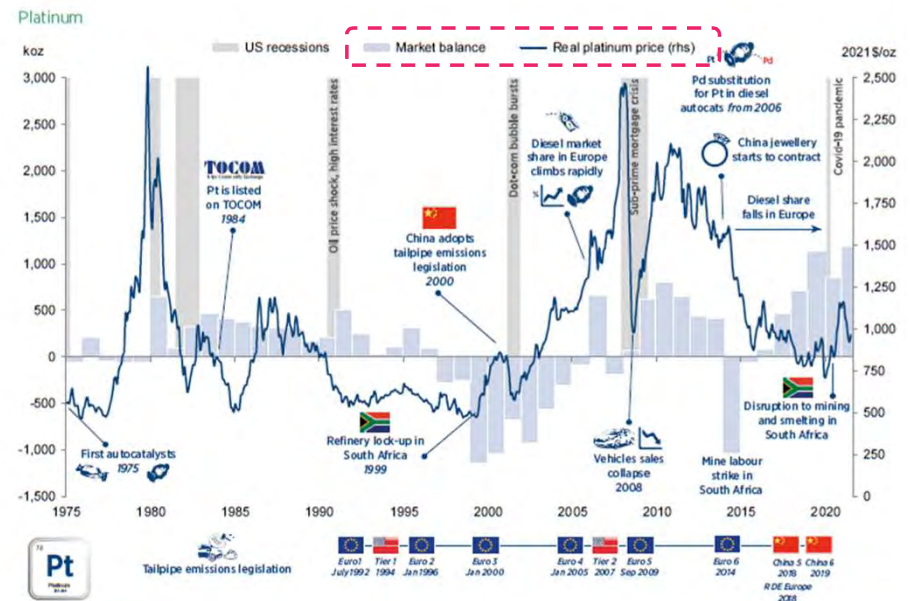
Ruwe grondstoffenstroom naar 15 technologieën en vijf sectoren



Source: JRC analysis (see Annex 3 for methodological details).

Bron: Carrara et al. (2023)

Illustratieve markt dynamiek van Platinium voor ruwe grondstoffen tussen 1975 en 2020



Source: SFA (Oxford), Bloomberg

Bron: SFA Oxford (2023)