

Kansen en bedreiging van PFAS restrictie voor de waterstof sector in Nederland

TNO 2024 R11813 – 10 maart 2025

Kansen en bedreiging van PFAS restrictie voor de waterstof sector in Nederland

Auteurs	Dr. R. (Ron) Oren, H. (Harshraj) Gali, Dr. A. (Arend) de Groot, Dr. C.E. (Clare) Harvey
Rubricering rapport	TNO Vertrouwelijk
Titel	TNO Vertrouwelijk
Rapporttekst	TNO Vertrouwelijk
Aantal pagina's	22 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	Ministerie van Klimaat en Groene Groei

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2025 TNO

Samenvatting

Het Europese Chemicaliën Agentschap heeft in 2023 een voorstel ingediend bij de Europese Commissie om de productie, verkoop en gebruik van per- en polyfluoralkylstoffen (PFAS) uit te faseren. Het uitfaseren van PFAS kan sterke invloed uitoefenen op de Nederlandse ambities voor waterstof productie; en daarmee op het Nederlandse verdienvermogen, strategische autonomie en haalbaarheid van klimaatdoelen.

PFAS zijn momenteel essentieel voor het functioneren van twee types electrolyzers (op basis van polymer electrolyte membrane (PEM) en anion exchange membrane (AEM) technologie). Hoewel alternatieve materialen beschikbaar zijn, hebben deze nog niet de levensduur en betrouwbaarheid die in de markt vereist wordt. Ook is materiaalontwikkeling tot nu toe toegespitst op één component (het membraan), terwijl andere componenten van de uiteindelijke assemblage achterlopen. Een directe vervanging van PFAS in deze electrolyzers is daarom niet realistisch.

Twee andere electrolyzer types (op basis van solid oxide en alkaline technologie) zijn nauwelijks afhankelijk van PFAS. Een marktanalyse toont dat de toepassingen van deze electrolyzers over het algemeen niet overlappen met die van PEM en AEM electrolyzers. Overstappen naar een PFAS-vrije technologie is – in de meeste gevallen – niet een realistische optie, ook na de PFAS-uitfaserings.

Mitigatie maatregelen voor de PFAS-uitfaserings bestaan, maar hebben tijd nodig. Belangrijke mitigaties zijn sector-wijde coördinatie van onderzoek en innovatie in alternatieve materialen, actieve ondersteuning van recycling en versterking van de benodigde vaardigheden in de sector.

Uit deze studie blijkt dat – voor de Nederlandse waterstofsector, klimaatdoelen en maakindustrie – een tijdelijke uitzondering op de PFAS-restrictie van 10 jaar de voorkeur heeft. Aanbevelingen worden gedaan voor flankerend beleid om te de kans te vergroten dat alternatieven tijdens deze uitzonderingsperiode technisch en commercieel volwassen worden.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
Afkortingen	5
1 Inleiding	6
1.1 PFAS-restrictie	6
1.2 Waterstof sector in Nederland	6
1.3 Onderzoeksvraag	7
1.4 Leeswijzer	7
2 PFAS in de electrolyzer waardeketen	8
2.1 Eigenschappen van PFAS	8
2.2 Waardeketen voor electrolyzer types	8
2.3 Product-markt fit analyse	11
2.4 Weglekrisico's	12
3 Alternatieve oplossingen	14
3.1 Ontwikkelingsproces voor alternatieven	14
3.2 Mogelijke alternatieven	14
4 Conclusie & aanbevelingen	16
4.1 Restrictie opties	16
4.2 Flankerende activiteiten	17
5 Methode	19
5.1 Methode in vogelvlucht	19
5.2 Productieketen analyse	19
5.3 Exploratie van interventies	20
Referenties	22

Afkorting

Afkorting	Omschrijving
AEM	Anion exchange membrane
CapEx	Capital expenditure (kapitaaluitgaven)
CCE	Catalyst coated electrode
CCM	Catalyst coated membrane
ECHA	European Chemical Agency
GDL	Gas diffusion layer
MEA	Membrane-electrode assembly
OpEx	Operational expenditure (operationele kosten)
PEM	Proton exchange membrane
PFAS	Per- en polyfluoralkylstoffen
RO1	Restrictie optie 1
RO2	Restrictie optie 2
SOE	Solid oxide electrolyzer

1 Inleiding

1.1 PFAS-restrictie

In februari 2023 heeft het Europese chemicaliënagentschap (ECHA) op initiatief van Nederland, Duitsland, Denemarken, Noorwegen en Zweden een restrictie voorstel voor per- en polyfluoralkylstoffen (PFAS)¹ gepubliceerd.¹ Het voorstel voorziet in de restrictie op productie, verkoop en gebruik van alle PFAS in de EU, met twee mogelijke implementatie opties:

1. Directe implementatie na inwerkingtreding van de wet, met een transitieperiode van 18 maanden
2. Tijdelijke uitzondering ("derogatie") van minimaal 5 en maximaal 12 jaar

Mogelijke derogaties worden in het wetsvoorstel genoemd voor selecte toepassingen, waaronder een derogatie van 5 jaar voor polymer electrolyte membrane (PEM) brandstofcellen. Waterstof productie wordt niet genoemd in het wetsvoorstel.

1.2 Waterstof sector in Nederland

Het bereiken van het Klimaatakkoord vereist een opschaling van hernieuwbare energieopwekking. De focus hiervan ligt in Nederland bij een uitbreiding van wind-op-zee tot een geplande capaciteit van 21 GW in 2032.² Om de veranderlijkheid van windenergie is grootschalige, langdurige en flexibele energieopslag essentieel. Waterstof – en specifiek elektrolyse – speelt hier een belangrijke rol: niet alleen om de energie van dag tot dag op te slaan, maar ook om productiepieken op te vangen en daarmee netcongestie te verminderen. Dit vereist wel dat de waterstof productie flexibel en robuust is, onder zware omstandigheden.

Naast de rol als energiedrager, heeft waterstof ook een belangrijke industriële functie als grondstof, bijvoorbeeld in de productie van ammonia (zelf een ingrediënt van kunstmest) en als reductiemiddel, bijvoorbeeld in de productie van staal. Groene waterstof productie is een vereiste voor de verduurzaming van hoogenergetische (en dus CO₂-intensieve) industrieën, die belangrijk zijn voor de Nederlandse autonomie en verdienvermogen. Hierin is de leveringszekerheid van waterstof erg belangrijk: niet alleen vanuit het perspectief van veranderlijkheid en just-in-time productie, maar ook vanuit geopolitieke afhankelijkheden.

Het Klimaatakkoord reflecteert het belang van groene waterstofproductie, met een ambitie om 2030 voldoende electrolyzers te hebben geïnstalleerd voor 4 GW aan productie,³ ondersteund door voldoende duurzame elektriciteit opwekking. Deze ambitie biedt ook mogelijkheden voor de Nederlandse maakindustrie om te groeien: niet alleen kunnen electrolyzer componenten hier worden geproduceerd, maar ook waterstofopslag en -transport producten, regel- en detectiesystemen, elektronica en aanpalende systemen zoals warmtewisselaars en pompen. Al deze producten bieden exportmogelijkheden in de internationale waterstof productie en -gebruik markt.

¹ PFAS is een groep van 10.000 verschillende moleculen, met hoge stabiliteit en lange levensduur. Deze eigenschappen maken PFAS nuttig in industriële processen, maar zorgen er ook voor dat PFAS niet afgebroken worden in het milieu

1.3 Onderzoeksvraag

De onderzoeksvraag in dit traject is: **wat is het effect van het uitfasen van PFAS – en specifiek de verschillende restrictieopties – op de (huidige) waterstof waardeketen?** Deze omvat de volgende sub-vragen:

1. Waar worden PFAS in de huidige waterstofketen gebruikt?
2. Welke technische en bedrijfsmatige innovaties kunnen afhankelijkheid van PFAS verminderen?
3. Wat is het effect van een PFAS verbod en mogelijke andere interventies op ontwikkeling van innovatie?

Hierbij is de volgende afbakening aangehouden:

- Alleen **essentiële** componenten van electrolyzers zijn geanalyseerd. Generieke componenten (zoals bijvoorbeeld sealants) die ook in andere industriële toepassingen gebruikt worden, worden wel genoemd maar niet meegenomen in de analyse.
- Alleen **directe** componenten van waterstof productie zijn geanalyseerd. PFAS gebruik in productie van materialen die zelf voor waterstof productie nodig zijn (bijvoorbeeld KOH-productie voor alkaline electrolyzers), zijn niet meegenomen in de analyse.
- Alleen **economische** impact van PFAS-restrictie is beschouwd. De milieueffecten van PFAS en/of alternatieve materialen zijn in deze analyse niet meegenomen.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt opgebouwd:

In **hoofdstuk 2** wordt de huidige situatie geschetst, door middel van een analyse van de electrolyzer productieketen en gevoeligheden t.a.v. de PFAS-uitfasering daarin.

Hoofdstuk 3 krijgt vooruit naar mogelijke oplossingen om afhankelijkheden van PFAS te verminderen.

De inzichten uit de eerdere hoofdstukken worden bijeengebracht in **hoofdstuk 4** tot een éénduidig antwoord op de onderzoeksvraag en advies over de meest gunstige restrictieoptie. Daarnaast geeft hoofdstuk suggesties voor flankerende activiteiten om de uitfasering van PFAS zo soepel mogelijk te laten verlopen.

Hoofdstuk 5 geeft de methodologische onderbouwing van de studie, met aansluitend referenties naar geraadpleegde bronnen.

2 PFAS in de electrolyzer waardeketen

Om het effect van PFAS-restrictie en mogelijke PFAS-alternatieven op de waterstof waardeketen in te schatten, is het eerst van belang om te begrijpen waar in de waardeketen PFAS gebruikt wordt en waarom PFAS daar zo belangrijk is.

2.1 Eigenschappen van PFAS

De belangrijkste eigenschap van PFAS is hun stabiliteit tegen chemische reacties. Electrolyzers werken per definitie onder zware omstandigheden (hoge temperaturen, lage pH, hoge concentratie zout, aanwezigheid van radicalen), waar veel materialen al snel falen. De chemische stabiliteit van PFAS vergroot de levensduur van de electrolyzer componenten.

Daarnaast hebben PFAS specifieke voordelen voor bepaalde componenten:

- PFAS in het **membraan** van *proton exchange membrane* (PEM) electrolyzers vergroot geleiding van protonen door het ionomeer (de actieve component van het membraan) en biedt mechanische kracht. Voorbeelden van commerciële producten die hiervoor gebruikt worden zijn Nafion, Forblue, Aquivion en 3M corporation ionomers.⁴
- Teflon is een commercieel PFAS dat in de **Gas Diffusion Layer** (GDL) wordt gebruikt als een bindmiddel. Daarnaast fungeert het als een waterbestendige laag om doorbraak van de elektrolyt tegen te gaan.⁵ Dit zorgt dat het gas de actieve katalysator kan bereiken.
- Ook in de **microporous layer** helpt PFAS met de hydrofobiciteit van de laag, maar vergroot het ook de elektrische geleiding (via proton transport).
- Tenslotte helpt PFAS om geleiding en binding tussen het **membraan**, **katalysator** en **electrode** te versterken. Dit geldt zowel voor de *catalyst coated electrodes* (CCE) en *catalyst coated membrane* (CCM) configuraties.

Zonder gebruik van PFAS – of alternatieven met vergelijkbare eigenschappen – gaan de levensduur, robuustheid (oftewel: de zekerheid dat het systeem een zekere levensduur haalt) en efficiëntie van electrolyzers omlaag. Een lagere efficiëntie maakt het resulterende waterstof duurder en vergroot de hoeveelheid duurzame elektriciteit die nodig is; maar dit kan in de beprijzing afgevangen worden. Gegarandeerde levensduur, in tegenstelling, is voor de meeste gebruikers een harde eis (zie ook §3.2.1).

Het belang van PFAS in de componenten varieert per type electrolyzer. Het is daarom van belang om de waardeketen van de verschillende electrolyzer types uit te schetsen.

2.2 Waardeketen voor electrolyzer types

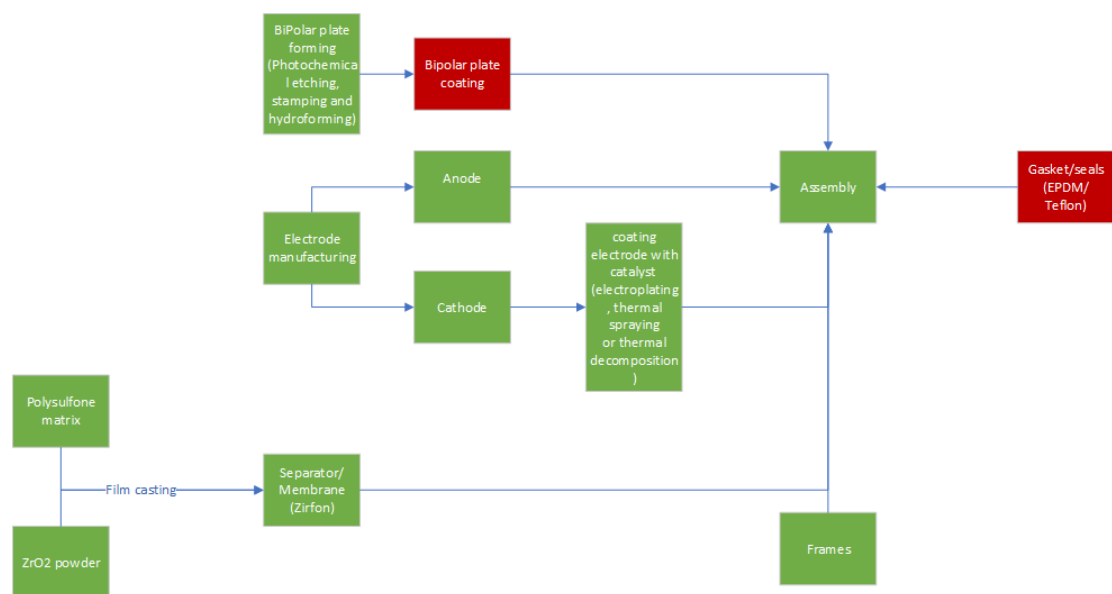
Er zijn vier verschillende technologieën voor elektrolyse:

- a) Alkaline electrolyzer

- b) Solid oxide electrolyzer (SOE)
- c) Proton exchange membrane (PEM) electrolyzer
- d) Anion exchange membrane (AEM) electrolyzer

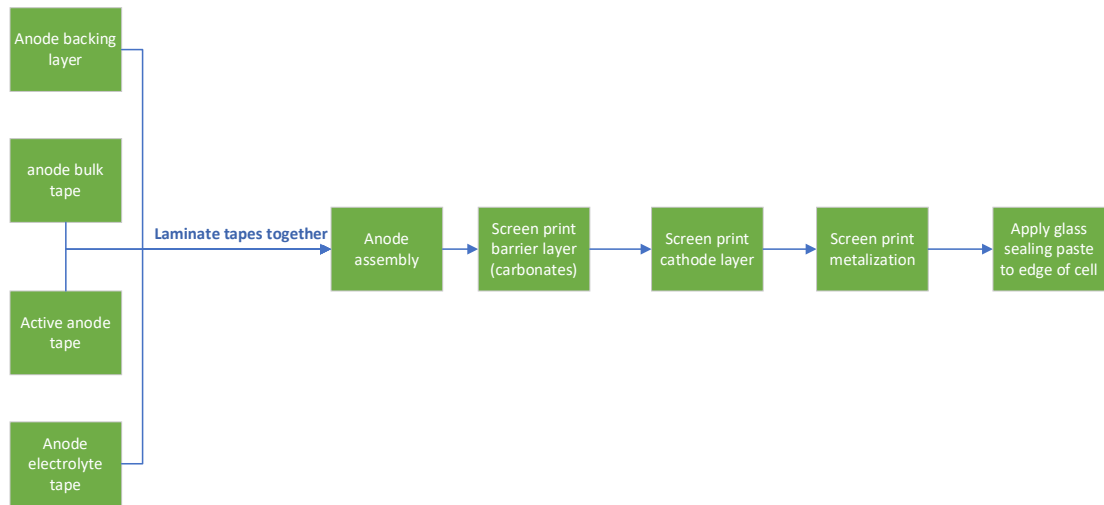
De waardeketen voor productie van de electrolyzer (en daarmee het gebruik van PFAS in de componenten) is hieronder aangegeven:

Figuur 2.1 toont de stappen die benodigd zijn in de productie van alkaline electrolyzers. De meeste componenten zijn vrij van PFAS. De uitzondering hier is de *bipolar plate* die met PFAS beschermd wordt tegen het basische milieu waarin de electrolyzer functioneert;⁶ deze PFAS coating maakt de *bipolar plate* ook hydrofoob. Ook de pakking bevat PFAS, voornamelijk Teflon, dat lekkage van elektrolyt en gas tegengaat. De pakking valt buiten de afbakening van deze studie en is verder niet meegenomen.



Figuur 2.1: Productieketen voor alkaline electrolyzer.⁷ Blokken in rood geven aan waar PFAS gebruikt wordt.

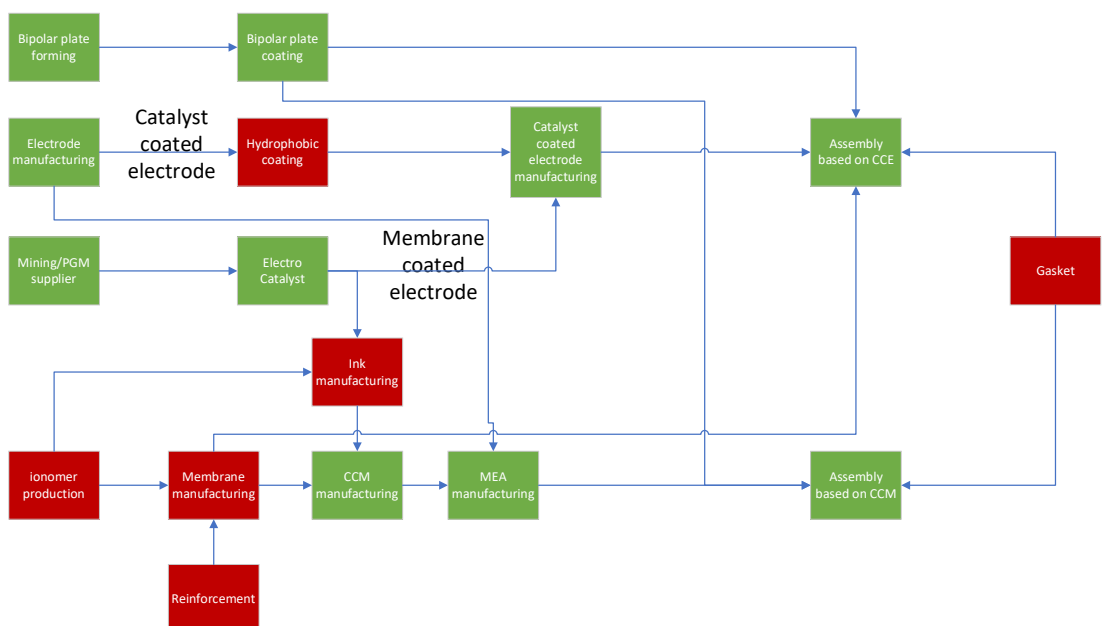
Figuur 2.2 toont de productiestappen voor SOE. Geen van de componenten van SOE bevat PFAS.



Figuur 2.2: Productieketen voor SOE⁸

Tenslotte toont Figuur 2.3 de productieketen voor PEM en AEM electrolyzers. Hoewel de technologie anders is, zijn de componenten van deze twee electrolyzers dezelfde. Voor de analyse van PFAS gebruik kunnen deze twee electrolyzer types daarom als één worden beschouwd. In tegenstelling tot SOE en alkaline, zijn PEM en AEM sterk afhankelijk van PFAS. Huidige technologie gebruikt twee mogelijke configuraties: catalyst coated membrane (CCM) of catalyst coated electrode (CCE). Voor beide configuraties bevat het membraan zelf PFAS; daarnaast zijn PFAS benodigd om de katalysator te binden aan het membraan of de electrodes.

Een derde configuratie bindt de katalysator aan de microporous layer. Dit kan mogelijkheden bieden om afhankelijkheid van PFAS voor katalysator binding te verminderen; maar deze configuratie is momenteel minder ver doorontwikkeld dan CCE en CCM.



Figuur 2.3: Productieketen van PEM / AEM electrolyzers.⁷ Blokken in rood geven aan waar PFAS gebruikt wordt

Bij de drie bovenstaande productieketens moet de afbakening van deze studie als kanttekening geplaatst worden: afhankelijkheden van PFAS voor chemicaliën, energievoorziening of randapparatuur die nodig zijn voor elektrolyse zijn niet gerepresenteerd in deze figuren.

2.3 Product-markt fit analyse

Omdat AEM en PEM veel sterker afhankelijk zijn van PFAS dan alkaline en SOE, zou een mogelijke reactie[#] op een PFAS-restrictie zijn om van PEM/AEM over te schakelen naar SOE of alkaline oplossingen. Om in te schatten of dit een haalbare oplossing is, hebben wij een beknopte analyse van de toepassingen en technologieën uitgevoerd.

Op basis van verwachte prestatie criteria, hebben we voor zes casussen geschetst welke electrolyzer technologie het beste past (zie hoofdstuk 5 voor gedetailleerde methode). Tabel 2.1 toont, ter illustratie, hoe de criteria voor GW-schaal wind-op-zee uitpakken: alkaline electrolyzer bieden lagere installatiekosten (CapEx), terwijl SOE betere efficiëntie heeft (lagere OpEx). Maar het belangrijkste criterium voor wind-op-zee is de mogelijkheid van dynamische response (om veranderlijkheid in windkracht op te vangen), waar PEM en AEM sterker zijn dan SOE en alkaline. Daarnaast zijn PEM/AEM electrolyzers ook kleiner, waardoor het makkelijker is om ze op een offshore platform te plaatsen.

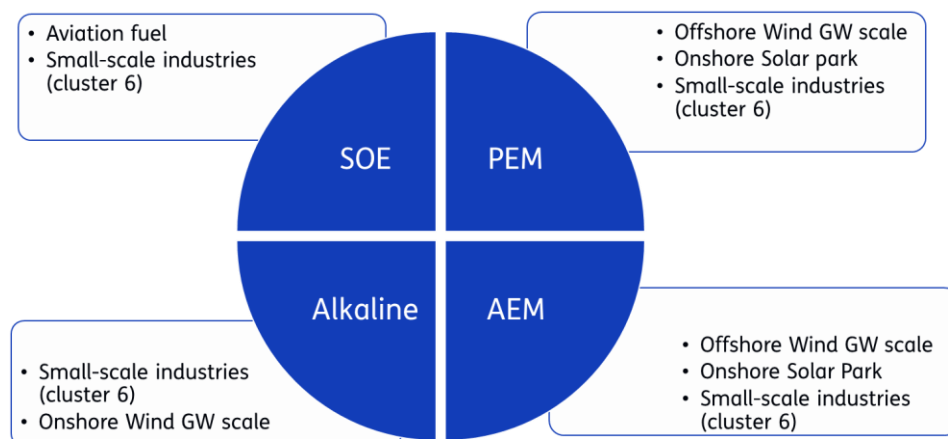
Tabel 2.1: illustratie marktanalyse

Toepassing	Vereiste	PEM	Alkaline	AEM	SOE
GW-schaal wind-op-zee	i) Efficiëntie				
	ii) Dynamische response				
	iii) Frequentie onderhoud				
	iv) Robuust systeem				
	v) Gewicht / formaat				
	vi) CapEx				

Figuur 2.4 toont de uitkomst van de analyse. Voor kleinere toepassingen, inclusief kleinschalige industrie, zijn alkaline en SOE relevant – maar in alle waarschijnlijkheid gebruiken deze toepassingen al alkaline en SOE electrolyzers (gezien deze typisch lagere kosten hebben dan AEM/PEM). Het effect van PFAS-restrictie op deze toepassingen zal dus relatief klein zijn.

De grootste toepassingen, daarentegen, zijn GW-schaal wind-op-zee en zonneparken: voor deze zijn AEM en PEM duidelijk de meest relevante technologieën en is uitwijken naar SOE of alkaline veelal geen optie – m.n. vanwege de behoefte dynamische response. Voor deze toepassingen zal het effect van een PFAS-restrictie daarom significant zijn.

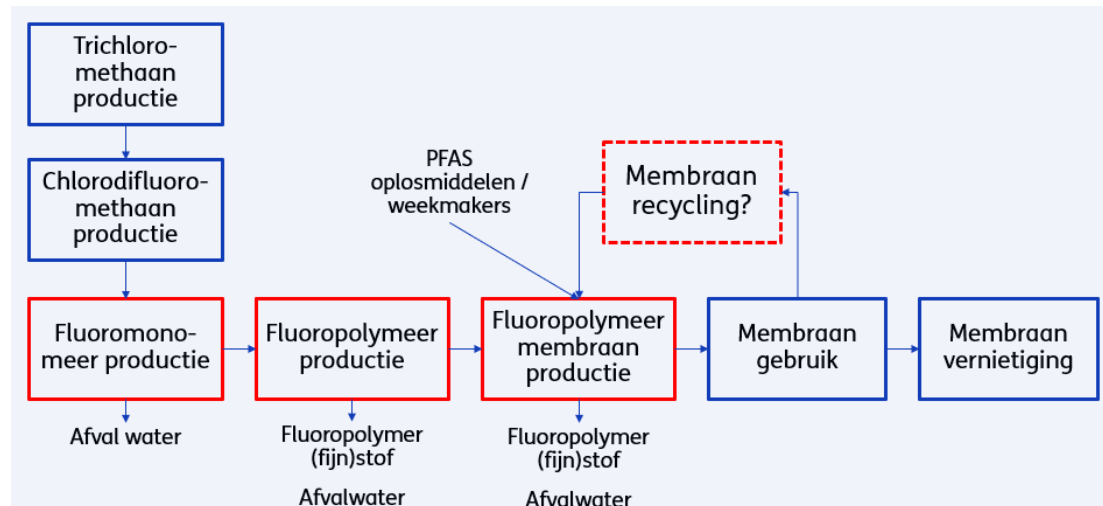
[#] Als een commerciële beslissing vanuit industrie. We maken **geen** veronderstelling dat de overheid een keuze tussen technologieën maakt. Het is daarentegen wel nuttig voor de overheid om te begrijpen of en wanneer de technologiekeuze realistisch is.



Figuur 2.4: Visuele samenvatting van casus analyse⁹

2.4 Weglekrisico's

De milieu- en gezondheidseffecten van PFAS spelen alleen een rol wanneer de PFAS weglekken uit een gecontroleerd systeem (bijv. een electrolyzer of een 'closed loop' fabriek). Een inzicht in de weglekrisico's van verschillende PFAS en in verschillende plekken in de productieketen kan daarom een keuze van mogelijke alternatieven beïnvloeden. Hoewel een alomvattende analyse van weglekrisico's buiten de scope van dit project ligt, hebben wij wel een kwalitatieve inschatting van risico's gedaan. Deze is visueel samengevat in Figuur 2.5.



Figuur 2.5: Indicatie van weglekrisico's in de PFAS-productieketen

De risico's voor weglekken (in Figuur 2.5 aangegeven met een rode rand) liggen met name in de productie van de fluoromonomenen, -polymeren en -membranen. Deze productiestappen liggen allemaal binnen de chemische industrie, die ervaring hebben met beheersing van chemische risico's. Zodra een membraan geproduceerd en in een membrane-electrode assembly (MEA) geïntegreerd is, zijn de risico's verwaarloosbaar (mits electrolyzers conform voorschrift worden gebruikt en afgebroken).

Membraan vernietiging wordt momenteel gedaan via verbranding (en herwinning van de katalysator die erop gecoat was). Systematische reviews tonen dat goed functionerende *hazardous waste incinerators* PFAS volledig afbreken tot CO₂ en HF.¹⁰

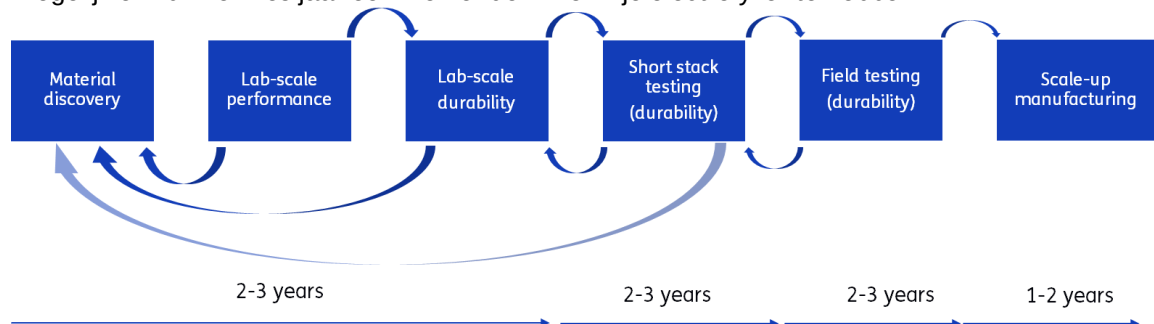
Een punt van onzekerheid is het recyclen van electrolyzers (en uiteindelijk membranen): hier is er per definitie een weglekrisico, omdat het membraan gereconstitueerd moet worden. Daarentegen is er bij recycling automatisch een business case om zoveel mogelijk materiaal te behouden, waardoor investeren in beheersmaatregelen aantrekkelijk kan zijn (mits er überhaupt een business case voor recycling is).

Hier moet een kanttekening geplaatst worden dat “weglekrisico” op twee niveaus geïnterpreteerd kan worden: letterlijk het weglekken van PFAS naar het milieu en figuurlijk het weglekken van PFAS uit Europa, door export van producten en/of offshoring van recycling- of vernietigingsstappen. Er is een risico dat recycling weglekken in beide betekenissen vergroot, zolang het economisch aantrekkelijk (en toelaatbaar) is om membranen in lage-lonen landen – met mogelijk zwakkere regelgeving en handhaving – te laten recyclen.

3 Alternatieve oplossingen

3.1 Ontwikkelingsproces voor alternatieven

Het ontwikkelen van een alternatief is een iteratief proces, zoals weergegeven in Figuur 3.1. Het proces begint met de ontdekking of formulering van een nieuw materiaal dat een kans heeft om (één van) de eigenschappen van PFAS te evenaren. Hier volgen lab-schaal testen op prestaties en duurzaamheid op. Als het materiaal op het verwachte niveau kan presteren, wordt het als onderdeel van een shortstack getest op duurzaamheid. Als dit succesvol is, gaat het product verder met veldtesten, waarbij het wordt onderworpen aan bedrijfsomstandigheden die vergelijkbaar zijn met het beoogde gebruik van het product. Als al deze bovengenoemde stappen in één keer worden doorlopen, is het in het beste geval mogelijk om binnen zes jaar een werkende PFAS-vrije electrolyzer te hebben.



Figuur 3.1: Typische tijdslijn voor ontwikkeling van alternatieve producten

De onderlinge samenhang van verschillende componenten in de electrolyzer speelt een belangrijke rol bij het vaststellen van deze tijdslijn. Het vervaardigen van een PFAS-vrij PEM-membraan is bijvoorbeeld slechts één aspect van de oplossing; de andere componenten van de elektrolysecel moeten ook compatibel zijn met het nieuw ontwikkelde membraan. Zolang er geen radicale doorbraak is (waardoor een totaal ander systeem mogelijk wordt gemaakt), is het daarom reëel dat een alternatieve oplossing één of meer stappen meerdere keren doorloopt – dit is het iteratieve aan het ontwikkelingsproces.

In het meest positieve scenario is het dus niet te verwachten dat een PFAS-vrije electrolyzer binnen een tijdsbestek van 8-10 jaar op de markt zal komen. Aan de andere kant, hoe eerder er zekerheid is rond een PFAS-restrictie, hoe eerder innovatietrajecten begonnen worden en dus hoe sneller PFAS-vrije electrolyzers op de markt komen.

3.2 Mogelijke alternatieven

In principe zijn er twee types alternatieven:

1. Alternatieve materialen die het PFAS kunnen vervangen
2. Proces veranderingen om PFAS te controleren

3.2.1 Alternatieve materialen

PFAS-vrije membranen voor PEM en AEM bestaan al, hoewel op verschillende ontwikkelingsniveaus. Ionomer's Pemion,¹¹ bijvoorbeeld, is commercieel beschikbaar (TRL9). Een ander voorbeeld is NEXAR,^{12,13} dat door Kraton Polymers en Texas A&M ontwikkeld is en momenteel op TRL4 geschat wordt. Dergelijke PFAS-vrije membranen hebben nog niet de levensduur die door gebruikers verwacht wordt. Uit marktonderzoek¹⁴ blijkt dat er weinig tot geen ruimte voor onderhandeling is rond levensduur: het kan niet gebalanceerd worden door een lagere prijs, minder gewicht, minder milieueffecten etc. Voor bestaande PFAS-vrije membranen is er ruimte om levensduur te verlengen via optimalisatie van het productieproces. Investeren in productie optimalisatie blijven daarentegen uit, zolang bestaande (PFAS-houdende) producten verkopen en er geen duidelijk signaal uit de markt komt dat PFAS-vrije producten afgenomen zullen worden. Als de onzekerheid rond afname verwijderd wordt, bijvoorbeeld middels een sector-breed gedragen technologie roadmap, is optimalisatie binnen een tijdsbestek van 10 jaar realistisch haalbaar.

Een grotere barrière is dat PFAS-vrije MEAs nog niet buiten labs beschikbaar zijn buiten het lab (TRL4). De ionomeren die de katalysator aan het membraan (CCM) of electrode (CCE) bindt bevat nog PFAS en er is op dit moment geen business case om de PFAS-vrije ionomeren te ontwikkelen. Er is vanuit de sector geen twijfel dat PFAS-vrije ionomeren ontwikkeld kunnen en zullen worden, zodra de onzekerheid rond PFAS gebruik in electrolyzers verdwijnt (en daarmee de business case sluitend wordt).

3.2.2 Proces aanpassingen

In principe is een *closed loop* van fluoropolymeren mogelijk: hier is de chemische stabiliteit van PFAS een voordeel, omdat het extreem hoge terugwinning percentages mogelijk maakt. De barrière hier is dat huidige volumes van PEM/AEM electrolyzers te laag zijn om een business case voor recycling rendabel te maken (en zelfs deze volumes komen waarschijnlijk pas in medio jaren-2030 beschikbaar voor recycling).

Een mogelijke oplossing voor deze barrière kan zijn om in te zetten op Nederland als een (P/AEM-) recycling hub voor de wereld om volumes te verhogen en de business case haalbaar te maken. Nederland heeft een sterke handel- en doorvoer infrastructuur waarop gebouwd zou kunnen worden. Bestaande industriële recycling infrastructuur is minder sterk in Nederland, maar een open vraag is of het gunstig is om bestaande infrastructuur te gebruiken. Het aanleggen van nieuwe infrastructuur heeft weliswaar hoge CapEx, maar biedt ook ruimte tot groei van de circulaire economie.

De restrictie op PFAS-gebruik is zelf ook een barrière voor recycling: elke business case die voor recycling gemaakt kan worden is per definitie tijdelijk en valt weg zodra de uitzonderingspositie verloopt. Dit neemt niet weg dat de business case nog steeds positief kan zijn – dit zou doorgerekend moeten worden. Ook kan een business case versterkt worden als de recycling infrastructuur zodanig opgezet wordt dat het makkelijk omgezet kan worden naar andere materialen en dus na afloop van een PFAS-uitzonderingspositie in bedrijf kan blijven.

4 Conclusie & aanbevelingen

4.1 Restrictie opties

Hoewel er stemmen zijn die een permanente uitzonderingspositie voor de electrolyzer industrie bepleiten, blijkt uit onze analyse dat er geen reden is om hierop in te zetten: er zijn voldoende mogelijkheden voor alternatieve materialen en processen om electrolyzers PFAS-vrij te maken, mits de onzekerheid rond regelgeving wegvalt en -blijft.

Van de twee restrictie opties die in het ECHA-voorstel genoemd worden, **geeft RO1 (directe implementatie) een groot risico dat de electrolyzer industrie uit Nederland en Europa vlucht**. Totdat de industrie buiten Europa tijd heeft gehad om PFAS-vrije elektrolyzers te ontwikkelen, kunnen elektrolyzers niet geïmporteerd worden (omdat de voorstel ook het gebruik van PFAS aan banden legt). Dit zal betekenen dat traditionele waterstof productie op basis van fossiele brandstoffen (grijze of blauweⁱⁱⁱ waterstof) in Europa groeit. Gezien *carbon capture and storage* projecten nog volop in ontwikkeling zijn, zal dit met name grijze waterstof zijn. Hierdoor wordt de energietransitie (en met name de industriële verduurzaming) vertraagd.

Daarnaast is het mogelijk dat waterstof productie in het algemeen uit Europa wegtrekt, omdat het economisch aantrekkelijker is om groene waterstof op basis van PFAS-houdende elektrolyzers in importeren dan grijze waterstof hier te produceren (en emissierechten te betalen). Hiermee wordt niet alleen de energietransitie aangetast, maar ook de strategische autonomie van Europa.

RO2 (een uitzonderingspositie van 5 – 12 jaar) geeft de electrolyzer industrie ruimte om aan te passen. Een redelijke termijn voor uitzonderingspositie zou 10 jaar zijn: een kortere uitzonderingspositie geeft een groot risico dat de benodigde ontwikkelingen niet op tijd gerealiseerd worden, terwijl een langere uitzonderingspositie mogelijk alleen uitmondt in vertraging van ontwikkelingstrajecten (aangezien de urgentie in eerste instantie minder hoog is).

Hierbij moet benoemd worden dat de onzekerheid van regelgeving een grote barrière voor investering in innovatie activiteiten. Vanuit de industrie is meerdere malen gepleit om een **snelle afhandeling van onderhandelingen** rond mogelijke uitzonderingsposities. Flexibiliteit (vanuit de Rijksoverheid) rond de lengte van een uitzonderingspositie ten behoeve van een versnelde beslissing zou dan ook aangejuicht worden. De kanttekening moet wel geplaatst worden dat een beslissing vast moet staan voor de lange termijn: zodra de uitzonderingspositie afgesproken is, kan er niet meer aan die tijdslijn getornd worden.

Tenslotte merken we op dat de EU een mogelijkheid heeft om wereldwijd het voortouw te nemen in de regelgeving rond PFAS. Vanuit deze optiek is de formulering in het restrictievoorstel om productie, verkoop en gebruik aan banden te leggen uiterst productief, aangezien het ook de geïmporteerde electrolyzers raakt.

ⁱⁱⁱ Grijze waterstof wordt op basis van fossiele brandstoffen geproduceerd. Blauwe waterstof wordt ook op basis van fossiele brandstoffen geproduceerd, maar met afvang van de koolstofdioxide-emissies.

RO1 ondermijnt dit potentieel: gezien er geen commercieel volwassen alternatieven zijn, kunnen andere landen terecht inzetten op grijze waterstof. Een uitgerekte uitzonderingspositie is evenmin gunstig; daarmee verliest de EU haar leidende positie. **Ook vanuit het perspectief van Europa als globale leider in regelgeving is inzetten op RO2 met flexibiliteit in de onderhandelingen aan te raden.**

4.2 Flankerende activiteiten

Naast het inzetten op een uitzonderingspositie van 10 jaar, bevelen wij ook aan dat de Rijksoverheid en de industrie nu acties ondernemen om te zorgen dat a) die 10 jaar productief gebruikt worden om PFAS-vrije alternatieven (door) te ontwikkelen; en b) de weglekrisico's tijdens die 10 jaar geminimaliseerd worden. Mogelijke acties zijn:^{iv}

- Ontwikkel een visie en technologie roadmap voor PFAS-vrije alternatieven, met expliciete, realistische mijlpalen voor ontwikkeling.
 - o **Dit moet door de industrie gedaan worden, samen met universiteiten en onderzoeksinstituten, maar de Rijksoverheid kan een belangrijke coördinerende rol spelen.**
- Zet een onafhankelijk orgaan op dat PFAS-vrije ontwikkeling kan ondersteunen. Dit omvat:
 - o Orkestreren van de gehele waardeketen om realistische requirements te zetten
 - o Bijeen brengen van technische kennis, test- en pilotfaciliteiten, waar bedrijven gebruik van kunnen maken om producten tot een hoger TRL te brengen (dit is m.n. relevant voor kleinere bedrijven die de investering in faciliteiten niet kunnen maken)
 - o Onafhankelijk valideren van test resultaten (vergelijkbaar met de rol van TÜV in Duitsland)
 - o **Dit moet door industrie en overheid samen opgezet worden en belegd bij een specifieke partner, met bijbehorende financiering.**
- Onderzoek alternatieve configuraties voor MEAs, zoals het binden van de katalysator op microporous layer.
 - o **Dit moet door industrie, universiteiten en onderzoeksinstituten gedaan worden.**
- Leg verantwoordelijkheid voor recycling wettelijk vast*
 - o Dit moet op verschillende niveaus van de waardeketen beschreven worden (bijv. verantwoordelijkheid voor recycling van het membraan kan ergens anders liggen dan verantwoordelijkheid voor recycling van de hele stack)
 - o De mogelijkheid en limitatie van uitbesteding moet expliciet beschreven worden.
 - o Ondersteun bedrijven om de juiste samenwerkingsverbanden aan te gaan voor recycling
 - o **Dit moet door de overheid gedaan worden, met afstemming op Europees niveau**
 - **Ondersteuning voor bedrijfsleven zou mogelijk bij het onafhankelijke PFAS-vrij instituut belegd kunnen worden.**
- Leg vast in regelgeving dat een bepaald percentage van materialen terug moet vloeien naar productiefaciliteit, voor recycling of vernietiging.

^{iv} Acties gemarkeerd met * zijn niet alleen relevant voor PFAS en electrolyzers, maar versterken recycling in het algemeen. Implementatie van deze acties levert dan ook baten over meerdere sectoren.

- Dit moet ondersteund worden door materialenpaspoort, dat materialen en producten over hun levensduur volgt op een Europees (en idealiter wereldwijd) niveau
 - Het minimum percentage voor terugvloeit moet over tijd verhoogd worden
 - **Dit moet door de overheid gedaan worden**
- Ondersteun recycling actief, bijvoorbeeld door minimale fractie recyclaat te vereisen voor subsidies en bij inkoop
 - **Dit moet door de overheid gedaan worden**
- Ontwikkel & implementeer een skills agenda voor recycling*
 - **Dit moet door de overheid gedaan worden**

5 Methode

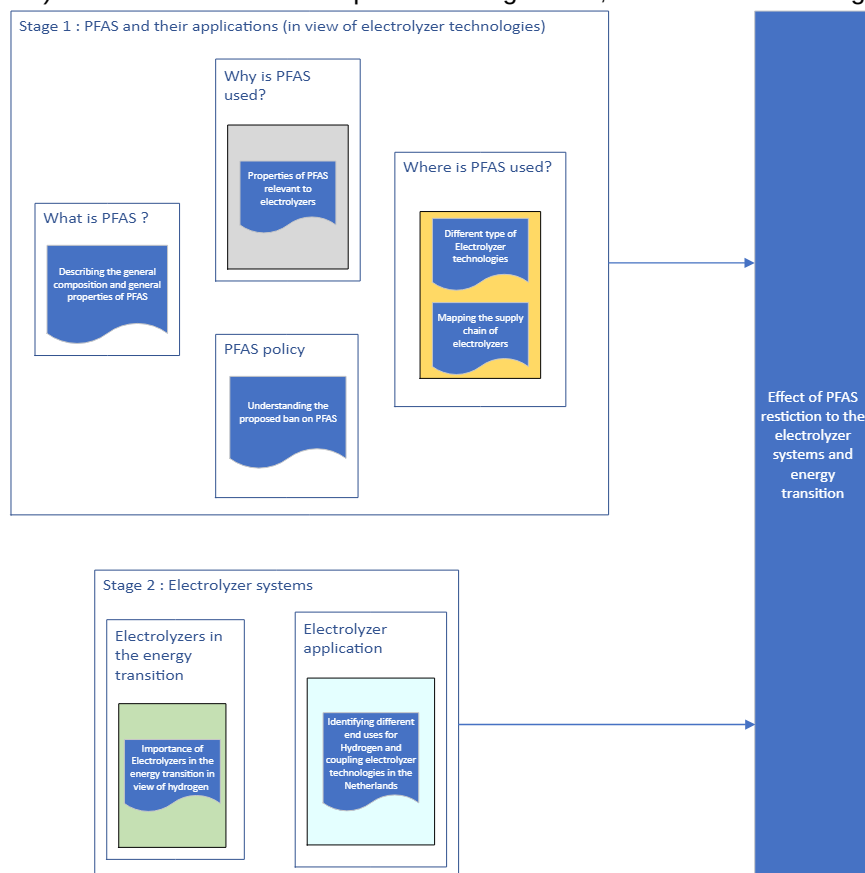
5.1 Methode in vogelvlucht

Deze studie bestond uit twee takken:

1. Een analyse van de electrolyzer productieketen, met specifieke focus op:
 - a. In welke segmenten van de productieketen PFAS gebruikt worden, opgesplitst voor verschillende electrolyzer technologieën;
 - b. Wat de weglekrisico's van PFAS zijn in de verschillende productiestappen; en
 - c. Welke alternatieve materialen in ontwikkeling zijn, inclusief een inschatting wanneer deze op de markt kunnen komen.
2. Exploratie van mogelijke oplossingen om PFAS gebruik in de electrolyzer productieketen te verminderen.

5.2 Productieketen analyse

De productieketen analyse werd gedaan op basis van literatuur review, expertise van het project team en discussies met TNO experts Energy Transition Studies. Eerste resultaten zijn gevalideerd in gesprekken met TeijinAramid en Chemours; en vervolgens in de workshop (zie 5.3). Hiervoor is een twee-staps methode gebruikt, zoals visueel samengevat in Figuur 5.1:



Figuur 5.1: Visualisatie van analysemethode

In de eerste stap waren de onderzoeksvragen:

- Wat zijn de kenmerken van PFAS, die deze materialen zo belangrijk maken in electrolyzer productie?
- Wat zijn de stappen in de productieketen waar PFAS gebruikt worden en in hoeverre zijn deze stappen cruciaal?
 - o Dit is voor alle vier types electrolyzer technologie in parallel gedaan
- Wat is het effect van de PFAS-uitfasering op de productiestappen waar PFAS in gebruikt worden?
 - o Als onderdeel hiervan zijn alternatieve materialen in kaart gebracht door gesprekken met TNO-experts die betrokken zijn bij onderzoek hiernaar.¹⁵

De uitkomst van deze stap was een duidelijk begrip op welke productiestappen de PFAS-uitfasering het grootste effect kan hebben.

De tweede stap van de analyse focuste op de verschillende toepassingen van electrolyzer technologie, om in te schatten of er ruimte is om PFAS-luwe technologieën breder in te zetten. In deze stap werd eerst een shortlist gemaakt van toepassingen die belangrijk zijn voor de Nederlandse samenleving en economie:

- i) Windpark op zee
- ii) Zonnepark op land
- iii) Waterstof tankstation (voor transport)
- iv) GW-schaal windpart op land
- v) Kleinschalige industrie
- vi) Kerosine-alternatieven (*sustainable aviation fuel*)

Voor elke toepassing is er een set van vereisten opgesteld (waarbij overlap tussen toepassingen acceptabel was) en is getoetst hoe goed elke technologie aan de vereisten voldoet. Op grond van deze toetsing is voor elke toepassing aangegeven welke technologie(ën) relevant is (zijn).

Om weglekrisico's te analyseren, werd een gesimplificeerde productieketen van membranen geschetst^{16,17} en getoetst tegen bestaande risico's van PFAS.^{18,19} Resultaten van deze analyse zijn in de workshop (§5.3) en in individuele gesprekken met experts gevalideerd.

5.3 Exploratie van interventies

Mogelijke interventies werden onderzocht tijdens een fysieke workshop in drie componenten:

1. Beschrijving van het probleem
2. Duiden en prioriteren van barrières tot opschaling van alternatieven
3. Voorstellen van interventies om barrières te overkomen

In de eerste fase werden resultaten van de eerdere analyse aan deelnemers gepresenteerd en gevalideerd in een ronde-tafel discussie.

Voor de tweede en de derde fase werden deelnemers in twee groepen verdeeld: één groep focuste op alternatieve materialen en de tweede focuste op procesaanpassingen. Voor het duiden van barrières werd een semigestructureerde brainstorm toegepast: deelnemers werd verzocht om individueel zoveel mogelijk barrières te noteren. Deze barrières werden vervolgens geclusterd en de clusters werden geprioriteerd op:

- urgentie (wat moet snel opgelost worden),
- volgordelijkheid (wat is waarvan afhankelijk) en
- complexiteit (hoe moeilijk is het oplossen).

De prioriteiten werden tenslotte tussen de twee subgroepen teruggekoppeld.

In de derde fase bleven deelnemers aan dezelfde sub-onderwerpen werken maar werden de groepen uitgesplitst in tweetallen. Elk tweetal koos één barrière en schetste mogelijke oplossingen (met het expliciete verzoek om ‘out of the box’ te denken). Elk tweetal deed vervolgens een ‘elevator pitch’ naar de rest van de subgroep en werden opbouwende kritiek en suggesties genoteerd (door de facilitatoren). Tenslotte werden de voorgestelde oplossingen door de twee subgroepen aan elkaar teruggekoppeld om synergiën en afhankelijkheden tussen de twee ‘armen’ te duiden.

Deelnemers aan de workshop waren:

Naam	Affiliatie	Naam	Affiliatie
Martijn Bax	EZK	Soheil Rostami	Battolyser
Ir Mark Breed	TeijnAramid	Dr Timo Sciarone	PTG
Dr Arend de Groot	TNO	Lennart van der Burg	GroenvermogenNL
Dr Samira Farahani	NLHydrogen	Paul Verbraak	EZK
Dr Walter Goorts	Bosch	Dr Ron Oren	TNO Vector (facilitator)
Dr Ahmadreza Rahbari	XINTC	Harshraj Gali	TNO (co-facilitator)
Dr Danny Roolvink	HyET		

5.3.1 Vastlegging & verwerking

Deelnemers werd gevraagd om discussies zoveel mogelijk in post-its vast te leggen tijdens de workshop. Daarnaast werden aantekeningen gemaakt door de (co-)facilitatoren, m.n. tijdens de terugkoppelingen (plenair en tussen tweetallen). Na afloop van de workshop zijn alle post-its en aantekeningen eerst gedigitaliseerd en daarna geanalyseerd en bijeengebracht tot concept inzichten. Deze conclusies zijn per email gevalideerd met de deelnemers, voordat finale inzichten in deze rapportage gebruikt zijn.

Referenties

-
- ¹ [Registry of restriction intentions until outcome - ECHA \(europa.eu\)](#)
 - ² [Kamerbrief over update aanvullende routekaart wind op zee | Kamerstuk | Rijksoverheid.nl](#)
 - ³ [Klimaatakkoord | Publicatie | Klimaatakkoord](#)
 - ⁴ [Hydrogen Europe PFAS position paper](#)
 - ⁵ [Z. Zhang *et al.*, Journal of Power Sources, 2023](#)
 - ⁶ [Minnesota Pollution Control Agency, "PFAS in the metal plating and finishing industry", 2002](#)
 - ⁷ Interviews met TNO-experts op electrolyzer technologie
 - ⁸ M. R. Weimar *et al.*, "Cost Study for Manufacturing of Solid Oxide Fuel Cell Power Systems," Pacific Northwest National Laboratory for U.S Department of Energy, 2013
 - ⁹ o.a. op basis van eerdere interne TNO-studies naar toepassingen van electrolyzers
 - ¹⁰ [K. Weitz *et al.*, Science of The Total Environment, 2024](#)
 - ¹¹ <https://ionomr.com/solutions/pemion/>
 - ¹² <https://frontis-energy.com/tag/nexar/>
 - ¹³ [M. Hwang *et al.*, Journal of Membrane Science, 2021](#)
 - ¹⁴ TeijnAramid, verbale communicatie
 - ¹⁵ Kanttekening: TNO heeft geen zicht op materialenonderzoek dat individuele bedrijven achter gesloten deuren doen. De problematiek rond integratie van alternatieve materialen in de electrolyzer stack (zoals beschreven in §3.2.1) wordt alleen maar versterkt door unilateraal onderzoek.
 - ¹⁶ [PTFE Products manufacturers & Supplier - Standard Fluoromers \(standard-ptfe.com\)](#)
 - ¹⁷ [Poly\(tetrafluoroethene\) \(Polytetrafluoroethylene\) \(essentialchemicalindustry.org\)](#)
 - ¹⁸ [Learn about PFAS | ATSDR \(cdc.gov\)](#)
 - ¹⁹ [Cross-cutting story 3: PFAS — European Environment Agency \(europa.eu\)](#)

ICT, Strategy & Policy

Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
www.tno.nl