

4

Simulatie elektrolyser opschaling, CRM-vraag en R-strategieën van 2020 tot 2070

Een systeemdynamische benadering van kritieke materialenvraag voor elektrolyseropschaling

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*.

Hoofdboodschappen:

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/j (voor resp. 2030 en 2070); Dit is 0.8% tot 2.0% van de huidige wereldproductie)**
- **Voor iridium tussen de 0.4 en 1.4 ton/j (voor resp. 2030 en 2070); 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.

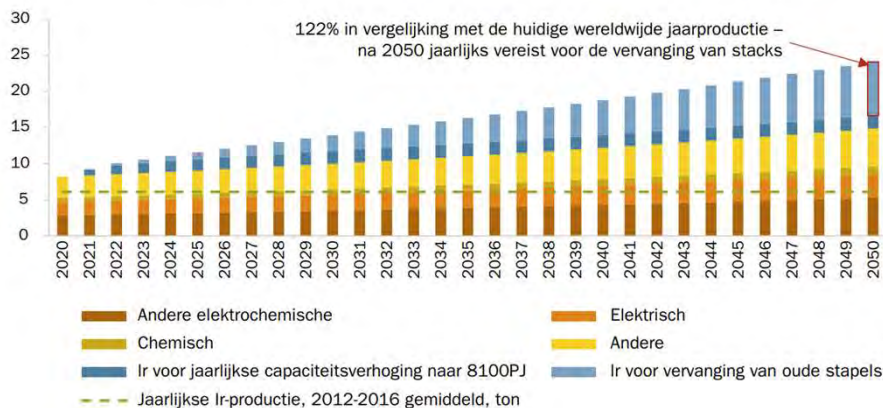
- **Reduce** heeft de grootste impact en is al op korte termijn te implementeren. Dit vereist focus op snelle innovatie en strenge eisen aan materiaalefficiëntie van componenten.
- Een **Recycle-strategie** impliceert het switchen naar CRMs van secundaire oorsprong. Dit kan zeer effectief zijn maar hangt af van de beschikbaarheid van voldoende gerecycleerd 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 averechts werkt omdat het de vervangingsvraag naar efficiëntere elektrolyzers vertraagt.

Voorgaand onderzoek gaf sterk waarschuwingssignaal af rondom beschikbaarheid specifieke CRMs voor electrolyzers.

TNO heeft de grondstofvereisten voor mondiale en Europese waterstofambities in kaart gebracht (Wieclawska & Gavrilova (2021)). De toevoer van iridium (en platina) kan de opschaling van elektrolyzertechnologieën beperken. Vermindering van de netto materiaalinhoud is essentieel om de hoge waterstofproductieambities van de EU te halen.

- Als men uitgaat van een 1:1 aandeel van AEL en PEM typen electrolyzers die in 2050 samen 8100 PJ waterstof produceren, leiden de huidige ambities tot een sterke toename van de vraag naar diverse CRMs.
- Niet alle toenames zijn direct reden tot zorg. Voor iridium ligt dit anders. Iridium is een marginaal (<5%) bijproduct van de platina mijnbouw.
- Potentiële tekorten van andere CRMs, bijvoorbeeld door sterke groei in toepassingen in nog onbekende technologieën, kunnen de overgang naar de wijdverspreide productie en het gebruik van groene waterstof belemmeren.

Hoeveelheid jaarlijks benodigde iridium voor diverse toepassingen, ton/jaar



Een aantal opties voor verkleinen van opschalingsbelemmeringen met materiaalbeschikbaarheid als oorzaak zijn eveneens geanalyseerd (Gavrilova & Wieclawska (2021)), waaronder de reductie van Iridiumgebruik in PEM electrolyzers.

- Het verlagen van het iridiumgehalte (bijvoorbeeld door de ontwikkeling van Atomic Layer Deposition, ALD) is de meest veelbelovende en impactvolle route. TNO experimenteert met ALD op laboratoriumschaal.
- Andere strategieën en technieken waar TNO naar heeft gekeken zijn het recyclen van de materialen aan het einde van hun levensduur en het langer en intensiever laten werken van elektrolyzers.



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

Diepgaander begrip van de onderliggende dynamieken is essentieel om de inzet van schaars beschikbare (virgin) grondstoffen te minimaliseren.

Belangrijkste aannames in de studie waarop voortgebouwd wordt in dit werk (Gavrilova & Wieclawska (2021):

In stand gehouden aannames:

- 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 zullen dit belangrijke bepalende factoren zijn voor de schaal van waterstofproductie.

Aangescherpte of gewijzigde aannames:

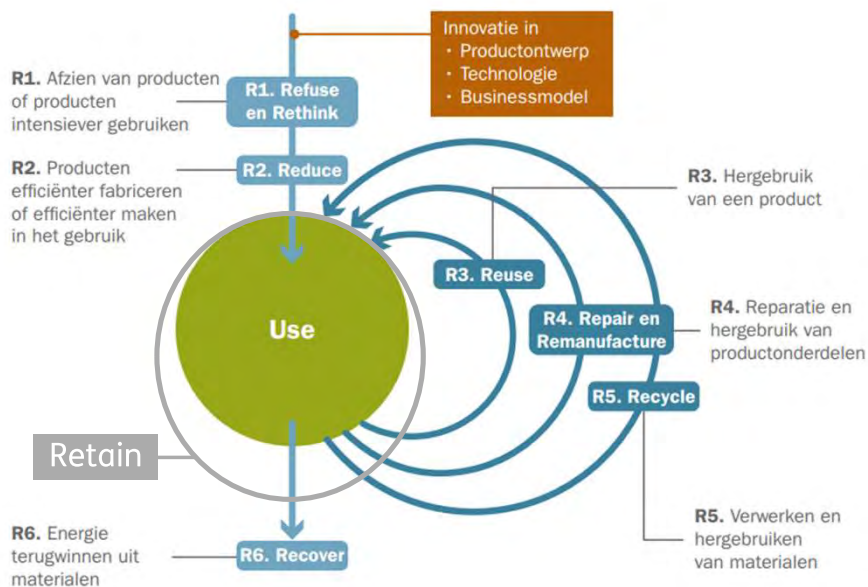
- De strategieën staan los van elkaar; er is meer onderzoek nodig naar de onderlinge wisselwerking, bijvoorbeeld welke invloed een dunnere laag materiaal heeft op de productiviteit.
→ *In deze studie zijn strategieën met elkaar in interactie*
- Omwille van de vergelijkbaarheid is bij de berekening van het effect van alle strategieën uitgegaan van een technologiemix van 50% PEM en 50% AEL.
→ *De technologiemix is gevarieerd door de tijd heen en een aandeel SOE en AEM is aangenomen.*
- 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 verminderd in verhouding met de hoeveelheid groene waterstof.
→ *De waterstofvraag wordt voorzien via import, niet-groene productie routes en groene waterstofproductie.*

Daarnaast zijn twee uitbreidingen toegevoegd door gebruik te maken van andere methodieken, waaronder systeemdynamisch simuleren:

- *Non-lineariteit en feedback loops rondom: opschaling tot 2070, ingroei van elektrolyser types in de technologie-mix, technische prestatie innovatie en materiaalgebruik verbeteringen.*
- *Gedetailleerdere timing van beleid/interventies en maturiteit(sgroei) middels vier losse strategieën en gezamenlijke realisatie van de strategieën.*

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

Een selectie van strategieën uit het denkkader van de R-ladder (Vollebergh et al., 2017) wordt verkend in deze studie zoals ook gebruikt door Gavrilova & Wieclawska (2021): zie diagram). Levensduurverlenging, onder de term Retain, is expliciet gemaakt en daarmee niet onder Refuse en Rethink geschaard. De andere strategieën kunnen ook doelmatig zijn. Aanvullend onderzoek kan hier inzicht in geven.



✘ Refuse

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

Reduce

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

⌚ Retain

Verlengen van de operationele levensduur van elektrolysers 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 elektrolysers.

De toegepaste werkwijze (1/3): Een systeemdynamische benadering van kritieke materialenvraag voor elektrolyseropschaling

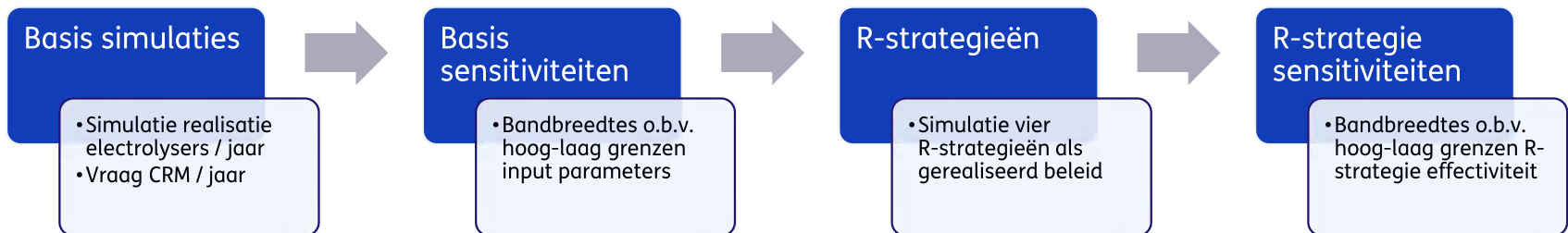
De gevolgde systeemdynamische werkwijze kent vier algemene stappen welke meerdere malen iteratief doorlopen zijn:

- 1) **Probleemdefinitie**
- 2) **Schetsen van causale verbanden** diagram (causal loop diagram), bepaling van productstromen en – accumulaties (stocks and flows) en bijbehorende gedragingen door de tijd (behaviour over time)
- 3) **Ontwikkeling kwantitatief model**
- 4) **Resultaatanalyse** in vier sub-stappen (zie onderstaande diagram)

In lijn met de doelstelling van dit onderzoek is een model ontworpen wat de toekomstige ontwikkeling simuleert van de **vraag naar *virgin* kritieke materialen** als gevolg van:

- Het opschalen van elektrolyser-capaciteit (base case);
- De uitwerking en effectiviteit, **van verschillende (combinaties van) R-strategieën.**

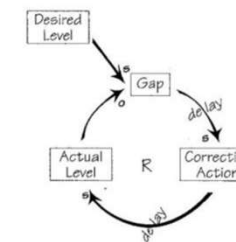
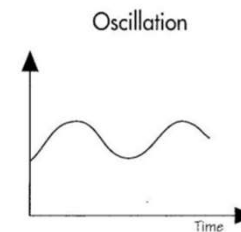
4) Resultaat-analyse in 4 sub-stappen:



De toegepaste werkwijze (2/3): Wat is systeemdynamica?

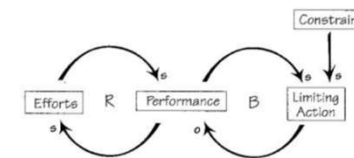
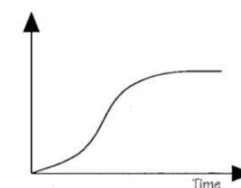
Systeemdynamica is een vakgebied met uiteenlopende gereedschappen en werkwijzen en bouwt voort op het vakgebied systeem theorie en systeemdenken. Achtergrondkennis is uitvoerig gedocumenteerd door Forrester (1993), Sterman (2000) en Richardson (2011). Systeemdynamica focust zich onder meer op:

- Kwalitatieve probleemdefinitie en group thinking voor vergroten van collectieve kennis
- Kwantitatief modelleren middels simulaties inclusief (diepe) onzekerheid
- Het verkrijgen van een endogeen perspectief op complexe systemen. Het gaat ervanuit dat de structuren van, en causale relaties binnen, een complex systeem feedback loops creëren die het gedrag van het systeem bepalen.
- Systeemdynamica is daarmee gericht op het omgaan met dynamische complexiteit in systemen.
- Voorbeelden van systeemdynamische archetypes, veel voorkomende gedragingen in de maatschappij, zijn door Kim & Lannon (n.d.) beschreven. In deze studie komen de archetypes *Shifting the burden* en *Limits to success* terug. Met specifiek aandacht voor de S-vormige ingroei van electrolyse capaciteit en de daaropvolgende oscillatie van deze capaciteit op basis van waterstof-marktvraag, zie illustraties rechts (Lannon (n.d.)).



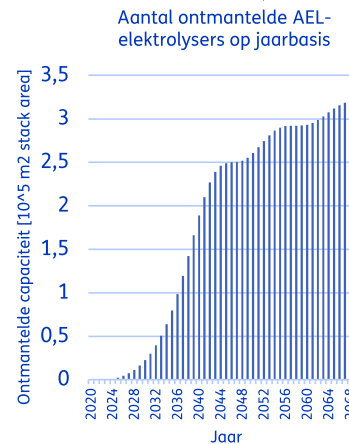
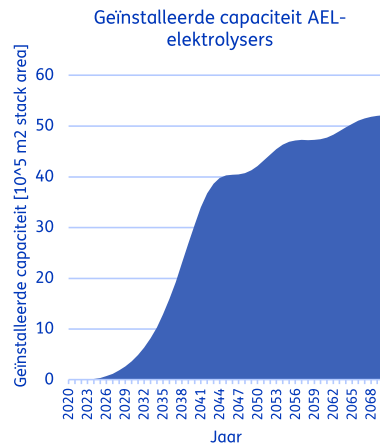
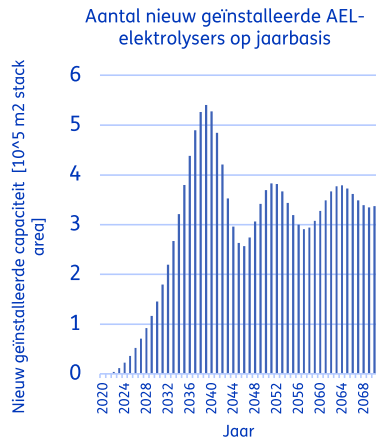
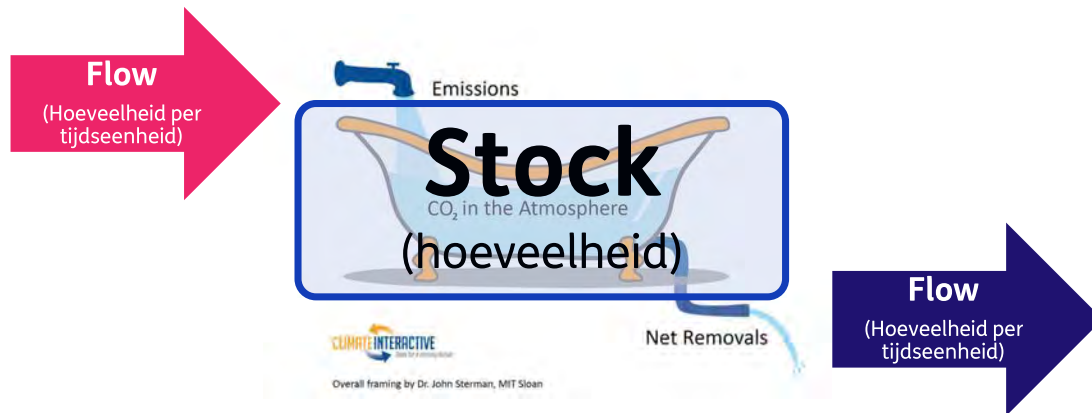
An oscillation is caused by a balancing process with significant delays, which creates under- and over-adjustment around the goal.

S-Shaped Growth



S-shaped growth is the result of a reinforcing process that has become "stalled" by a balancing process (commonly referred to as the "Limits to Success" archetype).

De toegepaste werkwijze (3/3): Essentiële begrippen in de systeemdynamica



Essentiële begrippen in de systeemdynamica zijn **stocks** en **flows**. Stocks zijn variabelen die absolute hoeveelheden weergeven. Bijvoorbeeld de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer (zie illustratie links). Flows leiden tot een verandering in een stock met een bepaalde hoeveelheid per tijdseenheid. Dit kan een toename (**inflow**) of een afname (**outflow**) zijn. In het voorbeeld van CO₂ emissies is een inflow bijvoorbeeld jaarlijkse CO₂-emissies. Een outflow is bijvoorbeeld de hoeveelheid CO₂ die jaarlijks door de natuur of carbon capture uit de atmosfeer wordt gehaald. In de presentatie van de resultaten geven we stocks weer met vlakdiagrammen en flows met staafdiagrammen (zie illustratie links).

Naast stocks en flows is in de systeemdynamica sprake van **informatievariabelen** en **exogene parameters**. Informatievariabelen duiden geen fysieke grootheden aan maar causale relaties. Bijvoorbeeld de relatie tussen energieconsumptie en CO₂-emissies.

Waar stocks, flows en informatievariabelen **endogene factoren** zijn die binnen de systeemgrenzen vallen en door het dynamische gedrag van het systeem worden bepaald, zijn exogene parameters factoren die buiten de grenzen van een beschouwd systeem vallen maar er wel invloed op uitoefenen. Als men bijvoorbeeld de CO₂-emissies van Nederland onderzoekt is de groei van de wereldeconomie typisch zo'n exogene parameter.

Leeswijzer van gevolgde 4-staps-werkwijze

1. Probleemdefinitie

2. Schetsen van causale verbanden diagram (causal loop diagram), bepaling van productstromen en -accumulaties (stocks and flows) en bijbehorende gedragingen door de tijd (behaviour over time)
3. Ontwikkeling kwantitatief model
4. Resultaatanalyse in vier sub-stappen:
 - I. Basis simulaties
 - II. Basis sensitiviteiten
 - III. R-strategieën
 - IV. R-strategie sensitiviteiten

Probleemstelling

De eerste stap in de systeemdynamische werkwijze, de definitie en scoping van het probleem, is in de eerste twee secties van dit rapport uitgebreid uitgewerkt. Onderstaande samenvatting dient als vertrekpunt voor de vervolgstappen welke in de volgende pagina's beschreven zijn.

Probleemstelling

Om te voldoen aan de geplande vraag naar groene waterstof in Nederland en de EU moet de elektrolyser-capaciteit worden opgeschaald. Echter, elektrolyzers leggen een beslag op de wereldwijde kritieke materialen-reserves, hetgeen niet in overeenstemming is met de principes van een circulaire economie.

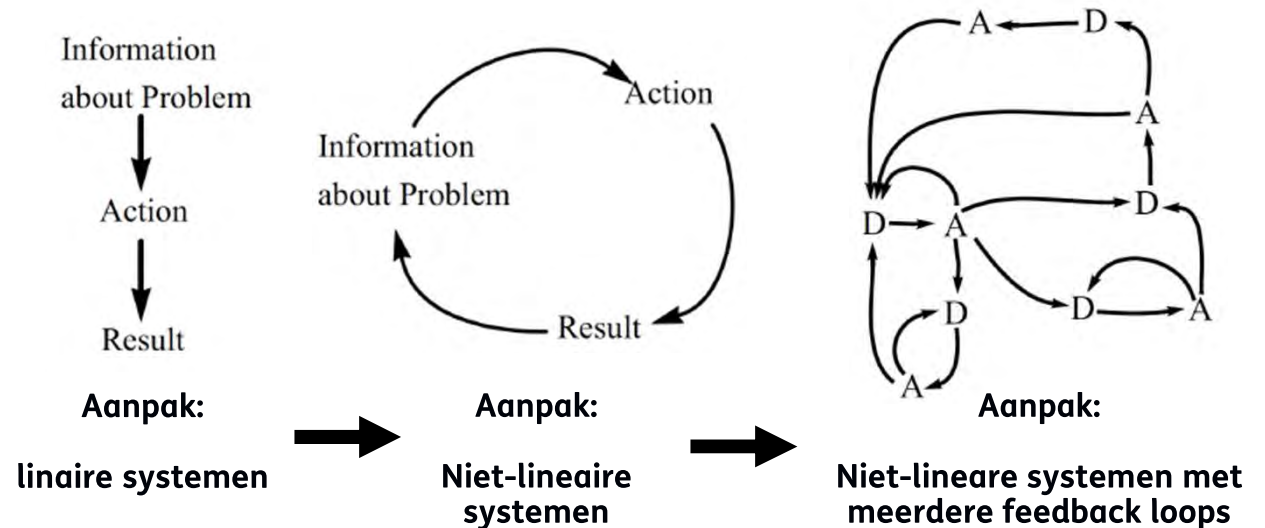
Onderzoeksvraag

Wat zijn mogelijke (beleids)interventies voor het reduceren van de vraag naar kritieke materialen ten gevolge van de opschaling van de electrolyser-capaciteit in de EU?

De variabelen, factoren en onderlinge relaties welke in de probleemstelling terugkomen zijn nonlinear van aard en kennen complexe vormen van feedbackloop structuren.

Om tot toegankelijke inzichten te komen wordt, parallel aan de inhoudelijke probleemstelling, ook de methodische aanpak als uitdagende opgave aangepakt: Dit leidt tot de methodische onderzoeksvraag:

Hoe kan doelmatig en schaalbaar onderzoek gedaan worden naar schaarste-beperkingen voor opschalende emergente technologieën, waarbij recht gedaan wordt aan het niet-lineaire karakter van deze systemen met meerdere feedback loops.

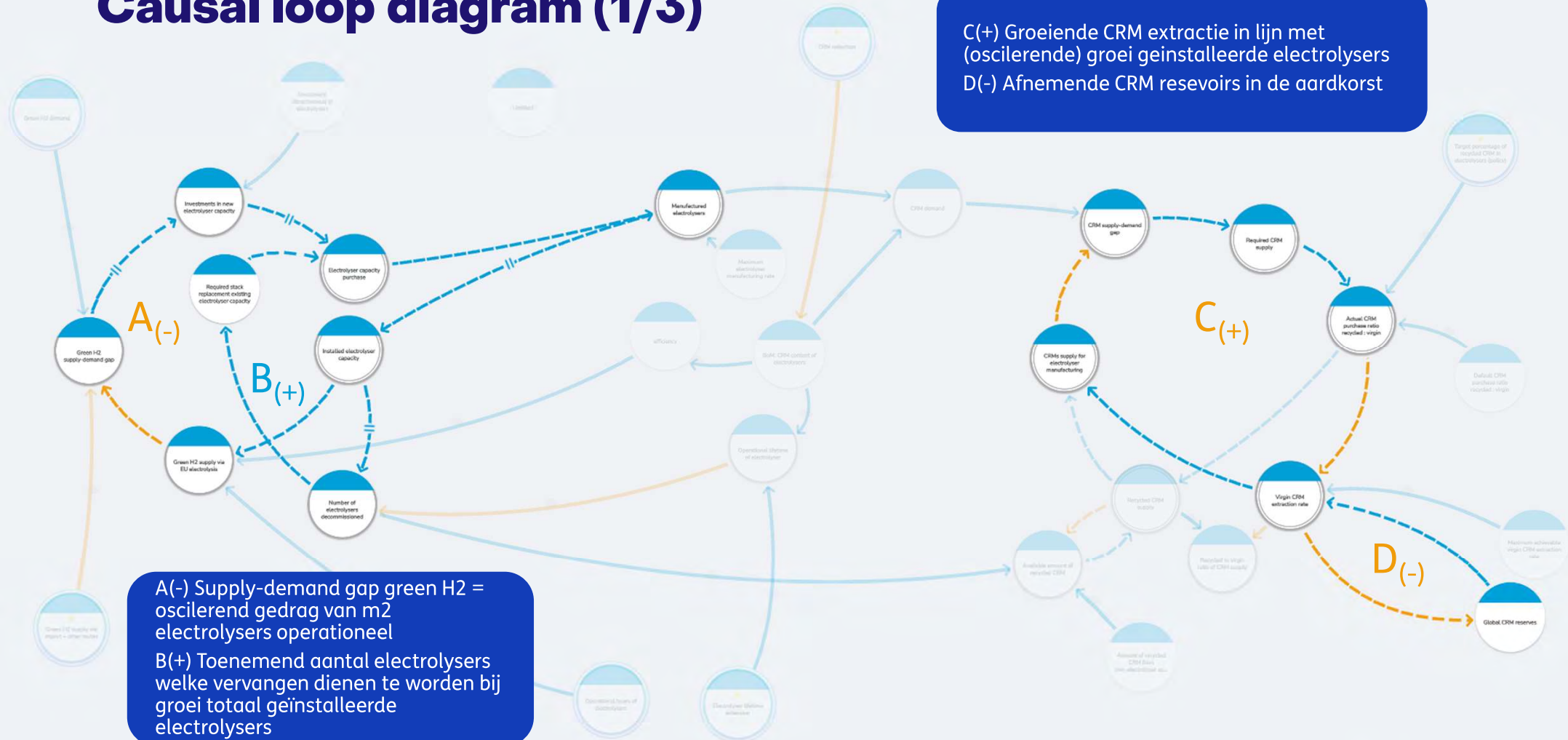


Leeswijzer van gevolgde 4-staps-werkwijze

1. Probleemdefinitie (zie vorige sectie)
2. Schetsen van causale verbanden diagram (causal loop diagram), bepaling van productstromen en -accumulaties (stocks and flows) en bijbehorende gedragingen door de tijd (behaviour over time)
3. Ontwikkeling kwantitatief model
4. Resultaatanalyse in vier sub-stappen:
 - I. Basis simulaties
 - II. Basis sensitiviteiten
 - III. R-strategieën
 - IV. R-strategie sensitiviteiten

Causal loop diagram (1/3)

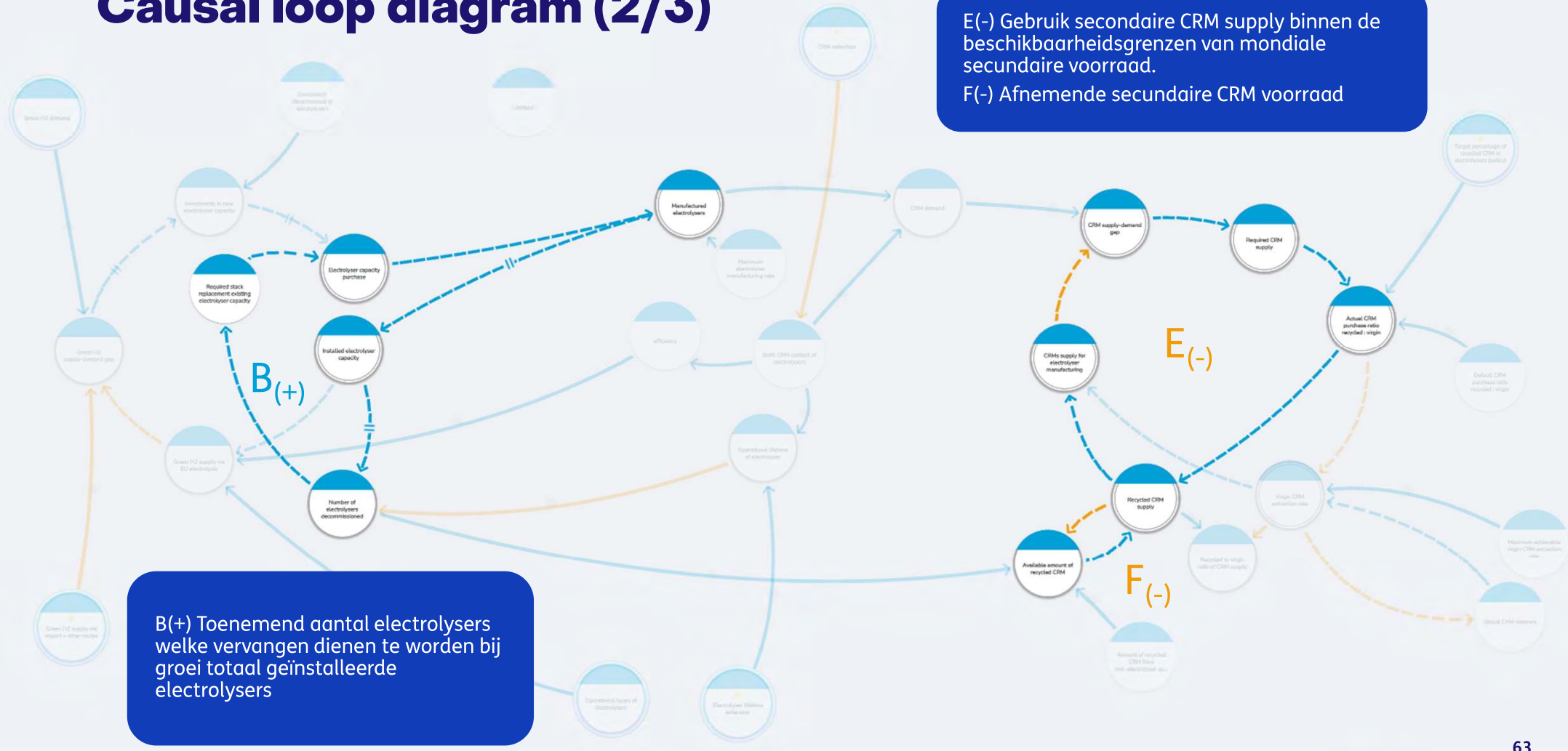
C(+) Groeiende CRM extractie in lijn met (oscilerende) groei geïnstalleerde electrolyzers
 D(-) Afnemende CRM reservoirs in de aardkorst



A(-) Supply-demand gap green H2 = oscilerend gedrag van m2 electrolyzers operationeel
 B(+): Toenemend aantal electrolyzers welke vervangen dienen te worden bij groei totaal geïnstalleerde electrolyzers

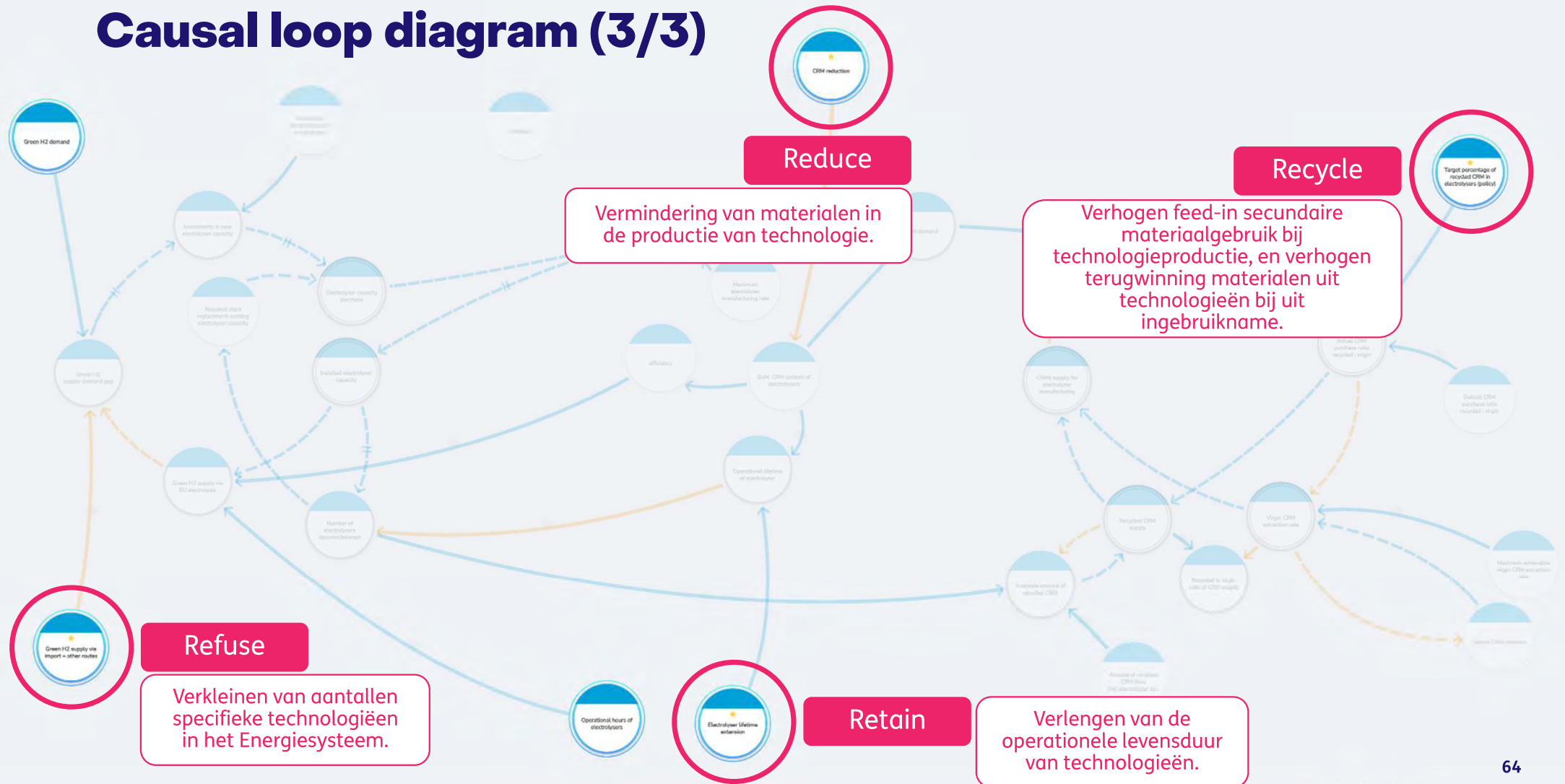
Causal loop diagram (2/3)

E(-) Gebruik secundaire CRM supply binnen de beschikbaarheidsgrenzen van mondiale secundaire voorraad.
 F(-) Afnemende secundaire CRM voorraad



B(+) Toenemend aantal electrolyzers welke vervangen dienen te worden bij groei totaal geïnstalleerde electrolyzers

Causal loop diagram (3/3)



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

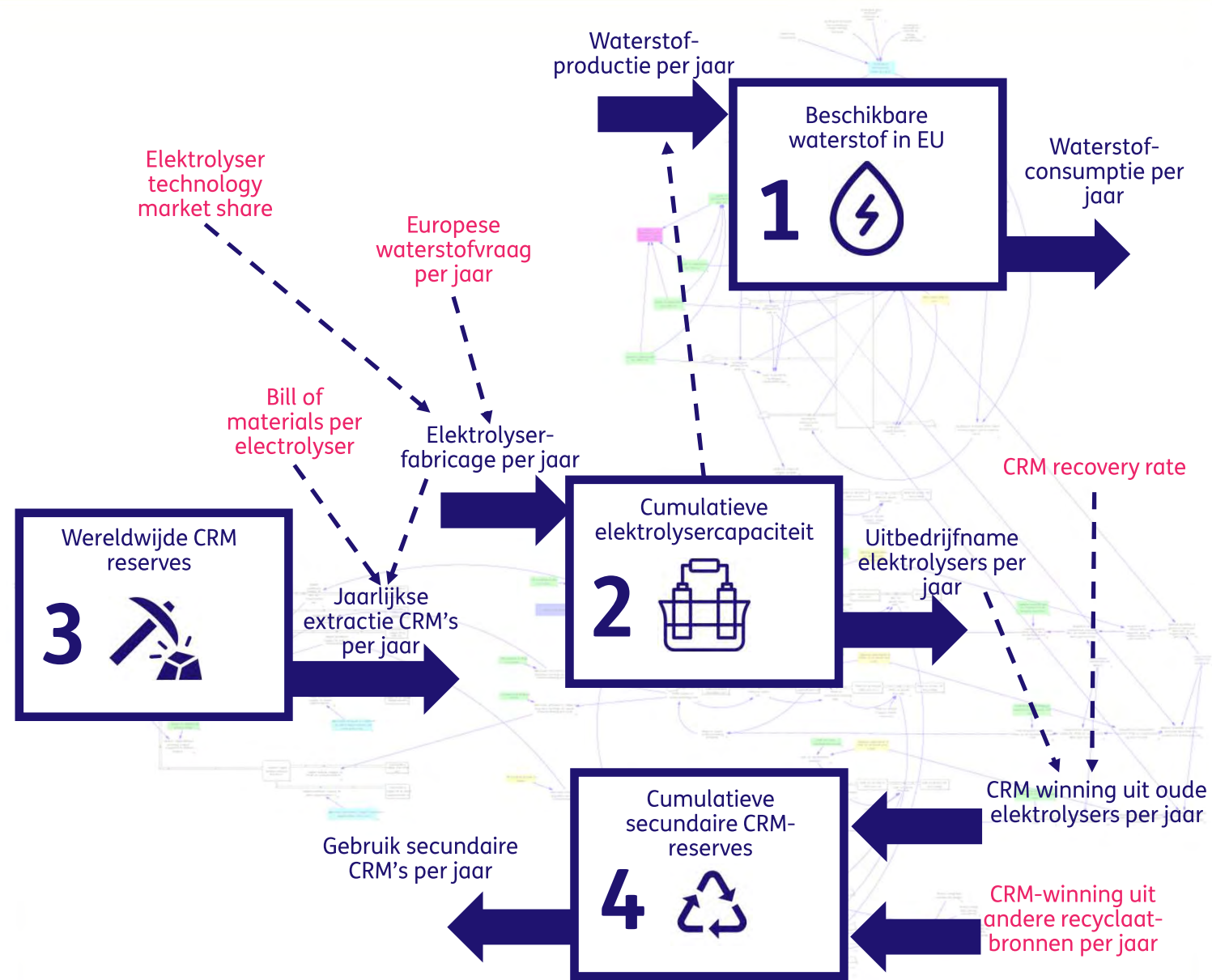
De vraag naar groene waterstof is het startpunt van het model. Deze vraag bepaalt hoeveel additionele elektrolyzers door de tijd heen worden bijgebouwd (*flow*).

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.



Leeswijzer van gevolgde 4-staps-werkwijze

1. Probleemdefinitie (zie vorige sectie)
2. Schetsen van causale verbanden diagram (causal loop diagram), bepaling van productstromen en -accumulaties (stocks and flows) en bijbehorende gedragingen door de tijd (behaviour over time)

3. Ontwikkeling kwantitatief model

4. Resultaatanalyse in vier sub-stappen:
 - I. Basis simulaties
 - II. Basis sensitiviteiten
 - III. R-strategieën
 - IV. R-strategie sensitiviteiten

Ontwikkeling van kwantitatief model: de vier sub-modellen uitgelicht

Het conceptuele systeemdynamische model dat we op voorgaande slides hebben uitgelegd, hebben we vertaald naar een kwantitatief model in de software Vensim. Met dit model kunnen dynamische simulaties worden uitgevoerd die de ontwikkeling van het systeem over tijd laten zien. Het model bestaat uit vier onderdelen, die hiernaast schematisch staan afgebeeld. 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 **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.

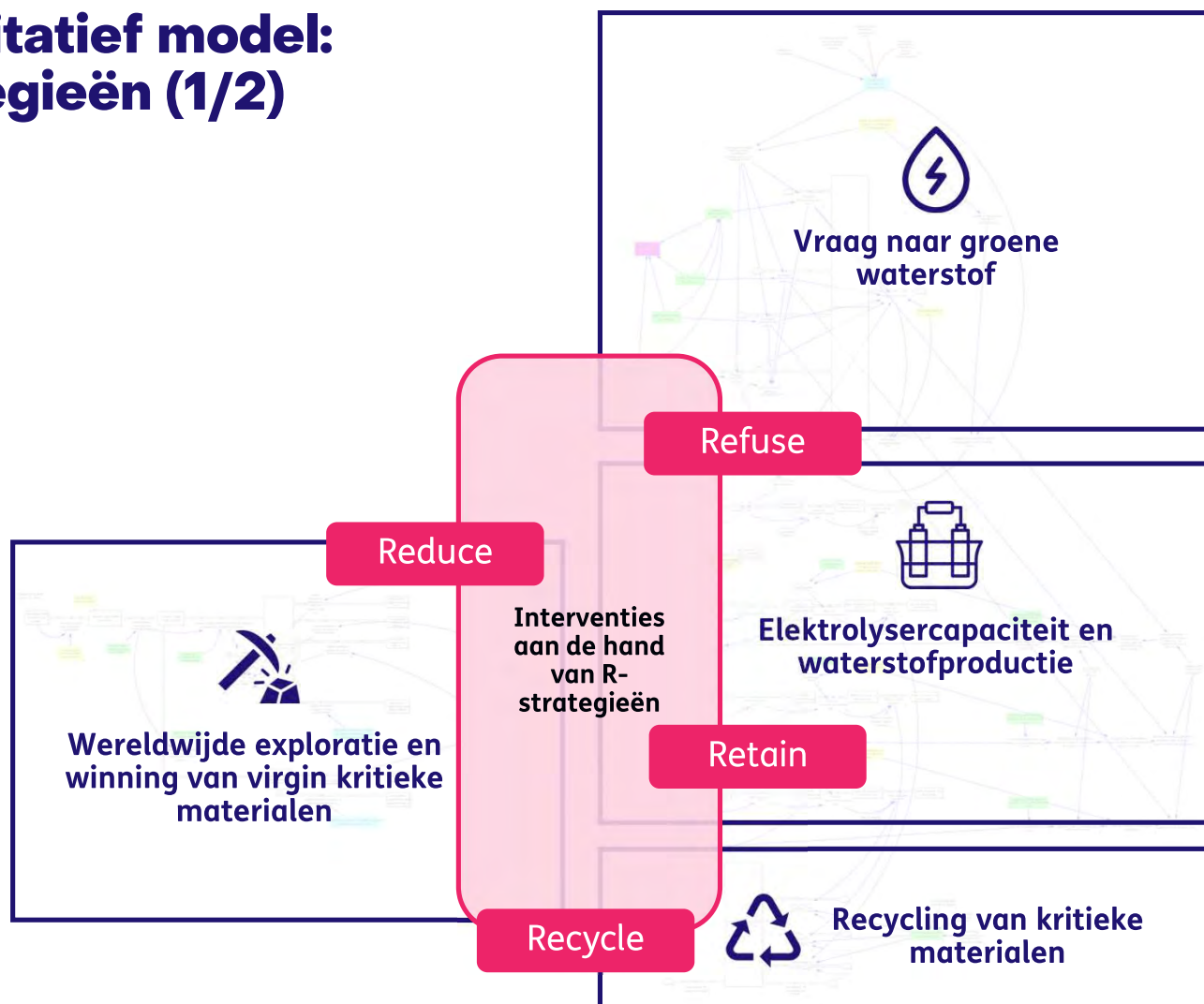
De dynamische simulaties die we met deze modelopzet hebben uitgevoerd noemen we de **base case**. Maar we zijn natuurlijk benieuwd wat er met het systeem gebeurt als er bepaalde interventies worden gepleegd. Hier gaan we op de volgende slide op in.



Ontwikkeling van kwantitatief model: modellering van R-strategieën (1/2)

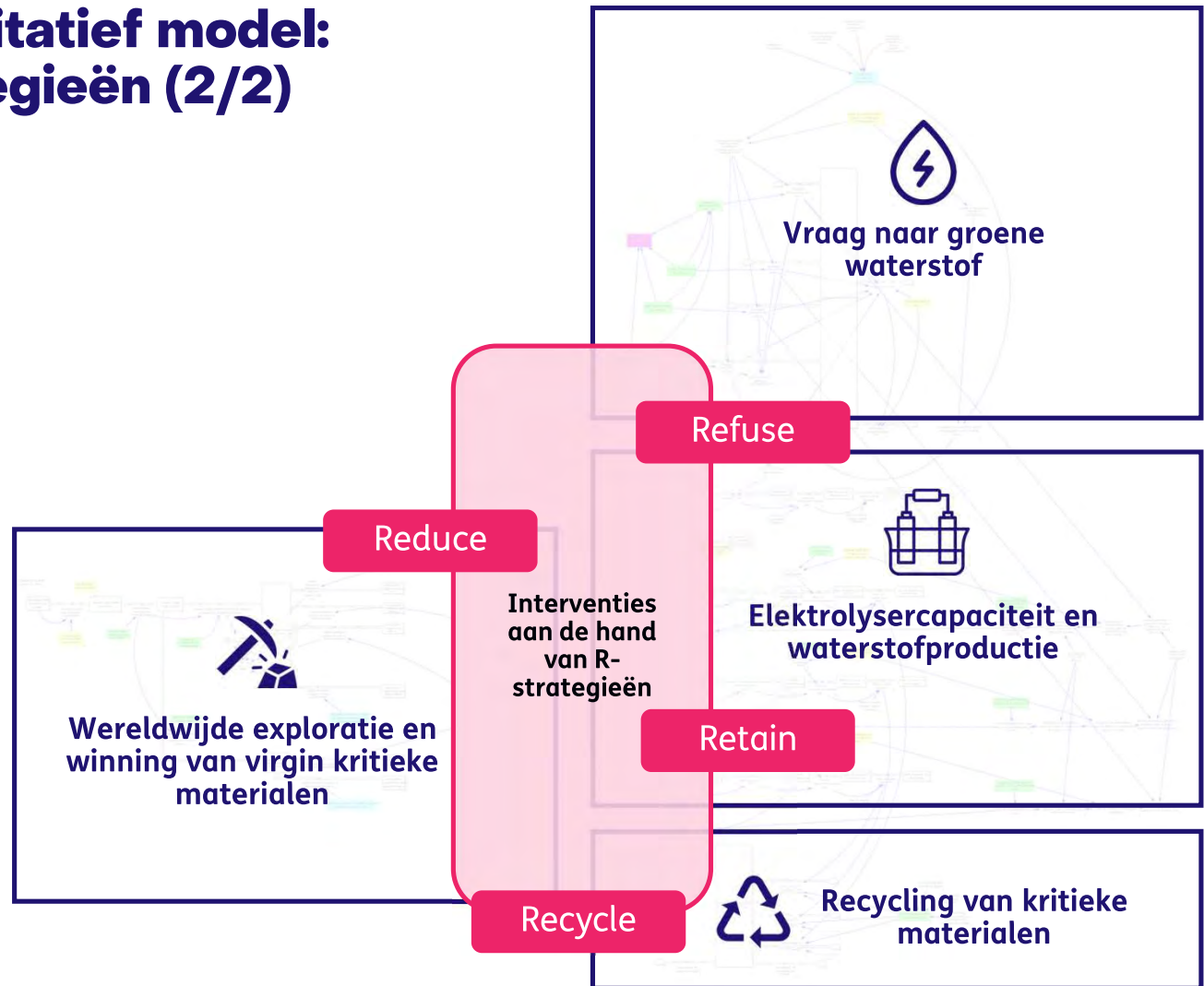
Naast een simulatie van de base case hebben we het systeemdynamisch model gebruikt om de impact van verschillende R-strategieën (zie slide 36) op het systeem en met name de vraag naar virgin kritieke materialen te onderzoeken. Op deze slide leggen wij graag uit hoe wij deze R-strategieën hebben gemodelleerd.

- **Refuse.** In de base case bepaalt een vooraf ingestelde *technologiemix* (die weliswaar door de tijd heen verandert) welk aandeel elk type elektrolyser (AEL, PEM, SOE, AEM) heeft in de invulling van de groene-waterstofvraag. Refuse zorgt ervoor dat het aandeel van PEM-elektrolysers in deze technologiemix afneemt van 60% in 2030 naar 20% in 2050 (in plaats van 40% in 2050 in de base case). Hierdoor neemt het aandeel van AEL toe van 40% in 2030 naar 50% in 2050, in plaats van een afname naar 30% in 2050 in de base case. Het doel van deze strategie is de vraag naar iridium te verlagen. Zie de bijlage voor meer informatie over de technologiemix.
- **Retain.** Deze strategie verhoogt de levensduur van elektrolysers met 20%, waardoor reeds geïnstalleerde elektrolysers langer in bedrijf blijven. Hierdoor hoeven met dezelfde groene-waterstofvraag minder nieuwe elektrolysers geïnstalleerd te worden.



Ontwikkeling van kwantitatief model: modellering van R-strategieën (2/2)

- De **Recycle**-strategie zorgt ervoor dat er een eis wordt gesteld aan de hoeveelheid gerecycled materiaal in nieuw te installeren elektrolyzers. Deze neemt vanaf 2030 lineair toe van 0% tot 90% in 2050. Hierdoor neemt de vraag naar virgin kritieke materialen af.
- **Reduce** verlaagt de *bill of materials*, de hoeveelheid benodigde kritieke materialen per elektrolyser, onder de aanname dat er vergaande innovaties optreden die zorgen dat dezelfde elektrolyser-prestaties kunnen worden bereikt zonder, of met zeer gering gebruik van kritieke materialen.



Ontwikkeling van kwantitatief model: de vier sub-modellen in meer detail (1/2)



Vraag naar groene waterstof

Dit onderdeel vormt het startpunt van het model. Het bevat een **projectie van de totale waterstofvraag** van de EU, die gebaseerd is op het Net Zero Emissions-scenario van de IEA (International Energy Agency, 2023a & International Energy Agency, 2023b). Dit scenario wordt nader toegelicht op slide 39.

Een andere belangrijke input is het **aandeel groene waterstof** in de totale waterstofvraag. We gaan ervanuit dat het aandeel groene waterstof lineair toeneemt van 0% in 2020 tot 50% in 2030 (EU-doelstelling, zie Erbach & Svensson, 2023) en daarna lineair verder stijgt tot een maximum van 95%. Zo wordt de **vraag naar groene waterstof** berekend. Het verschil tussen de vraag naar groene waterstof en het **aanbod van groene waterstof** (dat met elektrolyse beschikbaar komt) is de **vraag-aanbod-kloof**. Deze variabele bepaalt de gewenste additionele waterstofproductie.

Een derde input die van belang is, is de **elektrolyser-technologiemix**. Deze bepaalt het aandeel van de verschillende elektrolyser-technologieën (AEL, PEM, SOE en AEM) in de te installeren elektrolyser-capaciteit. Deze verhoudingen zijn niet statisch, maar volgen een ontwikkeling over de tijd vanwege de opkomst van de nieuwe technologieën SOE en AEM. De **Refuse-strategie** past deze verhoudingen aan ten koste van PEM en ten gunste van AEL.

De vraag-aanbod-kloof en de technologiemix bepalen gezamenlijk de gewenste additionele waterstofproductie uit elk type elektrolyser. Bijvoorbeeld: als in een bepaald jaar de vraag-aanbod-kloof 100 PJ is en het aandeel van AEL in de elektrolyser-technologiemix 50% dan is de gewenste additionele waterstofproductie uit AEL in dit jaar 50 PJ.



Elektrolyser-capaciteit en waterstofproductie

Dit submodel is gelinkt aan het “vraag naar groene waterstof”-submodel via de gewenste additionele waterstofproductie uit elk type elektrolyser. Via de **stroomdichtheid** (de hoeveelheid stroom per oppervlakte-eenheid van de elektrolyser-stack) en enkele natuurkundige constanten wordt – in elk jaartal van de simulatie – uit de groene-waterstofvraag de **benodigde additionele elektrolysercapaciteit** berekend in termen van vierkante meter stack-oppervlakte. Deze benodigde additionele elektrolyser-capaciteit is de hoeveelheid elektrolyzers die in het model in elk jaartal van de simulatie worden bijgebouwd. Deze variabele is een *flow*, die wordt toegevoegd aan de **geïnstalleerde elektrolysercapaciteit** (*stock*). Tegelijkertijd worden in het model elektrolyzers die het einde van hun levensduur hebben bepaald, uit de bestaande capaciteit gehaald (*flow*).

Het model gaat uit van **technologieverbeteringen** op het vlak van stroomdichtheid (alleen voor PEM-elektrolyzers) en de degradatie van de elektrolyser-prestaties (alle elektrolyser-typen). Deze gelden voor de elektrolyzers die nieuw worden bijgebouwd. Met de **Retain-strategie** neemt ook de levensduur van nieuwe elektrolyzers toe.

Op basis van de geïnstalleerde elektrolysercapaciteit, het aantal elektrolyzers dat jaarlijks nieuw wordt geïnstalleerd en ontmanteld en de technologieverbeteringen rekent het model de **productiecapaciteit van groene waterstof** uit. Samen met de **benutting** van de elektrolyzers (in vollasturen per jaar) volgt hieruit de **waterstofproductie op jaarbasis**. De som van deze variabele voor elk type elektrolyzers is het **aanbod van groene waterstof**. Deze variabele wordt weer teruggevoerd in het “vraag naar groene waterstof”-submodel.

Ontwikkeling van kwantitatief model: de vier sub-modellen in meer detail (2/2)



Wereldwijde exploratie en winning van virgin kritieke materialen

Dit submodel is gelinkt aan het “elektrolysercapaciteit en waterstofproductie”-submodel via de zogeheten **bill of materials**, in de literatuur ook wel *material loading* genoemd. Dit is de benodigde hoeveelheid platina, iridium en nikkel voor elke nieuw te bouwen elektrolyser. In het model wordt aangenomen dat onder het mom van technologieverbetering de hoeveelheid platina in AEL-elektrolyzers met 60% zal zijn afgenomen in 2030 (Expertconsultatie, 2023). Met de **Reduce-strategie** wordt een radicale reductie van 95% of meer doorgevoerd in de bill of materials, voor alle typen elektrolyzers.

De bill of materials en de hoeveelheid nieuwe elektrolyzers die worden bijgebouwd bepalen gezamenlijk de **vraag naar virgin kritieke materialen**. Uit het verschil tussen de vraag en het **aanbod van kritieke materialen uit wereldwijde reserves** (*stock*) wordt de **vraag-aanbod-kloof** berekend. Op basis van deze kloof worden virgin kritieke materialen onttrokken uit wereldwijde reserves (*flow*). Deze reserves worden opgebouwd door **exploratie van mijnen** van kritieke materialen (*flow*). Doordat reserves worden onttrokken ontstaat er aanbod van kritieke materialen, die weer terug wordt gevoed in de start van het sub-model.



Recycling van kritieke materialen

Als de **Recycle-strategie** wordt toegepast, wordt er een eis gesteld aan de hoeveelheid gerecyclede materiaal die moet worden gebruikt in de bouw van nieuwe elektrolyzers als percentage van de totaal benodigde hoeveelheid kritieke materialen: de **recycling-inputgraad**. Deze neemt toe van 0% in 2020 tot 90% in 2050. Deze parameter creëert een vraag naar gerecyclede materialen.

Het aanbod van gerecyclede materialen wordt gevormd doordat elektrolyzers die het einde van hun levensduur hebben bereikt uit gebruik worden genomen. Hierdoor ontstaan **voorraden aan gerecyclede materialen**. We nemen aan dat 90% van de uit bedrijf genomen elektrolyzers gerecycled worden. Tot het jaar 2020 nemen we een **werkelijke recyclinggraad** van 14% voor iridium, 25% voor platina en 60% voor nikkel (SCRREEN, 2023). Na 2020 nemen we aan dat de werkelijke recyclinggraad lineair toeneemt tot 90% in 2050 voor alle kritieke materialen. Het model checkt of de voorraden aan gerecyclede materialen voldoende zijn om aan de recycling-inputgraad te voldoen. Zo niet, dan wordt de vereiste recycling-inputgraad niet gehaald en worden **maximaal haalbare recyclinggraden** berekend op basis van de beschikbare voorraden.

Op basis van ofwel de recycling-inputgraad ofwel de maximaal haalbare recyclinggraad wordt berekend hoeveel van de kritieke materialenvraag met gerecyclede materialen wordt ingevuld. Het resultaat van deze berekening voedt terug in het “wereldwijde exploratie en winning”-sub-model; de resterende vraag wordt ingevuld met virgin kritieke materialen.

Leeswijzer van gevolgde 4-staps-werkwijze

1. Probleemdefinitie (zie vorige sectie)
2. Schetsen van causale verbanden diagram (causal loop diagram), bepaling van productstromen en -accumulaties (stocks and flows) en bijbehorende gedragingen door de tijd (behaviour over time)
3. Ontwikkeling kwantitatief model

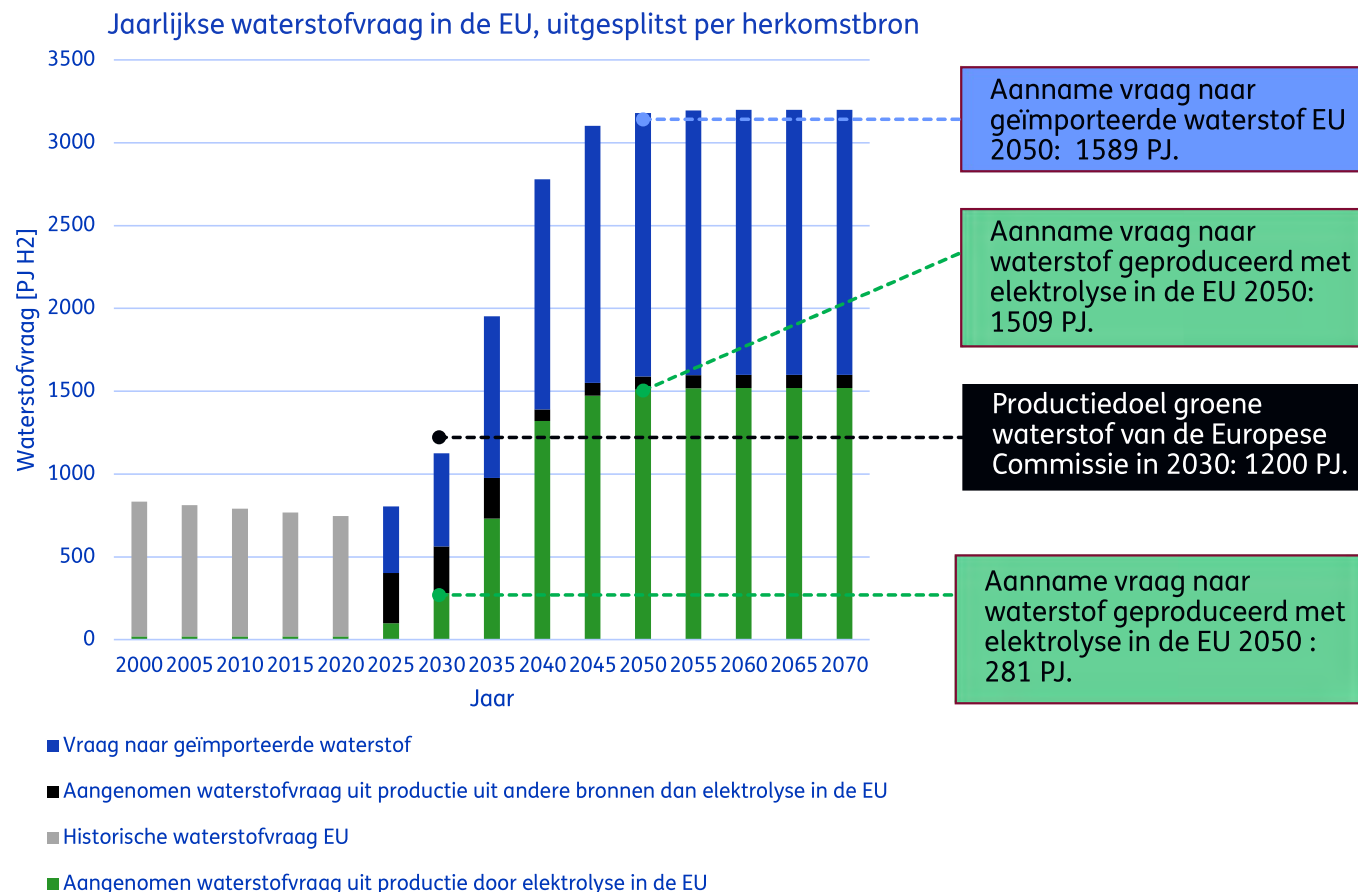
4. Resultaatanalyse in vier sub-stappen:

- I. Basis simulaties
- II. Basis sensitiviteiten
- III. R-strategieën
- IV. R-strategie sensitiviteiten

Snelle opschaling elektrolyzers nodig om aan groene waterstofvraag te voldoen

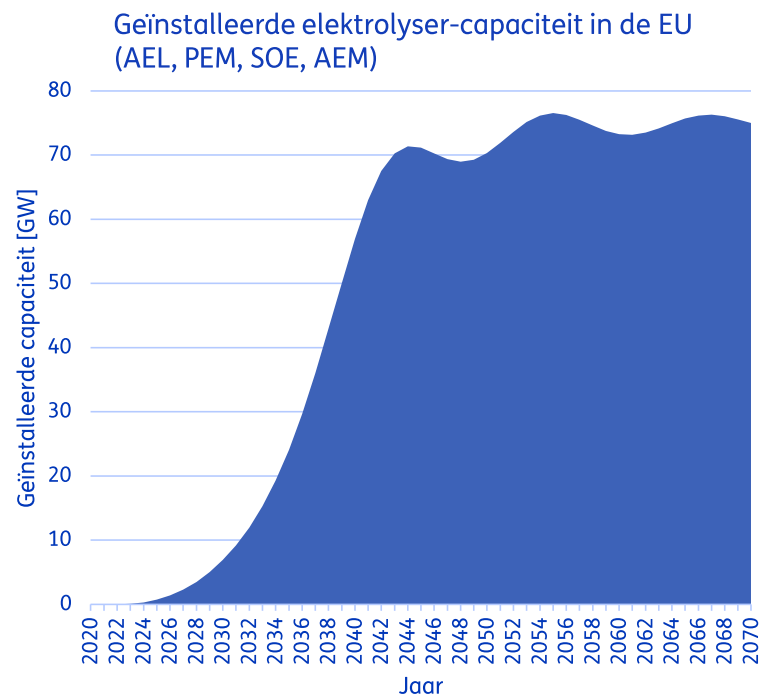
In het base case-scenario nemen we een waterstofvraagprojectie in de EU aan op basis van het Net Zero Emissions (NZE) Scenario van de IEA (International Energy Agency, 2023a & International Energy Agency, 2023b). Uit de data in deze rapportages volgt een waterstofvraag in de EU van 9.3 Mton (1116 PJ) 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%.

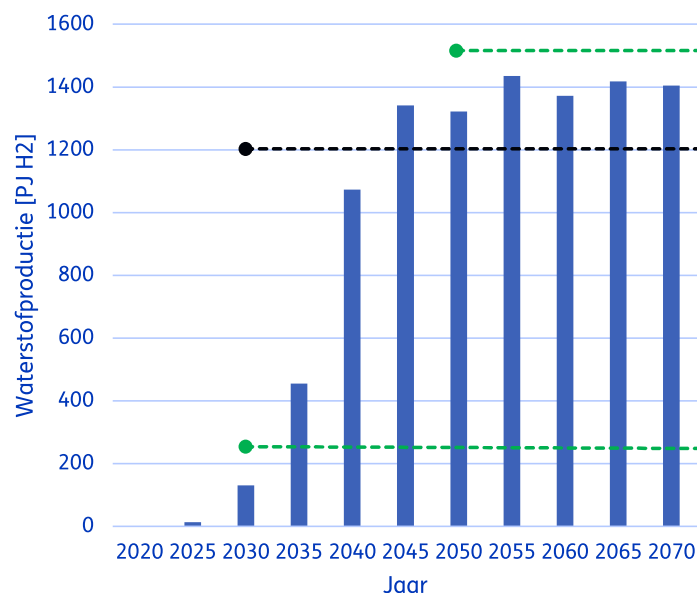


Snelle opschaling elektrolyzers nodig om aan groene waterstofvraag te voldoen

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



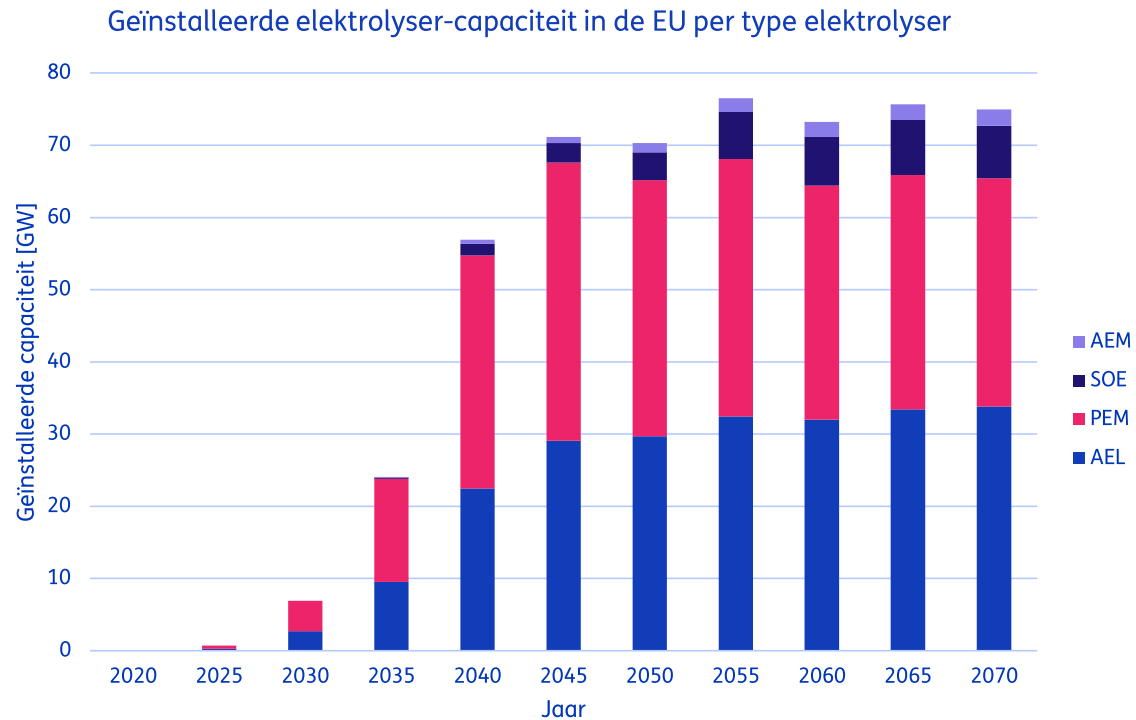
Aanname groene waterstofvraag uit elektrolyse EU 2050: 1509 PJ.

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

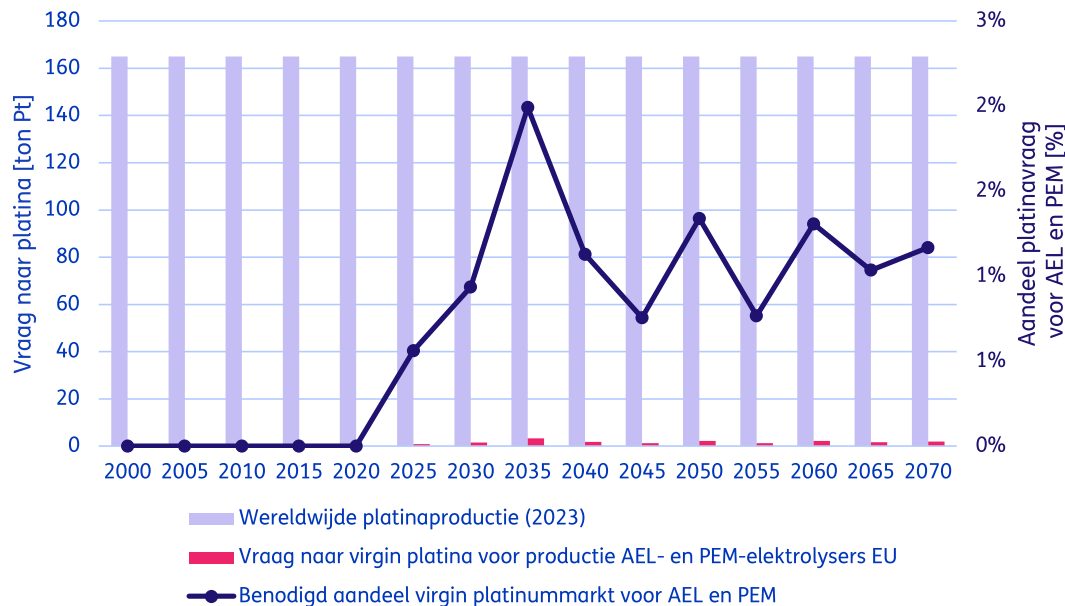
In onze simulaties nemen we aan dat de verhouding tussen verschillende elektrolysertypen (de technologiemix) in nieuw te installeren elektrolyzers door de tijd heen verandert. De verhouding van AEL ten opzichte van PEM neemt toe en nieuwe technologieën, SOE en AEM, groeien in.



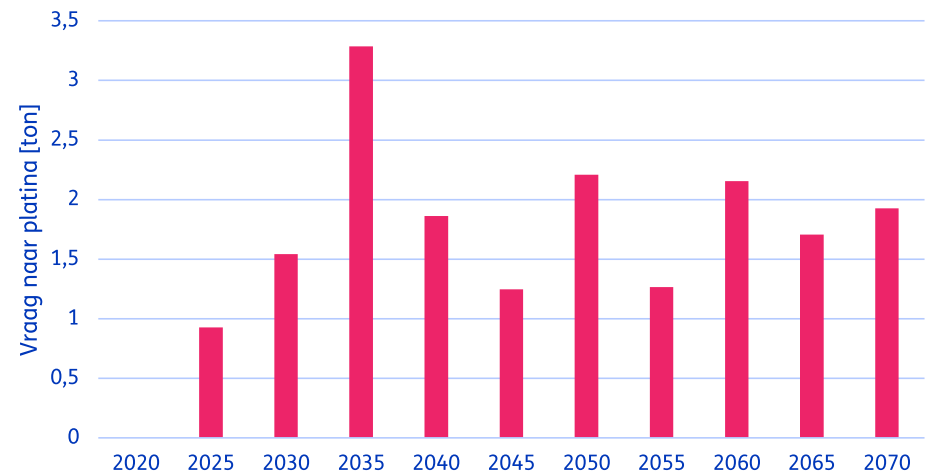
Vraag naar PGM's voor elektrolyzers neemt een vlucht; vooral iridiumvraag legt groot beslag op wereldmarkt

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

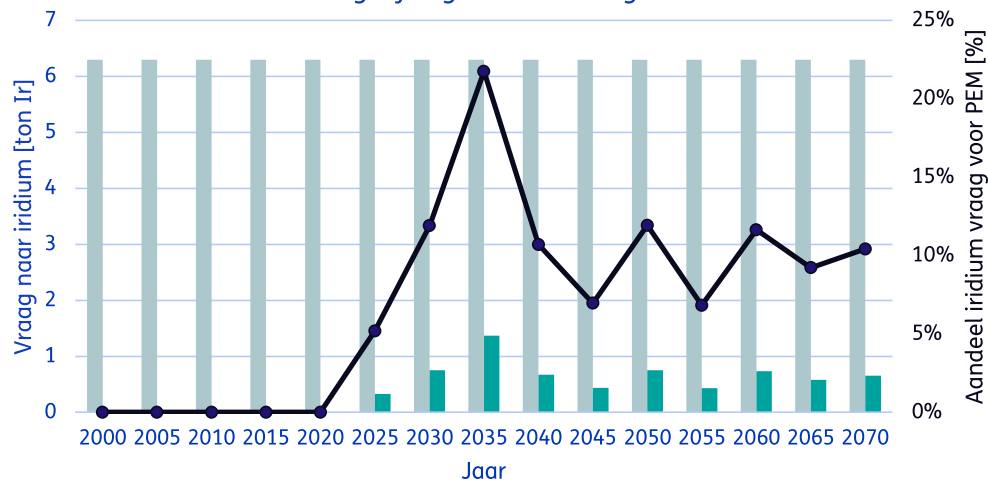


Vraag naar PGM's voor elektrolyzers neemt een vlucht; vooral iridiumvraag legt groot beslag op wereldmarkt

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.

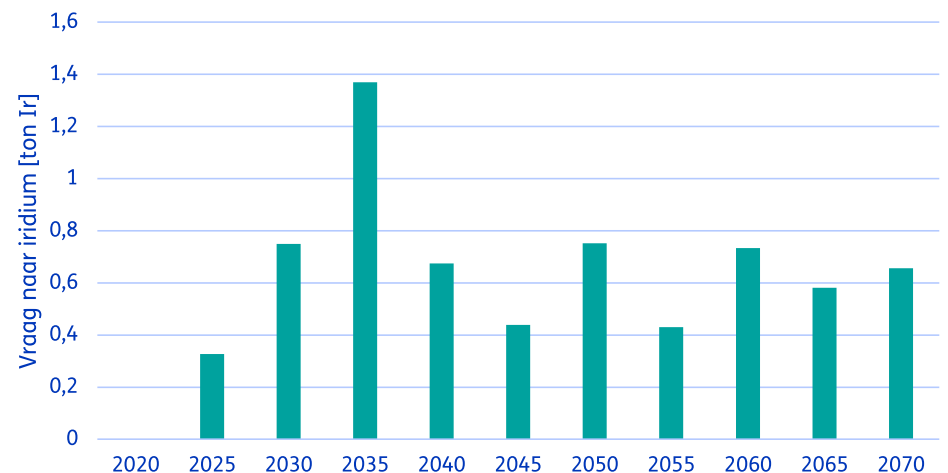
Gezien het significante aandeel van de vraag naar virgine platina en iridium voor de opschaling van elektrolyzers, nemen wij deze materialen mee in de rest van ons onderzoek.

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



- Wereldwijde iridiumproductie (2023)
- Vraag naar virgine iridium voor productie PEM-elektrolyzers EU (base case)
- Benodigd aandeel virgine iridiummarkt voor PEM

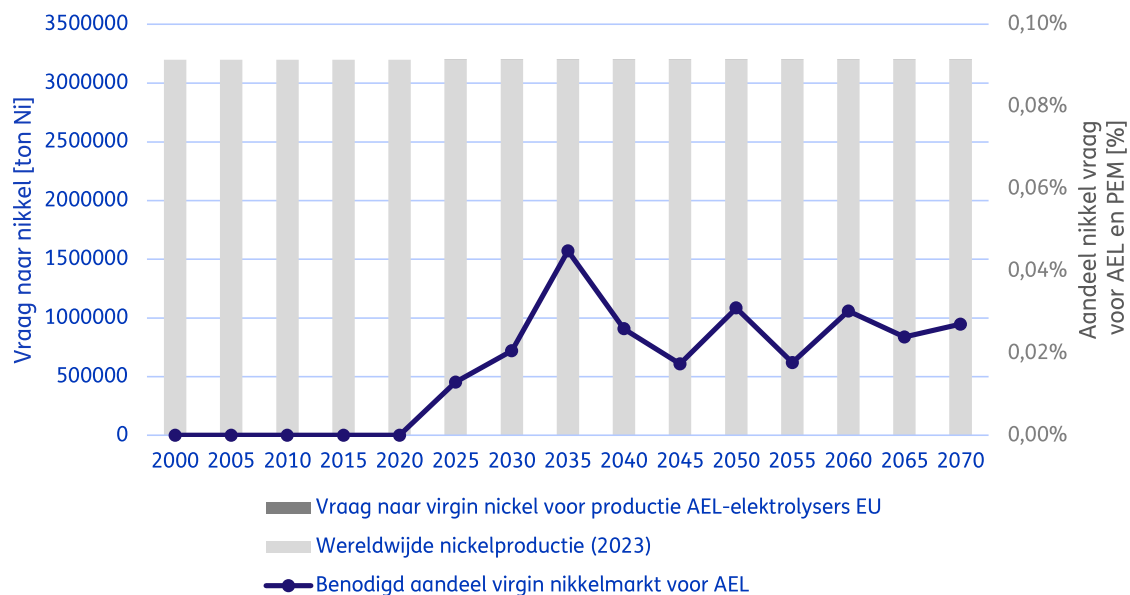
Jaarlijkse vraag naar virgine iridium voor PEM elektrolyserproductie in de EU



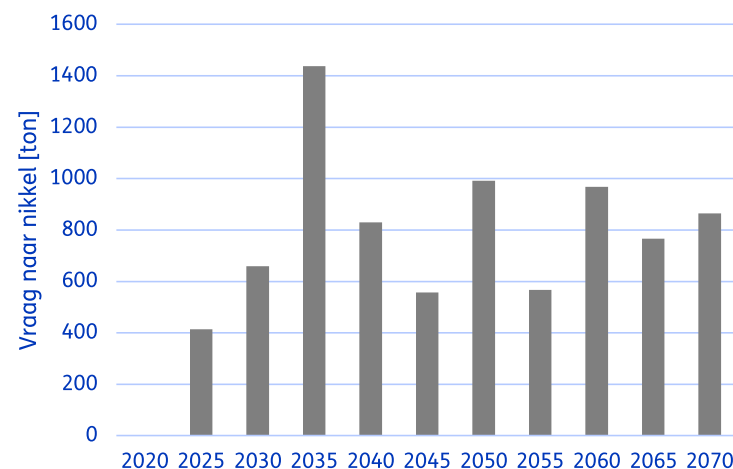
Nikkelvraag elektrolyserproductie EU is veel kleiner deel van wereldwijde vraag

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



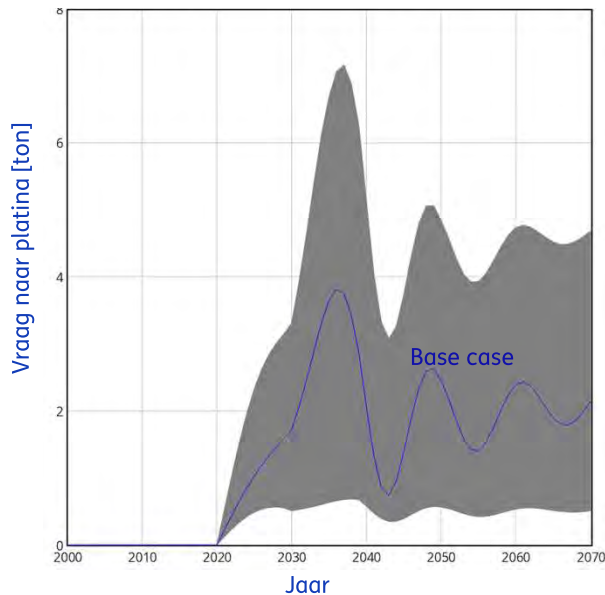
Onzekerheden zorgen voor grote spreiding in uitkomsten

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.

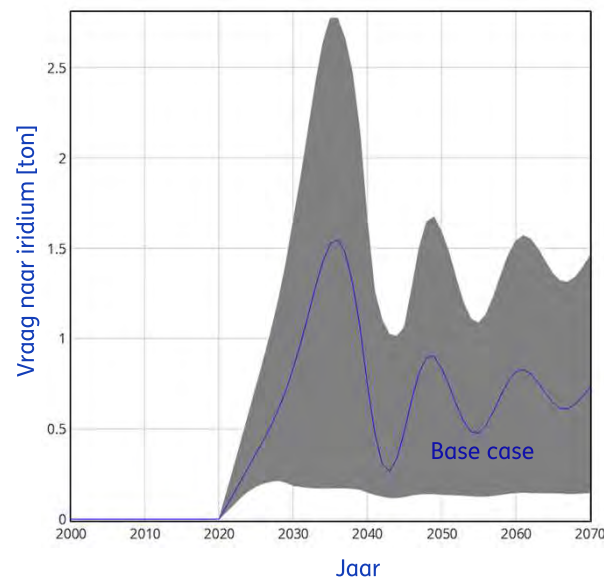
Onzekerheidsanalyse base case:

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.

Leeswijzer van gevolgde 4-staps-werkwijze

1. Probleemdefinitie (zie vorige sectie)
2. Schetsen van causale verbanden diagram (causal loop diagram), bepaling van productstromen en -accumulaties (stocks and flows) en bijbehorende gedragingen door de tijd (behaviour over time)
3. Ontwikkeling kwantitatief model

4. Resultaatanalyse in vier sub-stappen:

- I. Basis simulaties
- II. Basis sensitiviteiten

III. R-strategieën

IV. R-strategie sensitiviteiten

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.

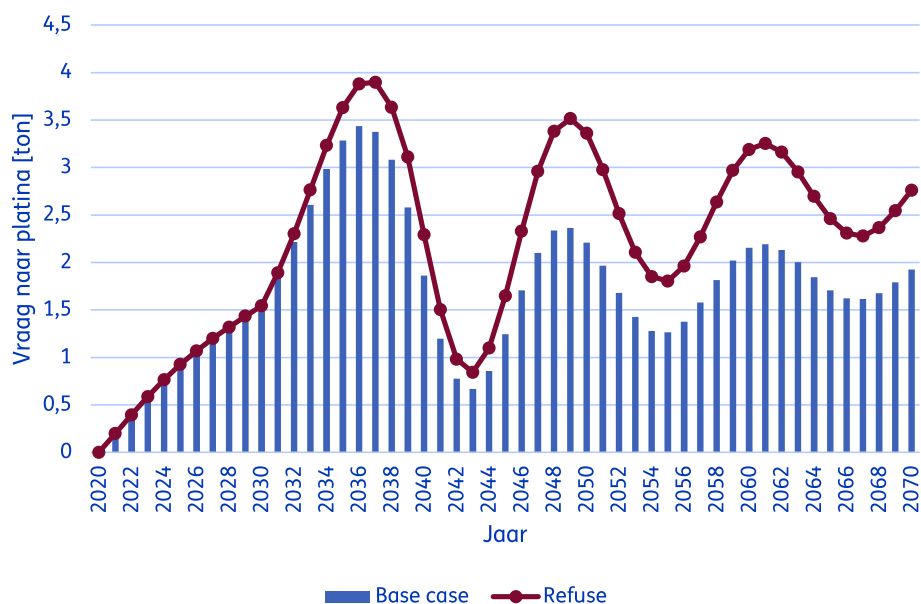
Onze hypothese is dat er in de realiteit nog meer interacties zijn tussen R-strategieën die moeilijk te vatten zijn in ons huidige model. Hieronder hebben wij een eerste aanzet gedaan tot een kwalitatieve analyse van dergelijke interacties. Let wel: deze veronderstelde interacties zijn slechts hypothesen 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”.

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

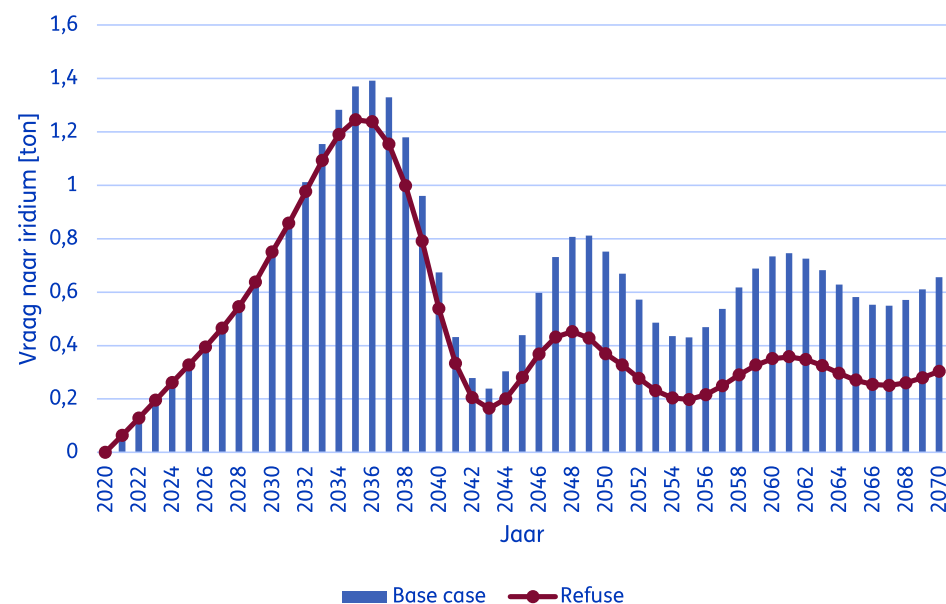
Impact van de Refuse-strategie: op termijn 1,5 keer zo hoge platinavraag, maar tegen 2 keer zo lage iridiumvraag

Met behulp van ons systeemdynamisch model hebben we de impact van de verschillende R-strategieën (zie vorige slide) getest op de vraag naar PGM's. Hieronder hebben we allereerst de impact van de Refuse-strategie uitgelicht. Hieruit blijkt gelijk één van de verschillende afwegingen die een rol spelen bij het minimaliseren van de kritieke-materialenvraag van elektrolysers: het afbouwen van het aandeel van PEM-elektrolysers in de totale elektrolysercapaciteit leidt voorbij 2050 tot een bijna 1.5 keer zo hoge vraag naar virgin platina. Echter, hiertegenover staat een bijna 2 keer zo lage vraag naar iridium. Gezien de hogere kritikaliteit van iridium ten opzichte van platina (zie slide 34) valt deze strategie dus te overwegen.

Jaarlijkse vraag naar virgin platina voor AEL en PEM elektrolyserproductie in de EU voor de base case en de Refuse-strategie



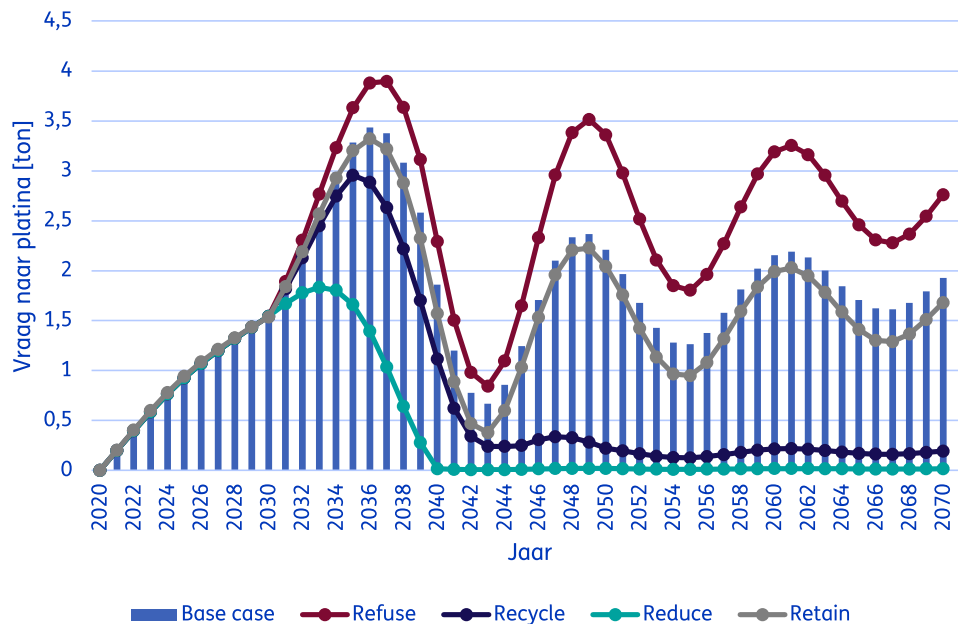
Jaarlijkse vraag naar virgin iridium voor PEM elektrolyserproductie in de EU voor de base case en de Refuse-strategie



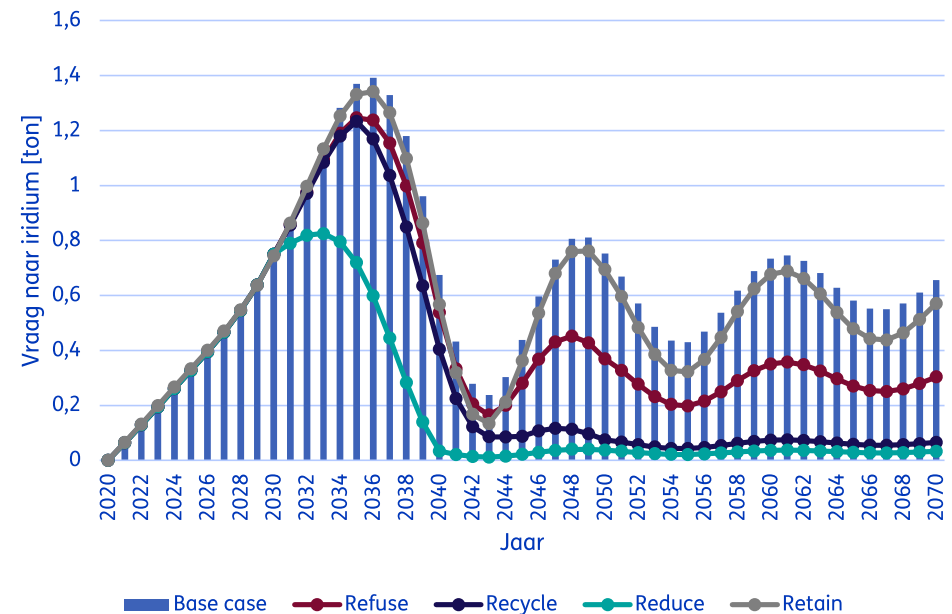
De impact van R-strategieën loopt sterk uiteen

In de grafieken hieronder is de impact van alle R-strategieën op de vraag naar virgin platina en iridium weergegeven. Op deze manier is te zien hoezeer de impact van de verschillende R-strategieën uiteenloopt. Retain leidt relatief gezien tot de laagste impact op de kritieke materialenvraag ten opzichte van het base case-scenario zonder interventies. Reduce leidt tot de grootste afname in de vraag naar kritieke materialen, maar vereist vergaande innovatie, want deze strategie gaat ervanuit dat PGM's bijna volledig vervangen kunnen worden door andere materialen. Ook Recycle heeft een aanzienlijke impact, die gaandeweg toeneemt doordat het percentage recycleert gaandeweg toeneemt en doordat gerecyclede materialen pas beschikbaar komen als oude elektrolyzers uit bedrijf worden genomen. Bovendien zal de beschikbaarheid van voldoende gerecycleerd materiaal waarschijnlijk een beperking gaan vormen voor deze strategie. Hier gaan wij in de volgende slides op in.

Effecten van de R-strategieën op de jaarlijkse vraag naar virgin platina voor AEL en PEM elektrolyserproductie in de EU



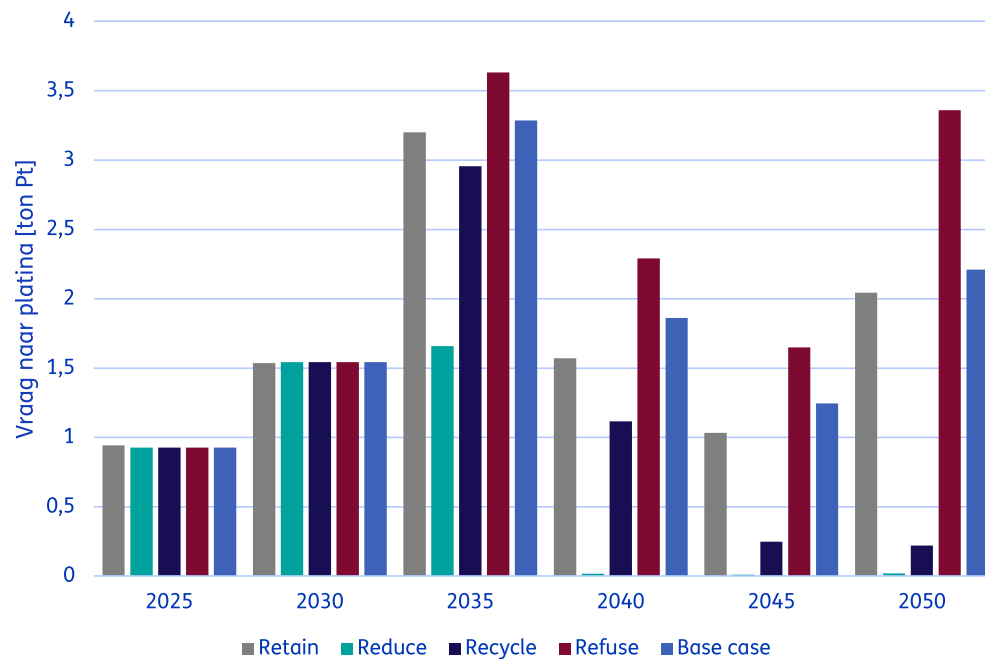
Effecten van de R-strategieën op de jaarlijkse vraag naar virgin iridium voor PEM elektrolyserproductie in de EU



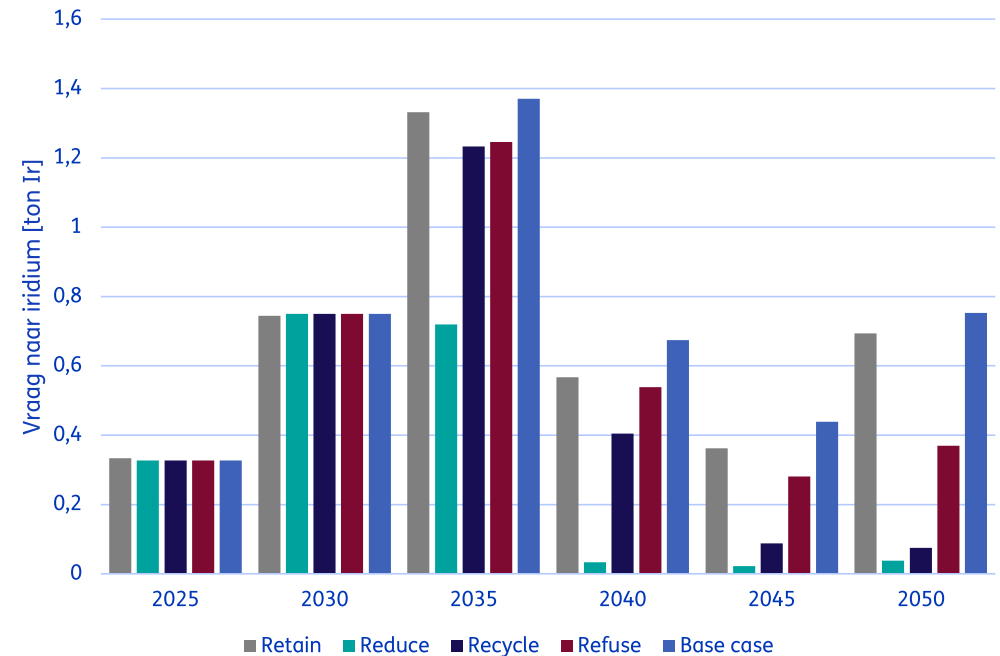
De impact van R-strategieën; weergegeven voor enkele peiljaren

Ten behoeve van de overzichtelijkheid hebben we op deze slide de resultaten van voorgaande slide weergegeven voor enkele peiljaren. Zo is de relatieve impact van de R-strategieën goed te zien.

Effecten van de R-strategieën op de jaarlijkse naar virgin platina voor AEL en PEM elektrolyserproductie in de EU



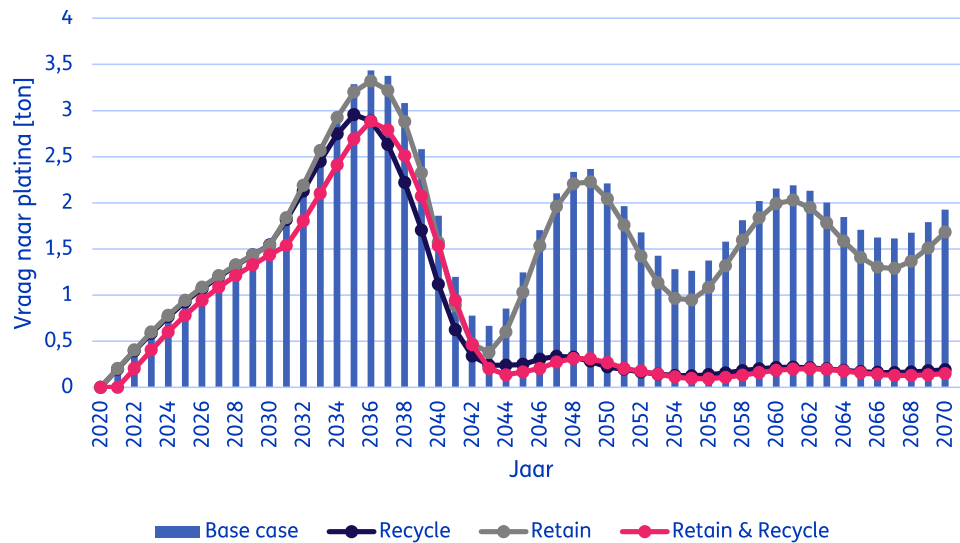
Effecten van de R-strategieën op de jaarlijkse naar virgin iridium voor PEM elektrolyserproductie in de EU



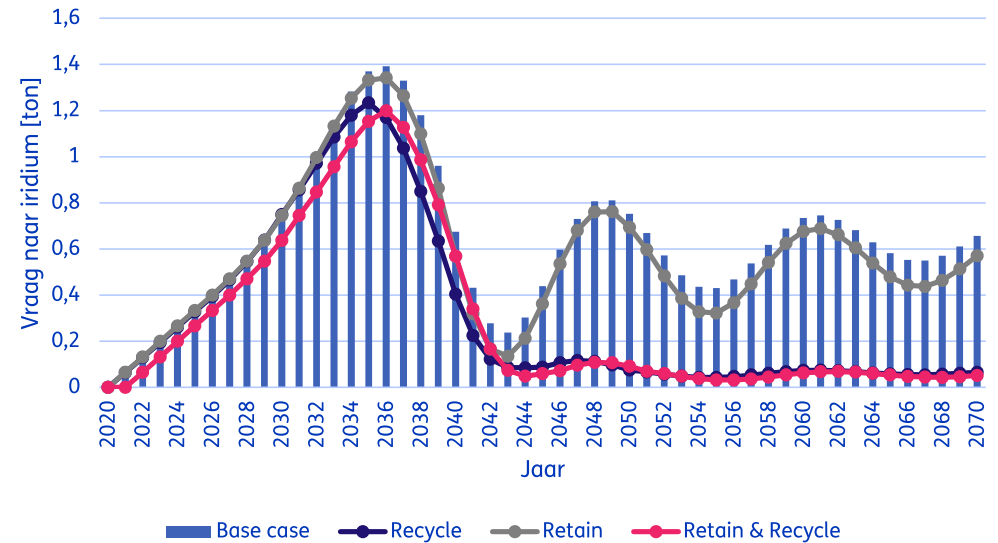
R-strategieën kunnen elkaar versterken maar ook tegenwerken: voorbeeld van Retain & Recycle

In het voorgaande is de impact van de verschillende R-strategieën telkens los van elkaar beschouwd. Maar wat zijn de effecten als twee of meerdere R-strategieën tegelijk worden toegepast? Ter illustratie beschouwen we hier het gecombineerde effect van Retain en Recycle. In de onderstaande grafieken is te zien dat het gecombineerde effect van Retain en Recycle maar heel weinig verbetering vertoont ten opzichte van het effect van de Recycle-strategie alleen. Oftewel: het effect van twee gecombineerde R-strategieën is niet simpelweg een optelsom van de effecten van de R-strategieën afzonderlijk. Dit komt doordat de Retain-strategie een negatieve invloed uitoefent op de Recycle-strategie. Hoe is dit te verklaren? Door het langer in bedrijf houden van elektrolyzers komen gerecyclede materialen later beschikbaar, wat een opdrijvend effect heeft op de vraag naar virgin materialen. Het is dus van belang interacties tussen R-strategieën in acht te nemen.

Effecten van de strategieën Recycle en Retain afzonderlijk en het gecombineerde effect van Retain & Recycle op de jaarlijkse vraag naar **virgin platina** voor elektrolyserproductie in de EU



Effecten van de strategieën Recycle en Retain afzonderlijk en het gecombineerde effect van Retain & Recycle op de jaarlijkse vraag naar **virgin iridium** voor elektrolyserproductie in de EU

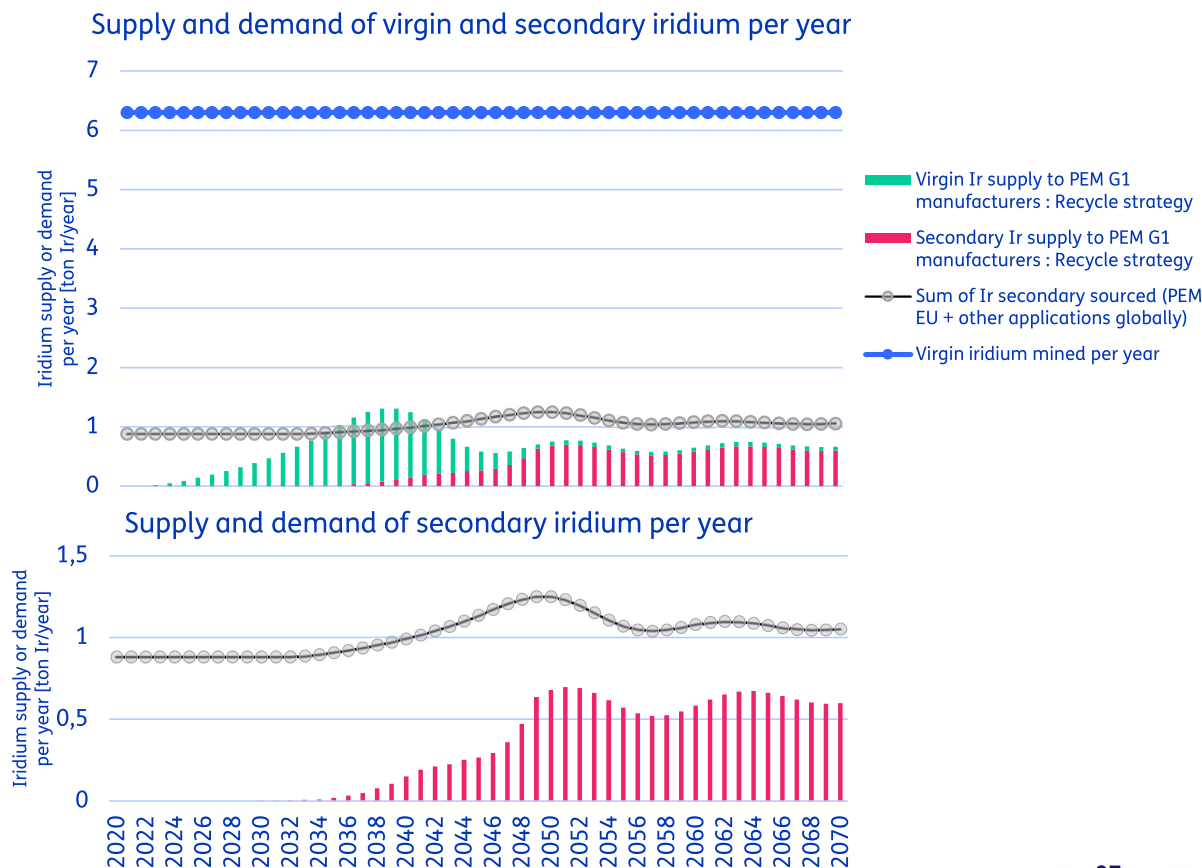


Recycle-strategie legt groot beslag op wereldwijde theoretisch beschikbaar secundair iridium. De gemengde handelsstromen van virgin en secundair maakt Recycle-strategie uitdagend.

Wanneer de virgin iridium behoefte voor PEM elektrolyser-productie vergeleken wordt met het aanbod valt op dat er tot 22% van de wereldproductie iridium nodig kan zijn voor PEM technologierealisatie in de EU. Bij het verkennen van de **Recycle** strategie wordt duidelijk dat de hoeveelheid benodigde secundaire iridium voor elektrolyserproductie in 2050 maximaal 70% bedraagt van de wereldwijd beschikbare iridium van secundaire oorsprong (rechter grafiek).

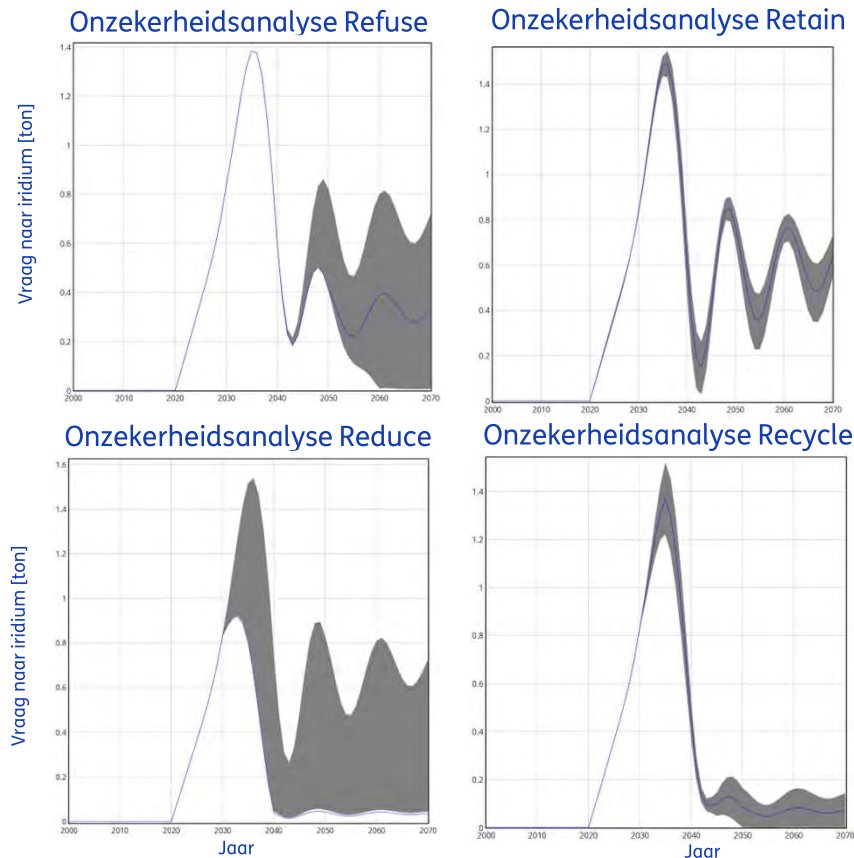
Echter zijn er diverse factoren waar onvoldoende aandacht naar is uitgegaan bij deze simulatie, te weten:

1. In de huidige (edel)metalenhandel is niet aantoonbaar te traceren of het virgin of secundair materiaal betreft bij inkoop. Deze aantoonbaarheid zou randvoorwaardelijk genoemd kunnen worden wanneer circulariteit van (input) materialen bewezen moet worden.
2. Door de samenvoeging van virgin en secundair iridium in handelsstromen is secundair iridium als product niet apart in de handel. Wanneer de EU maakindustrie voor PEM enkel gebruik zou maken van recycleert iridium uit de EU zou dit betekenen dat er zeer hoge secundaire aandelen in het iridium moeten zitten gegeven dat er geen virgin PGM in de EU via mijnbouw beschikbaar gemaakt wordt.
3. Europese 'close the loop' activiteiten, waarbij secundaire PGM gebruikt worden voor de EOL-RIR, verhogen de mate van strategische autonomie in de EU door de onafhankelijkheid van virgin PGM gebieden/landen, waaronder Rusland, Zuid-Afrika en Zimbabwe.



Het verkennen van de positieve impact van R-strategieën is gehuld in onzekerheid.

Impact van onzekerheden in de R-strategieën op de jaarlijkse vraag naar virgin iridium voor elektrolyserproductie in de EU



Ook in de implementatie van de R-strategieën spelen onzekerheden een rol. We hebben een analyse gedaan van de invloed van de volgende onzekerheidsmarges op de jaarlijkse vraag naar virgin iridium voor elektrolyserproductie in de EU:

- **Refuse:** aandeel PEM-elektrolyzers in de technologiemix in 2050 0-40%.
- **Retain:** verlenging van de elektrolyser-levensduur 20-50%.
- **Reduce:** vermindering van de hoeveelheid iridium in PEM-stacks van 0-95%.
- **Recycle:**
 - Een bandbreedte van de recycling-inputgraad van -10% tot +10% ten opzichte van de recycling-inputgraad in de hiervoor gehanteerde Recycle-strategie
 - Een bandbreedte van de wereldwijde recyclinggraad van iridium in 2050 van 14% (constant ten opzichte van de huidige graad) tot 90%.

Links zijn de resultaten van deze onzekerheidsanalyse te zien. Uit gevoeligheidsanalyse blijkt dat de vraag naar virgin iridium de grootste gevoeligheid vertoont voor de parameters (in rangorde):

- 1) Hoeveelheid iridium in PEM-stack (bill of materials)
- 2) Vraag naar groene waterstof
- 3) Technologieverbetering in stroomdichtheid PEM

Door de hoge gevoeligheid voor de vraag naar virgin iridium voor de bill of materials is het verklaarbaar dat de Reduce-strategie zo'n grote spreiding vertoont. Deze strategie vergt verregaande innovatie en is daarom erg onzeker. De grote spreiding in de Refuse-strategie spreekt voor zich door de directe impact van een lagere PEM-elektrolyserproductie op de vraag naar iridium. De vraag naar virgin iridium blijkt in geringe mate gevoelig voor de elektrolyser-levensduur. De Recycle-strategie vertoont ook een relatief kleine bandbreedte; echter, de onderkant van de bandbreedte is nog een steeds een ambitieuze recycling-inputgraad.

5

Strategie

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*.

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) |

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 wordt 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.

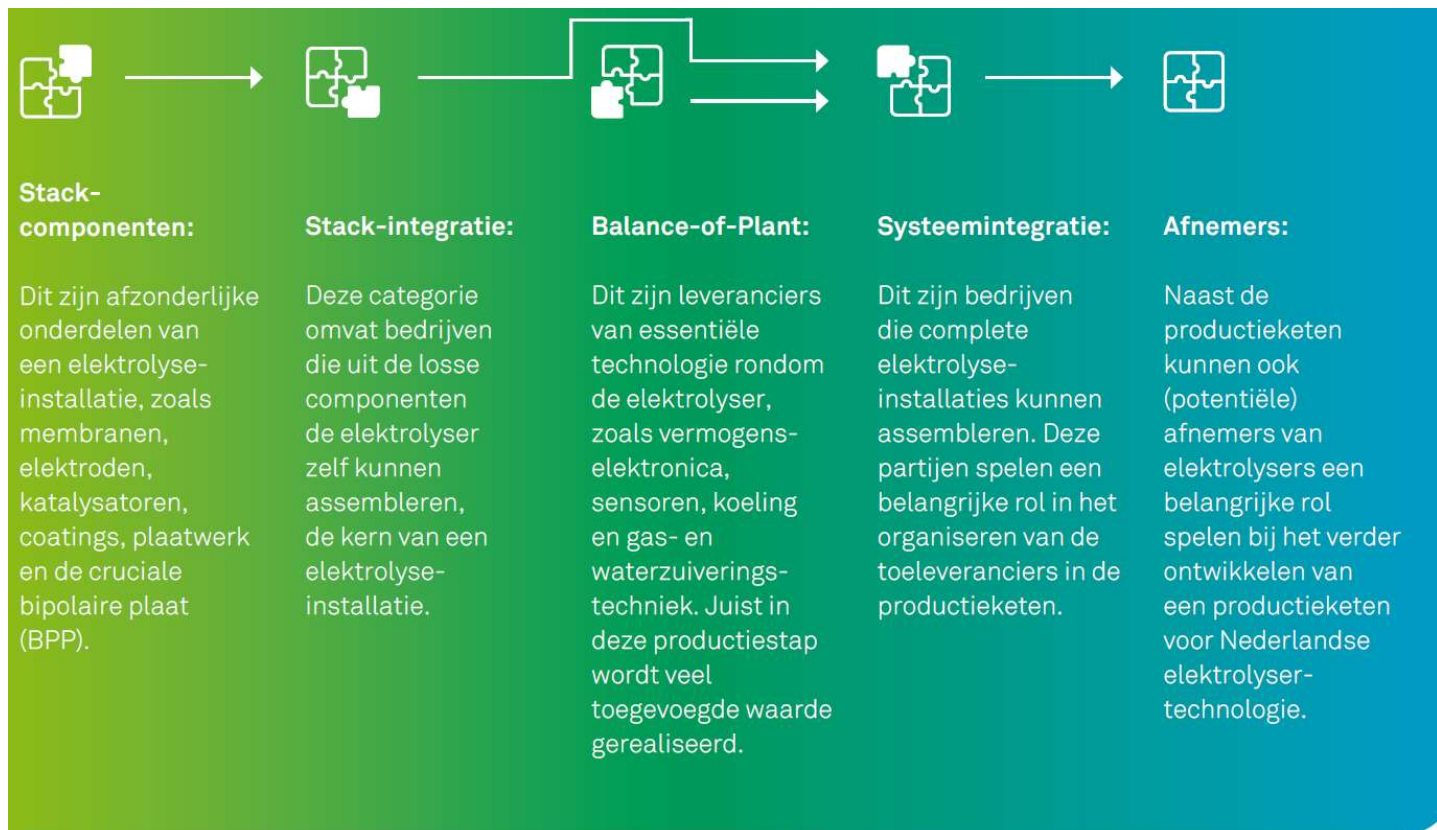
Zodra er een betrouwbare en veilige base line is 'neergezet' is de weg vrij voor **allerhande vormen van business-gedreven innovatie**. Met name het reduceren van PGM's in PEM is topprioriteit vanwege kostenreductie. Tegelijkertijd bestaat er een **risico op suboptimale technologische lock-in**. **Radicale 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.**

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



Bron: Suurs et al. (2021)

Inzichten Refuse (1/2)

Strategisch perspectief

Bedrijven voorzien dat alle technologische varianten naast elkaar zullen blijven bestaan. Qua technologiemix op systeemniveau is de verwachting dat vooral de marktontwikkelingen en de specifieke kenmerken van use cases bepalend zullen zijn voor de toekomstige verhoudingen tussen PEM, Alkaline en SOE.

De technologiekeuze van individuele bedrijven wordt grotendeels bepaald door hun bestaande business- en kennispositie.

Een beperkte groep bedrijven kiest bewust voor Alkaline-technologie omdat hier de afhankelijkheid van PGMs niet of nauwelijks een rol speelt.

Ook zijn er enkele bedrijven die **‘op meerdere paarden wedden’ door een technologie-agnostische positie in te nemen.** Dit betreft bijvoorbeeld leveranciers van elektroden die zowel de markt voor PEM als Alkaline bedienen. Ook zijn er enkele systeem-integrators die weliswaar gespecialiseerd zijn in PEM- of Alkaline-gebaseerde systemen maar die kunnen switchen door andere stack-technologie in te kopen.

Quotes

De keuze voor een bepaalde technologie is niet aan ons, maar aan de gebruiker van de systemen. Als er geen regelgeving op is, maakt de gebruiker ook geen expliciete keuze voor circulariteit. [r14]

Als je op korte termijn wilt opschalen, als je een veilige, betrouwbare asset wil bouwen, is AEL op dit moment de meest haalbare optie. We kijken echter naar meer dan AEL-systemen. We zijn technologie-agnostisch. [r12]

Wij kiezen voor PEM vanwege onze kennisbasis (fit met fuel cells en automotive). We houden de andere technologieën wel in de gaten maar verwachten sowieso dat het een mix zal blijven. [r9]

Voor ons is het een bewuste keuze om kritische materialen te vermijden. We sourcen nikkel. Daar is meer dan voldoende van om in de H2 ambities te kunnen voorzien. [r8; r18]

Onze productietechnologie [voor het aanbrengen van extreem dunne katalysatorlagen] is generiek inzetbaar. Wel zien we een betere fit met het aanbrengen van hoogwaardige materialen. [r15]

Inzichten Refuse (2/2)

R&D / Kennisbehoefte

- De ontwikkeling van **geavanceerde systemen als SOE of AEM worden genoemd als ontwikkelingen die de technologiemix bepalen voor de lange termijn.**
- Voor bedrijven is het van belang de voortgang op dit gebied te volgen zodat **tijdig kan worden geanticipeerd op potentiële game changers.**
- **Er is bij bedrijven beperkt inzicht in de kwetsbaarheden – en mitigatiemogelijkheden – die het gevolg zijn van hun technologiekeuzes.** De meeste bedrijven onderhouden weliswaar relaties met hun toeleveranciers en zien erop toe niet afhankelijk te zijn van een enkele supplier maar **hebben niet of nauwelijks zicht op de toeleverancier van hun toeleveranciers.**

Inzichten Reduce (1/2)

Strategisch perspectief

Het reduceren van CRM-gebruik in elektrolyzers is inherent aan het ontwikkelproces waar de industrie momenteel dagelijks mee bezig is. Hierbij wordt een afweging gemaakt tussen enerzijds materiaalkosten (die lager worden door een ‘dunnere electrodes’) en anderzijds de robuustheid van het systeem (waar men kiest voor zekerheid en levensduur en daarom voor ‘dikkere lagen’).

Betrouwbaarheid en levensduur zijn leidend. De gevestigde bedrijven zullen de komende jaren volledig inzetten op het neerzetten van een robuuste functionerende technologie. **Op het moment dat prestaties van de systemen in het veld bewezen zijn, kan er worden ingezet op reductie van ‘CRM-loadings’.**

Zowel voor PEM (Ir, Pt) als voor Alkaline (Ni, Pt) verwachten bedrijven dat substantiële materiaalreductie mogelijk is door productieprocessen te optimaliseren. Dit verloopt als **samenspel tussen component-ontwikkelaars en stack-ontwikkelaars**. Beiden hebben belang bij materiaalreductie.

Een groep bedrijven (veelal startups) werkt samen met onderzoeksinstituten voor de markt uit aan geavanceerdere productietechnieken, o.a. op basis van atomic layer deposition.

Quotes

Electrodes make up a large part of CAPEX. Lots of R&D effort is spent on reducing material density and increasing overall system efficiency. [r8]

Improved material loadings is a necessity but the majority of suppliers is trying to make the technology solid. We first need a solid baseline. [r3]

Er is niet veel bekend over corrosiesnelheden in extreme condities. Daarom passen we veiligheidsmarges toe. [r9]

Reductie is een hand-in-hand ontwikkeling met technologieleveranciers. [r9]

You can only move at the speed of the market. There are two groups, one who will take the risk and push this. The other are more conservative and want to keep a level of Ir to be sure it works. [r19]

Inzichten Reduce (2/2)

R&D / Kennisbehoefte

- **Kennisdeling over prestaties van de eerste werkende elektrolyzers in het veld is cruciaal om tot optimale material loadings te komen voor elektrolyzers.** Om deze leercurve snel en effectief te kunnen doorlopen is samenwerking en uitwisseling van inzichten en data noodzakelijk.
- **Investeren in geavanceerde productietechnieken brengen oplossingen dichterbij die verregaande reductie van PGMs mogelijk maken.** Qua R&D wordt bijvoorbeeld onderzocht of titanium kan worden vervangen door gecoat RVS. Ook wordt er geëxperimenteerd met PGM-vrije coatings.
- **Dergelijke procesinnovaties hebben het potentieel om opschaling naar hoge volumes mogelijk te maken en tegelijkertijd een impuls te geven aan kwaliteitsverbetering, kostenreductie en materiaal-efficiëntie.**
- Voor **bedrijven met een positie in PEM-technologie**, die sterk afhankelijk zijn van PGMs, is deze ontwikkeling een potentiële ‘game changer’ zo niet **noodzakelijke voorwaarde voor het kunnen opschalen** richting 2050.

Quotes

Increased material efficiency happens as part of business practice. You start with a high load, and then when it works you move towards using less. We're already at half the Ir loading compared to 3 years ago. By 2030 we could be at 1/5. From a CE perspective it has to happen. From a technical point of view, it can happen. There are technologies that will take us down to 1/10. [r19]

We experimenteren wel met lagere loadings. Er zijn diverse technieken van eenvoudig tot geavanceerd. We verwachten wel dat er een X10 reductie mogelijk is richting 2030. [r9]

Wij kunnen een zeer dunne laag Iridium aanbrengen met een harde beschermende coating. Dit maakt het mogelijk om materiaalefficiënte systemen te produceren [die bestand zijn tegen slijtage]. Dit kan ook voor nikkel maar de vraag is in hoeverre het daar net zoveel meerwaarde heeft als voor PGMs. [r15]

Inzichten Retain (1/2)

Strategisch perspectief

Het verlengen van de levensduur is de topprioriteit voor alle ontwikkelaars en producenten in de supply chain voor elektrolyzers. Met name de industriële afnemers hanteren een standaard van systemen die 30 jaar meegaan. Dit is voor de huidige elektrolyzers onrealistisch. Zelfs 10 jaar / 80.000 uur is problematisch.

De sleutel voor het verlengen van de levensduur ligt op dit moment bij de elektrodes met daarin de CRMs. De elektrodes ondergaan slijtage tijdens gebruik. Na een tijd is de laag dermate beschadigd dat het systeem disfunctioneert of dermate inefficiënt wordt dat het niet wenselijk is om langer in bedrijf te houden.

De industrie heeft behoefte aan inzicht in het verloop van slijtageprocessen over de tijd als gevolg van belasting, opschakelen, afschakelen, temperatuur en druk. Deze inzichten zullen de komende jaren worden opgedaan op basis van de eerste systemen in het veld. Deze ontwikkeling kunnen worden versneld door Accelerated Aging Tests te ontwikkelen.

Het omwisselen van stacks of elektroden van een systeem is technisch mogelijk. Dit maakt het **mogelijk om de levensduur van het balance-of-plant-systeem op 30 jaar te dimensioneren.** Er zijn wel **twijfels of dit voor de eerste generatie systemen effectief is** aangezien de balance-of-plant qua technisch ontwerp sterk geïntegreerd is met de stack. Over tien jaar zullen stacks zijn doorontwikkeld en is integratie met een 'oude groene-waterstoffabriek' een beperking met weinig meerwaarde. **De eerste fabrieken moeten in vooral als demonstratieplatforms worden gezien.**

Quotes

Generally, clients expect 90k operating hours. [r6]

Current activities are focused on delivering to the first projects. Lifetime and efficiency will be crucial KPIs. [r3, r5, r8]

Reducing degradation is the starting point for our projects. In the next generation of products, we can reduce degradation of stacks, and reduce our material footprint. [r6]

We kijken naar ontwerp stack: hoe kunnen we die nou zo maken dat die zo lang mogelijk meegaat. Wat is het faalmechanisme van de stack? De electrode blijkt daar bepalend in te zijn. [r13]

Yes you can replace a full stack. You bring it to the OEM. Stack replacement is a current practice. This stack can be opened and you can get the bipolar plates etc. out. It's easy to open it and get individual elements out. [r12]

System components last more than 20 years, which is why we can use them in future stacks. [r6]

Inzichten Retain (2/2)

R&D / Kennisbehoefte

- **Levensduurverlenging is onderdeel van alle R&D-trajecten waar de bedrijven mee bezig zijn.** Dit varieert van onderzoek naar degradatiemechanismen in materialen en componenten tot testen van prestaties onder flexibele belasting.
- De **beschikbaarheid van betrouwbare vergelijkbare gegevens over prestaties van de eerste systemen in het veld is een voorwaarde voor onderzoek en ontwikkeling** op dit gebied. Om dit te kunnen versnellen is samenwerking en uitwisseling nodig tussen verschillende bedrijven en kennisinstellingen.
- **Accelerated Test Protocols zijn nodig om, voor en tijdens de eerste toepassingen, inschattingen te kunnen maken over te verwachten prestaties** na e.g. 80,000 draaiuren. Dit kan parallel aan veldtesten worden ingezet om.
- Om kennis op te bouwen is het, met behulp van sensoren en ICT, **real-time en in-situ meten van stack- en systeemprestaties** van belang. Dergelijke meetssystemen kunnen ook in een commerciële context een rol spelen als het gaat om preventief onderhoud en aan elektrodes en andere componenten.
- **Onderzoek mogelijkheden voor reviseren en refurbishen van stacks.** De verwachting is dat dit voor de eerste ontwikkelingen geen prioriteit hoeft te hebben maar dat dit op middellange de levensduur van stacks of balance-of-plant kan verlengen.

Quotes

Onze target voor levensduurverlenging is 10 jaar of 80.000 uur. Maar hoe gaan we dat garanderen? We weten hoe lang de katalysator meegaat onder constante load, maar we weten nog heel weinig over de prestaties onder fluctuerende load. [r13]

There is degradation throughout the lifetime. Reducing degradation is the starting point for our projects now. [r6]

We don't know if components are good enough to reuse. Thus, we don't spend too much time on this. [r3]

We zijn hier samen met de leveranciers mee bezig. Hoe gaat het product door een life cycle heen? Is er vervanging nodig? Onderzoek is gericht op het begrijpen en kwantificeren van degradatie. Degradatie is dynamisch. Niemand heeft nog ervaring in de markt op bepaalde schaalgrootte met degradatie en efficiëntie. [r14]

Inzichten Recycle (1/2)

Strategisch perspectief

Gezien het ontwikkelstadium zal het aantal elektrolyzers in bedrijf de eerste jaren beperkt zijn. Met een minimale levensduur van 8-10 jaar zitten we al snel in **2040 voor we de eerste serieuze end-of-life materiaalstromen kunnen verwachten.**

Bedrijven beseffen dat er Europees beleid boven de markt hangt en dat zij verantwoordelijk zijn voor de end-of-life fase van hun systemen. **Vrijwel allemaal houden ze hier rekening mee in het ontwerp en ontwikkelproces.** Ofwel omdat hun klanten er naar vragen, ofwel omdat ze hier zelf business kansen zien. **De ervaring en kennispositie op dit gebied is wisselt sterk per bedrijf:**

- Leveranciers van stacks en systemen worstelen met de **vraag hoe componenten en materiaallagen van elkaar kunnen worden gescheiden.** De materiële samenstelling van de elektrodes is voor deze partijen onbekend; zij mogen deze niet analyseren.
- Leveranciers van elektrodes zijn **geïnteresseerd in het terugwinnen van kostbare CRMs. Zij beschikken over kennis en relevante ervaring in ‘aanpalende markten’.** Gangbaar is nu al dat elektroden worden terug ‘gekocht’ en gerecycleerd. Zij zien het terugwinnen van PGMs of nikkel als ongecompliceerd, zolang deze componenten maar worden gecollecteerd.
- **Leveranciers van elektroden en componenten bezetten een sleutelpositie in de keten** en oriënteren zich op constructies waarbij CRMs hun eigendom blijven.

Vrijwel alle bedrijven oriënteren zich op de mogelijkheden om non-virgin CRMs te sourcen voor hun producten. Voor PGMs, met name iridium, is de beschikbaarheid een mogelijke bottleneck.

Quotes

Recycleability speelt nog geen rol. Klanten kijken alleen naar efficiëntie en kosten. Maar wij proberen dit al wel in het ontwerp in te bouwen. Bijvoorbeeld als één cel kapot gaat dat je niet je hele stack hoeft te vervangen. [r17]

It's easy to deconstruct our systems in reverse. It's not our biggest concern yet. It's the client's responsibility because we sell the product. So we haven't put too much thought into it. [r6]

We moeten een plan klaar hebben. Voor als het systeem terugkomt van de klant. [r8]

In onze bestaande markt voor metal plating is het gangbaar dat elektroden terugkomen. Dit gaat gepaard met een order voor nieuwe anodes. [13]

Als er cellen vervangen moeten worden, gaan cellen/stack terug naar leverancier. Deze worden gerecycled, zijn schaarse materialen. [r14]

Nikkel is goed te recyclen. Niet helemaal zeker in hoeverre non-virgin nikkel de kwaliteit beïnvloedt. Zouden we aan leverancier moeten vragen. [r17]

Inzichten (2/2)

R&D / Kennisbehoefte

- **Het ontwikkelen van geavanceerde scheidingstechnologie** moet het mogelijk maken om CRMs (coatings, elektroden) te scheiden van de polymeren (membranen). Een bijkomende voordeel is het kunnen verwerken van PFAS.
- Het ontwikkelen van fysische scheidingsprocessen in plaats van chemische of thermische processen voorkomt emissie van chemicaliën en afvalstoffen.
- Het ontwikkelen van design-for-recycling standaarden moeten het end-of-life scheiden van componenten en materiaalagen vereenvoudigen.
- Onderzoek de mogelijkheden om non-virgin CRMS te gebruiken als grondstof voor componenten in elektrolyzers. (Recycling-In)
- **Voor PGMs is dit met name een kwantitatieve kwestie in de zin dat beschikbaarheid van non-virgin platina en iridium mogelijk op korte termijn een beperkende factor zijn.** De kwaliteit speelt hier in ieder geval geen rol aangezien deze stromen niet te onderscheiden zijn van virgin PGMs.
- **Voor Nikkel is het zaak om onderzoek te doen naar de beschikbare bronnen en kwaliteiten nikkel en om op basis daarvan tot een standaard te komen.** Het materiaal moet o.a. voldoen aan bepaalde zuiverheid en korrelgrootte.

Quotes

Zo'n 80% iridium wordt teruggewonnen. Dit gebeurt nog niet voor nikkel. Het zou wel kunnen. Maar de business case moeten nog uitgezocht worden. [r13]

Inherently, there is a lot of secondary materials in our (Alkaline) supply chains (Nickel, Steel, Copper). [r6]

We see there will be scrap from electrolyser components and fuel cells. We are looking at PGM coated on ionomers membranes. Our aim is not to just recover the metals but also the polymers in the membranes. The issue here is PFAS recovery. [r19]

Currently looking into the possibility of using recycled nickel. [r8]

Terugwinnen van Rare Earth Metals uit SOE-platen is doorgaans lastig omdat alles aan elkaar is vast gebakken. [r10]

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.

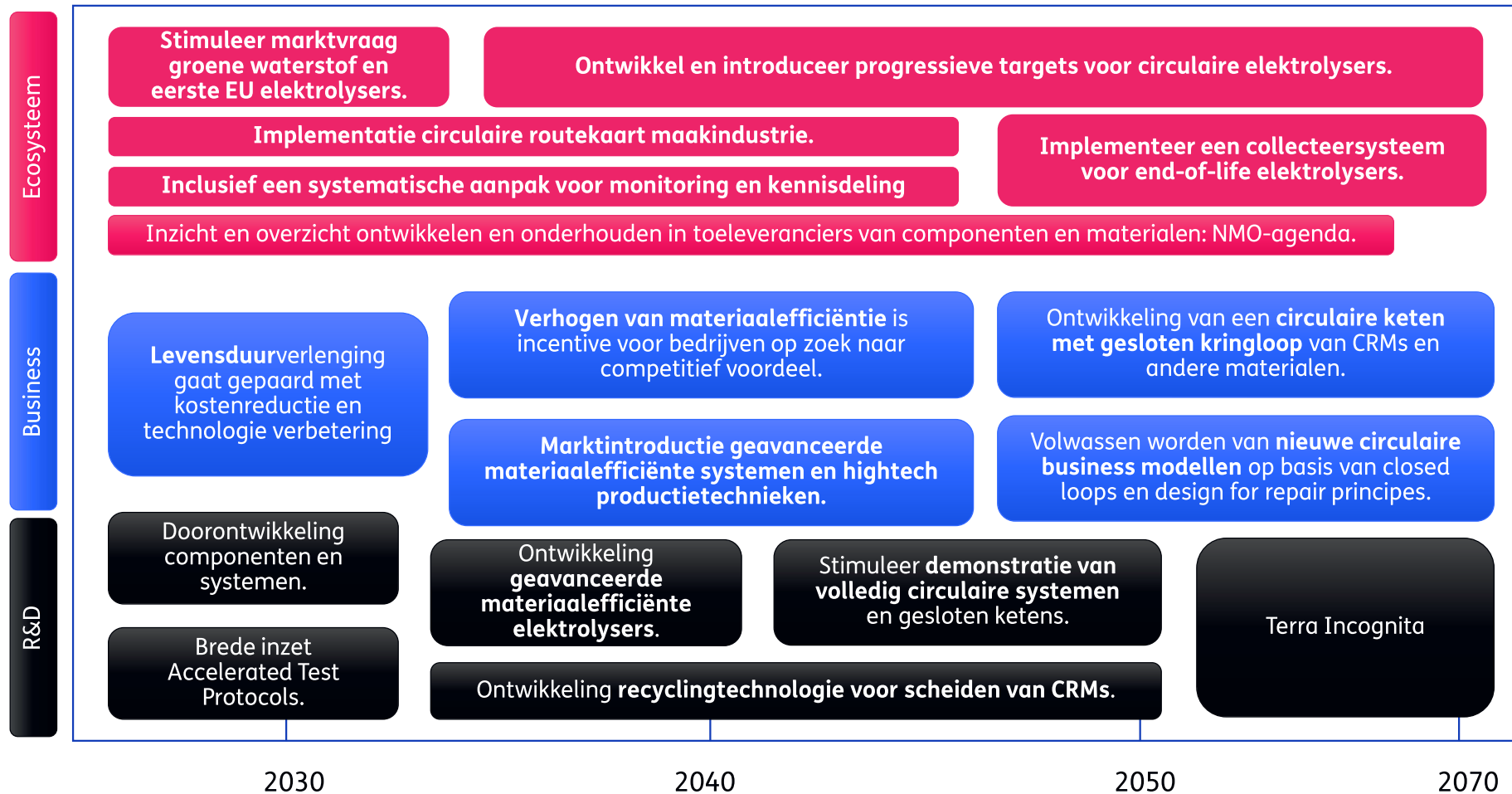
Quotes

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.



6

Reflectie op werkwijze

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 'doorgerkend' 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 oplossingverkenning 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:

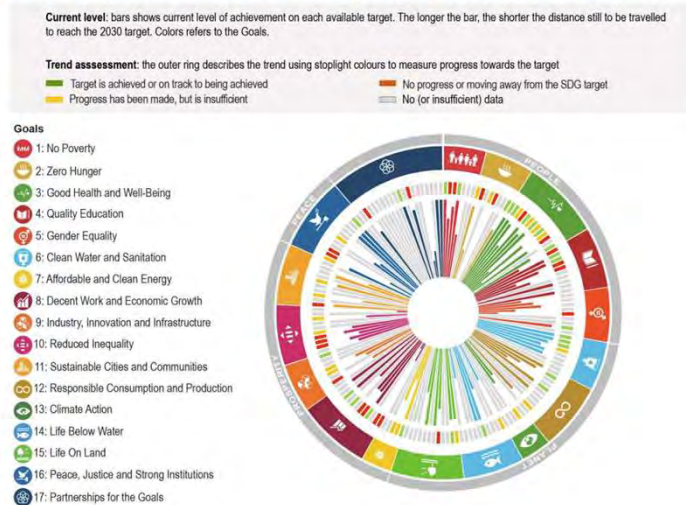
- Offshore windturbines, waarbij er schaarste is aan bijvoorbeeld installatieschepen, neodymium
- Grootschalige batterijsystemen, waar er schaarste is aan bijvoorbeeld kobalt.

Reflectie: Werken aan maatschappelijke doelen introduceert onvermijdelijke trade-offs tussen uiteenlopende belangen.

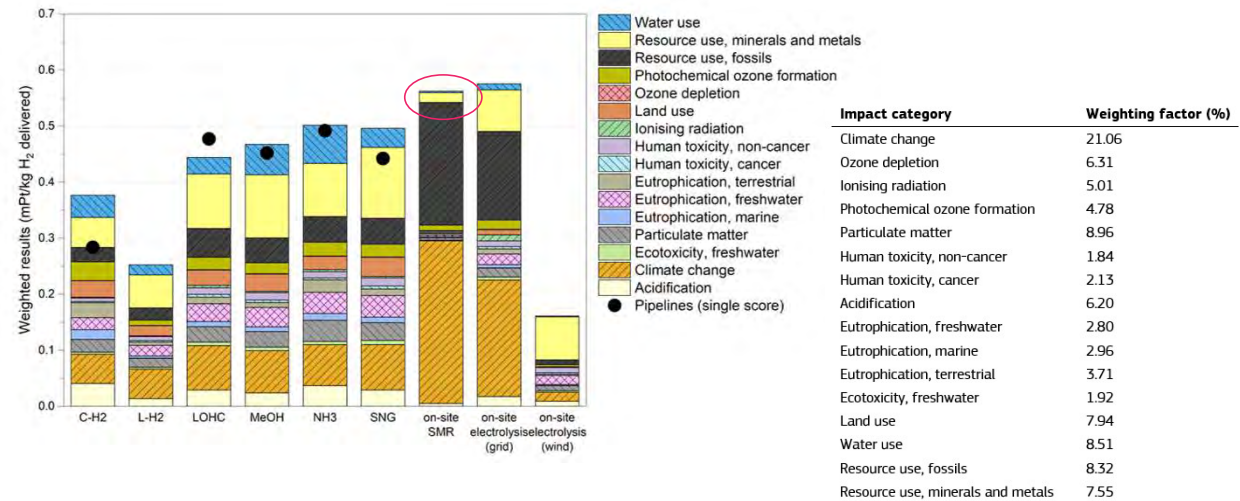
Aan de hand van drie voorbeelden wordt geïllustreerd dat het bereiken van maatschappelijke doelen inherent verbonden is aan het prioriteren van belangen. De voorbeelden SDG prestatie en LCA waterstofimport (onderstaand) en Nederlandse offshore wind tender (het voorbeeld op de volgende pagina).

De Nederlandse voortgang om alle Sustainable Development Goals in 2030 te halen is wisselend succesvol. Aan alle doelen tegelijkertijd werken zal zeer lastig te realiseren zijn door schaarse middelen, mensen en momentum. Tevens zijn onverwachte rebound effecten te verwachten tussen doelen. Bron: [Hyperlink](#) – laatste update van prestaties: oktober 2021

Figure 1. The Netherlands' distance from achieving SDG targets included in this report



Onderstaande LCA geeft de best presterende waterstof import drager weer op basis van gewogen environmental performance KPIs. Weging is per definitie subjectief. Wanneer weegfactoren anders gekozen worden kan een andere route beter gaan presteren. Opvallend is de best scorende *grijze waterstof via on-site SMR* op de KPI materiaalgebruik. Bron: [Hyperlink](#)



Source: Sala, Cerutti, and Pant (2018)

Een voorbeeld: van circulaire ambities naar circulariteits-criterium in huidige offshore wind tender IJmuiden-Ver Beta

Om maatschappelijke doelen, zoals minder gebruik van grondstoffen uit mijnbouw, te behalen worden eerste stappen gezet om tot meer transparantie te komen. Bijvoorbeeld via het toevoegen van circulaire strategie criteria in de tender voor een nieuw windpark op de Nederlandse Noordzee.

Ambities en doelen 2050 en 2030 van de Nederlandse overheid

Nederland wil in 2050 volledig circulair zijn. De milieueffecten van grondstoffengebruik in een circulaire economie, dus van alle Nederlandse productie en consumptie, vallen dan binnen de 'planetaire' grenzen. Bron: [Hyperlink](#)



Criteria beschrijving:

“5.5 Mate van inzicht in grondstoffenverbruik, milieu-impact en waardebehoud bij het ontwerp, de bouw, de exploitatie en de verwijdering van het windpark.

Het doel van dit criterium is om transparantie te bevorderen en inzicht te krijgen in het grondstoffenverbruik, milieu-impact en waardebehoud van de onderdelen van een windpark op zee. Hiermee kan in de toekomst mogelijk beleid worden gevormd en worden toegewerkt naar industriestandaarden.”

Bron: [Hyperlink](#)

De scoring van de aanvrager op deze circulariteits-criteria wordt in de tender evaluatie als volgt beoordeeld. Aanvullend zijn nog vele criteria van groter belang.

| | | | | |
|---|---|---|--|--|
| 2 | Gebruik van alternatieve (circulaire) materialen en kritieke en strategische grondstoffen | <p>2.1.1 De aanvrager geeft in de aanvraag inzicht in welke kritieke en strategische grondstoffen er in de verschillende onderdelen van het windpark (zoals genoemd onder 2.2) zitten op basis van de definities in de EU-lijst voor kritieke en strategische grondstoffen 2023¹¹ (A1.3 van de Leidraad circulair productpaspoort maakindustrie¹²).</p> <p>2.1.2 Vergunninghouder geeft, uiterlijk 18 maanden nadat de vergunning onherroepelijk is geworden, inzicht in de hoeveelheid (in grammen) kritieke en strategische grondstoffen gebruikt voor de verschillende onderdelen van het windpark (zoals genoemd onder 2.2) en het percentage van het onderdeel op basis van de definities in de EU-lijst voor kritieke en strategische grondstoffen 2023¹¹ en de Leidraad circulair productpaspoort maakindustrie.¹⁸</p> <p>2.2 De aanvrager onderbouwt in de aanvraag op welke manier voor de kritieke en strategische grondstoffen met een circulair ontwerp wordt ingezet op de circulaire strategieën: (1) vermindering van het gebruik van grondstoffen, (2) de substitutie van grondstoffen en componenten, (3) de hoogwaardige verwerking van grondstoffen en (4) het verlengen van de levensduur van de onderdelen van het windpark waarin kritieke en strategische grondstoffen zijn verwerkt¹⁹ op basis van een erkende standaard, zoals een ISO-norm of circulair ontwerpen methodiek.</p> <p>De aanvrager gaat in elke onderbouwde strategie specifiek in op de volgende onderdelen van het windpark:</p> <ol style="list-style-type: none"> windturbines, bestaande uit: 1. een mast; 2. een gondel; en 3. rotorbladen en eventuele meetapparatuur; een fundering van de windturbine (inclusief erosiebescherming indien van toepassing); een eventueel transitiestuk; en bekabeling die de individuele windturbines verbindt en aansluit op een aansluitpunt (inter-array kabels). | <p>De aanvrager geeft geen inzicht in de kwalitatieve maatstaf genoemd onder 2.1.1</p> <p>De aanvrager geeft wel inzicht de kwalitatieve maatstaf genoemd onder 2.1.1</p> <p>Vergunninghouder geeft, uiterlijk 18 maanden nadat de vergunning onherroepelijk is geworden, geen inzicht in de kwalitatieve maatstaf genoemd onder 2.1.2</p> <p>Vergunninghouder geeft, uiterlijk 18 maanden nadat de vergunning onherroepelijk is geworden, wel inzicht in de kwalitatieve maatstaf genoemd onder 2.1.2</p> <p>De aanvrager gaat in de onderbouwing niet in op een circulaire strategie</p> <p>De aanvrager gaat in de onderbouwing in op 1 circulaire strategie</p> <p>De aanvrager gaat in de onderbouwing in op 2 circulaire strategieën</p> <p>De aanvrager gaat in de onderbouwing in op 3 circulaire strategieën</p> <p>De aanvrager gaat in de onderbouwing in op 4 circulaire strategieën</p> | <p>0</p> <p>2</p> <p>0</p> <p>2</p> <p>0</p> <p>1</p> <p>2</p> <p>3</p> <p>4</p> |
|---|---|---|--|--|



Bronnen

Bronnenlijst (1/2)

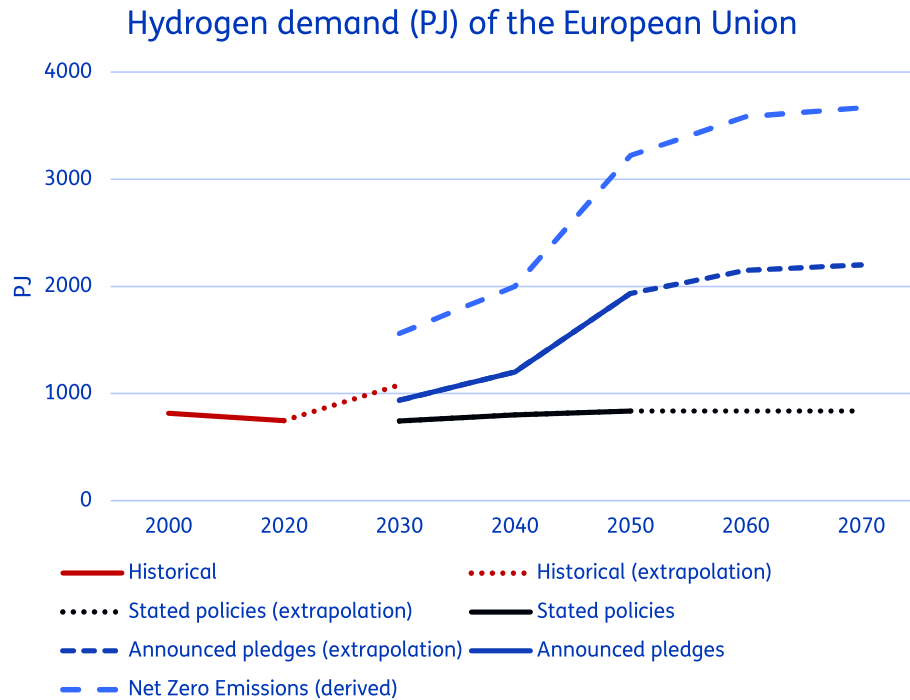
- Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D., Alves Dias, P., Cavalli, A., Georgitzikis, K., Grohol, M., Itul, A., Kuzov, T., Latunussa, C., Lyons, L., Malano, G., Maury, T., Prior Arce, Á., Somers, J., Telsnig, T., Veeh, C., Wittmer, D., Black, C., Pennington, D., Christou, M. (2023). *Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study*. JRC Science for Policy Report. European Union. <https://single-market-economy.ec.europa.eu/system/files/2023-03/Raw%20Materials%20Foresight%20Study%202023.pdf>
- China Hydrogen Bulletin (2023). Trina broke group for 1.5GW ALK electrolyser manufacturing facility in Jiangsu ([link](#)).
- DNV. (2022). Hydrogen Forecast to 2050 - Energy Transition Outlook 2022. Høvik, Noorwegen: DNV AS.
- Europese Commissie (2022). *Hydrogen*. Europese Commissie. [Hydrogen \(europa.eu\)](https://europa.eu/european-council/en/hydrogen)
- Erbach, G. & Svensson, S. (2023). *EU rules for renewable hydrogen - Delegated regulations on a methodology for renewable fuels of non-biological origin*. European Parliamentary Research Service (EPRS). [EU rules for renewable hydrogen \(europa.eu\)](https://eprs.europa.eu/eu-rules-for-renewable-hydrogen/)
- Forrester, J. W. (1993). *System Dynamics and the Lessons of 35 years*. In K. de Greene (Ed.), A systems-based approach to policymaking (p. 199-240). Springer. Retrieved from https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-3226-2_7#Bib1
- Gavrilova, A. Wieclawska, S. (2021) [Op weg naar een groene toekomst. Deel 2: Hoe we grondstoffenschaarste kunnen voorkomen en onze ambities voor groene waterstof kunnen verwezenlijken \(tno.nl\)](https://www.tno.nl/en/newsroom/2021/05/op-weg-naar-een-groene-toekomst-deel-2-hoe-we-grondstoffenschaarste-kunnen-voorkomen-en-onze-ambities-voor-groene-waterstof-kunnen-verwezenlijken). TNO.
- Georgitzikis, K.; Eynard, U.; Bobba, S.; Perpetuo Coelho, F.; Ingoglia, D. and Garbossa, E (2023). *Platinum: Impact assessment for supply security*. European Commission, JRC133245. [jrc133245_briefing_platinum_final.pdf \(europa.eu\)](https://ec.europa.eu/jrc133245_briefing_platinum_final.pdf)
- International Energy Agency (2019). *The Future of Hydrogen – Seizing today's opportunities*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf. IEA, Paris.
- International Energy Agency (2023a). [Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach - 2023 Update \(windows.net\)](https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap). IEA, Paris.
- International Energy Agency (2023b). [Global Hydrogen Review 2023 \(windows.net\)](https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023). IEA, Paris.
- International Energy Agency (2023c). *World Energy Outlook 2023*. IEA. [World Energy Outlook 2023 \(windows.net\)](https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023). IEA, Paris.
- International Energy Agency (2023d). *Energy Technology Perspectives 2023*. IEA. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023/executive-summary>. IEA, Paris.
- Kim, D. & Lannon, C. (n.d.) [The Systems Thinker – Systems Archetypes As Structural Pattern Templates - The Systems Thinker](https://www.systemsthinker.com/articles/the-systems-thinker-systems-archetypes-as-structural-pattern-templates). Website accessed on 26-03-2024
- Lannon (n.d.) [The Systems Thinker – Structure-Behavior Pairs: A Starting Point for Problem Diagnosis - The Systems Thinker](https://www.systemsthinker.com/articles/the-systems-thinker-structure-behavior-pairs-a-starting-point-for-problem-diagnosis). Website accessed on 26-03-2024.
- Löbbecke, S.; Malär, A.; Jönsson, C.; Andersson, A.; Cordobes, S.; Brusciotti, F.; van der Burg, L.; Oren, R.; Alastalo, A.; Saloniemi, H. (2024). *Joint Statement on PFAS*. https://www.tno.nl/en/newsroom/insights/2024/05/tno-explores-pfas-alternatives/?utm_medium=social&utm_source=linkedin&utm_content=EMT
- Manthey, E. (2023). *Nickel's underperformance to continue*. ING <https://think.ing.com/articles/nickels-underperformance-to-continue-hold/>
- Richardson, G. (2011). *Reflections on the foundations of system dynamics*. System Dynamics Review, 27 (3), 219{243. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/sdr.462>
- Rood, T. & Kishna, M. (2019). *Circulaire economie in kaart*. Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag. <https://www.pbl.nl/publicaties/circulaire-economie-in-kaart>
- RIVM (2024). *Risico's PFAS voor gezondheid en milieu*. www.rivm.nl/pfas/risicos-pfas-voor-gezondheid-en-milieu. Website accessed on 26-03-2024.
- RVO (2020). *R-ladder – Strategieën van circulariteit*. [R-ladder - Strategieën van circulariteit](https://www.rvo.nl/onderwerpen/circulariteit). Website accessed on 26-03-2024.
- Sambell, K; Lamboo, S.; van der Burg, L.; Warnaar, P.; Teer, J.; de Ruijter, A. (2024). The EU's China challenge: Rethinking offshore wind and electrolysis strategy. TNO, Den Haag. <https://www.tno.nl/en/newsroom/2024/05/europe-under-pressure-chinese-advance/>

Bronnenlijst (2/2)

- SFA Oxford (2021). *The hydrogen metals standard November 2021*. <https://www.sfa-oxford.com/knowledge-and-insights/green-hydrogen-and-fuel-cells/the-hydrogen-metals-standard/> - ...
- SFA Oxford (2023). *The platinum standard*. <https://www.sfa-oxford.com/media/xf3fiudv/sfa-oxford-edition-12-the-platinum-standard-may-2023.pdf> - ...
- Sterman, J. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw Hill, New York. Retrieved from [https://www.academia.edu/download/48262812/Sterman Business dynamics Systems Thinking and Modeling for a Complex World.pdf](https://www.academia.edu/download/48262812/Sterman_Business_dynamics_Systems_Thinking_and_Modeling_for_a_Complex_World.pdf)
- Suurs et al. (2020) Elektrolyzers: Kansen voor de Nederlandse Maakindustrie. TNO, FME <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2021/07/01/rapport-elektrolyzers>
- Suurs, R.A.A.; Dowling, R.; Diaz Morales, O.; Manrique Ambriz, E.; van der Burg, L.; van Schooneveld, M.M.; Kronemeijer, A.J.; de Groot, A.(2023) Electrolyzers: Opportunities for the High Tech Manufacturing Industry. TNO <https://www.voltachem.com/news/electrolyzers-opportunities-for-the-high-tech-manufacturing-industry>
- Utterback, J. (1994) *Mastering the Dynamics of Innovation: How Companies Can Seize Opportunities in the Face of Technological Change*. Harvard Business School Press, Brighton, Boston, MA.
- Utterback, J. M., & Abernathy, W. J. (1975). *A dynamic model of process and product innovation*. Omega, 3(6), 639-656.
- Vollebergh, H.; Dijk, J.; Drissen, E.; Eerens, H. en Vrijburg, H. (2017). *Fiscale vergroening: belastingverschuiving van arbeid naar grondstoffen, materialen en afval Verkenning van belastingen voor het stimuleren van de circulaire economie*. PBL Planbureau voor de Leefomgeving. [Fiscale vergroening: belastingverschuiving van arbeid naar grondstoffen, materialen en afval \(pbl.nl\)](https://www.pbl.nl/publicaties/fiscale-vergroening-belastingverschuiving-van-arbeid-naar-grondstoffen-materialen-en-afval)
- Wieclawska, S & Gavrilova, A. (2021) [Op weg naar een groene toekomst. Deel 1: Hoe grondstoffenschaarste onze ambities voor groene waterstof en de energietransitie als geheel kan belemmeren \(tno.nl\)](https://www.tno.nl/nl/onderzoek/energie/energievervoer/energievervoer-2021). TNO.

Bijlage

Aannames: Waterstofvraagbepaling

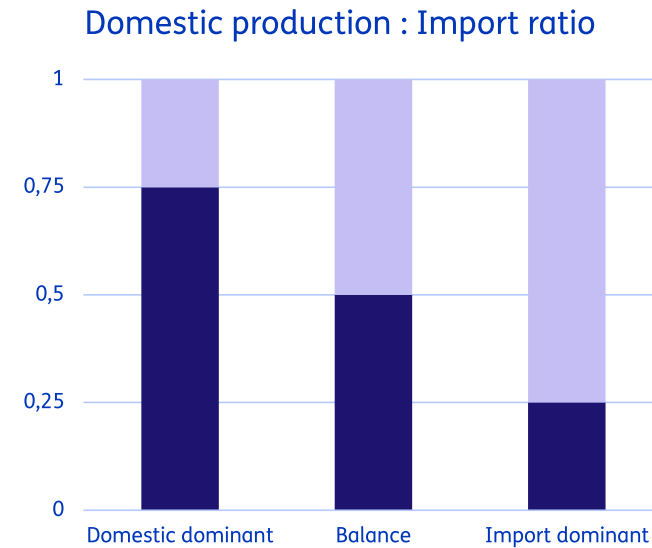


Hydrogen demand projection sources

2000, 2010: [JRC \(2022\)](#)

2020, 2030, 2050: [IEA \(2023\)](#) (SP and AP scenarios: p.292, NZE scenario derived from p.152)

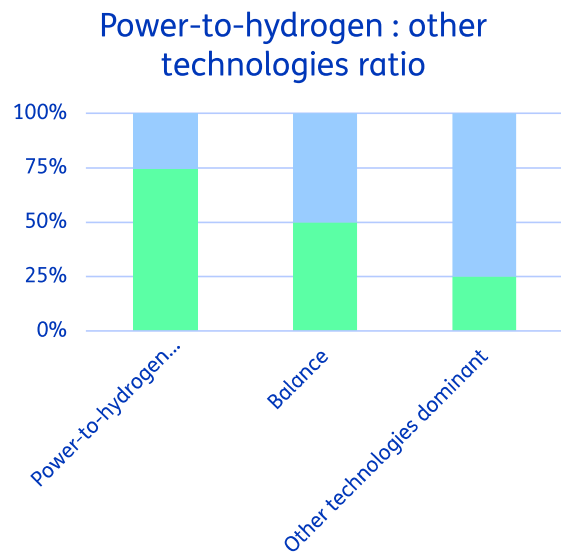
Extrapolations: Authors



Domestic vs import sources

Balance based on EU policy target of 10 Mton domestic and 10 Mton import in 2030: [EC \(2020\)](#)
 25:75 assumptions: Authors

Aaname: Electrolyse technologie mix

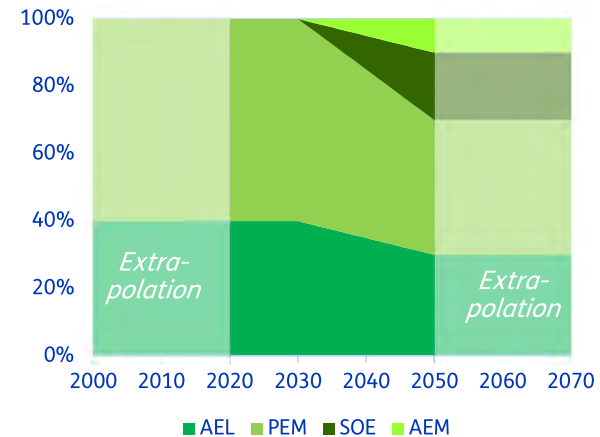


Assumed hydrogen production routes:
Ratios assumed by the authors

Assumption put out of scope by assuming hydrogen through electrolysis as the production technology of choice.

Recommended future research step is to rectify this assumption and include other non-power-to-hydrogen technologies.

Assumed electrolyser technology mix, 2000-2070



Assumed electrolyser technology mix sources:
2020-2050: [JRC \(2023\) p.40](#)
Extrapolations: Authors