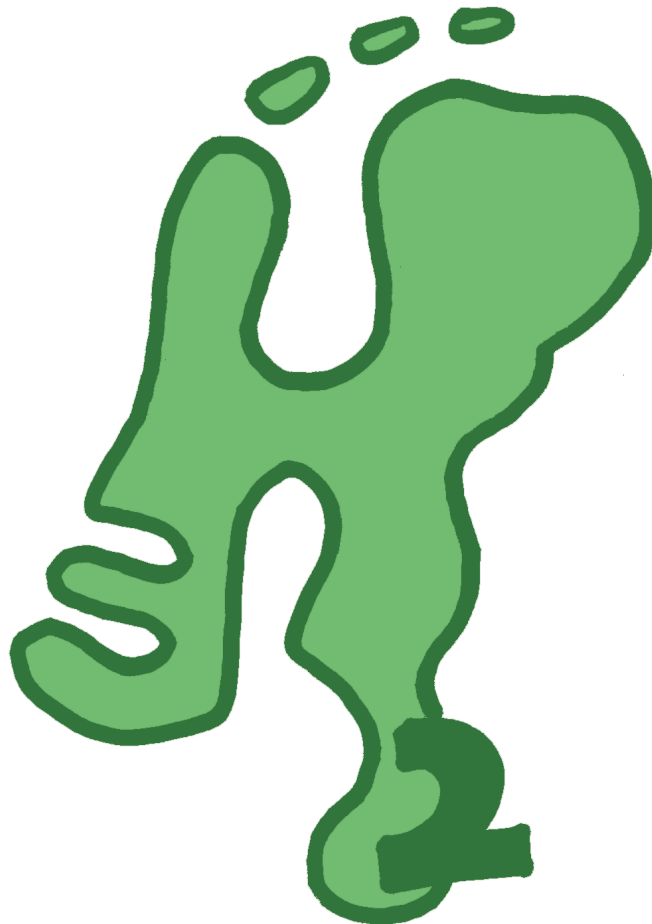


Overzicht van Nederlandse waterstofinitiatieven, -plannen en -toepassingen

Input voor een Routekaart Waterstof



Inhoudsopgave

Samenvatting.....	3
1. Inleiding	4
2. Waterstof voor verduurzaming van grondstoffen, hoge-temperatuur-warmte en gascentrales....	6
3. Waterstof in de energiesector voor systeemintegratie, flexibiliteit en energieopslag	18
4. Waterstof voor nul-emissie verkeer en vervoer	27
5. Waterstof voor lagetemperatuur-warmte	40
6. R&D voor groene waterstofproductie en solar fuels.....	44
7. Ondersteunende projecten voor markt en beleid	54
8. Stakeholders en regionale en overkoepelende initiatieven	56
9. Conclusies	62
Bijlage: Lijst geraadpleegde personen.....	65
Index van initiatieven.....	66

Colofon

Onderzoek: Dr. R.J.F. (Remco) Hoogma, Dwarsverband

Opdrachtgever RVO / TKI Gas

Periode: september – oktober 2017

Afbeelding voorpagina: Paul Hoogma

Alle afbeeldingen zijn ontleend aan internet en voor zover bekend vrij van auteursrechten, mocht dit niet het geval zijn neem dan contact op via www.dwarsverband.nl.

Samenvatting

Het ministerie van EZK heeft aan TKI Gas gevraagd om de regie te voeren bij de totstandkoming van een routekaart voor waterstof op basis van een inventarisatie van initiatieven, plannen en toepassingen die als groeikernen voor waterstof in Nederland zouden kunnen dienen. Opgenomen zijn initiatieven die momenteel in uitvoering zijn, projecten die recent zijn afgerond en waarop een vervolg overwogen wordt, en initiatieven in idee- of planfase. De scope is vooral de komende 5 jaar, maar sommige verder weg gelegen plannen zijn toch behandeld als deze prominent in de discussies van vandaag naar voren komen.

Er zijn veel initiatieven en projecten. Enigszins afhankelijk van waar grenzen tussen initiatieven worden getrokken, bijv. of elk tankstation als apart initiatief wordt beschouwd, is sprake van ruim honderd initiatieven. De initiatieven zijn in dit rapport geordend naar energiefunctie, aangevuld met R&D voor groene waterstofproductie en solar fuels, en ondersteunende projecten voor marktontwikkeling en beleid.

In de meeste gevallen gaat het om ideeën, plannen en haalbaarheidsstudies. Ook zijn er veel R&D-projecten voor techniekontwikkeling, vaak via EU-programma's, waar Nederlandse spelers zich tamelijk succesvol in bewegen.

Projecten waarbij daadwerkelijk iets "in het veld" gebeurt zijn, afgezien van de gevestigde toepassingen van waterstof in industrie, meestal projecten in mobiliteit (tankstations, bussen, personen- en vrachtauto's, e.a.). Bij het bouwen van business cases voor waterstof kijken partijen graag naar mobiliteit als sector met (potentieel) de hoogste toegevoegde waarde voor waterstof, maar de vloten en dus afzetvolumes zijn nog klein. In de industrie zijn afzetvolumes groot maar vindt men groene waterstof nog te duur.

Andere lopende of voorgenomen projecten "in het veld" (naast mobiliteit) zijn power-to-

gas (methaan) Rozenburg, elektrolyse voor netbalancing/stabiliteit bij Zuidwending (vanaf sept. 2018), uitwisseling van waterstof tussen bedrijven in Waterstofsymbiose Zeeland (eind 2018), waterstofbackbone Delfzijl (voorgenomen), uitbreiding elektrolysecapaciteit AkzoNobel, elektrolyse voor upstream blending in raffinaderij, kleinschalige ammoniakproductie met wind en zon op Goeree Overflakkee, waterstof voor verwarming in bestaande bouw (eerst bijmenging, later 100%) op Goeree Overflakkee, beproeving van een reversibel brandstofcelsysteem, en waterstofproductie bij een windmolen voor vuilniswagens in Noord-Holland.

Er zijn drie initiatieven voor grootschalig waterstofproductie uit aardgas met CO₂-afvang en opslag voor inzet in gascentrales en petrochemische industrie voor hogetemperatuurwarmte en feedstock. Het initiatief rond de Magnumcentrale is het meest concreet, getrokken door de potentieel sterke alliantie Nuon-Statoil-Gasunie, met geplande realisatie in 2023. De kracht van het concept is de schaalgrootte: er is substantieel effect op CO₂-uitstoot, en het rechtvaardigt de opbouw van infrastructuur voor leidingtransport en seizoensopslag in zoutcavernes. Tegelijk is de schaal een uitdaging: de absolute kosten zijn hoog, waardoor de totale financiële ondersteuning ook aanzienlijk zal moeten zijn.

Het inzicht dat je windenergie niet met stroomkabels alleen van de Noordzee kunt afvoeren leidt tot veel interesse in windwaterstof. Het gaat hierbij niet meer om benutting van tijdelijke overschotten, maar om benutting van capaciteit bovenop de maximale afvoer via stroomkabels.

Het rapport besluit met een overzicht van de betrokken stakeholders en regio's (provincies, gemeenten, landsdelen) bij de initiatieven in Nederland.

1. Inleiding

Eind 2016 stuurde het kabinet de Energieagenda naar de Tweede Kamer. Met deze agenda wil het kabinet een helder en ambitieus perspectief schetsen voor de transitie naar een betrouwbare, betaalbare, veilige en CO₂-arme energievoorziening. Waterstof maakt hiervan onderdeel uit.

In Nederland wordt waterstof als industrieel gas al op grote schaal geproduceerd en gedistribueerd voor gebruik als basisproduct in industrie, zoals bij olieraffinage en ammoniakproductie. Belangrijk is de productie van waterstof te vergroenen. Voor waterstof wordt een aanvullende rol gezien in de industrie bij hoge temperatuur warmtevoorziening, als medium voor seizoensopslag resp. buffer van hernieuwbare energie, en als energiedrager voor mobiliteit. In de komende jaren dient een landelijk dekkend netwerk van tankstations te worden opgebouwd in samenhang met de verwachte groei van het aantal voertuigen. Een kleinere rol wordt gezien bij lagetemperatuur ruimteverwarming. Hernieuwbare gassen zoals biogas en waterstof kunnen de huidige aardgasvraag verduurzamen, maar inzet van deze gassen in andere functionaliteiten, met name transport en industrie wordt meer belang toegedicht omdat daar minder opties voor verduurzaming zijn.¹

Het ministerie van EZK heeft aan TKI Gas gevraagd om de regie te voeren bij de totstandkoming van een routekaart voor waterstof op basis van een inventarisatie van initiatieven, plannen en toepassingen die als groeikernen voor waterstof in Nederland zouden kunnen dienen. Om actueel beleid op het gebied van waterstof mogelijk te maken moet duidelijk zijn hoe waterstof in de komende jaren tot ontwikkeling kan komen, hoe specifieke kenmerken een stimulerende of faciliterende rol kunnen spelen en welke rol de spelers met hun innovaties daarin hebben.

TKI Gas heeft opdracht verleend aan Dwarsverband voor het in kaart brengen van de waterstofinitiatieven, -plannen en -toepassingen

in Nederland. De inventarisatie moet ook een beeld schetsen van de verwachtingen van de verschillende spelers en initiatieven voor de komende 5 jaar. Aan de betrokkenen is gevraagd hoe zij zouden willen dat waterstof door de overheid gestimuleerd wordt, en hoe het past bij hun eigen sterkten, ambities, ideeën en ontwikkelrichtingen.

Indeling van dit rapport

Het rapport volgt de indeling in vier energiefunctionaliteiten uit de Energieagenda:

- Hoofdstuk 2 behandelt initiatieven, plannen en toepassingen voor waterstof in de industrie voor verduurzaming van grondstoffen, hogetemperatuur-warmte en gascentrales.
- Hoofdstuk 3 gaat over waterstof in de energiesector voor systeemintegratie, flexibiliteit en energieopslag. (De functionaliteit kracht en licht is dus over twee hoofdstukken verdeeld.)
- Hoofdstuk 4 betreft waterstof voor nul-emissie verkeer en vervoer.
- Hoofdstuk 5 gaat over waterstof voor lagetemperatuur-warmte in gebouwen voor verwarming.
- Hoofdstuk 6 gaat in op initiatieven voor techniekontwikkeling voor groene waterstofproductie met toepassingen voor alle vier energiefuncties. Ook solar fuels worden hier behandeld.
- Hoofdstuk 7 omvat ondersteunende projecten voor marktontwikkeling en beleid.

In de inventarisatie zijn initiatieven opgenomen die momenteel in uitvoering zijn, projecten die recent zijn afgerond en waarop een vervolg overwogen wordt, en initiatieven in idee- of planfase. De scope is hierbij voornamelijk de komende 5 jaar, maar sommige verder weg gelegen plannen worden toch behandeld als deze prominent in de discussies van vandaag naar voren komen. Initiatieven betreffen soms een combinatie van functionaliteiten (bijvoorbeeld waterstofproductie uit windoverschotten voor industrie); in dat geval is een initiatief met enige willekeur onder één functionaliteit geplaatst. Initiatieven waarbij water-

¹ Ministerie van Economische Zaken, Energieagenda. Naar een CO₂-arme energievoorziening, december 2016.

stof het halffabrikaat vormt in power-to-X processen zijn ook meegenomen. Europese projecten met Nederlandse partners zijn ook vermeld. In enkele gevallen zijn initiatieven elders in Europa opgenomen als deze een richting aangeven voor Nederland, maar dit overzicht heeft uitdrukkelijk niet het doel om de initiatieven in Nederland internationaal te benchmarken.

Bij de beschrijvingen komt aan bod: wat is het doel van een initiatief, de concrete voorgenomen activiteiten en eventuele resultaten tot dusver? Gaat het om een haalbaarheidstudie, technische ontwikkeling, praktijkproef of demonstratie, of opschaling? Wat zijn mogelijkheden voor herhaling en verdere uitrol? In het geval van een plan: wat is nodig om dit tot uitvoering te brengen: innovaties, deelname van partijen, politiek draagvlak, financiële middelen, aangepaste regelgeving?

Hoofdstuk 8 geeft een overzicht van de betrokken stakeholders en regio's (provincies, gemeenten, landsdelen) bij de waterstofinitiatieven, -plannen en toepassingen in Nederland. Er wordt ook ingegaan op internationale industrieconsortia die zich nu richten op andere landen maar waarvan de deelnemers veelal ook in Nederland gevestigd zijn. Hoofdstuk 9 tenslotte trekt conclusies.

Het overzicht is uiteraard een momentopname en is tot stand gekomen door internetonderzoek, bevragen van experts in het veld, en door contactpersonen van gevonden projecten te benaderen voor aanvullende informatie. Vertrouwelijke informatie is niet gebruikt.. Referenties naar geschreven bronnen staan bij de project-beschrijvingen, en de bijlage geeft een overzicht van geraadpleegde personen met vermelding van organisatie en betreffende initiatieven.

2. Waterstof voor verduurzaming van grondstoffen, hoge-temperatuur-warmte en gascentrales

2.1 Inleiding

Waterstof is een veelgebruikte grondstof in de industrie. De grootste huidige markten voor waterstof zijn als feedstock voor ammoniak / kunstmest (60% van huidige waterstofgebruik), in kraakprocessen in olieraffinaderijen en hydrotreatment in de biobrandstof-industrie. Het totaal in Nederland is 9,2 miljard m³ H₂, ofwel 828 kton, waarvan 80% door een reforming-proces en 20% als bijproduct uit de chemie wordt geproduceerd.² Het gebruik concentreert zich in Rijnmond, Delfzijl, Terneuzen, Geleen en IJmuiden.

Het aandeel van elektronen in de energiemix gaat volgens cijfers van IEA en EC verdubbelen van ongeveer 20% vandaag naar bijna 40% in 2050. Het overige energieverbruik blijft in de vorm van moleculen. Vergroening hiervan kan worden bereikt met o.a. waterstof. Mogelijke toepassingen op de korte termijn zijn de levering van hogetemperatuur-warmte aan industrieën en het gebruik van waterstof in gascentrales. Mobiliteit is een andere mogelijke markt.

In dit hoofdstuk komen de volgende initiatieven aan bod:

- §2.2: Meerdere, deels gerelateerde plannen voor grootschalig waterstof uit aardgas met CC(U)S³ voor gascentrales als groeikern voor hogetemperatuur-warmte en feedstock voor industrie met landelijk bereik via waterstofleidingen.
- §2.3: Initiatieven voor 10-30 MW elektrolyzers in (petro)-chemie als eerste stappen naar grootschalige elektrolyse in industrie.
- §2.4: Waterstofsymbiose Terneuzen: uitwisseling van industrieel waterstof via een aangepaste aardgasleiding).
- §2.5: Tata Steel heeft eigen waterstofproductie en waterstofvrij kooksofengas en onderzoekt de beste inzet).
- §2.6: Brandstofcelcentrales in de industrie.

² Cijfers uit studie Berenschot/TNO, zie 2.2.3.

³ CCS = Carbon Capture and Storage; CCUS = Carbon Capture, Utilisation and Storage.

2.2 Waterstof uit aardgas met CC(U)S voor gascentrales en petrochemische industrie

Er zijn drie initiatieven voor grootschalig waterstofproductie uit aardgas met CO₂-afvang en opslag voor inzet in gascentrales en petrochemische industrie voor hogetemperatuur-warmte en feedstock. Het eerste rond de Magnumcentrale is het meest concreet. Er is overlap tussen de bedrijven die betrokken zijn bij het waterstofproject voor de Magnumcentrale en bij h-Vision. Dit maakt mogelijk dat de projecten elkaar op enige wijze ondersteunen en versterken. Een derde initiatief dat aan beide raakt is van Berenschot en TNO. Dat is een meer generiek concept, met dezelfde transitievisie en technische uitgangspunten, maar zonder de uitwerking bij specifieke energiecentrales. Tussen de initiatieven zijn contacten geweest maar het gaat om afzonderlijke plannen, die elkaar niet uitsluiten.

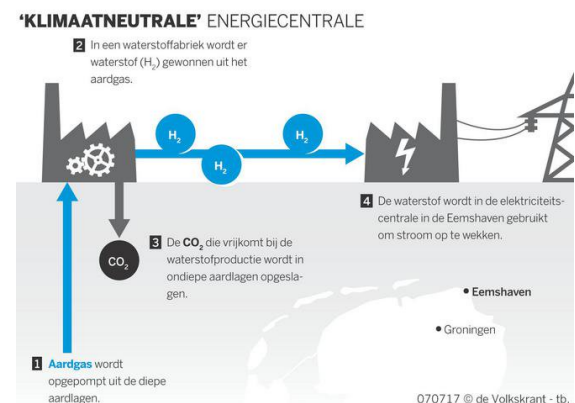


Fig. 1 Schema energiecentrale op waterstof (bron De Volkskrant)

2.2.1 Waterstof voor de Magnumcentrale

Het aanbod van energie uit zon en wind blijft in de komende decennia groeien. Nuon ziet een behoefte aan flexibele opwekcapaciteit. Gascentrales zijn hiervoor geschikt, maar die moeten dan ook worden gedecarboniseerd om de nationale CO₂-ambitie voor 2030 te kunnen halen (49% CO₂-reductie t.o.v. 1990 volgens het regeerakkoord). Nuon wil per 2023 één van de drie units van de Magnumcentrale in Eemshaven laten overschakelen op waterstof dat is

verkregen uit aardgas met CCS. Hierdoor wordt er ervaring op gedaan met grootschalig gebruik van waterstof en wordt de infrastructuur ontsloten. Vanaf 2030 kan dan geleidelijk overgeschakeld worden naar waterstof op basis van wind- en zonne-energie. Dit geeft de tijd om de nodige kostendalingen in elektrolyse te laten plaatsvinden. De gascentrale heeft 3 'combined cycle' gasturbines (CCGT) met elk een capaciteit van 440 MW. Eén eenheid in continu-bedrijf stoot 1,3 Mton CO₂ per jaar uit.

Nuon onderzoekt de inzet van waterstof met Statoil (gasleverancier) en Gasunie (transport en opslag). Er zijn twee varianten: aardgas splitsen met CCS in Noorwegen en transport van waterstof naar Nederland, of Noors aardgas aanvoeren naar Nederland, splitsen alhier en transport van CO₂ naar Noorwegen (per schip of bij grote volumes eventueel pijpleiding). In beide gevallen gaat het om nieuwe waterstofproductiecapaciteit. De tweede optie is momenteel de base case omdat de bouw van een centrale hier aanzienlijk goedkoper lijkt te kunnen. De beoogde CCS-locatie is een nieuwe te ontwikkelen locatie voor de kust van Noorwegen, een project van Statoil waar Shell en Total zich recent bij hebben aangesloten.

Eemshaven, knooppunt van gas- en elektrische infrastructuur, verbonden met offshore windparken en met genoeg ruimte, is de voorkeurslocatie voor een eventuele waterstoffabriek in Nederland. De productie danwel aanlanding van waterstof kan een groeikern vormen voor infrastructuuropbouw van waterstof en bedienen van andere toepassingen in Noord-Nederland en daarbuiten.

De go/no-go beslissing voor het project valt in 2020 aan het eind van een keten van besluitvorming. De Noorse overheid neemt in 2019 een investeringsbesluit over het CCS-project. Het moet helder zijn hoe het zit met de mogelijkheden voor cross-border CO₂-transport. En er moet zekerheid zijn over overheidssteun, zij het in de vorm van een exploitatiesubsidie, investeringssteun of door socialisatie van kosten of een combinatie daarvan. Steun is nodig omdat er sprake zal zijn van een onrendabele top. Na een go-besluit is 3 jaar bouwtijd nodig, zodat de waterstofcentrale in 2023 in bedrijf kan gaan.

Nuon is zich bewust van mogelijke kritiek dat CCS nog steeds fossiel betekent. Heldere

en vroegtijdige communicatie met stakeholders is daarom essentieel, en daarbij is ook een belangrijke rol weggelegd voor de overheid. De argumentatie is dat grote volumes waterstof nodig zijn voor de opbouw van infrastructuur (als rechtvaardiging voor investeringen). Groene waterstof is daarvoor nu nog te duur en nog niet in grote hoeveelheden beschikbaar. Elektrolyse moet flink goedkoper worden, en er moet voldoende aanbod goedkopere hernieuwbare stroom komen.⁴

Ammoniak als opslagmedium na 2030

Nuon kijkt ook naar de toepassing van ammoniak als energiedrager. Ammoniak heeft een hoge energiedichtheid (de helft van diesel), is goed op te slaan, en ook te importeren. Het maakt mogelijk om hernieuwbare energie te verplaatsen in tijd (opslag) en ruimte (import). Nuon nam deel in het onderzoeksproject power-to-ammonia van ISPT. Dit onderzoek wees uit dat de route met ammoniak uit duurzame energie nu nog te duur is, met name door de hoge kosten van elektrolyzers. Volgens modellering van de energiemarkt zullen de energieoverschotten uit zon en wind in Nederland tot 2030 nog beperkt zijn. Op de langere termijn verwacht Nuon dat toepassing van ammoniak een goede mogelijkheid is voor opslag van duurzame energie.

De bouwstenen voor de inzet van ammoniak zijn er. Ammoniak moet voor gebruik in de gasturbine worden gekraakt, een bekend proces maar het moet nu op een schaal gebeuren waarop dat niet eerder is gedaan. Het flexibel maken van het proces is een uitdaging, die verder onderzoek vraagt. Nuon werkt voor de studies naar ammoniak samen met TU Delft.⁵ In de eindsituatie (na 2030) zou sprake kunnen zijn van een opslagtank van 60.000 m³, waarmee een miljoen huishoudens tien dagen van stroom kan worden voorzien.

⁴ De efficiency van elektrolyse is nu 50 kWh per geproduceerde kg waterstof, dus met een kWh-prijs van 5 €ct kom je al op €2,5/kg aan alleen elektriciteitskosten, en dat is duurder dan grijze waterstof (±€1,5). Op bepaalde uren is elektriciteit wel goedkoop, maar als de elektrolyser alleen op die momenten draait zijn de afschrijvingskosten weer heel hoog.

⁵ Er is subsidie aangevraagd bij TKI Energie voor haalbaarheidsonderzoek en laboratoriumtests bij TU Delft.

In het plan is ook een rol weggelegd voor de waterstof producerende nikkel-ijzer elektrische batterij 'battolyser' die TU Delft ontwikkelt (zie §6.2).

Herhalingspotentieel gascentrales

De Magnumcentrale is ontworpen voor multi-fuel-syngas met kolenvergassing als uitgangspunt maar met mogelijkheid om andere gassen bij te stoken (aardgas of biosyngas). De gekozen brandertechnologie en turbines van Mitsubishi zijn daarom relatief eenvoudig aan te passen naar puur waterstof, maar in principe zijn ook andere gascentrales geschikt om waterstof te verstoren.

Als de ombouw van de Magnumcentrale naar waterstof lukt kunnen ook andere gascentrales op deze manier koolstofvrij worden. In Nederland staat 6 GW tamelijk nieuwe capaciteit van verschillende bedrijven. Vanuit Magnum kunnen andere toepassingen ook worden bediend, zoals chemie Delfzijl, of stadsnetwerken (vgl. project Leeds). Ook kan de waterstof met pijpleidingen naar andere gebieden buiten Noord-Nederland worden getransporteerd.

CCS-project Statoil, Total en Shell

In 2016 is een haalbaarheidstudie uitgevoerd voor een fullscale CCS-project in Noorwegen. Statoil heeft de studie naar de opslag gedaan. Op basis van deze studie heeft de Noorse regering steun gegeven aan de ontwikkeling van een nieuwe CCS-project in Noorwegen. Statoil heeft de daaruit voortvloeiende tender gewonnen voor de ontwikkeling van de opslag. Inmiddels wordt dit deel medege dragen door Shell en Total.

Het doel van het CCS-project is in eerste instantie om af te vangen CO₂ van drie bedrijven aan de oostkust van Noorwegen per schip naar de westkust van Noorwegen te vervoeren (600 km). Hier wordt de CO₂ in buffertanks geladen waarna de CO₂ met een pijpleiding naar de offshore opslag wordt vervoerd (50 km) waarna het vanaf de zeebodem in het reservoir wordt geïnjecteerd. Er wordt actief geworven om meer industrieel af te vangen CO₂ aan te trekken. In 2019 wordt de investeringsbeslissing genomen.

Om de kans van slagen te verhogen is het van belang om een grotere markt te ontwikkelen voor CO₂-arme waterstof. Hiervoor wil Sta-

toil de hele waardeketen betrekken en ook samenwerken met andere upstream partijen. De markt is te pril om al zulke projecten in concurrentie uit te voeren, ziet Statoil. Daarom wordt tegelijk naar afzet in Nederland en VK gekeken. Voor een groot waterstofproject in Leeds doet Statoil een feasibility study voor het CCS-element van implementatiescenario's (1x Leeds, 10x Leeds en 50x Leeds).

Voor cross-border transport van CO₂ moeten juridische hordes worden genomen: bijvoorbeeld de ratificering van de aanpassing van artikel 6 van het London Protocol. Zonder de aanpassing kan het London Protocol een barrière zijn voor transport van CO₂ over landsgrenzen voor permanente opslag offshore. Momenteel hebben enkel Nederland, VK en Noorwegen deze verdragswijziging van de Londonprotocollen geratificeerd. Alternatieven zullen moeten worden onderzocht.

2.2.2 Rotterdam: concept h-Vision

h-Vision (voorheen Decagas) van TNO betreft een grondige verkenning van grootschalige decarbonisatie van aardgas op de Maasvlakte met afvoer van CO₂ via bestaande pijpleidingen voor opslag in de gasvelden P18 en Q1.⁶ Het idee is vergelijkbaar met de plannen voor de Magnumcentrale en heeft ook overeenkomsten met het hiernavolgende concept van Berenschot (waarvoor TNO de technische onderbouwing leverde).

Het idee van h-Vision is om in eerste instantie de waterstof te gebruiken voor gebruik in de (petro)chemie als grondstof en als brandstof voor ondervuring, en daarnaast voor elektriciteitsproductie in plaats van kolen. In de kolencentrales zou dan een gasturbine voorgeschakeld moeten worden. De efficiency van aardgas naar elektriciteit zou 45% zijn. Ook is een bestaande gascentrale in beeld. Er wordt gesproken over 2.500 MW elektriciteit, waarvoor ca. 5,5 GW aan aardgasreformers nodig is, nieuw te bouwen op de Maasvlakte. Hiervoor zijn 3 van de allergrootste SMR- of ATR-installaties nodig die beschikbaar zijn. Ook de bestaande waterstoffabrieken kunnen in h-Vision worden opgenomen. Het hele concept

⁶ Rotterdam h-Vision Project. Getting started with energy transition, Maurice Hanegraaf, Ernest Groensmit, TNO, presentatie voor ministerie van EZK, 9 oktober 2017.

kan worden uitgevoerd met standaard beschikbare technologie en benutting van bestaande assets, en kan in 2022 – 2025 gereed zijn. Er zijn geen onderzoeksvragen rond productie, afvang en opslag. Er is gebruik gemaakt van zaken die zijn uitgezocht in het ROAD CCS-project (Rotterdam Opslag en Afvang Demonstratieproject) van Uniper en Engie Energie. TAQA, operator van veld P18, heeft een opslagvergunning voor 60 Mton. Een andere mogelijkheid is gebruik te maken van de CCS-locaties van Statoil in Noorwegen. Meerdere locaties betekent risicospreiding.



Fig. 2 Locatie veld P18. Uniper en Engie zijn rechtsopvolgers van Eon en GDF Suez (bron ROAD-project)

Parallel hieraan kan de waterstof ook worden geleverd aan raffinaderijen en chemische industrie, en aan mobiliteit. Verwezenlijking van h-Vision zou 4 miljard m³/jaar aardgas vergen en 12 Mton/jr CO₂-reductie kunnen opleveren (de CO₂-doelstelling voor Rotterdam is 14 Mton/jaar reductie in 2030 t.o.v. 2005). Daarvan zou 8 Mton/jr CO₂ onder de grond gaan, hetgeen op deze schaal de kosten zou beperken tot €15/ton (plus afvangkosten). Het concept vergroot de beschikbaarheid van koolstofvrije elektriciteit voor industrie zolang offshore wind nog onvoldoende kan leveren. De verwachte capaciteit offshore wind is 10,5 GW in 2030, achterblijvend bij het beoogde groeipad naar 35 GW in 2050. De extra 2.500 MW

elektrisch vermogen door h-Vision verbetert de vestigingsvoorwaarden voor industrie, zowel huidige als nieuw aan te trekken industrie met uiteenlopende power-to-products processen. h-Vision stelt dat vervanging door grootschalige elektrolyse pas na 2040 mogelijk is als zowel offshore capaciteit als elektrolysetechniek volwassen zijn geworden.

Er is een businessmodel uitgedacht en het plan is gevalideerd door het Wuppertal Instituut dat eerder een studie voor Havenbedrijf Rotterdam heeft gedaan met transitiepaden voor een klimaatneutraal havengebied. In elk van deze transitiepaden speelt hernieuwbare elektriciteit en waterstof een hoofdrol. TNO heeft de uitwerking van de concepten, de positionering en de evaluatie door het Wuppertal Instituut gefinancierd met eigen middelen en een subsidie van Deltalinqs, de vereniging van Rotterdamse havenbedrijven. Verscheidene bedrijven hebben meegekeken. TNO wil een Rotterdams industrieel consortium vormen met deelname van het Havenbedrijf waarin zaken verder moeten worden uitgewerkt in een haalbaarheidsstudie.

Op het ogenblik ligt er een verzoek bij 16 partijen om deel te nemen aan dit platform, waaronder energieproducenten (TAQA, Uniper, Engie, Eneco, Shell, Statoil), waterstofproducenten (Air Liquide, Air Products, Linde Gas), Gasunie, Havenbedrijf, gemeente, Deltalinqs en ministerie van EZK. TNO wil de leiding dan overdragen aan dit consortium en betrokken blijven voor onderzoek van bijv. offshore geologie, modellering en technologieselectie.

Naast levering in Rotterdam is ook levering van waterstof per pijpleiding aan Chemelot een mogelijkheid. Hier verbruiken OCI, Sabic, en WKC Swentibold samen 2-3 miljard m³ aardgas. De ammoniakindustrie kan vraagfluctuaties dempen door bij hoge vraag naar waterstof over te schakelen op de eigen SMR-installatie. Dit voorkomt investeringen in waterstofopslag. Op Chemelot afgevangen CO₂ kan per schip of pijpleiding naar Rotterdam.

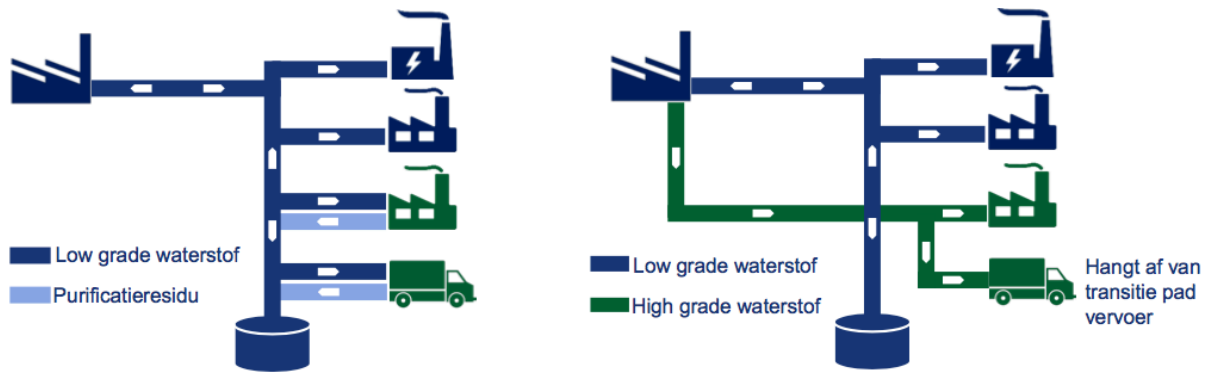


Fig. 3 Twee varianten van de voorzieningsketen van waterstof in het concept van Berenschot en TNO

2.2.3 Studie Waterstof uit gas met precombustion CCS

Berenschot en TNO hebben de haalbaarheidstudie *Waterstof uit gas met precombustion CCS* uitgevoerd.⁷ Deze studie is gefinancierd door Topsector Systeemintegratie, met medefinanciering van Gasunie, NOGEPA (belangenbehartiger voor olie- en gaswinningindustrie) en EBN (staatsonderneming voor olie- en gaswinning). In de studie is een concept uitgewerkt voor een waterstofketen die gebruik maakt van bestaande infrastructuur om koolstofvrije ("blauwe") waterstof te leveren voor hogetemperatuur-warmte in gascentrales en de industrie, en mogelijk ook mobiliteit. Het concept is bedoeld als gedecarboniseerde transitieoplossing naar groene waterstof uit groot-schalige waterelektrolyse en als alternatief voor grootschalige biomassa-import.

Uitgangspunt is dat de vereiste waterstofkwaliteit verschilt per toepassing. Brandstofcellen voor mobiliteit hebben zeer zuivere waterstof nodig. De chemische industrie legt minder strenge kwaliteitseisen op. Voor energiecentrales en HT-warmte is alleen de energie-inhoud van waterstof van belang. Omdat voor de grootste toepassingsmarkten laagwaardig waterstof volstaat is de productie, distributie, opslag en gebruik van laagwaardig waterstof de primaire focus van Berenschot en TNO. In het concept wordt op enkele gecentraliseerde industriële locaties in grote havens en/of bij kunstmestfabrieken (Rotterdam, Eemshaven, Terneuzen, Geleen) waterstof geproduceerd uit aardgas met precombustion CCUS. CO₂ wordt vanuit deze vier plekken vervoerd met

pijpleidingen of schepen, en opgeborgen in oude gasvelden op de Noordzee voor de Nederlandse of Noorse kust.

Waterstof wordt in het concept geproduceerd met de techniek van ATR (autothermische reforming). ATR van hoogcalorisch aardgas resulteert in een goedkope laagwaardige waterstof (90% H₂, 10% overig) en een zuivere CO₂-stroom. Deze waterstofkwaliteit is geschikt voor industriële toepassingen en gascentrales maar moet worden opgewaardeerd voor gebruik in chemie en mobiliteit. De voor ATR benodigde zuurstof kan men met een luchtscheidingsfabriek uit de lucht halen of in zuivere vorm uit elektrolyse halen. Dit is een toekomstige synergie tussen ATR met CCUS en wind op land of zee. Het kan gaan om nieuwe ATR-centrales of om ombouw. Omdat de ammoniakindustrie heeft geïnvesteerd in eigen SMR-installaties met bijbehorende langetermijncontracten ligt een retrofit van deze centrales meer voor de hand dan het opzetten van een nieuwe productieketen.

Distributie van waterstof gebeurt in het concept met een deel van het hoogcalorische gasnet. Dit kan door de leidingen aan te passen of door een waterstofleiding in de gasleiding te schuiven (pipe-in-pipe). Waterstof kan voor kleine fluctuaties gebufferd worden door line packing (gasdruk in het net variëren) en voor seizoensvariaties door opslag in zoutcavernes. Bij dit laatste kunnen stoffen in waterstof komen (waaronder methaan als "kussengas" bij ingebruikname van de caverne), dat is dan geen probleem voor waterstof dat wordt gebruikt voor HT-warmte. Voor andere toepassingen kan het waterstof lokaal worden gezuiverd. Als de vraag naar zuiver waterstof toeneemt kan een parallel netwerk worden gebouwd (vgl. hoog- en laagcalorisch aardgas-

7

<https://www.berenschot.nl/expertise/sectoren/energie/fl exibiliteit/waterstof-uit-aardgas-studie-1/>

net). Wordt ATR gecombineerd met elektrolyse dan kunnen vanuit dezelfde installatie twee netten gevoed worden, waarbij het laagwaardige netwerk als overstort kan dienen in geval van wisselende vraag naar zuiver waterstof.

Berenschot/TNO opperen het volgende transitiepad:

- retrofit van bestaande SMR-centrales met CO₂-afvang
- een deel van het hoogcalorisch aardgasnet omzetten naar laagwaardig waterstof voor gascentrales en HT-warmte in de industrie
- huidige en nieuwe waterstofvraag bedienen met ATR met CCUS
- invoeding van waterstof uit elektrolyse, daarbij synergie nastreven door benutten van zuurstof uit elektrolyse voor ATR; geleidelijke vervanging van waterstof uit aardgas door waterstof uit elektrolyse naarmate kosten van elektrolyse dalen.

De studie is bijna afgerond. Er zijn meerdere vervolprojecten vastgesteld waarover de meeste partners in het consortium zich nog niet hebben uitgesproken, en nieuwe geïnteresseerden kunnen zich aansluiten. Twee ideeën kunnen op relatief korte termijn worden opgepakt:⁸ het eerste is een demonstratie van waterstofproductie met ATR voor een gascentrale en industrie (ondervuring of input voor een raffinaderij. ATR is voor het concept doorgerekend op een schaal van 0,5 miljard kuub gas, de geschikte schaal voor een demo moet nog worden bepaald; een kleinere schaal betekent wel verlies van efficiency. Het tweede is CO₂-afvang retrofit bij huidige kunstmestfabrieken.

2.2.4 Benodigde techniekontwikkeling

Flexibele brandertechnologie

Omdat in de transitiefase mogelijk niet altijd waterstof beschikbaar zal zijn is van belang dat

⁸ Andere ideeën hebben een langere voorbereidingstijd nodig: demonstratie van de combinatie van ATR met elektrolyse (waterstof als duurzame energiedrager, zuurstof als input in ATR voor omzetting van aardgas in nog meer waterstof); oplossingen voor opwaardering van laagwaardig naar hoogwaardig waterstof; vervolgonderzoeken naar technische haalbaarheid van waterstoftransport (retrofit) en -opslag (Zuidwending en/of korte-termijnopslag) en toepassing in mobiliteit.

de industrie dan zowel aardgas als waterstof kan toepassen met sterk wisselende hoeveelheden. Waterstof heeft echter andere eigenschappen dan aardgas: hogere vlamtemperaturen, een verbrandingssnelheid die circa 6 maal zo hoog is als die van aardgas, een veel lagere calorische waarde, een factor 4 verschil in luchtbehoefte tussen waterstof en aardgas, en toenemende NO_x-emissie met oplopend aandeel waterstof.

DNV GL heeft daarom in het SBIR programma van RVO een feed-forward brandstofadaptief brandersysteem ontwikkeld, dat is getest voor Wobbe-variaties tot 30% waterstof in aardgas.⁹ Het brandersysteem wordt najaar 2017 getest op industriële schaal (4 MW). In het vervolproject Varigas wil DNV GL met marktpartijen een flexibele brandertechniek ontwikkelen die functioneert van 100% aardgas tot 100% waterstof. Deze moet kunnen worden toegepast voor directe verhittingsprocessen, zoals stoom- en warmwaterketels (~ 100 °C) en ovens en fornuizen (>>100°C). Het brandersysteem stuurt op optimale verbranding en minimale emissies.

CO₂-afvang met waterstofproductie

ECN heeft een reactor ontwikkeld waarbij het afvangen van CO₂ gepaard gaat met de productie van waterstof in één stap. De ingaande stroom is syngas, dat een Sorption Enhanced Water Gas Shift ondergaat met stoom. ECN gaat deze reactor testen in een pilot bij een staalfabriek in Zweden als onderdeel van het E-project STEPWISE (2015 – 2019). De techniek verhoogt het aandeel afgevangen CO₂, bij lagere energieinput en lagere afvangkosten.¹⁰ SE-WGS kan worden toegepast bij autothermal reforming van aardgas.¹¹

⁹ Waterstof van Put-naar-Pit: transitievoorbeeld van 100% aardgas naar 100% waterstof, Sander Gersen, DNV GL, Symposium "Waterstof of Niet(s) - De Toekomst van Waterstof als Energiedrager en Brandstof", Assen, 8 juni 2017.

¹⁰ <http://www.stepwise.eu/project/>, ECN, Swerea Mefos, Universitatea Babeş Bolyai, Johnson Matthey, SSAB EMEA, Politecnico di Milano, Kisuma Chemicals, Amec Foster Wheeler, Tata Steel Consulting, budget 13 M€ volledig uit Horizon 2020

¹¹ <https://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/h2sf/pdf/B-10-016.pdf>

2.3 Elektrolyse in de industrie

De (petro)-chemische industrie ziet mogelijkheden voor het ontwikkelen en toepassen van nieuwe technologieën en bijbehorende businessmodellen voor de omzetting van hernieuwbare zonne- en windenergie in warmte, waterstof en chemicaliën. Direct gebruik van deze energie in de industrie kan, naast energieopslag, bijdragen aan het opvangen van pieken in de energietoevoer uit hernieuwbare bronnen.

2.3.1 AkzoNobel

AkzoNobel bedrijft in Nederland grootschalige elektrochemie met 250MW baseload. De voornaamste producten hiervan zijn chloor en loog. Het bijproduct waterstof wordt deels als industrieel gas geleverd aan klanten en deels gemengd bij aardgas ingezet in WKK. AkzoNobel is bezig met een strategische heroriëntatie waarbij het een grote positie wil verwerven als producent van groene elektrochemie producten naast producent van chloor en loog. Onderdeel van de nieuwe strategie is om naast chloor en loog ook grootschalig waterstof via waterelektrolyse te produceren.

Rond Delfzijl werkt AkzoNobel met Groningen Seaports aan een “backbone” voor waterstof. Voorgenomen wordt om hierop in te voeden met ordegrrootte 30MW waterelektrolyse. Deze waterstof moet fossiele waterstof bij partijen aangesloten op de backbone vervangen of voorzien in groei in de vraag naar waterstof bij die partijen. AkzoNobel en Groningen Seaports overwegen een aanvraag voor financiering uit het Waddenfonds voor een Waterstofinnovatiepark in Delfzijl (sluitingsdatum voor aanvragen 25 januari 2018). AkzoNobel gaat ook waterstof leveren aan de mobiliteit (bussen, auto's en treinen), om te beginnen via een gepland tankstation van Pitpoint in Delfzijl.

In Rotterdam werkt AkzoNobel aan Waste-to-Chemicals met levering van waterstof (in eerste instantie uit het bestaande chloor-alkali productieproces) voor productie van methanol met koolstof (CO) van afvalvergassing. De methanol dient weer voor productie van onder andere DME. Rond deze Waste-to-Chemicals ontwikkeling wordt verdere opschaling van waterelektrolyse voorgenomen ten behoeve van het in consortia ontwikkelen /

creëren van bio-based chemie-waarde-ketens voor verduurzaming van de koolstofchemie. Bio-based routes naar chemische producten vergen inzet van groene waterstof. Hierbij is van belang dat een certificering van ‘groene waterstof’ tot stand komt; hieraan wordt gewerkt in het EU-project CertifHy (zie hfst 7).

Verdere opschalingsprojecten zijn nodig om geleidelijk de stap naar honderden MW en GW-schaal elektrolyse te kunnen maken. Zo blijft het financiële gat dat per stap overbrugd moet worden acceptabel. De komende 10-15 jaar staan in het teken van dergelijke opschalingsprojecten. Met aanlanden van grote hoeveelheden wind op zee wordt door groei naar honderden MW en meer voorzien vanaf 2030. Voor ondersteuning van genoemde ontwikkelingen is er behoefte aan een SDE-achtige structuur voor groene chemische producten. Verder is er behoefte aan een mechanisme dat steun biedt om de weg van opschaling in te slaan en verder te doorlopen. Gedacht kan worden aan een Green Deal met concrete ambities voor opschaling.

2.3.2 Power-2-Gas-2-Refineries

In het project Power-2-Gas-2-Refineries hebben BP Refinery, Havenbedrijf Rotterdam, Joulz, TNO en Uniper gekeken wat nodig is om een 20 MW elektrolyse installatie te realiseren die op commerciële schaal duurzaam opgewekte elektriciteit van windparken op de Noordzee omzet in waterstof voor de BP-raffinaderij in Rotterdam.¹² Dit kan bijvoorbeeld gebeuren bij de beoogde aanlanding van de wind op zee-stroom op de Maasvlakte.

Onderzocht is wat een installatie van de benodigde omvang kost, welke aanpassingen in de raffinaderij nodig zijn, welke regelgeving geldt en hoe de business case van een dergelijk project er uitziet. Ook andere toepassingen voor het waterstof zijn beschouwd.

De conclusie van de studie is dat de toepassing technisch en economisch haalbaar is, zonder subsidies, mits de groene waterstof wordt erkend als hernieuwbare brandstofcomponent. diesel (“upstream blending”) zou een brandstoffenleverancier kunnen voldoen aan de

¹² <http://smart-port.nl/project/ddp-power-2-gas-2-refineries/> in het samenwerkingsverband Smart Port en tevens vanuit innovatieprogramma Voltachem.

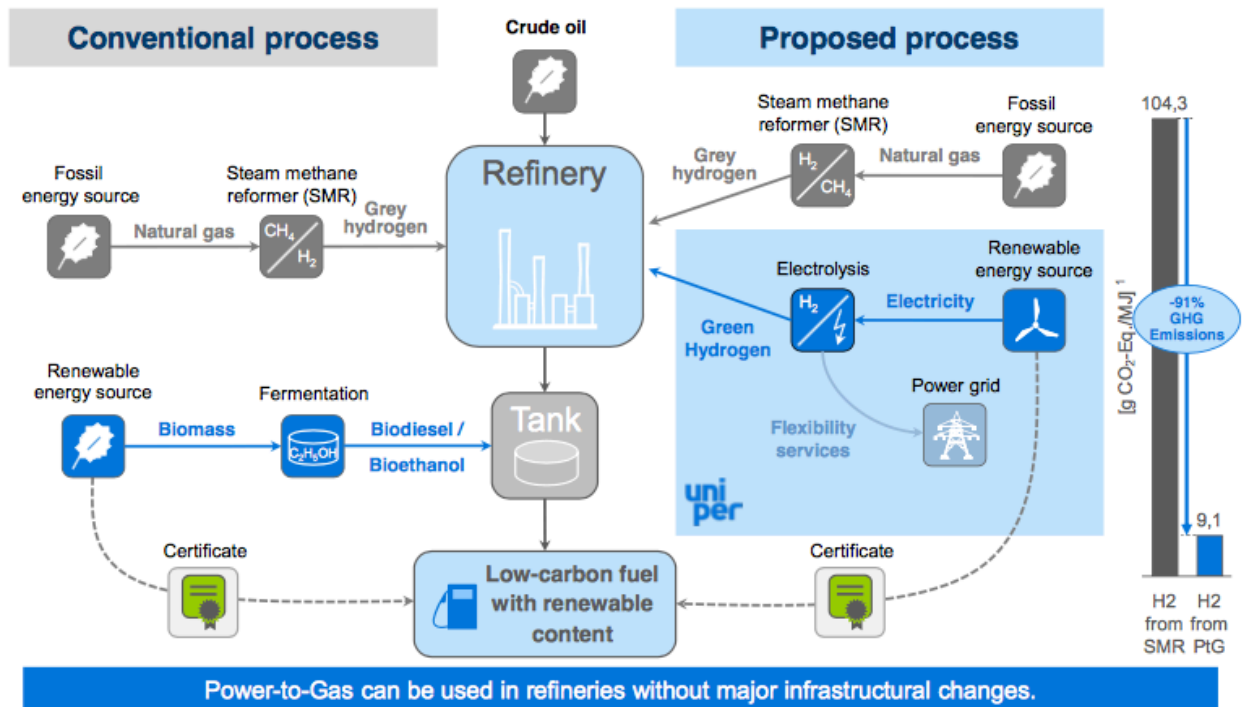


Fig. 4 Voorgestelde inzet van groene waterstof in olieraffinage (bron Uniper)

Door groene waterstof te gebruiken in een olieraffinaderij bij productie van benzine en verplichting voor vervoer volgens de Hernieuwbare Energie Richtlijn in plaats van het toepassen (downstream bijmengen) van bio-brandstoffen. Er is daarom veel interesse voor in de olie-industrie, maar de Europese Commissie erkent deze optie niet in de nieuwste versie van de Richtlijn (groene waterstof telt alleen mee bij gebruik in brandstofcelvoertuigen of na methanisatie).¹³ In de business case zijn inkomsten uit netwerkdiensten zoals netstabilisatie meegerekend. Voordelig is dat er geen energiebelasting wordt geheven op de netaansluiting voor de elektrolyser.

Er is volgens TNO investeringbereidheid bij bedrijven als upstream blending onder de Richtlijn gehonoreerd wordt, en als tevens de regelgeving voor waterstof op orde is. Door waterstof onder de Gaswet te brengen wordt het transport van waterstof een taak van een publieke netbeheerder, met een scheiding tussen waterstofproductie en waterstoftransport, en transparante voorwaarden aan invoeding op dit net.

Gerelateerd aan de studie naar upstream blending is een onderzoek naar inzet van waterstof voor HT-warmte in raffinaderijen in plaats van aardolie. Zo kan de aardolie worden vrijgespeeld voor raffinage naar producten. Ook hier wordt met partners in Smart Port naar gekeken. Dit raakt ook aan h-Vision, waar waterstof uit aardgas met CCUS centraal staat.

In Duitsland gaat Shell een 10 MW elektrolyser van ITM Power installeren in zijn olieraffinaderij bij Keulen.¹⁴ Het doel is om te demonstreren dat de technologie geschikt is voor toepassing in de raffinaderij en goedkoper is dan eerdere generaties elektrolyzers. Bijdragen aan netstabilisatie wordt ook genoemd als voordeel van de toepassing (zie ook §3.2).

2.3.3 Groene waterstof voor kunstmest

Ammoniak- en kunstmestproducent OCI Nitrogen is met 1 miljard m³ per jaar één van de grootste afnemers van aardgas in Nederland, net als branchegenoot Yara. Hiermee voedt OCI 2 SMR-installaties in Geleen om waterstof voor NH₃ te maken. Het bedrijf onderzoekt mogelijkheden om haar grote CO₂-uitstoot te

¹³

https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/Mischlau_Power-to-Hydrogen_Regulation.pdf

¹⁴ <http://www.itm-power.com/news-item/10mw-refinery-hydrogen-project-with-shell>; Shell Deutschland Oil, Shell Energy Europe, ITM Power, SINTEF, thinkstep en Element Energy. Subsidie van FCH JU.

verminderen en heeft meerdere vergroeningsroutes verkend om toekomstvast te produceren. Waterelektrolyse is een aantrekkelijke route aangezien het aanbod van hernieuwbare elektriciteit toeneemt.

In 2015 heeft OCI deelgenomen in de al eerdergenoemde haalbaarheidstudie naar power-to-ammonia.¹⁵ De gedachte is dat elektrochemische ammoniakproductie kansen biedt voor de industrie om duurzame elektriciteit op te slaan in producten op het moment dat het aanbod groter is dan de vraag en de prijs laag. Overtollige elektriciteit kan worden gebruikt om waterstof en stikstof te binden tot CO₂-vrije ammoniak, dat vloeibaar kan worden gemaakt voor compacte opslag.

De conclusie was dat het maken van waterstof uit elektrolyse nog te duur is door zowel hoge investeringen als variabele kosten. Dalende kosten van elektrolyzers en elektriciteit, mede door handig opereren op de elektriciteitsmarkt, een hogere CO₂-prijs, subsidies en een premie voor groene ammoniak kunnen de business case tegen 2030 rendabel maken. Er is ook zeer veel duurzame elektriciteit voor nodig: overstappen van SMR naar elektrolyse voor de huidige productie van OCI en Yara samen vraagt 20% meer elektriciteit dan Nederland nu opwekt.

OCI heeft twee opties: zelf waterstof maken met waterelektrolyse of aanvoeren van buiten. Voor de eerste optie is samen met Europese partners een projectvoorstel ingediend bij FCH JU voor de demonstratie van een 10 MW elektrolyser in Geleen. Dit voorstel met een investering van 20 M€ is niet gehonoreerd. Om de grootte van de opgave aan te geven: deze installatie zou voltijds op volle capaciteit draaiend minder dan 1% van de waterstofvraag van OCI kunnen vervangen. De subsidie zou de investeringskosten drukken maar de business

case nog niet sluitend maken. Het project levert ervaring op over elektrolyse, opereren op onbalansmarkt, en draagt bij aan techniek- en marktontwikkeling. Elektrolyse is echter geen core business voor OCI en de investeringen zijn hoog, dus samenwerking met mede-investerende leveranciers is essentieel.

Het alternatief voor eigen opwekking is externe aanvoer. Er is geen waterstofleiding in de regio maar bestaande gasleidingen zouden kunnen worden gebruikt voor aanvoer van waterstof. OCI wil kijken of eenzelfde soort project als Waterstofsymbiose in Terneuzen (zie §2.4; Yara is hierbij betrokken) mogelijk is met bedrijven op Chemelot die ook waterstof maken en/of gebruiken. Dat zal wel zeker 5 jaar duren. Voor OCI heeft uitwisseling van waterstof alleen zin als er duurzamere waterstof aangevoerd kan worden. De eigen SMR-installaties gaan nog lang mee.

OCI zet in elk geval de eerste stap, en dat is het geschikt maken van de NH₃-productie om een nevenstroom waterstof in te voeden. Dat kan eigen productie uit elektrolyzers zijn of extern aangevoerd waterstof. Het doel is om voorbereid te zijn, en de timing is gunstig vanwege de geplande grootonderhoudstop volgend jaar (eens in de 5 jaar). Invoeden is mogelijk mits het waterstof voldoet aan zuiverheidseisen. Men zal moet leren omgaan met instabiel aanbod. Het huidige proces is ingericht op 24/7 volledige benutting van capaciteit, zodat een fluctuerende bron een probleem kan vormen en misschien buffers nodig zijn. Enkele procenten invoeden zal waarschijnlijk geen probleem zijn. Met deze voorziening geeft OCI ook het signaal af dat partijen duurzaam waterstof kunnen aanbieden, van de juiste kwaliteit en tegen een acceptabele prijs.

Een andere route om binnen 5 jaar de CO₂-footprint van OCI te verlagen is CC(U)S. OCI vangt al 2/3 van de emissies af en gebruikt daarvan een groot deel in het eigen proces voor ureum- en melamineproductie of levert het aan derden. Enkele honderden kton worden alsnog uitgestoten en kunnen worden opgeslagen. Het zou per trein of schip naar Rotterdam kunnen worden gebracht en opgeslagen onder zee.

¹⁵ Power to Ammonia: het produceren van CO₂-vrije ammoniak als chemische grondstof en brandstof, door ISPT (Institute for Sustainable Process Technology), AKZO Nobel Industrial Chemicals, CE Delft, ECN, Nuon Power Generation, OCI Nitrogen, Proton Ventures, Stedin Diensten, TU Delft, Universiteit Twente. Een ander, inhoudelijk vergelijkbaar onderzoeksproject is in 2015 uitgevoerd door Proton Ventures, Energy Valley en Hanzehogeschool Groningen: FlexNH₃ – Power-to-Ammonia: Rethinking the role of ammonia - from a value added product to a flexible energy c. Beide studies werden ondersteund door TKI Energie.

Decentrale ammoniakproductie

Ondernemers op Goeree-Overflakkee waaronder Proton Ventures willen met op het eiland met wind en zon opgewekte hernieuwbare energie benutten om groene ammoniak te maken. Er zijn vergunningen aangevraagd op bedrijventerrein Oude Tonge voor de bouw van een proeffabriek voor power-to-ammonia met 2x10 MW elektrolyse. De groene ammoniak kan worden verkocht aan kunstmestindustrie (bijv. ammoniakterminal OCI Rotterdam, Yara Sluiskil) voor groene kunstmest. Er wordt gezocht naar klanten die willen betalen voor de duurdere groene kunstmest. Idealiter wordt de groene kunstmest weer op Goeree-Overflakkee gebruikt. 10 MW elektrolyzers kunnen binnen 5 jaar operationeel zijn; er zijn er twee nodig voor back-up.



Fig. 5 Infografiek waterstofsymbiose (bron SDR)

2.4 Waterstof Symbiose Terneuzen

Met het project Waterstof Symbiose willen 3 naburige bedrijven in Terneuzen door uitwisseling van waterstof energie en kosten besparen, emissies beperken en transport van waterstof over de weg verminderen. Dow Benelux benut op dit moment waterstofvrij gas (30% methaan en 70% waterstof) uit de krakerprocessen als brandstof in het eigen productieproces. Yara Benelux maakt ammoniak met waterstof, en ICL-IP Benelux gebruikt waterstof bij verwerking van broom. ICL voert de waterstof over de weg aan. Door de fabrieken met elkaar te verbinden en de waterstof die bij Dow als restproduct vrijkomt te gebruiken als grondstof kan de waterstof hoogwaardiger worden ingezet en energie bespaard.

Men zal gebruikmaken van een bestaande gasleiding van Gasunie Transport Services, die onder het Kanaal bij Terneuzen doorloopt vanuit Dow langs ICL-IP naar Yara. Met beperkte

maatregelen en investeringen voldoet deze leiding aan de technische vereisten voor veilig transport van waterstof. De realisatie van de Waterstofsymbiose is economisch haalbaar als de uitwisseling energiebelasting-neutraal kan worden uitgevoerd (dus niet leidt tot een hogere afdracht), en de tariefstelling voor gebruik van de gastransportleiding van Gasunie Transport Services de tariefstelling van het landelijk gastransportnet volgt. Om sneller helderheid te verschaffen over deze vraagstukken hebben de betrokken bedrijven, evenals Provincie Zeeland, NV Economische Impuls Zeeland en Zeeland Seaports, met het ministerie van EZK een Green Deal afgesloten voor de periode 2016 – 2020.¹⁶ Dit heeft geleid tot de vaststelling dat transport van waterstof in de gekozen leiding mogelijk is en er zijn afspraken gemaakt met Belastingdienst over de Energiebelasting en met Gasunie over de transporttarieven.

Het wachten is momenteel op goedkeuring van een aanvraag voor bestemmingsplanwijziging. In het eerste kwartaal van 2018 kan dan worden begonnen met het maken van aansluitingen op de leidingen naar de terreinen en voorzieningen voor in- en uitkoppeling bij de bedrijven. De benodigde investeringen voor de bedrijven zijn in de ordegrootte van miljoenen euros. De verwachting is dat de waterstofsymbiose in het vierde kwartaal van 2018 operationeel is. De beoogde uitwisseling van circa 4,5 kton/jaar waterstof resulteert in een energiebesparing van 0,15 PJ (vgl. gasverbruik van 3.000 huishoudens) en een CO₂-reductie van circa 10 kton per jaar; en hogere externe veiligheid door 70-80% afname van waterstoflevering per as naar ICL. De afname van waterstof door Yara kan verder toenemen als daarvoor benodigde procesaanpassingen tijdens een geplande grote onderhoudstop in 2020 doorgevoerd kunnen worden. Provincie Zeeland heeft een opschalingstudie voor de 2^e fase gesubsidieerd, waarbij onder meer technische vraagstukken spelen met betrekking tot zuiveringstappen. In deze fase gaat het om uitwisseling van circa 20 kton/jaar waterstof, met 2-4 maal zo hoge besparingen.

De betrokken organisaties werken samen in het Smart Delta Resources platform, dat de

¹⁶ <http://www.greendeals.nl/gd194-waterstof-symbiose-in-de-delta-regio/>

omslag stimuleert naar een industrie die economisch sterk en minder afhankelijk is van fossiele energie en schaarse grondstoffen. Ook andere bedrijven in de zuidwestelijke deltaregio nemen hierin deel, met zowel waterstofvraag als – aanbod.¹⁷ In de verdere toekomst kan de waterstofsymbiose potentieel nog verder groeien naar een regionale waterstofronde met andere industriële partijen. Er wordt met veel belangstelling gekeken naar de plannen om in de toekomst grootschalig waterstof op zee te maken, zodat de regionale waterstofinfrastructuur gevoed kan worden met groene waterstof.

Voor Gasunie is het project een exercitie voor het ombouwen en herbestemmen van bestaande gasleidingen voor waterstof in de transitie van fossiel aardgas naar CO₂-neutrale energiedragers waaronder hernieuwbaar waterstof.¹⁸ De activiteit gaat onder een apart Gasunie-bedrijf vallen omdat transport van waterstof niet onder de Gaswet valt. Dit betekent dat de kosten voor het waterstoftransport niet gesocialiseerd kunnen worden (overgeslagen over alle gasnetgebruikers) en er dus een apart tarief berekend zal worden. Gasunie onderzoekt ook elders in Nederland casussen voor herbestemming van gasleidingen voor waterstof.

2.5 Waterstof bij Tata Steel

Bij Tata Steel wordt verkennend nagedacht over de inzet van waterstof op het terrein. Tata Steel gebruikt waterstof uit een installatie van Linde Gas met overcapaciteit, die kan worden benut om commercieel verkrijgbare heftrucks en ander intern vervoer in de hallen emissievrij te laten rijden. Dit wordt afgewogen tegen batterij-elektrisch materieel. Wordt gekozen voor waterstof aangedreven materieel dan is dit op korte termijn te realiseren.

¹⁷ Smart Delta Resources is een samenwerkingsverband van elf energie- en grondstofintensieve bedrijven: Arcelor Mittal Gent, Cargill, Delta, Dow, ICL-IP, Lamb Weston-Meijer, Sabic Bergen op Zoom, Trinseo, Suiker Unie, Yara en Zeeland Refinery. Ook provincie Zeeland, Zeeland Seaports en Impuls (facilitator) nemen deel.

¹⁸ Waterstoftransport door een aardgastransportleiding. Waterstof Symbiose in de Delta Regio, Harry Smit, Gasunie Transport Services, Symposium “Waterstof of Niet(s) - De Toekomst van Waterstof als Energiedrager en Brandstof”, Assen, 8 juni 2017.

Er komen daarnaast grote hoeveelheden waterstof vrij bij de productie van kooks. Tata Steel maakt jaarlijks 2 miljoen ton kooks voor voeding van de hoogovens. Het nevenproduct kooksofengas bevat 60 vol% waterstof, dat vanwege de hoge verbrandingswaarde nuttig wordt gebruikt voor warmte en kracht in het productieproces. Met PSA zou 70-80% van de H₂ kunnen worden afgescheiden, goed voor 200 miljoen Nm³ waterstof (2 PJ energie).¹⁹ Tata Steel overweegt verschillende mogelijkheden voor inzet van dit waterstof. Het kan worden gebruikt om ijzererts mee te reduceren, of geleverd aan derden. Er zouden bijvoorbeeld ordegruote 1.000 bussen op kunnen rijden. Essentieel hierbij is de vraag hoe het bedrijf zijn primaire proces wil ontwikkelen. Ook weegt mee dat inzet van kooksgas voor productie van elektriciteit nu CO₂-vrij is, als dit gas anders wordt ingezet is een vervangende CO₂-vrije elektriciteitsbron nodig.

De verwachting is dat een andere inzet van het waterstof uit kooksofengas niet binnen 5 jaar aan de orde is. IJzerertsreductie met waterstof is een nieuw proces om zonder CO₂-uitstoot staal te maken met water als enig restproduct. Bij hoge temperaturen rond de 1.000°C wordt het zuurstof uit het ijzererts losgemaakt met waterstof. De Zweedse staalindustrie begint samen met Vattenfall een langjarig onderzoeksproject. Tot 2024 wordt gewerkt aan een haalbaarheidsstudie en een proeffabriek om de werking van het proces te testen. Rond 2030 moet er een eerste demonstratiefabriek staan.²⁰

Het kan ook zijn dat de behoefte aan kooks vervalt. Tata Steel voert een proef uit met een andere nieuwe productietechniek genaamd Hisarna. Hierbij hoeven de grondstoffen ijzererts en metallurgische kolen niet te worden voorbereid, maar worden rechtstreeks in het reactorvat ingebracht. Dat scheelt een processtap en levert 20% CO₂-reductie en energiebesparing op. Omdat er geen kooks bij nodig is ontstaat er ook geen waterstofrijk kooksofengas

¹⁹ <https://noordholland.d66.nl/content/uploads/sites/179/2015/09/JAEGERS-Tata-16sep15.pdf>

²⁰ <https://www.deingenieur.nl/artikel/staalproductie-zonder-co2-uitstoot>

In Oostenrijk wordt een 6 MW elektrolyser van Siemens geplaatst op het terrein van staalproducent voestalpine in Linz.²¹ Het waterstof wordt in het interne gasnetwerk gevoed, waardoor het gebruik van waterstof in de diverse processtadia van staalproductie kan worden getest. Het betreft het project H2FUTURE (2017 – 2022). De waterstofvraag op het terrein van Tata Steel zou in principe ook op deze wijze kunnen worden vergroend.

2.6 Brandstofcelcentrales in de industrie

Nedstack, MTSA en AkzoNobel hebben een 2 MWe/1,5 MWt brandstofcelcentrale ontwikkeld en geleverd aan een chloorproducent in China.²² De reststroom waterstof uit chloor-elektrolyse wordt er met brandstofcellen omgezet in elektriciteit en warmte (met warmtepomp omgezet in koude) voor eigen gebruik van de fabriek. De centrale heeft het formaat van 3 zeecontainers. Het is de grootste brandstofcelcentrale tot nu toe: MTSA en Nedstack leverden eerder vergelijkbare installaties aan respectievelijk AkzoNobel en Solvay.

De 70kWe installatie bij AkzoNobel draait inmiddels 10 jaar en wordt met het drie-jarige FCH-JU project Grasshopper (gehonoreerd, aanvang januari 2018) vervangen met een nieuwe 100 kWe module. Deze module is schaalbaar en uitgerust met een nieuwe generatie stacks met een snellere reactietijd bij wisselende elektriciteitsvraag. Dit maakt mogelijk dat de installatie flexibeler ingezet kan worden. Het ontwikkelen van sneller reagerende brandstofcellen voorziet tevens in een behoefte bij automotive klanten van Nedstack in Azië. Hier is inmiddels ook bij Nederlandse industrie belangstelling voor.

De 1 MWe installatie bij chemiebedrijf Solvay in Antwerpen, onderdeel van project Waterstofregio, was bedoeld als testfaciliteit voor Nedstack-modules die dan regelmatig vervangen zouden worden door nieuwe. Nadat Solvay

met deze site stopte is de installatie verplaatst naar een petrochemische firma op Martinique. De eerste testen worden in november 2017 uitgevoerd.



Fig. 6 PEM Powerplant bij Ynnovate, Yingkou (bron www.demcopem-2mw.eu)

²¹ <http://www.h2future-project.eu>, Verbund, Voestalpine Stahl, K1-Met, Siemens, Austrian Power Grid, ECN, budget 18 M€, 12 M€ subsidie van FCH JU. ECN is betrokken voor evaluatiestudies.

²² <http://www.demcopem-2mw.eu>, (2015 – 2018), AkzoNobel Industrial Chemicals B.V.; Nedstack Fuel Cell Technology B.V.; MTSA Technopower B.V.; Johnson Matthey Fuel Cells Limited; Politecnico di Milano, budget 10,5 M€, waarvan 5,4 M€ subsidie van FCH JU.

3. Waterstof in de energiesector voor systeemintegratie, flexibiliteit en energieopslag

3.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk zijn initiatieven voor de toepassing van waterstof in gascentrales behandeld. In dit hoofdstuk komen andere initiatieven met waterstof voor energiefunctionaliteit kracht en licht aan bod:

- §3.2: Netstabilisatie met waterelektrolyzers in het project HYSTOCK / TSO 2020. Hierbij vindt tevens verkenning van ondergrondse opslag van waterstof plaats.
- §3.3: Inpassing van hernieuwbare energie in de vorm van waterstof of synthetisch methaan: Power-to-Gas projecten Rozenburg, STORE & GO (EU), Delfzijl, Wijster, Duiven,

Archipel, Power-to-X Nieuwegein, Power to Protein, en Flexnode.

- §3.4: Omzetting van wind op zee naar waterstof als alternatief voor transport via stroomkabels en voor opslag in batterijen. Initiatieven richten zich op synergie met bestaande olie- en gaswinninginfrastructuur, en op de bouw van nieuwe infrastructuur (North Sea Wind Power Hub, het energie-eiland Doggersbank).

Dedicated waterstofproductie met in windmolens geïntegreerde elektrolyse komt in het volgende hoofdstuk aan bod (§4.4).



Fig. 7 Schema uit project HyStock / TSO 2020

3.2 HyStock: power-to-gas waterstof bij Aardgasbuffer Zuidwending

In het project HyStock²³ van Gasunie-dochters EnergyStock en Gasunie New Energy wordt waterstof gemaakt door elektrolyse, waarbij de elektrolyser wordt ingezet voor het onderzoeken van mogelijke nieuwe netwerkdiensten voor

TenneT. Er komen steeds meer duurzame bronnen en minder traditionele energiecentrales, waardoor er behoefte is aan alternatief regelvermogen. Door elektrolyzers meer of minder vermogen te laten afnemen zouden deze gebruikt kunnen worden voor netstabilisatie of balancing. Partijen kunnen leveren aan de onbalansmarkt, waar de waarde van elektriciteit

²³ www.agbzw.nl/projecten/waterstofproject

soms tot vijfvoudig van normaal oploopt. Dat betekent kansen voor investeerders in waterstofproductie voor onbalans en stabilisatie. Hierin investeren past niet bij de rolopvatting van TenneT.²⁴

HyStock is onderdeel van het Europese project “TSO 2020: Electric Transmission and Storage Options along TEN E and TEN T corridors for 2020” (2017 – 2019).²⁵ Activiteiten in dit project zijn studies naar de koppeling tussen hernieuwbare energie en nul-emissie mobiliteit met de nadruk op energieopslag en netbeheer; het genoemde pilotproject; en het opstellen van een bedrijfsplan voor opschaling naar grootschalige toepassing. Het project wil helpen met op gang brengen van de supply chain voor waterstof naar mobiliteit. Dit wordt gezien als meest kansrijke sector voor waterstofinzet omdat benzine/diesel de referentie-energiedragers zijn.

In eerste instantie wordt een 1 MW elektrolyser gedemonstreerd. Doel is te leren waar de technologie staat en leren omgaan met waterstof. ITM Power levert de elektrolyser inclusief compressor en tube-trailer vulpunten. Conversie start in september 2018. Op de locatie Zuidwending worden ongeveer 5.000 zonnepanelen geplaatst. Dit is goed voor 12% van de jaarcapaciteit van de elektrolyser. Voor de overige 88% wordt de elektrolyser gevoed met groene netstroom om zoveel mogelijk draaiuren te maken. Deze groene stroom wordt door derden aangeleverd en Energy-Stock biedt de conversie en opslagdienst aan. Het waterstof wordt met tube-trailers naar tankstation Green Planet in Pesse gebracht als onderdeel van het TSO2020 project. Er wordt gekeken om meer stations te bedienen.

²⁴ Hoogspanningsnetbeheerder TenneT is verantwoordelijk voor elektriciteitstransport en totale balanshandhaving tussen vraag en aanbod van elektriciteit. TenneT stimuleert de markt om met regelbare productie en afname te komen door het prijsmechanisme in te zetten. De onbalansmarkt is techniekneutraal. TenneT doet zelf niets met waterstof maar is wel bereid tot proefprojecten en de markt bewust maken van kansen, zoals met waterstof.

²⁵ <http://tso2020.eu>, EASE, Energy Storage NL, TenneT TSO, Gasunie, Green Planet, TU Delft, Energy Valley, Ministerie van I&W. Budget 11,7 M€, waarvan 7,0 M€ subsidie onder de Connecting Europe Facility (CEF)-regeling (SYNERG-E call). Voor honorering in deze Europese regeling was de verbinding met COBRACable essentieel, de ondergrondse hoogspanningskabel die de Deense en de Nederlandse elektriciteitsnetten gaat verbinden, en die aanlandt in Eemshaven.

TenneT, met gespecialiseerde inbreng van TU Delft, kijkt met Gasunie naar de integratie van elektrolyzers in het elektriciteitssysteem. Het achterliggend vraagstuk is hoe je de stabiliteit van het elektriciteitsysteem kunt bewaren bij grootschalige integratie van wind en zon. Specifiek onderzoeksthema in TSO 2020 is het dynamische gedrag tussen het elektriciteitsstelsel en waterstof. Een elektrolyser kan diensten leveren voor netspanning en balans. Men wil dit ervaren met een 1 MW elektrolyser, en simuleren voor een 300 MW opschaling. Op een dergelijke schaal zou men mogelijk ook diensten aan Denemarken kunnen leveren via de COBRACable. Zo'n schaal van elektrolyse is eerder geschikt voor de Eemshaven bij de aanlanding van de kabel, en dan kan het waterstof door een gasleiding naar Zuidwending. Dit zijn mogelijke vervolgprojecten na 2019.

De locatie van de installatie is de Aardgasbuffer Zuidwending van Energystock. Deze locatie is interessant gezien de aansluiting op het landelijk gastransportnet van Gasunie Transport Services en het landelijke hoogspanningsnet (380 kV) van TenneT. Ook is de locatie geschikt om in de toekomst waterstof grootschalig op te slaan in voor waterstof geschikt gemaakte zoutcavernes. Het project heeft vanwege de locatie een grote symbolische waarde omdat het TenneT (Power) en Gasunie (Gas) dicht bij elkaar heeft gebracht als het gaat interactie tussen elektronen en moleculen middels de energiedrager waterstof. Op de *wind-meets-gas* bijeenkomst in Groningen waar het project werd bezegeld is vervolgens ook bekend gemaakt dat Gasunie in het project energie-eiland Doggersbank gaat deelnemen.

Grootschalige waterstofopslag

De waterstofproductie in de pilot HyStock is te klein om fysiek op te slaan in een zoutcaverne. De kleinste caverne zou 2.000 ton waterstof kunnen bevatten en een “full size” caverne 7.200 ton/240.000 MWh. Op korte termijn zouden er een aantal van zulke cavernes op Zuidwending gerealiseerd kunnen worden. De “salt dome” Zuidwending heeft de mogelijkheid om tientallen van zulke cavernes te herbergen mocht dat in de toekomst nodig zijn. Energystock werkt in het komende jaar de waterstofopslag uit zodat er een gedragen ontwerp komt te liggen.

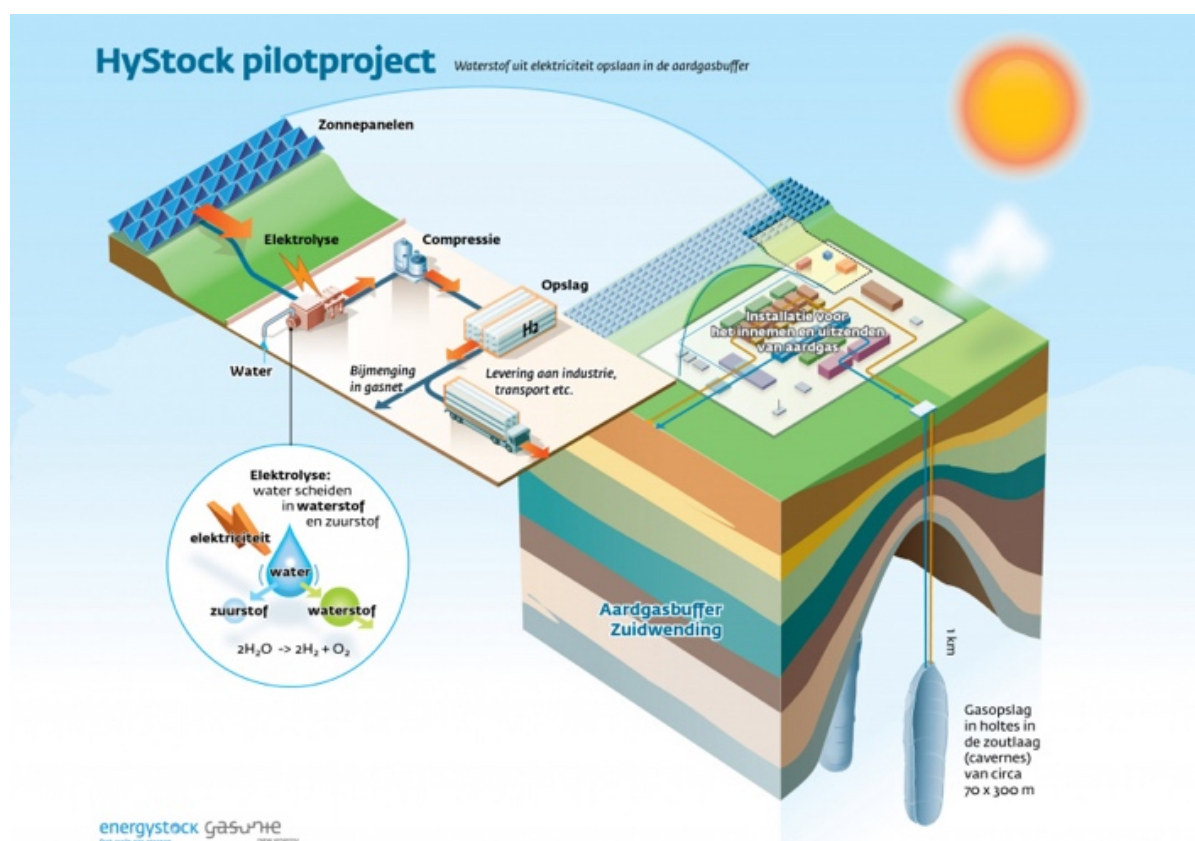


Fig. 8 Schema uit project HyStock / TSO 2020

In de komende 2–3 jaar werkt Energystock aan een business case, zelfstandig of met partners, voor een waterstofopslag. Toepassingen kunnen zijn als regionale buffer (Hydrogen Hub) voor mobiliteit van waaruit tankstations en OV bevoorrad kunnen worden, als opslag voor waterstof voor de Magnumcentrale, of om TenneT te ondersteunen met netbalancing/stabiliteit door waterstof met brandstofcellen om te zetten in elektriciteit. Een vervolgproject kan zijn om een zoutcaverne fysiek geschikt te maken voor waterstofopslag. Dit wordt de moeite waard vanaf ordegrrootte 20 MW elektrolyse, een omvang die nog eenvoudig op de site in Zuidwending kan worden gerealiseerd maar mogelijk is waterstoftransport via een pijpleiding vanaf een locatie als Eemshaven gunstiger.

Ondergrondse opslag van waterstof in zoutcavernes ten behoeve van grootschalige seizoensopslag van hernieuwbare elektriciteit is eerder bestudeerd in het project HYUNDER (2012 – 2014).²⁶ Uit deze studie is gebleken dat

op meerdere plaatsen in Noord- en Oost-Nederland geschikte zoutlagen zijn met (ruimte voor) zoutcavernes en in de nabije omgeving de juiste infrastructuur aanwezig, zoals zoutindustrie, water, aardgasleidingen en hoogspanningsnet. HYUNDER heeft de technische uitvoering en eventuele risico's van het opslaan van waterstofgas op hoofdlijnen onderzocht.

3.3 Power-to-Gas voor inpassing van hernieuwbare energieopwekking

Er zijn de afgelopen jaren diverse initiatieven genomen waarbij de productie van waterstof werd voorgesteld om hernieuwbare elektriciteit beter in te passen in het energiesysteem, hetzij om tijdelijke overschotten op het elektriciteitsnet te benutten hetzij om investeringen in netverzwaringen te vermijden. Hierbij is waterstof eindproduct of tussenproduct voor synthetisch methaan. In de meeste gevallen ging het om haalbaarheidstudies.

²⁶ <http://hyunder.eu>, 12 partners waaronder ECN en Shell, subsidie van FCH JU.

Vier projecten hebben de stap naar realisatie gemaakt: dat zijn power-to-gas Rozenburg, het Europese project STORE&GO, en de kleinschalige projecten Flexnode en Power-to-Protein. Andere projecten zijn nog in voorbereiding, staan onhold of zijn afgerond met of zonder vervolgplannen. Power-to-methaan kan worden gezien als snel in de bestaande gasinfrastructuur in te passen overgangstechnologie naar een volledige waterstofvoorziening, al leidt de extra methanisatiestap voorlopig tot te hoge kosten voor synthetisch methaan. Anderzijds blijft de chemische industrie op lange termijn behoefte houden aan koolstof en daar kan met power-to-methaan in worden voorzien.



Fig. 9 Opstelling power-to-gas in Rozenburg

Power-to-Gas (methaan) in Rozenburg

Stedin, DNV GL, Gemeente Rotterdam en Resort Wonen onderzoeken in een demonstratieproject (2014 – 2019) de inzetbaarheid en toepasbaarheid van de power-to-gas-technologie in de gebouwde omgeving. Met zonnepanelen opgewekte elektriciteit is omgezet in waterstof, dat met CO₂ is gemethaniseerd tot synthetisch gas van aardgaskwaliteit. De apparatuur is ingebouwd in 2 zeecontainers. Het gas is toegepast in een gasgestookte ketel van een nabijgelegen appartementencomplex in Rozenburg.

De demonstratie heeft aangetoond dat het mogelijk is om power-to-gas in te zetten om pieken duurzaam opgewekte elektriciteit te benutten.²⁷ De installatie kan binnen ca. 40 minuten worden opgeschakeld vanuit stilstand naar volle capaciteit (4 minuten voor het opstarten van de elektrolyser, 35 minuten voor de metha-

nisatie). Omdat een verouderde elektrolyser werd gebruikt was het energetisch rendement van het hele proces 35% (47% elektrolyser, 73% methanisatie). Verwachte toekomstige rendementen zijn 75% elektrolyser en 90% methanisatie. Het synthetisch aardgas voldeed aan de specificaties die gelden voor invoeding op het Nederlandse gasnet. Het rendement kan echter omhoog als er meer waterstof in het methaan mag zitten. De omzetting bleek veilig en betrouwbaar en de eindgebruikers van het gas, de huurders van de woningbouwcorporatie, ondervonden geen hinder.

De huidige tweede fase van het project draait om de terugwinning van CO₂ uit rookgassen om deze te hergebruiken voor de methanisatie. In een volgende fase wordt gekeken of CO₂ uit de lucht gehaald kan worden. Onderzoek kan zich ook richten op het uitbreiden van het systeem met technieken om vrijkomende productstromen proceswater, warmte en zuurstof te hergebruiken. Stedin hoopt binnenkort uitsluitel te krijgen van de gemeente Rotterdam over behoud van de locatie voor nog enkele jaren. De locatie wordt ook gebruikt voor veldproeven van andere partijen, waaronder Hyet met hun project PurifHy (zie §5.2). Er is volgens Stedin veel interesse voor herhalingsprojecten, maar installaties voor power-to-gas moeten door schaalvergroting en technologische ontwikkelingen in de toekomst dan wel substantieel goedkoper worden. Een prijsstijging van gas ten opzichte van elektriciteit en een hogere CO₂-prijs zouden ook gunstig zijn voor power-to-gas.

STORE&GO: Europese demonstraties van power-to-gas (methaan)

Behalve het project in Rozenburg zijn er nog geen andere demonstraties van power-to-gas (methaan) van de grond gekomen. Nederlandse partijen zijn wel betrokken bij demonstraties elders. In het Europese STORE&GO-project (2016 – 2020) wordt power-to-gas methaanproductie en levering aan het gasnet gedemonstreerd op 3 plekken in Duitsland, Zwitserland en Italië.²⁸

²⁷ DNV GL, Eindrapport Demonstratieproject Power-to-Gas Rozenburg, 2015; <https://www.gawalo.nl/energie/artikel/2017/6/technologie-nog-te-duur-voor-doorbraak-power-gas-1014636>

²⁸ STORE&GO, Innovative large-scale energy STOragE technologies AND Power-to-Gas concepts after Optimisation, <https://www.storeandgo.info/en> http://cordis.europa.eu/project/rcn/200559_en.html. Budget 28 M€, waarvan 18 M€ subsidie uit Horizon 2020, onderwerp "Large scale energy storage". 2,3 M€ subsidie is

27 partners uit 6 landen nemen deel, waaronder ECN, Energy Valley, Hanzehogeschool, en Rijksuniversiteit Groningen. Het project richt zich op de inpassing van power-to-gas technologie in Europese energienetten om te onderzoeken hoe volwassen de technologie is. Bovenliggend doel is de flexibele integratie van energieopslag in de vorm van synthetisch methaan in energiesystemen met veel fluctuatie van hernieuwbare energieaanbod.

De gekozen locaties hebben verschillende kenmerken en omstandigheden: beschikbare energiebronnen (hoge windkracht; PV en hydro; PV en windkracht); lokale consumenten (laag verbruik, gemeentelijk gebied, landelijk gebied); type elektriciteitsnet (hoogspanningsnet, regionaal of lokaal distributienet); type gasnet (langeafstandstransport; regionaal of lokaal distributienet); soort CO₂-bron (biogas, afvalwater, atmosfeer), en warmtelevering (fineerfabriek; stadsverwarming; CO₂ air capture).

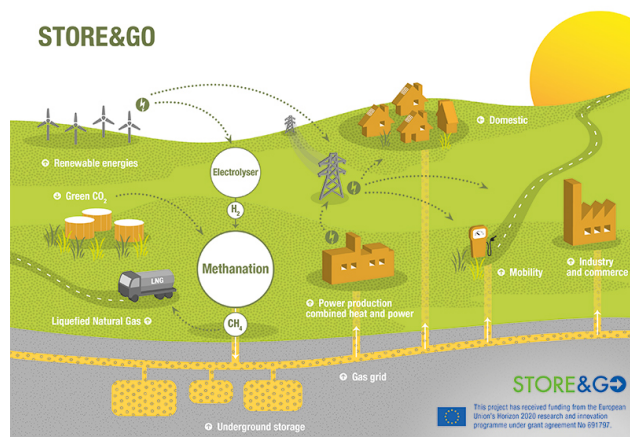


Fig. 10 Infographic (bron www.storeandgo.info)

Drie innovatieve methanisatieprocessen worden ontwikkeld en op een schaal van 200 kW—1 MW gedemonstreerd gedurende twee jaar. Het synthetische aardgas wordt geïnjecteerd in het gasnet en geleverd aan klanten. Het project beoordeelt de economische en business aspecten en de mogelijkheden om met de STORE & GO-technologie grootschalig energie op te slaan. Dit leidt tot bedrijfsmodellen, een power-to-gas routekaart voor Europa en aanbevelingen voor beleidsmakers. Ook wordt onderzocht welke wetgevende en juridische aspecten op Europees, nationaal en lokaal niveau een grote invloed

hebben op de exploitatie van toekomstige power-to-gasinstallaties.

Power-to-Gas (waterstof) installatie in Delfzijl

In 2014 tekende een tiental partijen een intentieverklaring om binnen twee jaar een geïntegreerde power-to-gas-installatie van 12 MW te bouwen, die in Delfzijl waterstof, zuurstof en syngas zou produceren voor vergroening van de chemische industrie. De productie zou tevens als opslag van tijdelijke overschotten van wind- en zonnestroom fungeren. De schaal was groter dan tot dan toe, en ook nu nog, vertoond. In Duitsland waren al diverse power-to-gas-initiatieven van kleinere omvang en inmiddels staat de grootste installatie van 6 MW geleverd door Siemens op Energiepark Mainz. Bijzonder in Delfzijl was de beoogde benutting van de zuurstof uit elektrolyse bij productie van syngas uit biomassa.²⁹ Over het project is sinds de aankondiging geen nieuws.

Power-to-Gas (methaan) fabriek in Wijster

Afvalverwerker Attero onderzocht met partners of het haalbaar is om in Wijster rendabel een power-to-gasfabriek te bedrijven.³⁰ TenneT zag dat power-to-gas-techniek kan helpen het elektriciteitsnet te stabiliseren, Gasunie zag kansen om het gasnet benutten voor opslag van overschotten duurzame stroom. Het consortium onderzocht een verdienmodel voor een power-to-gas-installatie met een vermogen van 5 MW, gericht op de inzet van methaan in mobiliteit. Autofabrikant Audi heeft ervaring met een soortgelijke 6 MW power-to-gas-installatie in het Duitse Werlte, die sinds 2012 levert aan het gasnet en sinds 2015 is toegelaten tot de korte termijnbalansmarkt voor elektriciteit. De benodigde CO₂ voor de methanisatie wilde Attero afvangen bij de opwerkingsinstallatie van een vergister. Het opgewerkte gas uit die installatie en het synthetische methaan ("e-gas") zouden in het aardgasnet worden ingevoerd. Om vraag naar het

²⁹ <https://www.energyvalley.nl/nieuws/eerste-grootschalige-power-to-gas-installatie-in-delfzijl>, Dutch Torrefaction Association (ECN, Cra-W, Biolake, Topell Energy, TorrCoal), Siemens Nederland, Stedin Netbeheer, A.Hak, Hanzehogeschool, Enrance, Energy Valley, Gasunie.

³⁰ Attero, TenneT, Gasunie, Pon Holding, Audi, Ponoc, Provincie Drenthe, <https://www.energyvalley.nl/nieuws/power-to-gasfabriek-in-wijster-weer-stap-dichterbij>

voor de Nederlandse partijen. Het is niet gelukt om een Nederlandse pilot in te brengen als casus.

duurdere e-gas uit de installatie te bevorderen voor mobiliteit vroeg het consortium het Rijk om de fiscaliteit van gasauto's gelijk te trekken met die van hybride en elektrische auto's. Het Rijk ging hierin niet mee. Het project staat on-hold.

Power-2-Fuel en Power-2-Gas in Duiven

Afval- en energiebedrijf AVR is een grote leverancier van groene elektriciteit en warmte in de regio Arnhem. De energievraag is gedurende de dag en het jaar niet constant. Het consortium InnoFasEnergy van AVR met buurbedrijven op industrieterrein InnoFase, kennisinstellingen en gemeente,³¹ onderzocht of een tijdelijk elektriciteitsoverschot kan worden gebruikt voor waterstofproductie, en eventueel dit waterstof met CO₂ uit de rookgassen om te zetten in methaan. De haalbaarheidstudie werd in 2015 afgerond.³²

Voor de casus Power-2-Fuel (waterstof) luidde de conclusie dat onder voorwaarden een sluitende business case mogelijk was bij inzet van 15-20 bussen die rijden op waterstof uit elektrolyse. Siemens, GreenPoint, Stedin en AVR waren bereid te investeren in een nieuw tankstation met elektrolyser, mits AVR een stabiele stroomprijs garandeert, afname van waterstof is verzekerd door langdurige inzet van een vloot van 18 bussen, en er subsidie van Rijk en provincie beschikbaar is. Het project is in 2015 on-hold gezet omdat er onvoldoende uitzicht op vraag naar waterstof was. Provincie Gelderland als concessieverlener voor het OV stelt nul-emissie als doel voor de volgende concessieperiode, maar die begint pas in 2023 (de busvloot in de regio omvat ±220 bussen).

Voor Power-2-Gas (methaan) werd geconcludeerd dat geen sluitende business case mogelijk was bij de stand van techniek (kosten apparatuur voor elektrolyse en methanisatie, alsook efficiency van methanisatie) en de lage prijs van gas ten opzichte van elektriciteit. Ook was onzeker hoeveel overschot CO₂ beschikbaar zou zijn na levering aan glastuinbouw. In 2017-2018 zou de casus heroverwogen worden. Realisatie van Power-2-Gas is daarmee voorlopig niet aan de orde. Inmiddels bouwt AVR wel een installatie voor CO₂-afvang (60 kton/jaar).

Archypel: waterstof voor energieopslag in autarkische woning

Energieopwekking gebeurt steeds vaker kleinschalig en lokaal met wind en pv-panelen, waarbij de vraag is wat te doen als de opwekking groot is en de vraag klein is, en duurzame elektriciteit tegen lage kosten beschikbaar is. Netbeheerders kunnen door toepassing van 'stand-alone' systemen investeringen in de energieinfrastructuur beperken. Het project Archypel (2016, afgerond) heeft de techniek uitgewerkt voor een systeem waarbij een huis alle energie op eigen terrein opwekt en opslaat in waterstof en batterijen (een 100% duurzame energie-autonome woning zonder netaansluitingen) en de commerciële haalbaarheid van zo'n systeem onderzocht.³³ Het energiesysteem is opgebouwd uit de componenten water elektrolyser, waterstofcompressor, brandstofcel, warmtepomp, waterstofopslagtank(s), batterij, regelsysteem en AC/DC converter.

De haalbaarheidstudie concludeert dat een Archypelsysteem technisch mogelijk is, maar de business case op dit moment niet interessant. De benodigde ruimte voor alle zonnepanelen en windturbines te groot voor de meeste woningen. Voor de winterperiode is een waterstofopslagtank nodig van ongeveer 10 m³. Ook zijn de kosten nog te hoog. Er zijn betere kansen voor een Archypelsysteem dat verbonden is met het elektriciteitsnet, of aaneengeschakelde microgrids, waardoor het systeem kleiner en goedkoper kan worden (lagere investeringskosten) en gebruik kan maken van de infrastructuur in Nederland. Onderzoek en ontwikkeling kunnen op termijn nieuwe kansen bieden; zo kan men de waterstofstroom in micro-wkk's met aardgasreformer en brandstofcel deels afscheiden en comprimeren, waardoor een small-scale home refuelling systeem dichtbij is.

Power to X Nieuwegein

Het project Power to X onderzoekt hoe men door waterstofproductie en warmtelevering de benutting van opgewekte zonnestroom kan optimaliseren zonder verzwarend van het elektrici-

³¹ AVR, Waterschap Rijn en IJssel, gemeente Duiven, Liander, WUR, DNV GL, CarbonOro, Alterra, Siemens Nederland, Cofely Zuid Nederland (nu Engie), Stedin

³² InnofasEnergy – Eindrapport aan stuurgroep April 2015

³³ Archypel, Haalbaarheidsstudie naar kleinschalige energieopslag van duurzame elektriciteit met waterstof, ISPT, Alliander, Hogeschool Arnhem Nijmegen, HyET, Hydron Energy, MTSA Technopower, NedStack, Process Design Center. Budget 50k€ uit TKI Gas Systeemintegratie.

teitsnet.³⁴ Waternet bouwt een zonnepark op het terrein in Nieuwegein waar rivierwater wordt gewonnen, voorgezuiverd en getransporteerd naar de Amsterdamse Waterleidingduinen. De installatie gaat in de eerste plaats elektriciteit leveren aan het lokale net. Onderzocht wordt of een deel van de zonnestroom kan worden omgezet in waterstof. Pitpoint wil dit afnemen voor zijn waterstoftankstation in Nieuwegein (bouw in 2019). Met de zonnestroom kan ook de warmte die in de zomer wordt gewonnen uit het gewonnen rivierwater met een warmtewisselaar en warmtepompen worden verhoogd, in de bodem opgeslagen en in de winter benut voor verwarming van woningen.

Eind dit jaar is een simulatiemodel voor de integratie van technieken en toepassingen gereed, dat niet alleen voor deze casus gebruikt kan worden maar breed toepasbaar moet zijn voor situaties met lokale energieopwekking en gebouwde omgeving. In een vervolgproject wordt het systeem voor de casus uitgewerkt en investering voorbereid. Een belemmering voor realisatie is dat de huidige wetgeving opslag van te hoge warmte in de bodem niet toestaat. In afwachting van onderzoek naar de milieueffecten (dit is onderdeel van het vervolgproject) worden hooguit vergunningen in het kader van pilots en onderzoeken verleend.

Power to Protein

In een ander project in de watersector wordt lokaal opgewekte elektriciteit benut voor de productie van waterstof, dat door bacteriën wordt gebruikt om ammonia en kooldioxide vast te leggen in de vorm van eiwitten (single cell proteins). De bacteriën zitten in een reactor die wordt gevoed met grondstoffen uit de afvalwaterketen. Tot 70% van het droge celgewicht bestaat uit het te oogsten eiwit. De reactor is op pilotschaal ontwikkeld door KWR en Avecom en wordt getest bij rioolwaterzuiveringen.³⁵

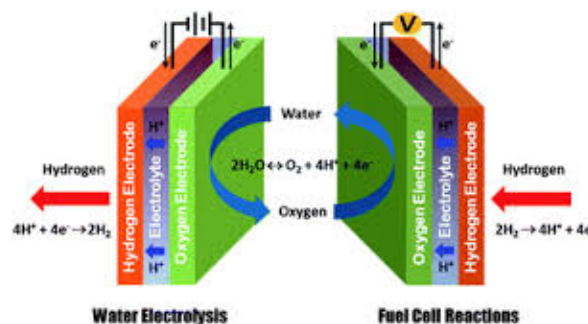


Fig. 11 Schema reverseerbare brandstofcel (bron Centre for Electrochemical Energy Storage MIT)

Flexnode: reverseerbare brandstofcel

Energy Matters, Hanzehogeschool en partners ontwikkelen en beproeven op laboratoriumschaal een reverseerbare brandstofcel (RBC) die waterstof produceert in de elektrolyse-modus, deze buffert en later weer omzet in elektriciteit en warmte in de brandstofcelmodus.³⁶ Op het moment van schrijven is het systeem nog niet operationeel. De gecontracteerde fabrikant ging failliet zodat men gedwongen werd om zelf het systeem te integreren uit al geleverde en nieuwe onderdelen. Voor sommige onderdelen lopen nog onderhandelingen met leveranciers. De proef begint eind van het jaar en loopt enkele maanden tot einde project (2015 – 2017). Wellicht wordt een vervolgproject gestart om meer ervaringen op te kunnen doen. Er wordt getest met realistische gebruiksprofielen bij het Energy Transition Centre. In samenwerking met Alliander en met behulp van model-based forecasting worden business modellen ontwikkeld voor de inzet van RBC voor energieopslag en handelen met onbalans.

Ter vergelijking is ook een micro-wkk van Viessmann aangeschaft. Deze werkt op aardgas, dat met een reformer wordt omgezet in waterstof voor een brandstofcel, en er zit een gasboiler in. In Japan zijn meer dan 200.000 micro-wkk's met aardgasreformer en brandstofcel geïnstalleerd, en de leveranciers Panasonic en Aisin Seiki betreden ook de Europese markt.³⁷ Marktleider Panasonic doet dit samen met de Duitse boilerfabrikant Viessmann. Dit is de eerste leve-

³⁴ <https://www.kwrwater.nl/projecten/power-to-x/>, KWR, Waternet, VolkerWessels, Stedin, PitPoint en Allied Waters (2017), TKI Watertechnologie. De partners behalve Stedin hebben een vervolgproject ingediend bij TKI's Urban Energy en Watertechnologie.

³⁵ <https://www.kwrwater.nl/actueel/unieke-pilot-power-to-protein-gestart-op-rwzi-enschede/>

³⁶ <http://energiekaart.net/initiatieven/flexnode/> Energy-Matters, Hanzehogeschool Groningen, Gasterra, Gasunie, Alliander, Hydron Energy. Project in het kader van TKI.

³⁷ <https://www.japantimes.co.jp/news/2017/06/19/business/corporate-business/panasonic-cranks-market-exposure-home-fuel-future/#.Wcdt70yiH64>

ring in Nederland. Aanvankelijk was het idee om de RBC ook met reformer te combineren maar hier is van afgezien. De RBC heeft een gesloten waterstofsysteem, maar zou kunnen dienen om waterstof te maken voor andere toepassingen.

3.4 Plannen voor waterstof van de Noordzee

Er zijn diverse plannen om de Noordzee te gebruiken voor waterstofproductie. Deze bevinden zich veelal in de fase van haalbaarheidstudie.

North Sea Programme

Het North Sea Energy programma is in mei 2017 van start gegaan en beoogt om activiteiten rond energiewinning om de Noordzee te bundelen. Dit programma wordt ondersteund door Topsector Energie en heeft een twintigtal deelnemers vanuit bedrijfsleven, brancheorganisaties, onderzoeksinstituten en NGO's.³⁸ Er wordt gezocht naar synergie tussen offshore sectoren en hun fysieke en logistieke infrastructuur. Verschillende casussen worden onderzocht. De visie is dat de olie- en gasplatforms op korte termijn worden aangesloten op stroomkabels en stoppen met eigen elektriciteitsopwekking met gas-turbines en –motoren onder druk van de aangescherpte NOx-emissienormen voor gasmotoren in 2019. Dit draagt bij aan de ontwikkeling van een offshore stroomnet, dat vervolgens (2023 – 2030) omzetting van (overtollige) windenergie in waterstof (of methaan) mogelijk maakt voor peak shaving. Het gas kan worden getransporteerd via de gasleidingen. Dit ontlast het elektriciteitsnet bij groot aanbod van windenergie en biedt de mogelijkheid voor opslag. De gedachte is dat na 2030 de offshore infrastructuur (pijpleidingen, gasvelden, platforms) kan worden benut voor de grootschalige omzetting en opslag van windenergie, zodat veel wind in het energiesysteem kan worden ingevoerd zonder zware aanpassingen.³⁹

Windwaterstof op olie- en gasplatforms

Hoogleraar Catrinus Jepma bepleit de inzet van te zijner tijd overbodige olie- en gasplatforms op

zee als fabrieken van groene waterstof.⁴⁰ Naar schatting gaat het om 600 platforms. Windenergie uit naburige parken kan op deze platforms met elektrolyzers worden omgezet in waterstof, dat via bestaande of nieuw aan te leggen gasleidingen aan land kan worden gebracht. Dit spaart de aanleg van elektriciteitskabels uit. Op een groot platform is fysiek plaats voor 250 MW elektrolyzers, op een klein platform voor 60 MW. Twee grote platforms met elektrolyzers zijn voldoende voor 1 windpark van 600 MW.

Jepma onderzocht de haalbaarheid aan de hand van business cases voor productieplatforms van Engie in de Noordzee. Offshore waterstofproductie is voordelig onder de voorwaarden dat een elektriciteitskabel naar land kan worden uitgespaard, of dat de groene waterstof tegen een hogere prijs verkocht kan worden dan grijze waterstof. De berekende kostprijs voor waterstof, inclusief voor het aan land brengen van de groene waterstof bijgemengd in een bestaand gasleiding of via een nieuwe leiding, is €3-4 per kilo, tegen €1,5-2 voor grijze waterstof uit aardgas. De verwachting is dat de prijs zal dalen bij opschaling van de toepassing, waarbij meerdere platforms gasleidingen delen. Ook prijsdaling van benodigde apparatuur zal daaraan bijdragen. De onderzochte variant waarbij het platform afhankelijk van marktprijzen elektriciteit produceert of opslaat in waterstof is niet haalbaar vanwege het dure elektriciteitstransport. Alleen “dedicated” waterstofproductie op de platforms is dus kansrijk. De bovengrens voor waterstofgehalte in gasleidingen moet omhoog om windwaterstof kosteneffectief naar de wal te vervoeren.

Het gebruiken van platforms voor windwaterstof is pas aan de orde als de platforms geen rol meer hebben voor olie- of gaswinning. Herbestemmen kan dan tijd kopen om decommissio-ning uit te stellen als de platforms nog voor andere doeleinden bruikbaar zijn.

Energie-eiland: North Sea Wind Power Hub

De ideevorming over windwaterstof heeft een verdere impuls gekregen door de aankondiging dat Gasunie gaat deelnemen in het energie-eiland consortium van elektriciteitsnetbeheer-

³⁸ <https://www.tno.nl/nl/aandachtsgebieden/energie/geo-energy/transitie-naar-duurzame-energie/north-sea-energy-programma/>

³⁹ Finding synergy in offshore energy, Ewald Breunese, Shell Nederland, Symposium “Waterstof of Niet(s) - De Toekomst van Waterstof als Energiedrager en Brandstof”, Assen, 8 juni 2017

⁴⁰ Catrinus Jepma, hoogleraar energie en duurzaamheid aan de Rijksuniversiteit Groningen en verbonden aan het Energy Delta Institute (EDI). <https://www.energydelta.org/mainmenu/news/obsolete-gas-and-oil-platforms-can-service-a-sustainable-energy-s>

ders TenneT TSO B.V, TenneT TSO GmbH (Duitsland) en Energinet.dk (Deense TSO voor zowel elektriciteit als gas) dat alle windparken op de Noordzee aan elkaar wil koppelen via een kunstmatig eiland op de Doggersbank. Ook Havenbedrijf Rotterdam treedt toe tot het consortium. Het initiatief, waarvoor ook deelname van Groot-Brittannië, België en Noorwegen wordt gezocht, wordt gesteund door de Europese Commissie. Gasunie onderzoekt de mogelijkheden om op het eiland een deel van de windenergie om te zetten in waterstof, dat zoveel mogelijk via bestaande gasleidingen aan land moeten worden gebracht.⁴¹

Tot 2023 zijn 3,5 GW near-shore windparken gepland op 5 locaties voor de Nederlandse kust. Hiervoor worden 5 gestandaardiseerde 700 MW connectoren geplaatst van 150 M€ elk. Tot 2035 worden nog eens 7-10 GW near-shore windparken ontwikkeld, waaronder windpark IJmuiden Ver. Er wordt onderhandeld over verbinding van dit park met een gepland Engels (East Anglia) windpark via de UK Windconnector om te besparen op infrastructuur en de markt te faciliteren. Daarna zijn de near-shore mogelijkheden benut en moet men verder de zee op. Daarvoor is het idee ontstaan om de windparken op de Noordzee aan elkaar te koppelen via een kunstmatig eiland op de Doggersbank. Het eiland moet ook een werkeiland worden voor onderhoud van de omliggende windparken.

Voorafgaand aan de publiciteit over het idee is gesproken met NGO's, die na eerste weerstand tegen verstoren van het mariene leven voorzichtig positief reageerden. Vissersbelangen zouden nog tegenstand kunnen opleveren. Overheden rondom de Noordzee moeten erachter gaan staan, en dan volgen de TSO's van de overige landen ook wel. De rationale voor de landen om mee te doen is dat als de geplande near-shore windparken klaar zijn je verder de zee op moet voor nieuwe parken, en dan is samenwerken goedkoper. Het overleg tussen de landen over onder meer de kostenverdeling zal ruwweg 10 jaar overleg vergen, daarna kan het in enkele jaren gebouwd worden. Dan zou het eiland er dus tussen 2030 en 2035 kunnen zijn.

⁴¹ <https://nos.nl/artikel/2192724-nederlandse-energiereuzen-gaan-wind-en-zonne-energie-opslaan.html>; <https://www.tennet.eu/nl/onze-kerntaken/innovaties/north-sea-infrastructure/>

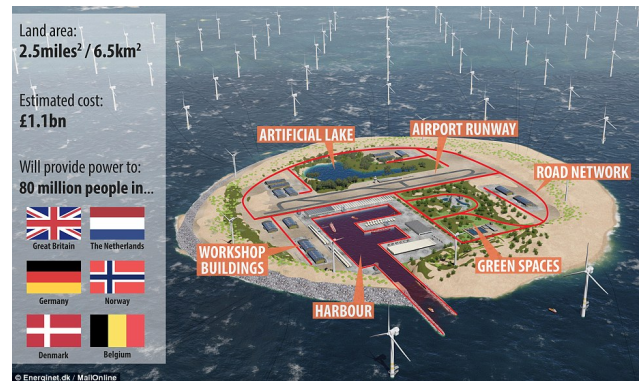


Fig. 12 North Sea Wind Power Hub (bron Energinet.dk)

In de eerste fase is sprake van een 30 GW interconnectie, met 15 verbindingen van 2 GW vanaf het eiland naar de omringende landen. Zulke zware verbindingen bestaan nog niet, maar de industrie wordt uitgedaagd om eraan te werken. Richting 2050 wordt 100 GW windopzee capaciteit verwacht. Het lukt dan niet meer om alle energie met kabels weg te krijgen. In de vorm van waterstof kan het wel. Er is voldoende ruimte op het eiland voor de eerste ontwikkeling elektrolyzers. Verwacht wordt dat elektrolyse tegen die tijd een volwassen, goedkopere technologie is dan vandaag. Er loopt al een gasleiding in de buurt van het eiland, die kan worden aangepast met bijv. pipe-in-pipe techniek.

Proef met elektrolyzers op zee

Als voorbereiding op grootschalige waterstofproductie uit wind op zee is het volgens meerdere partijen nuttig om binnen 2 tot 3 jaar een proeftuin te ontwikkelen voor offshore elektrolyse. Zo kan men ervaring opdoen met opwekking van windwaterstof onder Noordzeecondities, met transport van waterstof naar wal door bijmengen in een aardgasleiding of door dedicated leidingen, en met regelgeving en procedures. Het zou een (open) proeftuin moeten worden waar meerdere leveranciers hun system kunnen beproeven. Het leveren van het 'proof of concept' hoeft in eerste instantie niet met windelektriciteit. Het kan op een (geëlektrificeerd) platform, bij de aanlanding van de kabel voor windpark Hollandse Kust Zuid op de Maasvlakte, en na 2025 op een te bouwen eiland bij windpark IJmuiden Ver (na 2025).

4. Waterstof voor nul-emissie verkeer en vervoer

4.1 Inleiding

Elektrische aandrijving met brandstofcellen op waterstof is naast batterij-elektrische aandrijving de belangrijkste mogelijkheid voor emissievrije mobiliteit en transport. Waar batterij-elektrische (en met name plug-in hybride) personenauto's, OV-bussen en in mindere mate bestelauto's al een significant marktaandeel hebben bereikt, bevinden brandstofcelvoertuigen zich nog in het stadium van prototypes en preseries (vrachtauto's, bestelauto's, bussen). Voor enkele modellen brandstofcelpersonenauto's is wel sprake van serieproductie. Voor zwaar vervoer loopt de marktintroductie van batterij-elektrische aandrijving achter; juist hier is waterstof een oplossing om de actieradius te verlengen en de tanktijden te verkorten ten opzichte van batterijen.

Waterstof kan in verschillende soorten voertuigen en vaartuigen worden ingezet. Dit hoofdstuk gaat in op initiatieven met:

- §4.2: Personen- en bestelauto's
- §4.3: OV-bussen
- §4.4: Vrachtwagens
- §4.5: Waterstoftankstations
- §4.6: Treinen
- §4.7: Vaartuigen
- §4.8: Overige voer- en vliegtuigen.

4.2 Auto's op waterstof

Er is een beperkte beschikbaarheid van brandstofcelauto's. In Nederland reden in oktober 38 auto's van twee modellen, voornamelijk de Hyundai ix35 en daarnaast enkele Toyota Mirai's. Deze auto's zijn in serieproductie; een derde model is niet in Nederland leverbaar en er zijn meer modellen aangekondigd en in ontwikkeling. Klanten zijn veelal overheden (Rijk, gemeenten), bedrijven die actief zijn met waterstof, onderzoeksinstituten en een taxibedrijf. Er staan nu 3 tankstations ter beschikking maar dit moeten er de komende jaren meer worden (zie §4.5). In het toekomstbeeld van het H2Platform groeit het aantal auto's naar 1.500-2.000 (2020), 15.000 (2025), 100.000-200.000 (2030) en 2,5-3 miljoen (2050), ondersteund door 15-20 tankstations (2020), 20-80 (2025), en 50-200 (2030). Naar verwachting is vanaf 2030 sprake van massaproductie.

Er zijn meerdere grote Europese projecten waarin tankstations en auto's tegelijk gestimuleerd worden. Een voorbeeld is H2Mobility Europe (H2ME, 2015 – 2020), waarin 200 auto's (Hyundai en Mercedes), 125 elektrische bestelauto's met brandstofcel range extender (Renault met Symbio FCell) en 29 waterstoftankstations (Duitsland 20, Frankrijk 3, Groot-Brittannië 3 en Scandinavië 3) op de weg gebracht worden.⁴² Nederland neemt via het ministerie van I&W en Stedin deel in het zusterproject H2ME 2 (2016 – 2022), dat 1.230 nieuwe waterstofauto's in 8 landen op de weg brengt, waaronder 1.000 elektrische bestelauto's en bestelbussen van Renault met brandstofcel range extender.⁴³ Hiermee verdrievoudigt het aantal brandstofcelauto's in Europa. De bestelauto's komen volgens het projectplan niet in Nederland op de markt maar enkel in de landen uit het eerste project. Ook personenauto's van Mercedes en Honda komen via dit project beschikbaar in Europa (niet per se Nederland). Er worden ook 20 nieuwe vulpunten gebouwd met waterstof uit on-site elektrolyse.

Gemeente Arnhem wil graag meer auto's aantrekken door vraagbundeling in het kader van het Europese H2Nodes project. Dit omvat een promotiecampagne met aanschafsubsidies. Er rijden nu 4 brandstofcelauto's in Arnhem, het doel van vraagbundeling is 100. De TCO van brandstofcelauto's is in Nederland redelijk gunstig dankzij vrijstelling van BPM en MRB, lage bijtelling (4%), geen accijns op waterstof en Milieu-investeringsaftrek (MIA). Deze fiscale voordelen gelden in elk geval t/m 2020. Het blijkt echter moeilijk om meer aanbod te krijgen van de leveranciers. De hoofdmoot van de productie wordt gereserveerd voor de leidende markten voor waterstof, waar al een meer uitgebreide

⁴² <http://www.fch.europa.eu/project/hydrogen-mobility-europe>, Partners o.a. H2 Mobility Deutschland, Symbio FCell, ITM Power, Air Liquide, Linde, Daimler, Hyundai, WaterstofNet, OMV, Honda, Nissan, BMW, Renault, Toyota, budget 62 M€ waarvan 30 M€ subsidie van FCH JU.

⁴³ <http://www.fch.europa.eu/project/hydrogen-mobility-europe-2>, partners o.a. Daimler, Audi, Honda, Symbio FCell, Air Liquide, Stad Nancy, ITM Power, Agglomeration Nantaise, Stedin, København, H2 Mobility Deutschland, BMW, Nissan, Renault, Taxi Electrique Parisien, Ministerie van I&W, budget 102 M€ waarvan 35 M€ subsidie van FCH JU.

tankinfrastructuur bestaat en de industrie in consortia samenwerkt (zoals H2ME en zie ook §8.4). Vraagbundeling in Nederland op grotere schaal zou de autoindustrie op andere gedachten kunnen brengen. Sommige bedrijven overwegen om de krachten te bundelen en gezamenlijk brandstofcelauto's aan te schaffen, maar er is nog niet sprake van een concreet project.

De grote fabrikanten bieden in Nederland nog geen bestelauto's met brandstofcel aan, maar de Nederlandse firma Accenda in Delft bouwt auto's om naar elektrische aandrijving met of zonder brandstofcel als range extender onder de naam Hydroelectric resp. Ekoelectric.⁴⁴ Er is een tiental auto's omgebouwd.

Car as Power Plant

Gemiddeld worden auto's 5% van de tijd gebruikt om te rijden. Een auto met brandstofcel op waterstof kan ook de overige 95% van de tijd elektriciteit leveren. Dit gebeurt met hogere efficiëntie dan van de huidige Nederlandse stroomopwekking. In het project Car as Power Plant onderzoekt TU Delft daarom de combinatie van rijden en energie leveren uit waterstof met brandstofcellen. Dit gebeurt samen met partijen als GasTerra, Q-Park, Stedin, CNG net, RDW, Bovemij, Shell, en HyTruck.⁴⁵

In het project heeft Accenda samen met Hyundai een brandstofcelauto voorzien van een stopcontact als elektriciteitsuitgang. Hierdoor kan de auto in stilstand elektriciteit leveren aan een net of aan een woning of bedrijfsgebouw. Het geleverde vermogen is 10 kW, genoeg om gemiddeld tien huizen te voorzien in hun elektriciteitsgebruik. Onderzocht worden het rendement en de werking van stroom leveren met brandstofcelauto's, en het effect op de energierekening. Toyota's Mirai heeft in de Japanse versie een power-out aansluiting waarmee elektriciteit kan worden geleverd. Dit past in het beleid om Japan beter voor te bereiden op de gevolgen van aardbevingen zoals stroomstoringen. De capaciteit is genoeg om een huishouden enkele dagen van energie te voorzien.⁴⁶

⁴⁴ www.accenda.nl/waterstof-elektrische-rijden-innovatie.html

⁴⁵ NWO subsidieert het project vanuit het programma Uncertainty Reduction in Smart Energy Systems.

⁴⁶ <http://www.businessinsider.com/this-toyota-fuel-cell-car-can-power-your-house-2014-11?international=true&r=US&IR=T>

Er zijn contacten met meerdere autofabrikanten om verder te gaan met het project. Er worden verschillende varianten verkend van benutting van brandstofcelauto's als power plant in garages om pieken en dalen in het net op te vangen en bij te dragen aan netstabilisatie. Er wordt gewerkt aan een business model met handelen op de onbalansmarkt en leveren van netwerkdiensten. Een nieuw idee is om niet het opgeslagen waterstof uit de auto zelf, maar waterstof uit lagedruk-leidingen in te zetten in brandstofcelauto's in een parkeergarage. Een ander idee is om brandstofcelauto's in te zetten als energieleverancier bij evenementen.



Fig. 13 Waterstofbus in Apeldoorn (bron Hymove)

4.3 OV-bussen op waterstof

Het ministerie van I&W heeft in 2014 subsidie verstrekt aan 5 regio's voor 10 brandstofcelbussen (€850.000 per project met 2 bussen). Na een aanlooperperiode om de publiek-private afstemming tussen OV-opdrachtgever, vervoerder, busbouwer, tankstationexploitant en waterstofleverancier te regelen, worden de eerste van deze bussen nu ingezet en de overige volgen in de nieuwe dienstregeling in december dit jaar.

In Eindhoven/Helmond rijdt Connexxion met 2 Phileas waterstofbussen van VDL-APTS die gereviseerd zijn (o.a. met nieuwe brandstofcellen) nadat ze eerst bij GVB in Amsterdam reden. De bussen tanken bij een bestaande installatie in Helmond.

In Groningen heeft Qbuzz in opdracht van OV-bureau Groningen Drenthe 2 Van Hool bussen aangeschaft in het EU-project High VLO City. Qbuzz nam de bussen over van San Remo, waar men de bussen bij gebrek aan een tankstation niet kon inzetten.⁴⁷ Antwerpen en Aberdeen

⁴⁷ <http://highvlocity.eu> (2012 – 2019). Dit project brengt 14 brandstofcelbussen van Van Hool op de weg. Nederlandse partners zijn Qbuzz, Pitpoint en WaterstofNet (in totaal 12 partners). Budget 29 M€ waarvan 13,5 M€ van FCH JU.

hebben in High VLO City elk 5 bussen getest; Antwerpen kende problemen terwijl Aberdeen uit tevredenheid de vloot heeft uitgebreid. De Groningse bussen gaan vanaf december 5 jaar rijden en tanken bij een openbaar toegankelijk tankstation van Pitpoint in Delfzijl dat waterstof afneemt van AkzoNobel's chloorelektrolyse.

In Rotterdam rijden 2 nieuwe Van Hool waterstofbussen bij de RET, die waterstof tanken in Rhooen. Deze bussen vallen tegelijk onder het EU-project 3EMotion.⁴⁸

In Zuid-Holland heeft Connexxion bij VDL 4 waterstofbussen besteld (zie verder). Hiervoor wordt naast de I&W-subsidie ook subsidie uit het EU-project 3EMotion ingezet. Deze bussen worden ingezet in de concessie Hoekse Waard Goeree Overflakkee (HWGO) en gaan eveneens tanken bij het tankstation in Rhooen. De capaciteit van het tankstation wordt vergroot om de 4 bussen gedurende de dag van waterstof te kunnen voorzien.

In Arnhem zouden 2 bussen gaan rijden bij Connexxion maar dit gaat niet door. Provincie Gelderland wil de I&W-subsidie nu besteden aan 3 bussen van Hymove die gaan rijden in Apeldoorn. Gelderland had al 1 Hymove bus gesubsidieerd zodat er in totaal 4 bussen komen te rijden. In Apeldoorn moet een tankstation komen (elektrolyse met windenergie, tevens bedoeld om netstabiliteit te bieden). Het project loopt via ZETT, een leasefirma die aan OV-bedrijven een pakket aanbiedt van bussen en tankfaciliteit tegen een kilometerprijs. ZETT onderhandelt met de Europese Investeringsbank over financiering van een veel grotere vloot na de pilot met 4 bussen. Naast I&W-subsidie en eigen middelen van ZETT is een provinciale exploitatiebijdrage nodig (ordegrootte 1-2 M€). Het besluit over de pilot valt eind 2017. Hymove uit Arnhem bouwt de nieuwe bussen met de Poolse fabrikant Ursus. De eerdere bus werd door het eveneens Poolse Solbus gebouwd. HyMove ontvangt een subsidie van het Europees Fonds voor Regionale Ontwikkeling voor de ontwikkeling van een 60kW brandstofcel range extender.⁴⁹

⁴⁸ <http://www.3emotion.eu> (2015 -- 2019). Dit project brengt 21 brandstofcelbussen op de weg in 6 Europese steden waaronder 6 in Rotterdam. 20 partners waaronder uit Nederland RET en provincie Zuid-Holland en Waterstof-Net. Budget 42 M€ waarvan 15M€ subsidie van FCH JU.

⁴⁹ <http://www.hymove.nl>

JIVE-2: 50 nieuwe OV-bussen

Er komen in de komende jaren 50 bussen bij in het project JIVE 2 met FCH JU-financiering. Dit goedgekeurde project omvat 152 bussen waarvan 50 voor Nederland die worden verdeeld over Groningen (20), Zuid-Holland (20), en Noord-Brabant (10). Samen met het ministerie van I&W onderzoeken nu de betrokken provincies een speciale projectorganisatie om gezamenlijke inkoop van de bussen en benodigde waterstof met de laagst mogelijke TCO mogelijk te maken. Het zusterproject JIVE 1 zonder Nederlandse deelname omvat 139 bussen.⁵⁰ De aanbesteding van deze bussen loopt in Duitsland en het VK.



Fig. 14 VDL elektrische bus met range extender, hier in de variant voor mierenzuur (bron TUE)

De JIVE-2 bussen voor Groningen moeten vanaf december 2020 gaan rijden. Het OV-bureau Groningen Drenthe vraagt in de komende aanbesteding (die in januari 2018 op de markt komt) deze opschaling naar 22 waterstofbussen uit. Naast het tankstation in Delfzijl, dat geschikt is voor 5 bussen, zal daarvoor een tankvoorziening in de stad Groningen bij het opstel terrein van de bussen komen, zo mogelijk openbaar toegankelijk. De provincie Zuid-Holland is in gesprek met de vervoerder over het inpassen van 20 waterstofbussen begin 2020 in de dienstregeling en in de bedrijfsvoering van HWGO (de inzet is niet opgenomen in concessievoorwaarden). In Oude Tonge op Goeree wordt een openbaar tankstation gepland waar deze bussen zouden kunnen tanken, naast andere voertuigen. Noord-Brabant is in gesprek met Arriva en Connexxion, concessiehouders van West en Oost resp. Zuid-oost Brabant, over de inzet van de 10 bussen. Behalve in Helmond zouden de bussen kunnen tanken in

⁵⁰ JIVE 1 (2017 – 2023) brengt 139 brandstofcelbussen op de weg in 5 landen met 32 M€ subsidie van FCH JU.

Breda, waar de bouw van een tankstation wordt voorbereid met Interreg-subsidie.

VDL: e-bus met brandstofcel range extender

Een 12-meter brandstofcelbus kost nu nog €850.000. JU FCH wil uitkomen op een prijs van €450.000. VDL kan nu €650.000 halen, en denkt dat het verder omlaag kan, door toepassing van een range extender module bij een elektrische bus. Inmiddels heeft VDL ruim 200 elektrische bussen geleverd en nog eens 200-300 in de orderportefeuille.

De range extender module bestaat uit een 1,1m lange inbouwkast met brandstofcellen, waterstoftanks en alle randapparatuur. De module kan op verschillende manieren worden ingezet: als aanhanger (2,1m inclusief dissel) achter de elektrische bus, optisch overlopend in het busontwerp; als opbouw achter de cabine van een elektrische truck; weggewerkt in een oplegger gecombineerd met een elektrische trekker; of als stand-alone generator. De module is ontworpen in samenspraak met fabrikanten van brandstofcellen zodat er verschillende systemen in passen. Het grootste vermogen dat past is momenteel 103 kW. TÜV heeft een goedkeuring afgegeven voor de aanhanger. De range extender wordt op den duur met een standaardstekker (Combo2 CCS) verbonden met de bus (of truck). Het idee is dat een busvervoerder zijn complete vloot nul-emissie kan laten rijden door een combinatie van elektrische bussen en range extender aanhangers. De aanhangers kunnen worden uitgewisseld tussen de bussen, zodat een flexibeler en kosteneffectiever vlootmanagement mogelijk is dan bij een vloot van elektrische en brandstofcelbussen.

Om de kosten van een brandstofcelsysteem beneden €100.000 te brengen is de toepassing van een goedkopere brandstofcel met langere levensduur essentieel. De ontwikkeling hiervan is het doel van het EU-project Giantleap (2016 – 2019) waarin VDL deelneemt naast o.a. Bosch.⁵¹ Het brandstofcelsysteem wordt opgebouwd uit een veel goedkopere stack, waarvan het ontwikkeldoel is om de nog beperkte levensduur substantieel te verlengen door toepassing van gea-

vanceerde diagnostiek, en in massa geproduceerde componenten voor de randapparatuur.

In plaats van gecombineerd waterstof is mierenzuur een mogelijke alternatieve energiedrager voor de brandstofcelbussen. Dit wordt ontwikkeld door Team FAST van TU Eindhoven, die voor proefneming gebruik maakt van een door VDL ter beschikking gestelde range extender module. De belofte is dat de keten van mierenzuurproductie uit CO₂, water en elektriciteit 80% efficiënt is; hiervan kan dan weer waterstof gemaakt worden. Dat zou hoger zijn dan waterstofproductie met elektrolyse en compressie van waterstof. Een tank met mierenzuur maakt de range extender module wel zwaarder maar bespaart ruimte en het mierenzuur wordt gaandeweg verbruikt. De warmte van de brandstofcel kan worden benut om het waterstof uit mierenzuur vrij te maken.



Fig. 15 Waterstof-vuilmiswagen (bron E-trucks Europe)

4.4 Vrachtauto's op waterstof

Vrachtauto's op waterstof halen veelvuldig het nieuws door onthullingen van prototypes en aangekondigde productieplannen in het buitenland, met name Nikola One, Tesla en Toyota's Project Portal. Nikola beweert een truck te gaan leveren met een actieradius van 1.200 tot 2.000 km, een vermogen dat het dubbele bedraagt van dieseltrucks en zelf een netwerk op te bouwen met 364 tankstations, te beginnen in 2018. Toyota heeft een prototype van een truck gedemonstreerd met twee aandrijflijnen van de Mirai personenauto. In Zwitserland heeft een consortium van bedrijven eerder dit jaar een 34-ton vrachtwagen met waterstofbrandstofcel gedemonstreerd.⁵²

⁵¹ http://giantleap.eu/?page_id=27, Sveuciliste u Splitu, Universite de Franche-Comte, Bosch, ElringKlinger, VDL, budget 3,3 M€, volledig van FCH JU.

⁵² <http://www.protononsite.com/news-events/switzerland-unveils-fuel-cell-powered-heavy-truck-and-first-hydroelectric-hydrogen>

E-trucks Europe: vuilniswagens

Er zijn meerdere Nederlandse initiatieven om vrachtauto's op waterstof te ontwikkelen en testen. E-trucks Europe, een MKB in Westerhoven en Lommel gesticht vanuit Beukers Autoschade, begon met 1 vuilniswagen in Eindhoven in project Waterstofregio Vlaanderen Zuid-Nederland, daarna 2 in project 'Life 'N Grab Hy!', en toekomstig 15 in REVIVE, waarvan 9 in Nederland (2 Groningen, 2 Amsterdam, 2 Helmond, 2 Roosendaal, 1 Breda; daarnaast Antwerpen en Bolzano).⁵³ Het bedrijf gebruikt een lichte DAF als basistruck, waar de motor wordt uitgethaald en elektrische aandrijving ingebouwd met een brandstofcel als range extender voor een klein batterijpakket. E-trucks Europe is betrokken bij het aangekondigde demonstratieproject Duwaal dat 100 waterstofvuilniswagens op de weg wil brengen in Noord-Holland (zie verder).

VDL: distributietrucks

VDL ontwikkelt twee varianten: een 40-ton truck in het Interreg project Waterstofregio 2.0 en een 27-ton truck in het EU-project H2Share (2017 – 2020).⁵⁴ Ook in deze gevallen wordt een DAF-truck als basis genomen en voorzien van elektrische aandrijving, accu's en brandstofcel als range extender. De VDL-trucks krijgen dezelfde range extender module als de VDL-bussen, alleen zit deze bij de bus in een aanhangwagen en bij de trucks op het chassis achter de cabine of in de oplegger. Deze trucks gaan in 2018 proefrijden in verschillende landen. Zwaardere trucks dan deze komen voorlopig niet in aanmerking voor waterstof omdat de huidige brandstofcellen niet voldoende vermogen hebben voor lange snelwegritten, aldus VDL. Projectpartner in H2Share Wystrach in Duitsland ontwikkelt hier-

voor een mobiel tankstation voor waterstof. Behalve naar de techniek wordt ook naar onder meer de infrastructuur en regelgeving gekeken die nodig is om een succesvolle marktintroductie van waterstoftrucks mogelijk te maken.

E-trucks Europe en VDL hebben via WaterstofNet regelmatig contact en vormen als het ware een heavy duty waterstofvoertuigen-cluster. DAF levert de basistrucks maar is zelf niet actief betrokken in deze projecten. De bedrijven vullen elkaar aan: E-Trucks mikt op tientallen trucks per jaar tot 30 ton, VDL ziet eerder honderden trucks per jaar vanaf 27 ton. DAF zou kunnen instappen als een grotere schaal gevraagd wordt. Vuilniswagens is een geschikte markt voor een kleine bedrijf als E-trucks want zulke voertuigen zijn al custom-made en in de publiek-private samenwerking van de afvalsector zijn klanten eerder bereid meer te betalen. Scania, de andere grote truckbouwer in Nederland, ontwikkelt ook een waterstoftruck en gaat er vanaf eind 2018 vier demonstreren in Noorwegen.⁵⁵ Nederland kan een goede positie krijgen in de markt voor zware waterstofvoertuigen.



Fig. 16 VDL waterstoftruck (bron VDL ETS)

Waterstoftrucks moeten zich nog breder in de praktijk bewijzen. Hiervoor zijn proefprojecten nodig, onder meer om de techniek te testen onder uiteenlopende (o.a. weers-)omstandigheden. Voorlopig rendeert transport op waterstof nog niet door hoge (om)-bouwkosten van de trucks en kosten van waterstof. Ook is de inzetbaarheid beperkt door te weinig tankstations.⁵⁶

⁵³ <http://lifeandgrabhy.eu>, E-trucks Europe, Cure Afvalbeheer, Baetsen Groep, Hydrogenics GmbH; subsidie van LIFE. REVIVE (Refuse Vehicle Innovation and Validation in Europe): Tractebel, Groningen, Breda en Amsterdam, E-trucks, CEA, Elements Energy, Symbio Fcell, Swiss Hydrogen, WaterstofNet, Institute of Innovative Technologies, Suez Nederland, Stadtwerke Merano en SEAB, subsidie van FCH JU (onderhandelingsfase)

⁵⁴ <http://www.nweurope.eu/projects/project-search/h2share-hydrogen-solutions-for-heavy-duty-transport-aimed-at-reduction-of-emissions/>, VDL, Wystrach, WaterstofNet, gemeente Helmond, TNO, Vlaamse organisatie voor innovatie in de logistieke sector VIL, Colruyt Groep, e-mobil BW; budget 3,5 M€, waarvan 1,7 M€ subsidie van Interreg NWE.

⁵⁵ <https://ngtnews.com/hydrogenics-selected-provide-fuel-cell-systems-four-scania-trucks>

⁵⁶ <http://www.transport-online.nl/site/53706/proef-e-truck-op-waterstof-succesvol/>

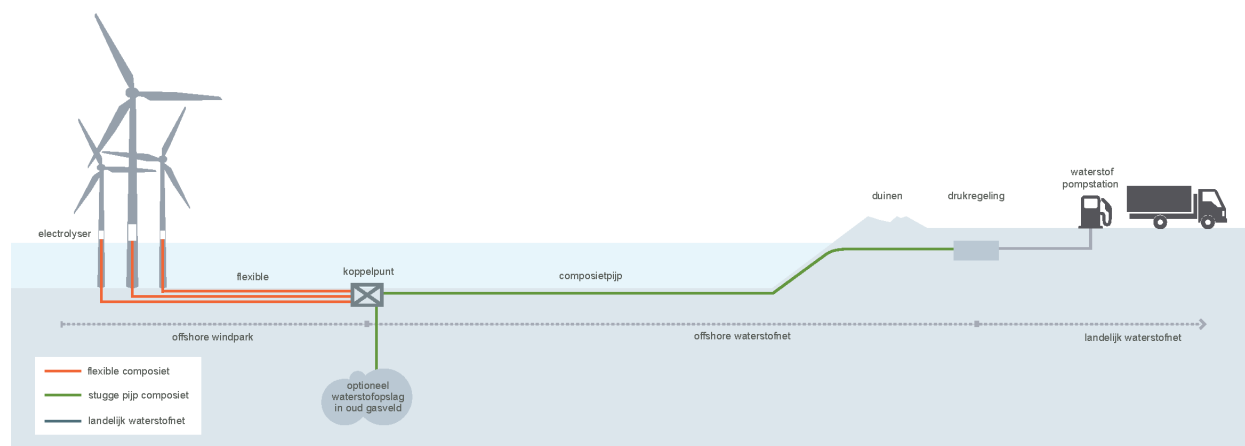


Fig. 17 Schema wind naar waterstof naar mobiliteit, hier in off-shore variant (bron HYGRO)

Duwaal / Waterstofmolen

Ging het in §3.4 om waterstofproductie uit overschotten windstroom, projectontwikkelaar HYGRO met wortels in de windindustrie pleit voor directe omzetting van wind in waterstof. HYGRO heeft samen met ECN, Energy Valley, e.a. een business case uitgewerkt voor opwekking van waterstof met windmolens en levering aan wegtransport.⁵⁷ HYGRO ziet de kostprijs van windenergie door toenemende schaalgrootte en innovaties verder dalen, maar ook de verkoopwaarde van windstroom zal dalen door overaanbod tijdens winderige dagen. Het alternatief is windwaterstof. Zoals de verzekerde afzet via de SDE een succes heeft gemaakt van windelektriciteit, heeft ook windwaterstof een verzekerde afzet nodig om te slagen. De waarde van windwaterstof is het hoogst in mobiliteit, en de kansen om snel voldoende afzetvolume te bereiken zijn het grootst in het vrachtvervoer. HYGRO positioneert zuivere windwaterstof uit elektrolyse voor mobiliteit naast goedkope, minder zuivere waterstof uit aardgas met CCUS voor de industrie.

Integratie van windmolen en elektrolyser leidt volgens HYGRO tot 30% lagere kapitaalkosten en 20% hogere efficiency doordat meerdere conversiestappen met energieverliezen worden vermeden. De elektrolyser werkt efficiënter in deellast, zodat kan bij gelijkblijvende vermo-

genselektronica in dezelfde behuizing een grotere generator gekozen kan worden met grotere wieken en daardoor hogere energieopbrengst. Er zijn geen grote risico's voor de technische integratie, wel is de regeling moeilijk vanwege de vele variabelen om rekening mee te houden.

Het is op deze manier volgens HYGRO mogelijk om voor windwaterstof op termijn hetzelfde kostenniveau te bereiken als voor windelektriciteit (bij massaproductie maar bij de huidige stand van techniek).⁵⁸ Dit geldt voor productie van 100% waterstof of 100% elektriciteit, maar hybride productie van elektriciteit enerzijds en waterstof alleen uit stroomoverschotten anderzijds is duurder.

HYGRO rust met windmolenbouwer Lagerweij een 4,5 MW windturbine uit met een 2 MW elektrolyser van een leverancier uit de VS. Dit gebeurt op het ECN Windturbine Testveld Wieringermeer. Het gaat in dit geval toch om een hybride turbine, die zowel elektriciteit als waterstof kan maken. De installatie gaat vanaf begin 2019 ordegrrootte 250 ton waterstof per jaar maken, die over de weg naar tankstations zal worden vervoerd. Om dit af te zetten zijn zo'n 70 trucks nodig. HYGRO is met GP Groot en HVC het project Duwaal (Duurzaam Waterstof Alkmaar) gestart.⁵⁹ Het doel is om in Noord-Holland 5

⁵⁷ W2H2: Wind op zee naar waterstof mobiliteit, HYGRO, ECN, Energy Expo, Energy Valley, Techmacon, Composite Agency; en Studie naar opslag, transport en distributie van hogedrukopslag van waterstof, HYGRO, Toyota NL, GP Groot brandstoffen en oliehandel, Nederlands Normalisatie-Instituut, 2 haalbaarheidstudies onder TKI Energie systeemintegratie.

⁵⁸ Uitgedrukt in LCOE, levelized cost of energy, zijnde Total Cost of Ownership gedeeld door energieproductie over de levensduur. ECN gaat bij deze berekening uit van een park van 100 windturbines van elk 10 MW op de locatie IJmuiden Ver (op ca. 80 km afstand van de kust) en de aangeleverde kosten van composiet pijpleidingen voor waterstof.

⁵⁹ DUWAAL: HYGRO, GP Groot brandstoffen en oliehandel, E-trucks Europe, HVC, ECN, Energy Valley, Ontwikkelings-

tankstations te bouwen en 100 vuilniswagens op de weg te brengen, de eerste 10 binnen 2 jaar in Alkmaar. De betrokken leverancier van de vuilniswagens is E-trucks Europe. Ook gemeente Amsterdam is een beoogde gebruiker.

De aanpak van Duwaal (windmolen met elektrolyse, tankstations en trucks in één project) is in principe herhaalbaar op andere plekken in Nederland, om te beginnen waar al Lagerweijmolens staan. Bij verspreide productie blijven de transportafstanden naar tankstations klein.

HYGRO mikt op projectfinanciering. Een bank is bereid te financieren en het Participatiefonds Duurzame Energie van Noord-Holland om deel te nemen, op voorwaarde dat de afzet van het waterstof en de trucks verzekerd is. Om dat voor elkaar te krijgen is nodig dat het Rijk voor de duur en omvang van het project (10 jaar, 100 trucks) vrijstelling verleent van accijns, wegenbelasting en energiebelasting op waterstof. In het algemeen is integraal (vraag en aanbod) en stabiel (langdurige regelingen) beleid nodig. Voor het eerste project is tevens een eenmalige subsidie nodig van €6 miljoen op totale kosten van €55 miljoen, waarvan €5 miljoen voor de turbine gedekt zijn. De overige €50 miljoen omvatten elektra, tankstations, waterstof distributie over de weg, en 100 waterstoftrucks. De aanschaf van de trucks is voorlopig fors duurder. Het kantelpunt voor kosten van trucks op waterstof versus diesel verwacht HYGRO in 2021/2022.

Voor de turbine is een SDE-beschikking afgegeven voor windelektriciteit. Er worden geen HBE (Hernieuwbare Brandstof Eenheden) afgegeven voor windwaterstof, want RVO ziet dit als dubbele subsidie. HYGRO redeneert dat er wel SDE is verstrekt voor windelektriciteit, maar geen subsidie voor waterelektrolyse, en dat de overheid daarvoor wel HBE kan afgeven. Daarbij is een argument dat er in geval van elektrolyse minder conversieverlies is in de molen waardoor de energieopbrengst in de vorm van windwaterstof hoger is dan in de vorm van windelektriciteit. Dit spaart dan SDE uit, hetgeen via HBE kan worden "uitgekeerd".

4.5 Waterstof tankstations

Het aantal waterstof tankstations wordt de komende jaren in Nederland uitgebreid van 3 naar

±16 in 2018 en 20 in 2020. In Rhooon staat sinds 2014 een station van Air Liquide. WaterstofNet heeft een station op de Automotive Campus in Helmond. In Arnhem staat een installatie van Hygear.⁶⁰ Eind 2017 opent een waterstof tankstation in Delfzijl, en er zijn plannen voor stations in Groningen, Nieuwegein, Rotterdam, Pesse, Amsterdam, Den Haag, Breda, Oude Tonge, Apeldoorn en Emmen. Alkmaar, Schiphol, Rotterdam Den Haag Airport, Apeldoorn/Deventer, Ede, Zeewolde, Venlo, Duiven, Waddinxveen en Leeuwarden worden ook genoemd als nieuwe locaties. (Zie ook voorgaande paragrafen.)



Fig. 18 Waterstof tankstation Helmond (bron WaterstofNet)

Achter de plannen zitten diverse initiatiefnemers, zoals (naast bovengenoemde): Shell, Pitpoint, Van Peperstraten Group en BP, Holthausen, Van Tilburg-Bastianen Groep, en GreenPlanet. Veelal gaat het in eerste instantie om stations waar zowel personenauto's (700 bar), vrachtauto's als bussen (350 bar) kunnen tanken om voldoende afzetvolume te verkrijgen, maar later ligt voor de hand dat de verschillende doelgroepen afzonderlijke stations krijgen (ook treinen). De klandizie van bussen op de huidige stations leidt tot wachttijd voor personenauto's omdat de bussen de buffers leeg trekken. Er worden verschillende technische oplossingen gekozen voor waterstoflevering, zoals aansluiting op een industriële pijplijn in Rhooon, on-site elektrolyse in Helmond, on-site aardgassteamreforming in Arnhem, en aanvoer met tubetrailers naar Green Planet Pesse.

Een waterstof tankstation kost 1-2 M€. Alle waterstof tankstations worden tot dusver met subsidies gebouwd, en de waterstof wordt vol-

⁶⁰ Hygear heeft dit station gebouwd omdat er dringend een oplossing moest komen voor Hymove en andere bussen en auto's. Dit eenmalige tankstation zal plaatsmaken voor een tankstation in aanbouw van Pitpoint met hogere druk.

gens bronnen in de industrie onder de kostprijs verkocht (tegen €10/kg). Een verborgen kostenfactor is de noodzaak om buffering en/of back-up waterstoflevering te organiseren bij storing van de on-site productie. Nederland heeft meerdere subsidies uit de programma's Interreg, TEN-T en FCH JU binnengehaald.⁶¹ Betreffende stations maken de meeste kans op realisatie omdat de investeringssteun veelal 90% is, waarbij Europese, nationale en regionale subsidies gestapeld worden. Om de investering in waterstoftankstations te rechtvaardigen willen initiatiefnemers het vertrouwen hebben dat er op afzienbare termijn voldoende klandizie komt. Hiervoor is nodig dat er meer en goedkopere voertuigmodellen komen. Gevraagd wordt om consistent overheidsbeleid: prikkels voor zowel infrastructuur (subsidies voor de tankstations om de onrendabele top te verkleinen) als voertuigen (langdurige fiscale stimulering of subsidies). Ook kan de overheid de marktopbouw ondersteunen door zelf waterstofvoertuigen in te kopen of voor te schrijven bij opdrachtnemers.

Bij de huidige waterstofstations komen storingen nog regelmatig voor. Het is belangrijk dat de stations in handen zijn van partijen met kennis. Nu er zeer ruime subsidies bestaan is er in de markt zorg dat dit ook minder competente partijen aantrekt. Interoperabiliteit van waterstoftankstations is sinds kort wel verzekerd door de invoering van een Nederlandse norm volgens het Europese normontwerp 'EN 17127 Gaseous hydrogen – Fueling stations – Part 1: General requirements'.

On-site elektrolyse

Watelektrolyse op een tankstation met lokaal uit wind en zon opgewekte energie kan een alternatief zijn voor netverzwaring en bijdragen aan netbalancing. Er zijn meerdere plannen om op of bij tankstations elektrolyzers te plaat-

sen om hernieuwbare energieoverschotten te benutten en waterstof te leveren aan mobiliteit (Oude Tonge, Duiven). Shell heeft in het buitenland ervaring met on-site elektrolyse op een tankstation waarmee tevens netbalancing wordt gedaan. Shell bepleit daarnaast de inzet van waterstof uit SMR als overgangstechniek naar hernieuwbare waterstof vanwege laagste kosten, CO₂-reductie ondanks fossiele herkomst, geen lokale emissies, en omdat elektrolyse in Nederland alleen klimaatwinst oplevert bij inzet van hernieuwbare elektriciteit.⁶²

NEFUSTA: Tankstation van de toekomst

Hogeschool Arnhem Nijmegen en de bedrijven DNV GL, SWECO en CGI (ict-dienstverlener) ontwikkelen in het project NEFUSTA (new energy fuels station) een tankstation voor elektrische en waterstofvoertuigen, dat bijdraagt aan energiebuffering en de balancing van het elektriciteitsnet door op het tankstation elektriciteit op te slaan in accu's en met de elektriciteit waterstof te maken uit water (en eventueel weer omgekeerd).⁶³ De hoofdvraag is of deze integratie van energievoorziening en mobiliteit kan helpen om toekomstige (waterstof)-tankstations economisch haalbaar te maken en tegelijk de flexibiliteit in het elektriciteitssysteem te verhogen. Voorlopige resultaten laten zien dat als toekomstige tankstations worden ingepast in het elektriciteitsnet als steunpunt voor gridservices, waarbij elektrolyzers het verwachte fluctuerende aanbod van stroom uit wind en zon volgen, het huidige aantal van 3.000 tankstations zou volstaan om de verwachte overschotten via energielevering (electriciteit en waterstof) aan voertuigen weg te werken, ook als het meerdere dagen niet waait. Het project omvat het ontwikkelen van een systeemarchitectuur, marktonderzoek, concept-engineering, en opstellen van een business case. Demonstratie van een dergelijk tankstation is een mogelijke vervolgstap maar is

⁶¹ Helmond (WaterstofNet): Interregproject Waterstofregio; Breda (Pitpoint): Interregproject Waterstofregio 2.0; Arnhem: TEN-T project H2Nodes (2014-2018), Den Haag: FCH JU project H2ME-2; Nieuwegein en Rotterdam (Pitpoint) en twee andere locaties (Shell): TEN-T project H2Benelux; Green Planet Pesse: CEF-project TSO 2020. Nederland kan via het TEN-T project BENEFIC subsidie verstrekken aan 7 tankstations in Nederland. De subsidie bedraagt 20% en maximaal €300.000 per station, maar kan door andere overheden worden aangevuld. Er wordt begin 2018 een tender uitgeschreven.

⁶² Hydrogen for Transport in NL: Opportunities and Challenges, Alice Elliott, Shell, Symposium "Waterstof of Niet(s) - De Toekomst van Waterstof als Energiedrager en Brandstof", Assen, 8 juni 2017.

⁶³ <https://specials.han.nl/sites/seece/actueel/nieuws/han-ontwikkelt-tankstation/index.xml>, project in TKI Urban Energy (2017 – januari 2019). Enkele exploitanten van tankstations en laadinfrastructuur hebben zitting in een klankbordgroep.

pas aan de orde als de technisch-economische randvoorwaarden zijn ingevuld.

Overige on-site waterstofopwekking

In meerdere Europese R&D-projecten is en wordt techniek ontwikkeld om op tankstations waterstof te maken. Een bekende techniek is kleinschalige SMR met aardgas. Behalve in Arnhem heeft Hygear 3 tankinstallaties op basis van SMR van aardgas geleverd voor brandstofcel-trolleybussen in Riga. Hygear was/is ook betrokken bij de volgende projecten.

NEMESIS 2+ (2012 – 2015) toonde de technische en economische haalbaarheid aan van waterstofproductie door steamreforming van biodiesel en/of diesel, brandstoffen die op veel tankstations al aanwezig zijn en gemakkelijker aan te voeren zijn dan waterstof.⁶⁴ Toepassing is voorlopig niet aan de orde omdat tankstations eerst in stedelijke gebieden komen met meer mogelijkheden om aan waterstof te komen dan op het platteland.

UnifHy (2012-2016) ontwikkelde een vergassingsproces om decentraal zuiver waterstof uit droge biomassa te maken.⁶⁵ Het doel was om zuivere waterstof te maken uit diverse soorten biomassa op de schaal van een tankstation (100-500 kg/dag). De vergassingstechniek werkte echter nog niet goed. Vergassing blijft wel in beeld als interessante route voor waterstof.

Onder leiding van Shell wordt in het project CH2P (2017 – 2020) een waterstofgenerator ontwikkeld door koppeling van een aardgasreformer met een Solid Oxide Fuel Cell die in continubedrijf zowel waterstof levert voor voertuigen als warmte/kracht.⁶⁶ De warmte van de

brandstofcel wordt weer benut in het proces zodat het systeem waterstof en elektriciteit opwekt met efficiëntie tot 90%.

Mobiele tankstations

Omdat er bij gebrek aan voldoende tankstations oplossingen moeten komen waar de klant ze nodig heeft en goedkoper dan de huidige pomp-prijzen ontwikkelt de Duitse firma Wystrach in Weeze met VDL In het Interreg-project H2Share een mobiel tankstation voor waterstof. Een ISO-container met hogedrukgasflessen wordt gevuld bij een waterstofbron (bijv. een chemische fabriek), en naar een mobiel tankstation gereden dat is voorzien van een compressor, hogedruk-gasflessen en tankzuil (weer in een ISO-container ingebouwd). De compressor trekt het waterstof uit de transportcontainer, die bijv. 400 kg kan vervoeren. Als een goedkope bron wordt gekozen (zoals chemiepark in Hürth bij Köln: €3,80/kg) is een pompprijs van €5 haalbaar.

In het project Power to Flex bouwt de firma Holthausen een klein waterstoftankstation dat pieken en dalen in de energievraag opvangt. Dit moet begin 2019 gedemonstreerd worden. Power to Flex (2016 – 2020) draait om innovatieve pilots voor de opslag van duurzame energie dichtbij de bron, met verschillende energiedragers, voor huishoudens, bedrijven en huizenblokken en mobiliteit.⁶⁷

Alternatieve opslagmedia voor waterstof

Een alternatief voor aflevering van (centraal geproduceerde) waterstof in tube trailers of als cryogene vloeistof is met zg. liquid organic hydrogen carriers. Waterstof “opgelost” in een bepaalde vloeistof kan met dezelfde tankwagens als diesel vervoerd worden en opgeslagen in bestaande opslagtanks op tankstations. Zo kan driemaal zoveel waterstof vervoerd worden als met een tube trailer. Het EU-project HyStoc (JU FCH, nog niet getekend) van Hygear met partners gaat de techniek hiervoor ontwikkelen.

⁶⁴ Nemesis 2+: Hydrogen production at refueling stations from biodiesel and diesel, <http://www.nemesis-project.eu/home.html>, <http://hygear.com/news/hydrogen-from-biodiesel-dream-or-reality/>, DLR, HyGear, Johnson Matthey, Abengoa, Centre for Research and Technology Hellas, Instituto Superior Technico. Budget 3,3 M€, 50% subsidie van FCH JU.

⁶⁵ UnifHy: Unique gasifier for hydrogen production, <http://www.unifhy.eu/>, <http://hygear.com/news/efficient-conversion-biomass-hydrogen/>, Università degli Studi dell'Aquila, ENEA, Università degli Studi La Sapienza, Air Liquide, Université de Strasbourg, HYGear BV, Pall Filtersystems GmbH. Budget 3,3 M€, 66% subsidie van FCH JU.

⁶⁶ CH2P: Cogeneration of hydrogen and power using Solid Oxide Based System fed by methane rich gas,

<https://ch2p.eu>. Budget 6,9 M€, 58% subsidie van FCH JU (Nederlands aandeel is ±30% van budget).

⁶⁷ <http://www.powertoflex.eu>, 18 bedrijven, hogeschoolen en overheden uit Noord-Duitsland en Noord-Nederland, waaronder Holthausen, Adverio, Bioclear, Energy Company Haren, Oosterhof Holman, Cedel, Hanzehogeschool Groningen, provincie Groningen, budget 3,4 M€, subsidie uit Interreg 5A.

De firma H2Fuel Systems bepleit een manier om waterstof op te slaan en te tanken in de vorm van een slurry met natriumboorhydride-poeder. Deze slurry zou via bestaande infrastructuur voor vloeibare brandstoffen opgeslagen en gedistribueerd kunnen worden.⁶⁸

Opslag en transport van waterstof in de vorm van vloeibaar mierenzuur en ammoniak is al eerder aan de orde geweest.

Elektrochemische compressoren

Compressoren zijn dure onderdelen van waterstoftankstations. HyET ontwikkelt een elektrochemische waterstofcompressor (EHC) op basis van membraantechnologie. De techniek is dichtbij commerciële toepassing. Een launching customer in de VS heeft een EHC succesvol in bedrijf genomen. Doordat er geen bewegende delen zijn biedt de HyET EHC een stiller en betrouwbaarder alternatief voor mechanische compressoren met lage onderhoudskosten. Hogeschool Arnhem Nijmegen heeft voor HyET kosteneffectieve besturingselektronica voor de waterstofcompressor ontwikkeld.⁶⁹



Fig. 19 Coradia iLint op waterstof (bron Alstom)

4.6 Treinen op waterstof

De meeste Nederlandse spoorlijnen hebben elektrische bovenleidingen, maar er resteren regionale lijnen waar treinen op diesel rijden. Elektrificeren met bovenleidingen is duur. Een alternatieve nul-emissie oplossing is de treinen op waterstof te laten rijden. In Duitsland ontwikkelt fabrikant Alstom een elektrische lagevloer-stop-trein met waterstofbrandstofcel en batterijen. De actieradius op een tankbeurt bedraagt

800 km. Testritten zonder passagiers bij 80 km/u zijn succesvol voltooid, testen bij 140 km/u volgen later dit jaar en begin 2018 wordt proefgereden met passagiers. De certificering door het EisenBahnAmt wordt in december of januari verwacht. In 2018 worden de eerste 2 treinen voor duurtesten in de dienstregeling geleverd aan vervoerder LNVG in Nedersaksen. Uitlevering van treinen aan deelstaten die Letters-of-Intent hebben ondertekend begint in 2020/2021.

In Nederland willen de provincies Groningen en Friesland pilots starten met waterstofftreinen inzetten voor de Noordelijke treindiensten. Arcadis heeft voor beide provincies de mogelijkheden van de batterij-waterstoffrein bestudeerd.⁷⁰ Hierbij is o.m. gekeken naar het duurzaam produceren van waterstof en de veiligheidsaspecten van waterstof als energiedrager voor treinen. De conclusie was dat er vanaf ca. 2020 treinstellen in kunnen stromen. De provincies werken in een projectgroep met Alstom, spoorvervoerder Arriva, railinfrabeheerder ProRail en het ministerie van I&W (waaronder de Inspectie voor Leefomgeving en Transport – ILT) aan het voorbereiden van een pilot. De bedoeling is dat in juli 2018 een waterstoffrein van LNVG geleend wordt voor een 14-daagse demonstratie in Europese Culturele Hoofdstad Leeuwarden, en dat in 2019 een structurele pilot plaatsvindt op het baanvak Groningen-Zuidhorn.

Vraagstukken waar genoemde projectgroep zich over buigt zijn o.m. de certificering van de trein door ILT, keuze van het traject waar de treinen worden ingezet, keuze van tankoplossing en van tanklocaties. Het proces om de waterstoffrein in juli 2018 toegelaten te krijgen op het gekozen baanvak maakt onderdeel uit van de pilot. Alstom heeft in Duitsland ervaren dat de tankvoorziening veel voeten in de aarde heeft. Technisch is dezelfde druk (350 bar) en tanknippel gekozen als voor bussen en trucks. De veel hogere waterstofvraag van de treinen (± 140 kg/dag per trein) betekent dat de tankstations in Duitsland onder het regime voor chemische fabrieken vallen, waardoor uitgebreidere gasveiligheidsplannen nodig zijn en een vergunning lastiger te verkrijgen is. Voor een vloot van 15 treinen is een 4 MW elektrolyser nodig. Om de

⁶⁸ <http://www.h2-fuel.nl>

⁶⁹ Ontwikkelen kosteneffectieve besturingselektronica voor een waterstofcompressor module, subsidie van OP-Oost (EFRO), 2015-2016.

⁷⁰ Arcadis, Onderzoek Batterij-waterstoffrein, 10 mei 2016.

inzet van waterstoffreinen in Nederland te laten slagen is volgens Alstom met name aandacht

nodig voor de tankinfrastructuur en de communicatie over (veiligheidsaspecten van) waterstof.



Fig. 20 Infografiek voor elektrisch aangedreven binnenvaartschip Bonjovi (bron Nedcargo)

Naast genoemde pilots in de lopende treinconcessie is in de net verleende concessie (dec. 2020 – dec. 2035) voor de Noordelijke treindiensten een innovatie-/experimenteer-regeling opgenomen. Op grond hiervan kunnen de provincies met de vervoerder afspraken maken over pilots met nul-emissie treinstellen (via ombouw of nieuw) gedurende de concessie. De concessie is gegund aan Arriva, die met 69 dieselelektrische Stadlertreinen gaat rijden en nog 3 erbij vanaf 2023. Van de eerste 69 treinen zijn er 18 nieuw bij de start van de concessie; deze nieuwe treinen gaan op biobrandstof rijden.

4.7 Vaartuigen op waterstof

In Amsterdam is in 2009 een rondvaartboot op waterstof onthuld voor de rederij Lovers, die door problemen met tankvoorziening weinig is ingezet. In de stad Groningen wordt voor het bedrijf Progress Events een rondvaartboot op waterstof gebouwd. In het project Waterstoffregio Vlaanderen Zuid-Nederland zijn twee sloepen met brandstofcel op waterstof gebouwd. Deze worden verhuurd aan toeristen. De firma Holthausen promoot elektrisch varen op waterstof door middel van brandstofcellen, onder meer voor het innovatieve zeiljacht Ecolution van de Stichting Wadduurzaam.

Waterstof voor hybride binnenvaartschip

In augustus kwam het elektrisch aangedreven binnenvaartschip Bonjovi in de vaart, dat voor Heineken vrijwel dagelijks lading zal varen van Alphen a/d Rijn naar Rotterdam voor internationale distributie.⁷¹ De elektriciteit wordt met een dieselgenerator opgewekt, maar het schip is zo ontworpen dat zonder grote aanpassingen ook LNG-elektrisch, helemaal elektrisch of op waterstof kan worden gevaren. Varen op waterstof is volgens vervoerder Nedcargo nu nog te duur, maar op een termijn van vier jaar misschien haalbaar. Er moet dan waterstof beschikbaar komen bijvoorbeeld op de Maasvlakte. Men oppert dat hiervoor duurzame elektriciteit van zonnepanelen op het nieuwe distributiecentrum of windturbines bij de containerterminal kan worden gebruikt. Havenbedrijf Rotterdam denkt in dit verband na over een 'Energy Island' in het havengebied waar duurzaam waterstof opgewekt kan worden voor dit schip en toekomstige schepen op waterstof. Het eiland kan tevens worden ontwikkeld als proeflocatie om functionaliteiten van het toekomstige grote energie-eiland op de Doggerbank te testen, en daarmee een iconische waarde krijgen voor de haven.

71

<http://www.maritiemnederland.com/achtergrond/bierboot-op-waterstof/item2201>, Concordia Group, Nedcargo, Heineken.

Een consortium van partijen ontwikkelt een vergelijkbaar concept van elektrische containerschepen voor binnenlandse routes met een powerpack op basis van batterijen, waterstof-brandstofcellen, of brandstofaggregaat.

MariGreen

In het Interreg-project MariGreen gaat TU Delft een verkennende studie doen naar elektrificatie van binnenvaartschepen met SOFC en PEM-brandstofcellen.⁷² TU Eindhoven kijkt naar verbrandingsmotoren op waterstof. Vaarprofielen en benodigde infrastructuur zijn ook onderzoeksthema's. Er kan worden geput uit kennis van de IEA-werkgroep over waterstof in de maritieme sector.⁷³ Het project is ontstaan uit contacten met de Private Transport Coöperatie van 55 schippers met relatief kleine schepen. Na afronding van de haalbaarheidstudie in maart 2018 is het de bedoeling om een schip (om) te bouwen. Een grote opdrachtgever van de coöperatie is Tata Steel in IJmuiden, waar voldoende waterstof op het terrein aanwezig is om eventueel schepen mee te bunkeren.



Fig. 21 Heftruck op waterstof (bron Hyster-Yale)

4.8 Overige voertuigen en vliegtuigen

Heftrucks op waterstof

Er is een positieve business case voor heftrucks op waterstof, die worden ingezet onder omstandigheden waar er een noodzaak is voor schoon en duurzaam transport/logistiek en waar er 24/7

vraag is naar veel energie. Opladen van batterijen zou de voertuigen te lang buiten werking stellen. In de VS zijn al duizenden heftrucks op waterstof in gebruik. Na een aanvankelijke demo met 2 vorkheftrucks op waterstof in het project Waterstofregio heeft supermarktketen Colruyt in België op basis van de ervaringen besloten op te schalen naar 75 stuks dit jaar en overweegt verdere opschaling naar 200. In Nederland loopt er op dit vlak op het ogenblik nog geen concreet project. Wel wordt in Nijmegen gesproken over een toepassingsproject op de containerterminal met containertrucks en reach stackers op waterstof van de Amerikaanse firma Hyster-Yale die in Nijmegen een fabriek en Europese onderdelen-centrum heeft.

Mobiele aggregaten

Er zijn al zo'n 10 jaar geleden meerdere aggregaten met brandstofcel op waterstof ontwikkeld.⁷⁴ Een commerciële doorbraak is nog uitgebleven vanwege te hoge kosten. De firma Bredenoord verhuurt sinds 2009 onder de naam Purity een aggregaat met waterstofbrandstofcel. Er zijn twee prototypes (5 kVA en 17,5 kVA) beschikbaar die op aanvraag ingezet kunnen worden voor marketingdoeleinden. Wolter & Dros hebben een aggregaat ontwikkeld voor gebruik door Rijkswaterstaat bij wegwerkzaamheden. Het bedrijf Cikam uit Almere levert sinds kort noodstroomaggregaten die zowel op waterstof als op ammoniak kunnen draaien. De brandstofcel range extender van VDL kan ook als afzonderlijke generator worden ingezet.

Straatveegmachine

Holthausen heeft een kit ontwikkeld waarmee een voertuig met dieselmotor omgebouwd kan worden tot een voertuig met waterstof-elektrische aandrijving. Deze is toegepast in een straatveegmachine voor gemeente Groningen. Het voertuig is net zo stil als batterij-elektrische veegwagens die ook te koop zijn, maar de inzetduur is 1,5 dag op een tank tegen 4,5 uur op een batterijlading. Er zou belangstelling zijn uit verscheidene binnen- en buitenlandse steden.⁷⁵

⁷⁴

<http://duurzaammb.nl/tips/tip/727/stroomaggregaat-op-waterstof/>

⁷⁵ <http://opwegmetwaterstof.nl/2017/05/09/schone-straatveger/> Het project (H2GO) ontving noordelijke EFRO-subsidie.

⁷² <http://nl.marigreen.eu>, Maritime Innovations in Green Technologies (2016 – 2020), 59 partners in Nederland en Duitsland.

⁷³ <https://www.ntnu.edu/oceans/iea-hydrogen>

Races met waterstofauto's

Door races met waterstofauto's worden innovatie, kennisontwikkeling in het onderwijs en bekendheid met en publieksacceptatie van waterstof bevorderd. Er wordt deelgenomen door teams van verscheidene universiteiten en hogescholen (zoals TU Delft, Universiteit Twente, HAN, met sponsoring door industrie en overheden.⁷⁶ Een bekende race is de Shell Eco-Marathon. Hier is een prijs weggelegd voor het team dat op het equivalent van 1 liter benzine het verst weet te komen.

Lucht- en ruimtevaart

De toepassing van waterstof en brandstofcellen in vliegtuigen is door o.a. Boeing en Airbus onderzocht voor straalmotoraandrijving en elektriciteitsvoorziening aan boord van vliegtuigen. Vliegmaatschappij Easyjet kondigde in 2016 aan een test te gaan uitvoeren met een brandstofcelsysteem op waterstof in het ruim die het mogelijk zou maken om elektrisch te taxiën en daardoor brandstof te besparen.⁷⁷ In 2016 vloog het 4-persoons vliegtuigje HY4 succesvol met brandstofcelaandrijving. Dit betreft allemaal projecten in het buitenland.

In Nederland wordt waterstof gepromoot om de vliegduur van elektrische drones te vergroten.⁷⁸ Drone Hub GAE onderzoekt samen met Holthausen of het bouwen van een prototype haalbaar is en wat de kosten hiervan zijn. HyET gaat na of mogelijke deelname of leveringen van haar waterstofcompressiesystemen van toepassing kunnen zijn bij ontwikkelingen om waterstof te gebruiken in de lucht- en ruimtevaart in EU en VS.

⁷⁶ Bijvoorbeeld <http://www.forze-delft.nl>

⁷⁷ Of deze test ook is uitgevoerd is onbekend; nieuwsberichten ontbreken en Easyjet's PR-afdeling antwoordde niet op vragen.

⁷⁸

<https://www.theguardian.com/travel/2016/feb/02/easyjet-plans-cut-carbon-emissions-hydrogen-fuel-cell-trial>, <http://hy4.org>, <https://dronehub-gae.eu>

5. Waterstof voor laagtemperatuur-warmte

5.1 Inleiding

Voor de functionaliteit laagtemperatuur-warmte in gebouwde omgeving, industrie en land- en tuinbouw wordt in Nederland vooral aardgas ingezet. Het beleid is erop gericht om dit gebruik van aardgas zoveel mogelijk terug te brengen ten gunste van warmtenetten, (hybride) warmtepompen, infraroodpanelen en pelletkachels (onder andere). Energiebesparing door verregaande gebouwisolering moet de vraag naar warmte sterk verminderen. Waterstof speelt een rol bij de volgende opties om laagtemperatuur-warmte te vergroenen:

- §5.2: bijmengen van groene waterstof bij aardgas)
- §5.3: vervanging van aardgas door 100% waterstof)

Al behandeld in §3.3 is het bijmengen van synthetisch methaan uit power-to-gas bij aardgas.

5.2 Bijmengen groene waterstof bij aardgas

De hoeveelheid waterstof in het aardgasnet is gereguleerd (maximaal 0,5vol% in Nederland volgens recente aanpassing van MR gaskwaliteit). Wordt duurzaam gas geproduceerd uit biomassa of uit het surplus aan 'groene' elektriciteit, dan is het percentage waterstof in dit gas soms te hoog om te voldoen aan de specifieke standaard voor invoeding in laagcalorisch aardgas. Zonder zuivering kan dit gas dan niet worden opgeslagen en gedistribueerd in het huidige leidingnetwerk, en moet het lokaal worden gebruikt. In het geval van waterstofproductie kan het aardgasnet juist worden benut voor opslag en transport van waterstof. Er is al veel onderzoek gedaan dat laat zien dat hogere percentages waterstof (tot 30 vol%) in bestaande gasinfrastructuur technisch mogelijk zijn, mits voorzorgsmaatregelen worden genomen. Een hoger percentage waterstof blijkt tot problemen te kunnen leiden bij CNG-auto's en sommige industrie, zo is gebleken in Frankrijk waar 10% bijmenging is toegestaan.

Het waterstof kan samen met het aardgas verbranden in ketels, fornuizen en motoren,

maar het kan in principe ook worden teruggewonnen uit de aardgasstroom en hoogwaardiger in zuivere vorm worden benut. Bijmengen van waterstof in aardgas is een goedkopere oplossing dan invoeding van gemethaniseerd waterstof in aardgas.

Waterstof bij aardgas op Ameland

Op Ameland werd van 2007 tot 2012 een proef gehouden door GasTerra, Stedin en Eneco waarbij uit water door middel van elektrolyse waterstof en zuurstof werd geproduceerd, en dit waterstof werd tot 20% in het bestaande aardgasnet bijgemengd. 14 woningen van een appartementencomplex maakten er jarenlang gebruik van. De uitkomst was dat dit aandeel technisch weinig problemen oplevert, volgens onderzoek aan de leidingen, slangen, koppelingen, huisdrukregelaars, gasmeters en gastoestellen door Kiwa Technology. Wel is extra aandacht nodig voor het lek-dicht maken van de installatie.⁷⁹ Een mogelijk vervolgproject is om een tijdelijk elektriciteitsoverschot op het eiland op te slaan in het lokale gasnet.⁸⁰

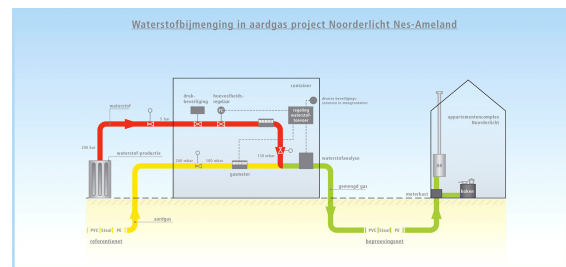


Fig. 22 Waterstof bij aardgas in woningen (bron Duurzaam Ameland)

HYREADY

Het Joint Industry Project HYREADY (2017 – 2018) ontwikkelt richtlijnen voor netbeheerders om de gevolgen van waterstofinvoeding tot 30vol% in gasnetwerken te omschrijven en om tegenmaatregelen te kunnen nemen als de gevolgen niet aanvaardbaar zijn.⁸¹ Zorg-

⁷⁹ <https://www.joulz.nl/nl/actueel/108-bijmengen-waterstof-in-aardgas-verloopt-vlekkeloos>

⁸⁰ <http://www.duurzaamameland.nl/projecten/>

⁸¹ Projectflyer JIP HYREADY.

punten zijn bijv. of de huidige gastoeepassingen overweg kunnen met waterstof, en in hoeverre specifieke niet-stalen onderdelen in de gastransportnetten bestand zijn tegen waterstof in het gas. De richtlijnen wortelen in bestaande kennis van eerder uitgevoerde onderzoeksprojecten zoals Naturalhy en HIPS. De projectpartners zijn ENAGAS, GasNatural Fenosa, Gas Networks Ireland, GazSystem, GRDF, GRT-Gaz, SoCalGas (Californië), TIGF en Enbridge (Canada). Het project wordt geleid door DNV GL en DBI-GUT. HYREADY richt zich op transmissie- en distributienetten op het niveau van netwerk en componenten; in een later stadium richt het zich ook op locaties zoals injectiestations en compressorstations en op eindgebruikerstoepassingen.

Purify en HyGrid: waterstof terugwinnen uit aardgasnet

HyET Hydrogen ontwikkelt de technologie “elektrochemische waterstofzuivering”, die het mogelijk maakt om waterstof selectief uit een gasstroom te zuiveren. De zuivering vindt plaats met behulp van selectieve membranen die in stacks worden samengebouwd. De techniek zit nog in R&D-fase. Er zijn diverse projecten gerelateerd aan zuivering. In het TKI Gas project Purify testte HyET de zuiveringstechnologie kortstondig in de P2G-opstelling van Stedin in Rozenburg (tot de elektrolyser stuk ging): na de methanisatie van CO₂ met waterstof werd een nevenstroom afgetapt om hieruit waterstof af te scheiden. De projectpartners willen graag verder, mogelijk als project onder de TKI Gas waterstofregeling. Dit is onzeker omdat de gemeente de locatie een andere bestemming wil geven. De partners hebben de gemeenteraad verzocht om het project te kunnen voortzetten.

Het Europese project HyGrid (2016 – 2019) demonstreert de mogelijkheid om waterstof uit het aardgasnet terug te winnen en het gasnet als een transportmedium voor waterstof te gebruiken.⁸² Volgens berekeningen loont transport van waterstof via het aardgasnet al over relatief korte afstanden als alterna-

tief voor transport over de weg. De opstelling gaat bestaan uit meerdere systeemonderdelen, alle opgebouwd in containermodules bestaande uit een SMR-systeem van Hygear (voedt tot 10% waterstof in aardgas), een membraan-systeem van Italiaanse partner SAES dat 8% waterstof zuivert, en daarna zal de HyET zuiveringsstack de resterende 2% waterstof zuiveren. TUE en Tecnalia (Spanje) zijn de andere partners.

In de projecten Memphys en Bio-Mates ontwikkelt HyET zuiveringstechnieken waarbij onder andere membranen onderzocht worden die verontreinigingen zoals o.a. CO en CO₂ kunnen verwerken. Doel is zuivering met weinig energie en lage kosten. HyET doet de membraanontwikkeling met meerdere kennisinstituten. In Memphys (2017 – 2019) wordt aan toepassingen gedacht zoals waterstofaf scheiding uit fermentatie van biomassa, industriële pijpleidingen, opslag in ondergrondse grotten en industriële afvalgasstromen.⁸³ In Bio-Mates (2016 – 2020) is de toepassing waterstofaf scheiding na hydrotreatment van flash pyrolyse-olie.⁸⁴ Verder werkt HyET samen met een olie- en gasmaatschappij om de toepasbaarheid van elektrochemische waterstofzuivering te onderzoeken.

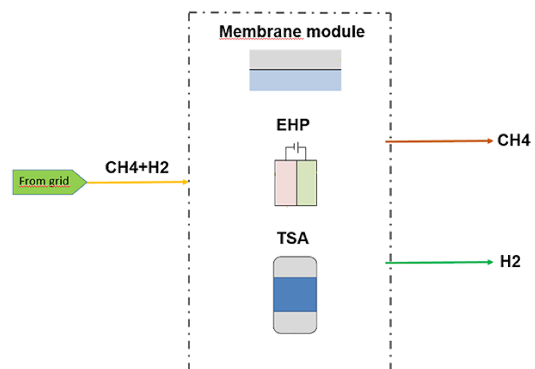


Fig. 23 Principe van HyGrid (bron HyET)

⁸³ MEMPHYS: MEMbrane based Purification of HYdrogen System, <http://www.memphys.eu>, Duale Hochschule BW, HyET, Institut Jozef Stefan, Forschungszentrum Jülich, Borit, Imperial College London, budget 2,1 M€, subsidie 2,0 M€ van FCH JU.

⁸⁴ Bio-Mates: Reliable Bio-based Refinery Intermediates, <http://www.biomates.eu/en/>, Fraunhofer UMSICHT, CERTH, University of Chemistry and Technology Prague, Imperial College London, ifeu, HyET, RANIDO, BP Europa, budget 5,9 M€ volledig gefinancierd door Horizon 2020.

⁸² <http://www.hgrid-h2.eu>, TU Eindhoven, Hygear, HyET, partners uit Spanje, Italië en Zwitserland, budget 2,8 M€, waarvan 2,5 M€ subsidie uit Horizon 2020 – Energy.

Studie duurzaam gasnetwerk

De netbeheerders zitten met meerdere samenhangende vraagstukken:

- Hoe kan decentraal in de wijk opgewekte elektriciteit het best worden afgevoerd? De netten zijn niet uitgelegd op de gelijktijdigheid die optreedt bij productie van zon-PV. De netbeheerder moet rekening houden met de pieken. Capaciteitsuitbreiding gaat veel geld kosten, dus wat zijn de mogelijkheden om het anders te doen?
- Dit vraagstuk speelt ook bij het aansluiten van zonneweides en bij aanleg of uitbreiding van wind op land. In enkele gevallen is gerekend aan omzetting naar waterstof in plaats van verzwaren van een onderstation, en bleek de maatschappelijke business case positief. Omdat het proces al te ver gevorderd was, de vraag naar waterstof op dat moment nog onzeker was, en een maatschappelijke business case verschilt van een private business case, is de verzwarend wel uitgevoerd, maar in de toekomst kan dat anders uitvallen.
- Discussie rond uitfasen van aardgasgebruik in de wijk. Met als sprekende parallel⁸⁵ dat als er een probleem is met te vuile auto's, men ook niet de wegen verwijderd, willen de netbeheerders als reactie op deze tendens nagaan wat de mogelijkheden zijn voor vervanging van aardgas door duurzame gassen.

Netbeheer Nederland heeft KIWA opdracht gegeven voor een studie die in kaart brengt wat er nodig is op het gasnet aan te passen/op te waarderen tot een volledig duurzaam gasnetwerk. Hierbij ligt de nadruk op waterstof, maar ook zal worden gekeken naar o.a. biogas en groen gas. Kostenramingen zijn geen onderdeel van deze nog lopende studie.

5.3 Aardgas vervangen door 100% waterstof

Met het voorbeeld van Leeds (zie onder) voor ogen wordt in Nederland ook nagedacht over de optie om aardgas geheel te vervangen door waterstof voor verwarming van gebouwen. Stedin onderzoekt dit bijvoorbeeld voor de bestaande bouw. 80-90% van het huidige woningbestand is er nog in 2050. De kosten per

woning om het gasnet aan te passen voor waterstof lijken lager te zijn dan de kosten om een woning uit te rusten met een warmtepomp (die ook meer ruimte inneemt). Er wordt daarom wel gesproken over “elektrisch waar het kan, en waterstof meenemen bij de alternatieven als het niet lukt”. Het beoordelingscriterium zou laagste maatschappelijke kosten over de langere termijn moeten zijn. Er is op dit moment echter nog onvoldoende inzicht in mogelijkheden, consequenties en kosten om de optie mee te nemen in discussies met gemeenten.

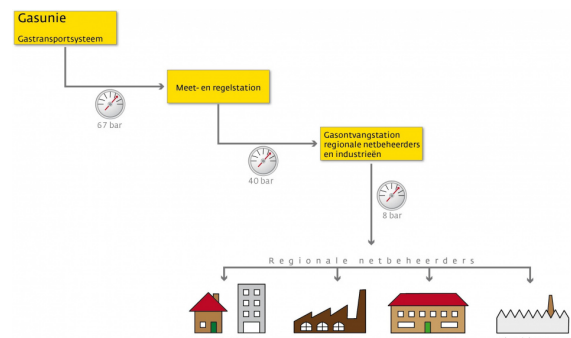


Fig. 24 Opbouw regionaal gastransport (bron NV Nederlandse Gasunie)

Stedin rekent met diverse aannames en vereenvoudigingen voor dat een gemiddeld huishouden in Nederland in een wintermaand 3kW piekvermogen heeft (teruggerekend vanuit het gasverbruik). Een 1 MW elektrolyser kan dan in de behoefte van 330 huishoudens voorzien tegen investeringskosten van €3.300 per huishouden.⁸⁶ De huidige 2 miljoen gasaansluitingen zijn verdeeld over 150 gasontvangststations met gemiddeld 13.000 aansluitingen per lokaal lagedruknetwerk. De transitie kan per lagedruknetwerk worden georganiseerd door vervanging of aanpassing van verwarmingsketels en gasmeters, gespreide plaatsing van gemiddeld 40 1MW elektrolyzers per lagedruknetwerk, en uiteindelijk afkoppeling van het gasontvangststation. Dit alles kan plaatsvinden zonder uitgebreide graafwerkzaamheden voor elektriciteitskabels of warmtenet. Deze eenvoudige berekening

⁸⁵ Afkomstig van Albert van der Molen, Stedin.

⁸⁶ Waterstof in bestaande gebouwde omgeving: onderbelicht?, Albert van der Molen, Stedin, Symposium “Waterstof of Niet(s) - De Toekomst van Waterstof als Energiedrager en Brandstof”, Assen, 8 juni 2017. Gerekend met 1 M€ investering voor een 1 MW elektrolyser.

toont dat de optie in elk geval niet onhaalbaar is en een nader onderzoek waard. Stedin pleit voornamelijk niet voor algemene inzet van 100% waterstof in de bestaande gebouwde omgeving. Op de ene plek is het maatschappelijk heel verstandig, op de andere niet. De absolute kosten van overschakeling van een bepaald gebied op 100% waterstof behoren op dit moment geen showstopper te zijn, omdat alternatieven misschien wel veel duurder zijn.

De drijvende kracht voor een eventuele rol voor waterstof in de gebouwde omgeving is volgens Stedin niet zo zeer lokale congestie in netten en behoefte aan energieflexibiliteit, maar de energietransitie van de bestaande gebouwde omgeving. Om de optie op tafel te krijgen is het van belang aanpassingen van de infrastructuur mee te nemen als onderdeel van een integrale wijkaanpak bij woningverbetering met aandacht voor verbetering van de woon- en leefomgeving. In de “slipstream” hiervan de verbetering / aanpassing van de infrastructuur meenemen met aandacht voor de consequentie voor de bewoners.

Op Goeree Overflakkee werkt o.m. Stedin de casus uit om waterstof of synthetisch methaan in te zetten naast hybride warmtepompen voor verwarming van bestaande woningen in perioden dat elektriciteit niet voldoende vermogen biedt. Het gaat om waterstof verkregen uit een gepland 25-75 MW conversiepark gevoed met elektriciteit uit wind en zon. Het idee is te beginnen met 10% bijmenging in aardgas en dan de netten en apparaten gedurende een transitieperiode geschikt te maken voor 100% waterstof in de termijn 2025 – 2030. Nieuwe aardgastoestellen zijn geschikt voor max. 10% waterstof (K-band toestellen 2017). Voor (10-100%) waterstof moet nieuwe apparatuur ontwikkeld worden.

Naast gebruik in woningen zou waterstof ook gebruikt kunnen worden om wijkcentrales van energie te voorzien.

H21 Leeds City Gate Project

Het H21 project in Leeds (VK) betreft een haalbaarheidstudie onder leiding van gasbedrijf Northern Gas Networks (NGN) naar een herontwerp van het gasnetwerk om een hogedruk (17 bar) buitenste stadsring te vormen voor aardgastransport naar SMR-installaties die waterstof maken (met CCUS)

voor distributie in het lokale netwerk (<7 bar). De studie stelt voor dat het lokale aardgasnetwerk na de start in twee jaar tijd wordt omgebouwd voor distributie van 100% waterstof. Ook moeten voor waterstof geschikte apparaten en branders worden geïnstalleerd of aangepast, en een personeelsbestand worden opgeleid om de werkzaamheden uit te voeren. Waterstof en elektriciteit worden de dominante energiedragers voor verwarming. Waterstof wordt later ook geproduceerd door elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit en nieuwe nucleaire technieken.⁸⁷

Het onderzoek concludeerde dat de omzetting naar waterstof, vergeleken met volledige elektrificatie of stadsverwarming, een relatief eenvoudige route biedt naar volledig koolstofvrije verwarming, met beperkte kostenverhoging voor de consumenten en zonder de uitdaging om 23 miljoen huiseigenaren en bedrijven te laten kiezen uit een complexe mix van koolstofvrije technieken met uiteenlopende werkzaamheid. Er is nog geen sprake van een definitief besluit over uitvoering van het plan. In april 2017 openden NGN en de stad Leeds een projectbureau met het doel “om innovatieprojecten op te leveren met de strategische focus om overtuigend bewijs te leveren om het Britse gasnetconversie van aardgas (methaan) naar koolstofvrij waterstof te ondersteunen.”⁸⁸ De Britse regering heeft een innovatieprogramma met £25 miljoen budget ingesteld om het gebruik van waterstof voor verwarming te bevorderen.

⁸⁷

https://www.kiwa.co.uk/uploadedFiles/Our_Services/Energy_and_Carbon_Advice/H21%20Report%20Interactive%20PDF%20July%202016.pdf

⁸⁸

<https://www.northerngasnetworks.co.uk/2017/04/27/northern-gas-networks-hydrogen-project-takes-step-forward-as-25-million-fund-announced-for-hydrogen-in-homes/>

6. R&D voor groene waterstofproductie en solar fuels

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk komen initiatieven aan bod voor techniekontwikkeling voor groene waterstofproductie en solar fuels. Dit betreft met name RD&D-projecten, toepassingsprojecten voor groene waterstofproductie kwamen in de voorgaande hoofdstukken al aan bod. De indeling is als volgt:

- §6.2: initiatieven voor verdere ontwikkeling van elektrolyse
- §6.3: Onderzoek naar plasmaconversie van water en CO₂ naar syngas (plasmaconversie van alleen water is niet succesvol gebleken)
- §6.4: solar fuels via indirecte omzetting (elektrolyse en synthese) of directe omzetting (foto-elektrochemische cel)
- §6.5: elektrochemische productie van mierenzuur, onder andere geschikt als opslagmedium voor waterstof in voertuigen
- §6.6: biologische waterstofproductie.

6.2 Ontwikkeling elektrolyse

Elektrolyse is een sleuteltechnologie voor hernieuwbare waterstof. Ten opzichte van waterstof van fossiele afkomst is waterstof uit elektrolyse nog enkele factoren duurder. De kosten van elektrolyse zitten vooral in de elektriciteit, niet in de CAPEX. Vandaag bepalen stroomkosten voor 80% de kosten van waterstof uit elektrolyse. Dat wordt veel minder door de grote uitbreiding van wind op zee. Volgens analyses van Voltachem neemt het aantal uren met zeer lage stroomprijzen toe naar boven 50% in 2030. Dan kan met 4.000 draaiuren per jaar elektrolyse worden bedreven tegen orde-grootte productiekosten €2/kg. Aan de andere kant gaat volgens analyses voor de Nationale Energieverkenningen 2017 de gemiddelde elektriciteitsprijs richting 2030 omhoog.

€2/kg komt overeen met de doelprijs van de Adviescommissie Elektrochemische Conversie & Materialen (ECCM) voor 2030. De doelprijs voor 2050 is hiervan de helft.⁸⁹ Volgens deze

adviescommissie is het noodzakelijk in te zetten op integratie van elektrolyse en duurzaam waterstof in het energiesysteem en grootschalige chemische processen. De commissie pleit voor een meerjarig programma voor geavanceerde elektrochemie, waaronder voor waterstofproductie. De hoofdvraag bij waterstof is volgens de voorzitter van de commissie prof. Richard van der Sanden hoe je elektrolyse industrieel toepasbaar maakt, dat wil zeggen hoe je goedkope robuuste elektrolyzers maakt die gedurende vele jaren betrouwbaar werken. Dit vraagt om bundeling van onderzoek naar materialen, engineering en efficiency-verbetering in een meerjarig programma.

Hierbij moet tegelijk in het oog worden gehouden dat industriële processen ook zonder waterstof als tussenstap kunnen plaatsvinden. Vaak is nu een continue stroom waterstof nodig voor een proces als ammoniak-synthese, dat wordt moeilijk als er steeds meer fluctuerende energiebronnen komen. Dat vergt een ingrijpende systeemverandering met ofwel oplossingen voor energieopslag ofwel processen die direct met intermittency van energievoorziening om kunnen gaan. In het voorgestelde onderzoek naar geavanceerde elektrochemie staat eerst waterstofproductie centraal maar het doel is om naar complexere moleculen door te pakken. Een ander doel is om naast elektrolyse ook extern gestuurde elektrochemie toe te passen (plasmaconversie, foto-elektrische cellen).

In de industrie is alkalische elektrolyse (met zoutoplossing) een lang gevestigde technologie. Er wordt onder andere in Europese programma's veel onderzoek gedaan naar Proton Exchange Membrane (PEM) waterelektrolyse. De CAPEX-prijs is hiervan nu vanaf €900/kW, maar deze zal volgens de industrie dalen tot €600/kW bij opschaling van de vermogens per elektrolyser (dit effect is groter dan opschaling van productie). Een zegsman in de industrie

⁸⁹ Topsectoren Energie, HTSM en Chemie, Elektrochemische Conversie & Materialen, Naar een CO₂-neutrale energievoorziening in 2050, September 2017. De commissie kwam na consultatie van deskundigen uit het bedrijfsleven en het kennisveld tot de doelstellingen dat in 2030

waterstof CO₂-arm wordt geproduceerd tegen een prijs van max. €2/kg en in 2050 tegen een prijs van €1/kg; en dat in 2030 minstens 20% van de waterstof en ammoniak wordt geproduceerd zonder CO₂-uitstoot.

stelt dat voor PEM al 20 jaar hetzelfde membraansoort (Nafion) wordt gebruikt. Elektrolyserfabrikanten hebben wel enige keuzevrijheid in engineering, maar komen wel op vrijwel hetzelfde optimum uit (64% efficiency bij laagste kosten). Hogere efficiency kan maar gaan ten koste van prijs of levensduur. Om sprongen vooruit te maken met efficiency zijn daarom nieuwe membranen nodig.

Een alternatieve technologie is de Solid Oxide Electrolysis Cell (SOEC). Deze werkt bij hoge temperatuur met stoom en is duurder in CAPEX (€2.000/kW), maar is efficiënter (orde-grootte 81%) en belooft een lange levensduur. Het voordeel van PEM is werking bij hogere druk en sneller kunnen opschakelen. Het nadeel is kortere levensduur, die doorwerkt in de kosten over de levensduur.

De leidende fabrikanten van elektrolyzers zijn Siemens, ITM Power, Hydrogenics en Proton OnSite (PEM) en NEL (alkalisch), die voorlopen qua capaciteit van hun systemen en markt-aandeel. Met name Siemens heeft in Nederland diverse (deels vertrouwelijke) waterstofprojecten geïnitieerd waarin Siemens' elektrolysetechnologie toegepast zou kunnen worden. Zowel Siemens als ITM Power hebben elders in Europa projecten lopen waarin orde-grootte 10 MW elektrolyzers toegepast gaan worden.



Fig. 25 Energiepark Mainz, de tot nu toe grootste (6 MW) PEM-elektrolyse-opstelling (bron Siemens)

Het mkb Hydron Energy is de enige Nederlandse fabrikant van elektrolyseapparatuur. Het bedrijf ontwerpt, ontwikkelt en vermarkt PEMWE-stacks en systemen, met naar eigen zeggen een hoger rendement, hogere stroomdichtheid en werking bij hogere druk, zodat compactere modules mogelijk zijn dan van de concurrenten. Commercieel verkoopt Hydron systemen in de orde van 5 kW per stack, en wil via de volgende projecten opschalen naar MW.

De markt ligt bij industrie en energieopslag. Frames Energy Systems is hierbij de strategische partner om containerised turnkey systemen te bouwen met Hydron's stacks.

FLEX-P2G

Het project FLEX-P2G (2016 – 2017) van Frames Energy Systems, Hydron Energy en ECN is afgerond en kent een drietal resultaten.⁹⁰ Hydron Energy bouwde een prototype 50 kW elektrolyser, door Frames geïntegreerd in een systeem met alle randapparatuur. De elektrolysestack is modulair opschaalbaar. In een laboratoriumomgeving heeft ECN de werking van een nieuw type methanisatie-reactor gedemonstreerd. En Hanzehogeschool heeft de randvoorwaarden voor commerciële toepassing van elektrolyse en synthetisch methaan onderzocht, zoals de voor methanisatie benodigde CO₂-bronnen, inpassing in het energiesysteem, marktkansen en businessmodellen.

NextgenH2

Frames, Hydron en ECN maken zich op voor het vervolgproject NextgenH2 in de TKI Energieregeling, waarin de werking van de elektrolyser in een duurtest op het terrein van ECN gevalideerd wordt. Doel is verdere verbetering van prestaties, kostprijsreductie en maken van een modulair systeemontwerp voor MW-schaal. Methanisatie is niet meer aan de orde: hoewel de reactor van ECN goed werkte maakt de extra conversiestap het systeem te duur volgens de studie van Hanzehogeschool.

ELECTRE

Hydron en ECN werken ook samen in het project ELECTRE (2015 – 2017) onder de vlag van innovatieprogramma Voltachem. Dit TKI Chemieproject ontwikkelde een testinfrastructuur en testprotocollen voor elektrolyzers bij ECN voor accelerated lifetime testing.⁹¹ Doel is het verkrijgen van inzicht in degradatiemechanismen

⁹⁰ FLEX-P2G: Flexibele energie infrastructuur door kosteneffectieve en efficiënte PEM-electrolyse en Sorption, <https://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/projecten/flexibele-energie-infrastructuur-door-kosteneffectieve-en-efficiënte-pem-electrolyse-en-sorption>. Bijdrage 0,5 M€ van TKI Gas Systeemintegratie.

⁹¹ <https://www.ecn.nl/nl/nieuws/item/start-van-electre-project-verlagen-van-electrolyzer-kosten-door-verlenging-levensduur/>

van PEMWE-technologie en verlagen van de kosten van elektrolyzers door verlenging van levensduur. Wisselende belasting, zoals bij inzet van fluctuerend elektriciteitsaanbod, verlaagt de levensduur van de technologie. Een vervolg is in voorbereiding met de werktitel ELECTRE-2. Doel is de Nederlandse maakindustrie te betrekken bij elektrolyserontwikkeling door bedrijven uit te nodigen om materialen te testen. Het project wordt ingediend bij de TKI-waterstof call.

QualyGrids

Het project QualyGridS (2017 – 2019) stelt gestandaardiseerde testprotocollen op voor elektrolyzers om electricity grid services uit te kunnen voeren.⁹² Het werkveld omvat een grote verscheidenheid aan grid services, evenals meerdere waterstof eindgebruikers. Er wordt een technisch-economische analyse van business cases voor grote elektrolyzers (> 3MW) uitgevoerd die betrekking heeft op de grid- en marktsituaties in de meest relevante regio's van Europa. De testprotocollen en economische analyse omvatten ook de beoordeling van bestaande en eventueel nieuw op te zetten Key Performance Indicators (KPI's) voor elektrolyzers. Het consortium van QualyGrids dat deze taken op zich neemt bestaat uit drie elektrolyserfabrikanten alsmede onderzoeksinstellingen met ervaring met betrekking tot waterstof-technologie, electricity grid operation en smart grids. NEN als Europese normalisatieinstelling maakt een maximale impact van de protocollen mogelijk. Een adviescommissie met deelname van TSO's uit verschillende landen en een Amerikaans instituut voor hernieuwbare energie en elektrolyse ondersteunt het project met advies.

Battolyser: gecombineerde elektrische opslag en waterstofopwekking

TU Delft ontwikkelt een combinatie van batterij en elektrolyser onder de naam 'Battolyser'. Deze laadt eerst zijn batterijdeel vol en gaat daarna over op waterstofproductie. De basis is

een klassieke nikkel-ijzer-alkaline-batterij. Tijdens het opladen vormen de elektrodes van de batterij NiOOH en gereduceerd Fe, dezelfde materialen die worden gebruikt op elektrodes om via elektrolyse van water waterstof en zuurstof te maken. Met deze techniek kan flexibel worden ingespeeld op wisselend aanbod van elektriciteit uit wind en zon. Neemt de beschikbaarheid toe en is de elektriciteitsprijs laag dan is opslag aantrekkelijk; is de batterij vol dan kan waterstof worden gemaakt. Stijgt de elektriciteitsprijs dan kan stroom uit de battolyser worden teruggeleverd aan het net of aan een klant. Een systeemefficiëntie tot meer dan 90% is mogelijk.

Na een proof of concept van tientallen Amperes op labschaal is nu het doel om een module van 20 kW te demonstreren.⁹³ Daarna volgt een test op industriële schaal van enkele MW bij een bedrijf in 2018/2019. O.a. Nuon, BASF, Shell, Allego en Proton Ventures investeren in het onderzoek.⁹⁴ Een mogelijke toepassing is gecombineerde waterstoflevering en snelladen van elektrische autobatterijen op tankstations. In de industrie kan de relatief dure waterstofaanvoer met tankwagens worden vervangen door on-site productie.

De battolyser wordt naar verwachting duurder in aanschaf dan elektrolyzers, maar biedt extra functies met waarde: naast waterstof- ook stroomopslag en -levering, waarmee netstabilisatie en handelen op onbalansmarkt mogelijk is. Voordelen van de nikkel-ijzer-batterij ten opzichte van lithiumaccu's zijn de goedkope basismaterialen met grote voorradigheid; benutting van volledige opslagcapaciteit terwijl een lithiumaccu om degradatie te beperken tussen minimale en maximale state-of-charge verblijft; en de bewezen langere levensduur. De techniek om de battolyser heen is vergelijkbaar met een alkalische elektrolyser (elektronische regeling, management van elektrolytstromen).

⁹² <http://www.qualygrids.eu/>, Standardized qualifying tests of electrolyzers for grid services, DLR, NEW NEL Hydrogen, ITM Power, Findacion para el desarrollo de la idrogeno en Aragon, CEA, DT, NEN, IHT, Hochschule Luzern, European Fuel Cell Forum, budget 2,8 M€, waarvan 2,0 M€ van FCH JU.

⁹³ Technologiëstichting STW ondersteunt een onderzoeksproject dat zich richt op verdere efficiëntie- en energiedichtheidverbeteringen. Er wordt ook een aanvraag voor EU-funding overwogen bij *Fast track to innovation*, maar dit programma heeft een lage slaagkans. Er wordt daarom naar een passende Nederlandse regeling gezocht.

⁹⁴ <http://www.stw.nl/nl/content/waar-stallen-we-onze-groene-stroom>

SOPHIA: Co-elektrolyse van water en CO₂

Bij hoge temperatuur is minder elektriciteit nodig om water te scheiden, en de benodigde energie kan verkregen worden uit warmte, doorgaans een goedkopere energiebron dan elektriciteit. Hoge temperatuur stoom-elektrolyse, oftewel Solid Oxide Elektrolyse, maakt het bovendien mogelijk om water met CO₂ door co-elektrolyse direct om te zetten in syngas (H₂ + CO), dat vervolgens kan worden gebruikt als tussenstap voor synthese van methaan of andere koolwaterstoffen. Ook komt er zuurstof bij vrij. Het project SOPHIA (2014 – 2017) onder leiding van Hygear betrof onderzoek naar verouderingseffecten bij hogedruk-hogetemperatuur co-elektrolyse op basis van Solid Oxide Elektrolyse. Het is gelukt om de verouderingsfactor te onderdrukken. Het idee is om de elektrolyser te combineren met geconcentreerde zonnewarmte.⁹⁵

Voor het bereiken van kostenreductie van elektrolysers en ook brandstofcellen kan 3D-printing een interessante ontwikkeling zijn.

6.3 Plasmaconversie

Plasma is een toestand waarin sommige deeltjes van een gasvormige stof geïoniseerd zijn, dat wil zeggen dat atomen door toegevoegde energie (elektromagnetisch veld) elektronen zijn kwijtgeraakt. De losgeslagen elektronen bewegen zich vrij door de ruimte en de achtergebleven kern (met de overgebleven elektronen) heet dan geïoniseerd. Plasmaconversie is een omzettingsproces waarbij elektrische energie door middel van een plasma wordt omgezet in chemische energie. Botsingen tussen de elektronen en CO₂- en/of watermoleculen brengen een reactie op gang waardoor de moleculen uit elkaar vallen (dissociëren).

Plasmaconversie is een alternatief voor elektrolyse. Het biedt in potentie voordelen bij hoge vermogens (>10 MW/m³), waardoor het systeem compacter kan zijn, een hogere productdoorvoer kan hebben, snel reageert op wisselend aanbod van energie en grondstoffen, en geen schaarse materialen gebruikt. De energieinput is gericht en dus efficiënt en het

proces kan gemakkelijk opgeschaald worden, zoals bewezen is bij de omzetting van andere stoffen dan CO₂. Het proces kan in principe onder atmosferische omstandigheden plaatsvinden. Elektrolyse is nog wel efficiënter dan plasmaconversie. DIFFER heeft een 10 kW reactor gedemonstreerd voor CO₂-dissociatie met 60% energierendement maar nog slechts 10% omzetting van CO₂.

Het einddoel is de toepassing van plasmareactoren voor grootschalige duurzame energieconversie. De ambitie is het realiseren van reactorprototypes voor hoogvermogen toepassingen binnen 5 jaar, en het implementeren, opschalen en toepassen in het duurzame elektriciteitsnetwerk binnen 10 jaar. DIFFER, TU's Eindhoven en Twente en andere partijen werken hieraan in meerdere projecten met financiering van onder meer NWO, STW, TKI's en Alliander.

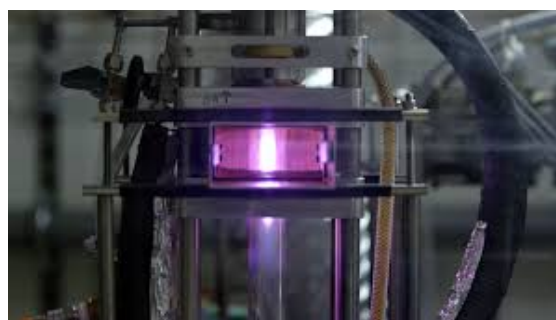


Fig. 26 Plasmareactor DIFFER (bron www.dekennisvannu.nl)

HyPlasma: Waterstof via plasmaconversie

De uitkomst van het project HyPlasma (2014 – 2017) is een proof-of-concept van een 1 kW plasmareactor, beter begrip van het proces en een basisontwerp voor een reactor van industriële omvang.⁹⁶ DIFFER werkte hierin samen met Alliander, Gasunie en Energy Valley. In eerste instantie is plasmaconversie van CO₂ naar CO onderzocht (waarna met een watergas-shift reactie waterstof gemaakt kan worden). Deze plasmaconversie leverde een energie-efficiëntie op van ongeveer 50%. Ook is onderzocht om waterstof te maken uit een puur waterplasma. Dit leverde een aanzienlijk lagere energie-efficiëntie (orde 1%). Daarom blijft het zwaartepunt van het onderzoek op de

⁹⁵ <http://www.fch.europa.eu/news/project-achievements-sophia>, Hygear, HTceramix, CEA, DLR, EPF Lausanne, VTT, GDF Suez, SOFCpower, budget 6,1 M€, 50% subsidie van FCH JU.

⁹⁶ Eindrapport HyPlasma, 2017, budget 150 k€, waarvan 100 k€ subsidie van TKI Gas.

route via een CO₂-plasma liggen. De aandacht vooral op methaanproductie gericht.

De systeemanalyse door Alliander heeft laten zien dat “Plasma-P2G” technisch haalbaar, schaalbaar en toepasbaar in het energiesysteem is. De plasmareactor en de daaraan gekoppelde gasscheiding moeten verder ontwikkeld te worden om tot een praktisch toepasbaar systeem te komen. Het energetisch rendement van plasma-P2G is in de praktijkmetingen 50% op basis van een CO₂-plasma –het beoogde rendement is 80%. Bij zulk rendement is het systeemrendement bij de omzetting van CO₂ naar meteen 46%. De kosten moeten nog wel sterk omlaag.

Plasma Power-to-gas

In het recent gehonoreerde project Plasma Power-to-gas (2017 – 2021) onderzoeken DIFFER, TU Eindhoven en Universiteit Twente hoe plasmaconversie, solid oxide elektrolyse cel (SOEC) en membraanscheiding gecombineerd kunnen worden in een hybride systeem dat water en CO₂ beter omzet in syngas.⁹⁷ Toepassing van de SOEC verwijdert de zuurstof uit het plasma waardoor de reactie naar CO beter verloopt, anders wordt opnieuw CO₂ gevormd. De toepassing werkt het best bij een lagere temperatuur dan waarop de SOEC normaal werkt. Verwijdering van zuurstof wordt ook bereikt met membraanscheiding.

Via een gebruikerspanel nemen Gasunie, DNV-GL, Stedin, Ampleon, Fujifilm en TU Delft deel in het project. Ampleon levert een prototype halfgeleider als hoogfrequente bron voor plasmaopwekking. Halfgeleiders zijn een alternatief met veel langere levensduur dan de huidige toegepaste magnetrons. Fujifilm ontwikkelt functionele films en scheidingsmembranen. TU draagt bij met modelleringen.

SolidStatePlasma

De hiervoor genoemde halfgeleidertoepassing voor plasmaopwekking wordt ontwikkeld in het project SolidStatePlasma (2016 – 2018) van DIFFER en Ampleon (voorheen NXP).⁹⁸ Het project richt zich op de opschaling van het 1 kW proof-of-concept met minimaal een orde-grootte door middel van op RF transistoren

gebaseerde voedingsbronnen in plaats van magnetronvoeding. Verwachte voordelen zijn:

- hogere beschikbare vermogens, modulair voor schaalbaarheid in toepassing (orde-grootte MW)
- snelle, eenvoudige modulatie, frequentie tuning en schakelbaarheid
- een veel langere levensduur (>100.000 uur) dan voor de magnetrons (5.000 uur).

Eén van de onderzoeksvragen is of met de transistors een even hoge efficiency kan worden behaald als met magnetrons. Het omzettingproduct is syngas.

Synplasma (EnOp)

In het project Synplasma (deelproject van EnOp, 2016 – 2019) worden op labschaal bewezen inzichten over syngasproductie met plasma opgeschaald.⁹⁹ Het project omvat een pilot om vanaf 1kW tot 5 kW (uiteindelijk tot 0,1 MW) duurzame energie om te zetten in syngas. Een toekomstperspectief is dat uiteindelijk een dergelijke installatie aan huis kan functioneren met wind en zonne-energie uit water en CO₂.

In een ander deelproject wordt onderzoek gedaan naar betere katalysatoren, specifiek ontworpen voor combinatie met plasma en CO₂. De huidige generatie katalysatoren werkt bij hoge temperaturen, terwijl het plasmaproces meestal plaatsvindt bij milde temperatuur. Zonder katalysatoren worden bij plasmaconversie van CO₂ naar chemicaliën te veel bijproducten geproduceerd (lage selectiviteit).

Electricity to Chemistry Catalysis for Energy Storage

DIFFER, TU Eindhoven en SynGasChem BV, een onderzoeksbedrijf met Chinese financiering, werken aan de omzetting van CO₂ en water met behulp van zon en wind in syngas gevolgd door Fischer-Tropsch synthese naar brandstoffen (power-to-liquids).¹⁰⁰ Onderzoek en ont-

⁹⁷ Budget 850 k€, waarvan 750 k€ STW-subsidie.

⁹⁸ Budget 440 k€ waarvan 372 k€ van TKI HTSM.

⁹⁹ <http://www.projectenop.eu>, Prototypes, CO₂ technologieën voor energieopslag en slimme materialen, o.a. FOM/DIFFER, Universiteit Hasselt, Universiteit Antwerpen, NanoHouse, totaalbudget 1,5 M€ voor meerdere werkpakketten, ondersteund door programma Interreg Vlaanderen-Nederland.

¹⁰⁰ <https://www.nwo-i.nl/nieuws/2015/04/16/differ-en-syngaschem-bv-starten-samen-onderzoek-naar-opslag>

wikkeling van co-elektrolyse en plasma-ondersteunde katalyse staat centraal. Onderzoeksthema's zijn de verbetering van elektro-dematerialen, beter begrip en controle van selectiviteit in de co-elektrolyse, en mechanistische modelstudies. Voor plasma-katalyse wordt gestreefd naar een Proof-of-principle, optimalisatie van katalysatoren en meer selectieve processen. Er wordt een haalbaarheidstudie gedaan van het power-to-liquids concept met aandacht voor toepasbaarheid, kosten en procesoptimalisatie.

Overig

Methanol is een ander mogelijk product. TU Eindhoven onderzoekt de omzetting van CO₂ met plasma's in CO en zuurstof met technologie van industriële partner Evonik; door toevoegen van waterstof en een katalysator kan methanol worden gemaakt. De opbrengsten zijn nog erg laag. De wisselwerking tussen het plasma en de katalysator is nog niet goed doorgrond, en nog onbekend is hoe het proces op te schalen naar industrieel niveau.¹⁰¹

Er is slotte een EU-projectaanvraag voor opschaling van het maken van kerosine via plasmaconversie onder de naam Kerogreen.

6.4 Solar fuels

Er zijn twee scholen binnen solar fuels: indirecte conversie (elektrolyse gevolgd door synthese) en directe conversie (foto-elektrochemische cel).

6.4.1 Solar fuels door elektrolyse en synthese

Door waterstof op te slaan in vloeibare chemische verbindingen kunnen toepassingen in mobiliteit of chemie worden bediend waar hoge energiedichtheid noodzaak is, zoals luchtvaart en scheepvaart. Bij solar fuels is het doel om energie uit zon of wind te gebruiken om in een gesloten cyclus water en CO₂ om te zetten in vloeistoffen. Een voorbeeld is een in 2011 geopende IJslandse fabriek voor renewable methanol, waar waterstof uit elektrolyse met geothermische elektriciteit wordt gecombineerd met CO₂ uit geothermische bron. Door

de goedkope, continue, hernieuwbare energie is de business case er bijna positief. Met CO₂ uit geothermische bron is er echter nog geen gesloten cyclus.



Fig. 27 Proeffabriek voor solar fuel (bron Sunfire)

De Duitse firma Sunfire heeft een systeem ontwikkeld waarbij wind- en zonnestroom met een hoogtemperatuur elektrolyser (reversible SOEC) waterdamp splitst in waterstof en zuurstof; de waterstof reageert met CO₂ tot een synthesesgas, dat in koolwaterstof ("blue crude") wordt omgezet. Hieruit worden bouwstoffen voor de chemische industrie gewonnen of via raffinage diesel, benzine of kerosine. De installatie levert 160 liter vloeibare brandstof per dag voor autofabrikant Audi. Omdat de omkeerbare brandstofcellen het waterstofgas ook weer snel in stroom kunnen omzetten, biedt het systeem tevens buffercapaciteit. In Noorwegen komt een installatie voor 8.000 ton blue crude per jaar met de Sunfire-technologie.¹⁰² In Finland heeft het project SOLETAIR de eerste 200 liter synthetische brandstof uit zonne-energie en CO₂ opgeleverd. Hiervoor is een mobiele installatie gebruikt met een capaciteit van 80 liter per dag, die past in een 40-voets container en modulair kan worden uitgebreid. De installatie kan benzine, diesel en kerosine maken in 3 stappen: afvang van CO₂ uit de lucht (techniek van VTT), waterstofelektrolyse, en kleinschalige Fischer-Tropsch synthese (Karlsruhe Institut für Technologie, KIT). KIT-spinoff INERATEC commercialiseert de installatie specifiek voor decentrale toepassingen.

groene-stroom/; financiering van NWO, TKI en private partijen in Industrial Private Partnership (2016 – 2021).¹⁰¹

<https://www.cursor.tue.nl/nieuwsartikel/artikel/zonne-energie-in-het-gasnet/>

¹⁰² <http://m.energiepodium.nl/nieuws/item/power-to-liquids-levert-groene-brandstof-en-buffercapaciteit;>
<http://www.sunfire.de/en/company/press/detail/first-commercial-plant-for-the-production-of-blue-crude-planned-in-norway>

In Nederland is solar fuels een onderzoeksthema van DIFFER en TU Eindhoven.¹⁰³ De ambitie is om nieuwe, schaalbare processen te demonstreren om op laboratoriumschaal om brandstoffen te maken. Om hier meer industrie bij te betrekken wil het samenwerkingsverband Solliance, opgericht voor bundeling van onderzoek naar de nieuwste generatie zonnecellen, het initiatief Fuelliance starten.

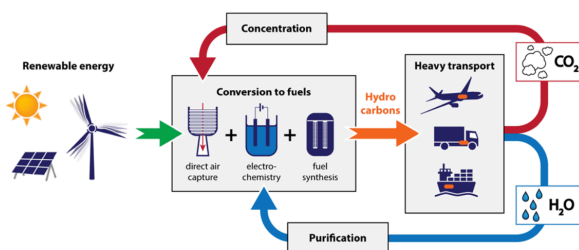


Fig. 28 Solar fuels productie in gesloten cyclus (bron DIFFER)

Fuelliance

Vanuit Solliance komt het plan om te demonstreren dat het technisch en economisch haalbaar is om met zonne-energie brandstoffen te maken in een gesloten cyclus van water en CO₂. De werktitel is Fuelliance. Het idee is om volgens dezelfde werkwijze als Solliance heeft voor dunne film PV, een onderzoeksprogramma rond een pilot plant voor solar fuels op te zetten in een samenwerking tussen instituten en bedrijven op verschillende TRL-nivo's. Het zou moeten gaan om een praktijkinstallatie ("beyond lab scale") met de nieuwste industrieapparatuur.¹⁰⁴

Het doel is om een gesloten cyclus te organiseren. Het proces vergt 3 modules: elektrolyse, CO₂ uit reststromen of uit air capture, en synthese naar koolwaterstoffen of alcoholen. De technieken zijn in principe beschikbaar, behalve direct air capture. Ver met deze techniek is de Nederlandse startup Antecy, die temperature swing absorption toepast waarbij sorbenten CO₂ uit de lucht halen en afgeven bij

verhitting. Antecy's sorbent doet dat al bij lage temperatuur, dus energiezuinig.

Fuelliance moet bewijzen dat solar fuels productie kosteneffectief kan. Het product kan methanol zijn maar ook een andere vloeistof. Het consortium staat nog in de kinderschoenen. Het idee is een onderzoeksprogramma van 5 jaar, met een pilot plant op TRL 4-6 maar ook onderzoek op TRL 1-3 voor instituten, begeleidend onderzoek naar economische modellen, transitie scenario's en het zoeken van locaties voor productie waar de omstandigheden het best zijn (vgl. project in IJsland). Er is ook aandacht nodig voor ondersteunend beleid zoals belastingvrijstelling voor solar fuels.

6.4.2 Kunstmatige fotosynthese: foto-elektrochemische cel

Als eerste stap van fotosynthese, het natuurlijke proces waarmee energie uit zonlicht wordt opgevangen en vastgelegd in chemische energie in de vorm van suikers, wordt water door fotonen (zonlicht) gesplitst in waterstof en zuurstof. De meeste planten halen 0,5-1% energie uit zonlicht; algen halen 5-10%, en voor kunstmatige fotosynthese is de verwachte haalbare efficiency van omzetting ±20%, met een theoretische limiet van 40%.

Biosolar Cells: eerste prototypes

In het onderzoeksprogramma BioSolar Cells¹⁰⁵ (2012 – 2017) zijn meerdere concepten van foto-elektrochemische cellen gedemonstreerd. Het verst is Universiteit Leiden, dat een eerste prototype bouwde van een foto-elektrochemische cel met een nog lage efficiency van 0,5%. Onderdelen zijn een conventionele zonnecel van silicium die de zonne-energie omzet in lading, en katalysatoren voor de splitsing van water in zuurstof en positief geladen waterstof en vervolgens voor de omzetting in waterstofgas. Universiteit Leiden werkt met mkb's Hydron Energy en Everest Coatings aan een tweede prototype in het vervolproject MyLeaf. De financiering is bijna rond. Het prototype moet eind 2018 klaar zijn.

¹⁰³ Het totale volume van het DIFFER-onderzoek is €7 miljoen, waarvan €5 miljoen van NWO en €2 miljoen industrie (o.a. Shell) en EU. In 2011 is het Solar Fuels programma begonnen. Het is de bedoeling om dat nog eens met 6 jaar te verlengen.

¹⁰⁴ In Solliance werken de instituten ECN, TNO, Holst Centre, imec en Forschungszentrum Jülich samen met de universiteiten van Eindhoven, Hasselt en Delft, en met industriepartners.

¹⁰⁵ www.biosolarcells.nl. Vijfjarig samenwerkingsproject van 10 kennisinstellingen en 40 bedrijven. Budget 45 M€, waarvan 25 M€ subsidie uit de aardgasbaten.

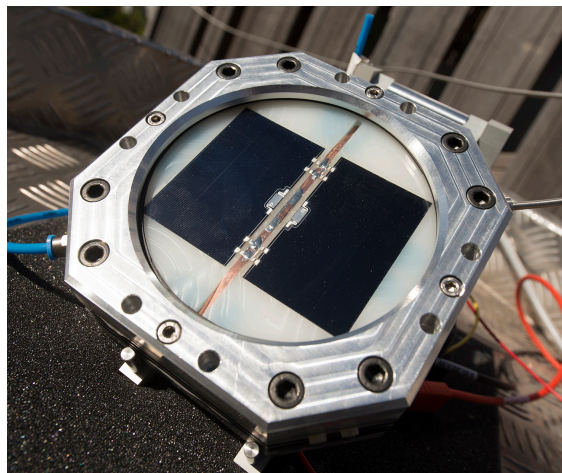


Fig. 29 Prototype foto-elektrochemische cel (bron Universiteit Leiden)

TU Eindhoven demonstreerde een zonnecel met nanodraden die waterstofmoleculen los-trekken uit watermoleculen.¹⁰⁶ TUE maakte een rooster met nanodraden van galliumfosfide, die net als zonnecellen elektriciteit opwekken als er licht op valt. Anders dan in zonnecellen leidt dat niet tot stroom, maar wordt water gesplitst in waterstof en zuurstof. Door het galliumfosfide in de vorm van nanodraden te gebruiken werd het rendement met een factor 10 verhoogd ten opzichte van eerdere toepassingen in vlakke cellen, met 10.000 keer zo weinig kostbaar materiaal. Het behaalde rendement waarmee het waterstof werd gewonnen was 2,9%. Met nanodraden van indiumfosfide werd zelfs een efficiëntie van 15,8% gehaald, maar dan in combinatie met een batterij.¹⁰⁷ Dit is het wereldrecord efficiëntie van omzetting van zonlicht naar waterstof. Het onderzoek is met het vertrek van de betreffende promovendus gestopt maar TUE is geïnteresseerd om het onderzoek te hervatten.¹⁰⁸

¹⁰⁶ <https://www.tue.nl/universiteit/nieuws-en-pers/nieuws/17-07-2015-nanodraadjes-maken-tien-keer-efficiëntere-zonnebrandstofcel/>; onderzoek in het kader van BioSolar Cells programma van FOM, NWO en ministerie van EZK.

¹⁰⁷ De batterij levert de extra energie die nodig is om de hele reactie (dus naar waterstof en zuurstof) te laten verlopen. De 'echte' efficiëntie van deze cellen wordt dus alleen gegeven voor de waterstofreactie, maar is eigenlijk lager als we naar de hele reactie kijken. Het voordeel van galliumfosfide is dat er waarschijnlijk geen batterij nodig is.

¹⁰⁸ STW wees een voorstel voor vervolgonderzoek af omdat het gekozen materiaal te duur werd bevonden. Een alternatief kan zijn om silicium in een andere kristal-

Wellicht kunnen samen met bedrijven polymeerfolies worden ontwikkeld waar aan weerszijden de naaldjes doorheen steken en die, als een membraan in een glazen cel met water, aan de ene kant zuurstof en de andere kant waterstof afgeven.

Sommige partners uit BioSolar Cells, waaronder universiteiten van Amsterdam en Leiden, gaan verder in het NWO-programma Solar to products, dat zich richt op het opslaan van zonne-energie in chemische bindingen via zowel directe als indirecte routes. Shell is medefinancier.¹⁰⁹ Om de energieopbrengst te verhogen wordt gezocht naar efficiënter werkende pigmenten die de zonne-energie opvangen; de levensduur van deze pigmenten moet dan omhoog. De kosten van het kunstmatig blad moeten voor een commerciële toepassing met een factor 1.000 tot 10.000 omlaag (nu enkele k€ per m²), bijvoorbeeld door katalysatoren zonder edelmetalen te gebruiken en met behulp van 3D-printing.

WUR: Vloeibaar Zonlicht

WUR wil in het project Vloeibaar Zonlicht het prototype uit Leiden combineren met enzymensystemen om waterstof met CO₂ om te zetten naar vloeistoffen, zoals methanol of mierenzuur.¹¹⁰ Het systeem zal worden opgeschaald van 20 x 20 cm naar 100 m². Voor het project zoekt WUR private funders en brengt het ook onder in een projectaanvraag voor de Future Emerging Technologies Flagships van DG Connect, de grootste onderzoeksprojecten in de EU. De Europese Commissie is enthousiast geworden over het thema *direct conversion*: de omzetting van zonlicht naar brandstoffen, grondstoffen of voedsel in zo weinig mogelijk stappen om optimale systeemefficiëntie te behalen. Als de aanvraag succesvol is loopt het project van 2020 tot 2030. De verwachting is dat over 5 jaar een foto-elektrochemisch zonnepark gedemonstreerd kan worden, en daarna is er 5 jaar nodig voor commercialisatie. Het idee is dat er over 30 jaar in Nederland

structuur te gebruiken, zodat het meer licht opvangt, zegt Prof. Erik Bakkers.

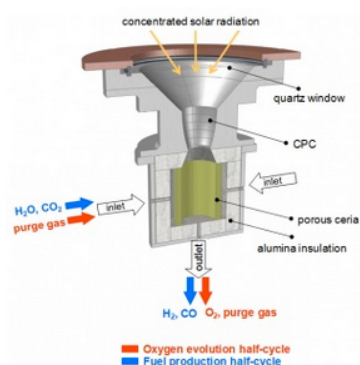
¹⁰⁹ <https://www.nwo.nl/actueel/nieuws/2016/cw/ruim-vier-miljoen-euro-voor-opslag-van-zonne-energie-in-chemische-bindingen.html>

¹¹⁰ www.wur.nl/ufw/liquidsunlight. Dit project wordt begroot op 5 M€.

vele vierkante kilometers kunstmatige bladeren liggen, verbonden aan de omzetting tot een vloeibare biobrandstof. Een mogelijke toepassing is ook om huizendaken te bedekken met cellen die thuis waterstof maken voor auto's.

SUN-to-LIQUID

Het Zwitserse onderzoeksinstituut ETH heeft een thermochemische zonnecel ontwikkeld die synthesesgas maakt. In het EU-project SUN-to-LIQUID (2016 – 2019) koppelt Hygear hier een Gas-To-Liquids-module achter die een kerosine-crude levert.¹¹¹ Ook verzorgt Hygear recycling van reformergas. Het gaat hier om een mogelijke route voor duurzame luchtvaart-brandstof. In het voorgaande project SOLAR-JET is op laboratoriumschaal 700 liter brandstof geproduceerd. In het huidige project is het doel om een 12-voudige opschaling te ontwerpen, bouwen en beproeven van een complete en efficiëntere solar fuel installatie.



The solar reactor converts CO₂ and water to 'Syngas'

Fig. 30 Principe van Sun-to-Liquid (bron ETH)

6.5 Mierenzuur: Power-2-Formic Acid

Mierenzuur (CH₂O₂) is onder meer bruikbaar als conserveringsmiddel in diervoeders, als chemische bouwsteen, en als energiedrager. Het is een alternatief voor syngas, dat nu uit aardolie, kolen en vast afval wordt gemaakt. Door water met CO₂ te combineren tot mierenzuur, en dit vervolgens uiteen te laten vallen tot syngas, kunnen bijvoorbeeld plastics of

koolwaterstoffen worden gemaakt. Mierenzuur is ook een alternatief voor opslag van waterstof omdat de opslag van mierenzuur gemakkelijker is dan van waterstof (geen compressie, niet cryogeen). Mierenzuur kan bij relatief lage temperatuur weer worden gesplitst in waterstof en CO₂.

Mierenzuur wordt voornamelijk uit fossiele grondstoffen geproduceerd. De Nederlandse startup Coval Energy heeft een hoge druk elektrochemische reactor voor continu bedrijf ontwikkeld voor de energie-efficiënte productie van mierenzuur uit CO₂, water en elektriciteit. Deze reactor levert hogere concentraties op dan eerdere reactoren. De ambitie in het Voltachem-programma¹¹² is om binnen 1-2 jaar een pilot te bouwen voor 100-200 kW. Deze pilot moet aantonen dat mierenzuur op deze wijze ook op grote schaal geproduceerd kan worden en dat men hiermee duurzame energie veilig en langdurig op kan slaan. Rond 2020 moet een eerste demonstratiefabriek gebouwd worden voor het op grote schaal omzetten van CO₂ in mierenzuur met behulp van duurzaam opgewekte elektriciteit.

Projectcoördinator TNO onderzoekt hoe het productieproces op grote schaal betaalbaar kan worden opgezet. Coval Energy en TU Delft ontwikkelen en testen de elektrochemische reactor. CE Delft bestudeert de keten van productie tot toepassing. Mestverwerking Friesland wil CO₂ uit zijn mestverwerkings- en bio-gasinstallaties inzetten voor mierenzuurproductie. Team FAST (TU Eindhoven) werkt met VDL Bus & Coach aan de ontwikkeling van een bus die rijdt op mierenzuur (zie §4.2).

Een met mierenzuurproductie vergelijkbare omzettingroute is elektrochemische waterstofperoxide (H₂O₂)-productie. Deze technologie is ontwikkeld door TNO. Er wordt aan gewerkt met Solvay.

6.6 Biologische waterstof

In het recente verleden werd er veel onderzoek gedaan naar biologische waterstofproductie uit biomassa met een hoofdrol voor het research-

¹¹¹ <http://www.sun-to-liquid.eu>, http://cordis.europa.eu/project/rcn/199438_en.html, Bauhaus Luftfahrt, ETH, DLR, IMDEA Energia, Hygear, Abengoa Research, ARTTIC. Budget 6,2 M€, waarvan 4,5 M€ subsidie uit Horizon 2020.

¹¹² <http://www.voltachem.com/fa>; voorloperstudie van Coval Energy BV en partner Tielo-Tech BV in het kader van TKI programma Systeemintegratie): <https://www.topsectorenergie.nl/systeemintegratie/project/en/liquid-syngas-renewable-carbon-and-hydrogen-source>

instituut Food & Biobased Research van Wageningen University & Research (zie <http://www.biohydrogen.nl>). Volgens WUR is de aandacht in Europa verschoven naar het maken van waterstof door elektrolyse van water met groene elektriciteit. WUR is wel partner in een EU-project over omzetting van organisch afval door hydrolyse en fermentatie in butanol en waterstof.¹¹³ Tot dusver is het gelukt om op laboratoriumschaal butanol en aceton te maken uit huishoudelijk afval maar nog niet om het bij de fermentatie vrijkomende waterstof efficiënt te oogsten. Het blijft volgens WUR een interessante mogelijkheid om biologisch geproduceerde waterstof te winnen door een aanpassing van industriële afvalwaterzuiveringsinstallaties. In het proces van biogasproductie wordt namelijk eerst waterstof gemaakt dat door methanogene bacteriën wordt opgegeten en gedeeltelijk omgezet in methaan.

¹¹³ MSWBH: Production of butanol and hydrogen by fermentation techniques using steam treated municipal solid waste (2016 – 2018) , Wilson Biochemicals, University of York, University of Nottingham, Wageningen Food & Biobased Research, Artech Automation, met Hygear als subcontractor. Budget 6 M€, subsidie van ERA-NET Bioenergy. <http://eranetbestf.net/wp-content/uploads/2017/08/Brochure-Bioenergy-from-Research-to-Market-Deployment-in-a-European-Context-v2-web.pdf>

7. Ondersteunende projecten voor markt en beleid

Voor de marktontwikkeling voor waterstof en -toepassingen is naast techniek, productie, infrastructuur en business cases ook nodig dat het kader van wettelijke regels, administratieve processen, standaards en normen, certificering van “duurzaam” en veiligheidsprocedures op orde is.

HYLAW: stroomlijning van regelgeving

Bestaande juridische kaders en administratieve processen op gebieden als planning, veiligheid, installatie en exploitatie houden vaak alleen rekening met gebruik van gevestigde technologieën. Onbekendheid met nieuw technieken zoals waterstof en brandstofcellen bij overheden en de onzekerheid over de wetgeving die van toepassing is op deze technologieën leidt tot vertragingen en extra kosten en kunnen investeerders of klanten afschrikken. In het FCH JU project HYLAW (2017 – 2018) werken 22 Europese organisaties samen om deze belemmeringen aan te pakken.¹¹⁴

Activiteiten zijn het systematisch vergelijken van relevante juridische kaders en administratieve processen in 18 Europese landen en in het EU-rechtssysteem; beoordelen in hoeverre sprake is van onnodige vertraging en kosten; opsporen van beste en slechte praktijken; bewustwording vergroten over invloed van de kaders en processen op de inzet van waterstof en benodigde technieken, en advisering over gerichte verbeteringen in elk van de 18 landen en op EU-niveau.

MetroHyVe: meetmethoden en normering

Het project MetroHyVe (Metrology for Hydrogen Vehicles, 2017 – 2020) richt zich op het ontwikkelen en vastleggen van normen voor het meten van kwantiteit en kwaliteit van waterstof bij afgifte door tankstations.¹¹⁵ Het wordt uitgevoerd door Europese metrologische instituten en bouwers en exploitanten van

waterstoftankstations. Enerzijds gaat het om het vastleggen van methoden en voorschriften voor hoeveelheidmeting van waterstof (hoeveel waterstof is afgeleverd aan de pomp), en anderzijds kwaliteitsmeting- en controle van waterstof, vast te leggen in ISO-/ CEN-normen. De zuiverheid van waterstof is van belang voor een goede werking en levensduur van de brandstofcel.

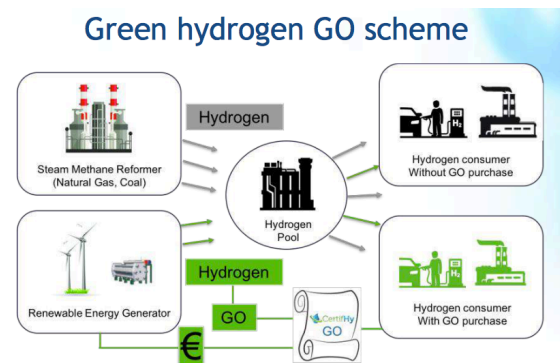


Fig. 31 Schema certificering van duurzame waterstof (bron CertifHy)

CertifHy: certificering van groene waterstof

Waterstof kan op vele manieren worden gemaakt uit zowel groene als grijze bronnen. Het Europese project CertifHy ontwikkelt en beproeft een EU-breed Garantie van Oorsprongsysteem voor groene en koolstofarme waterstof.¹¹⁶ Het gaat in eerste instantie om “consumer disclosure” om de klant te kunnen laten zien dat hij krijgt wat wordt geclaimd, nl. groene of koolstofarme waterstof. In het eerste project (2014 – 2016) is een definitie van duurzame waterstof geformuleerd, een architectuur opgezet voor de organisatie van de certificering en een routekaart gemaakt voor de realisatie daarvan. Eind oktober 2016 werd het eerste EU-brede 'Garanties van Oorsprong' (GO) systeem voor waterstof gepresenteerd. In het recent goedgekeurde vervolg-project (2017 – 2018) wordt het certificeringssysteem opgezet en pilots gehouden waarbij de methodiek in de

¹¹⁴ <http://www.fch.europa.eu/project/identification-legal-rules-and-administrative-processes-applicable-fuel-cell-and-hydrogen>, Nederlandse deelnemers zijn WaterstofNet en NEN. FCH JU financiert het project (1,1 M€).

¹¹⁵ www.metrohyve.eu, Nederlandse deelnemers zijn VSL (Nederlands Metrologisch Instituut, Shell) en NEN.

¹¹⁶ <http://www.certifhy.eu>, ECN met Hincio (aanvrager), TÜV SÜD, Ludwig Bölkow Systemtechnik, samen met tientallen Europese industriële partners. Budget 1^e project 0,55 M€ waarvan 0,43 M€ uit FCH JU.

praktijk wordt getest. De Nederlandse pilot betreft een locatie waar chloorelektrolyse wordt bedreven met hernieuwbare elektriciteit; daarnaast vinden pilots plaats in België, Duitsland en Frankrijk.

Waterstof Innovatie Veiligheidsprogramma (onder het H2Platform)

Het Waterstof Veiligheid Innovatie Programma wil de brede introductie van waterstof als nieuwe energiedrager mogelijk maken, om de grootschalige veilige toepassing voor mobiliteit en transport te versnellen. Het H2 Veiligheidsprogramma is opgesteld om een eenduidig beeld te krijgen van de veiligheidsrisico's in de hele keten en de interpretatie daarvan. Dit beeld is nodig om te komen tot:

- landelijk afgestemde maatregelen en
- instrumenten voor veiligheidsaspecten en risico's;
- wet- en regelgeving;
- uniforme vergunningverlening;
- uniforme incidentbestrijding en -beheersing.

PGS 35

Deze PGS (Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen) heeft betrekking op wegvoertuigen die waterstof als brandstof gebruiken. Deze PGS is van toepassing op waterstofafleverinstallaties op het land, met inbegrip van de hieraan verbonden en/of hiervoor benodigde hulpapparatuur met een maximale afleverdruk van 350 bar of

700 bar gasvormig waterstof voor wegvoertuigen met Europese typegoedkeuring.

CEN-CLC TC 6 Hydrogen in energy systems

Standaardisatie kan het proces voor de uitrol van de waterstofeconomie versnellen o.a. ten aanzien van de ontwikkeling van nieuwe technologieën, van innovatieve systemen, van het beheer en de veiligheid / beveiliging, evenals het versnellen van de markt- en publieke acceptatie. Om hier invulling aan te geven is in 2016 is, onder het Europese normalisatie instituut CEN/CENELEC CEN/CENELEC/TC 6 'Hydrogen in energy systems' ingesteld. NEN voert het secretariaat van CEN/CLC/TC 6.

Daarnaast bestaat een CEN/CENELEC Working Group (WG) on Hydrogen die valt onder de Sector Forum Energy Management (SFEM). Het doel van deze werkgroep is om de stand van de techniek en bijbehorende standaards te analyseren en vast te stellen welke aanvullende techniek en standaards nodig zijn.

Nederlandse normcommissie waterstof

De normcommissie is het aanspreekpunt voor Nederlandse belanghebbenden en draagt zorg voor nationale normontwikkelingsactiviteiten, en de Nederlandse inbreng in de relevante technische commissies van ISO en CEN. Dit zijn de mondiale normcommissies ISO/TC 197 'Hydrogen technologies', IEC/TC 105 'Fuel cell Technologies' en de Europese normcommissie CEN/CLC/TC 6 'Hydrogen'.

8. Stakeholders en regionale en overkoepelende initiatieven

8.1 Stakeholders

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van stakeholders die bereid zijn om mee te investeren/bouwen aan projecten, zoals bedrijven, overheden, en kennisinstellingen. Het gaat hierbij om zelfverklaarde stakeholders, dat wil zeggen partijen die door deelname aan samenwerkingsverbanden of projecten er blijk van geven belang te stellen in waterstofontwikkelingen. Daarnaast zijn er latente stakeholders: partijen die uiteindelijk wel nodig zijn voor, of te maken krijgen met, de grootschalige invoering van waterstof, maar daar nu nog niet actief mee bezig zijn.

Tabel 8.1 geeft een overzicht van actieve stakeholders behorend tot verschillen soorten. De organisaties in de tabel komen terug in het overzicht van initiatieven, plannen en toepassingen in voorgaande hoofdstukken. Organisaties zijn ingedeeld bij een enkele soort stakeholders, hoewel sommige onder meerdere soorten passen. De vetgedrukte namen zijn van organisaties die betrokken zijn bij het H2-Platform (H2NL). Vanwege de voortgaande organische wordingsgeschiedenis van het platform is er geen formeel vastgestelde lijst van leden.

H2NL is in Nederland het platform om kennis uit te wisselen en oplossingen te vinden voor vraagstukken die samengaan met de vele toepassingen die met de energiedrager waterstof mogelijk zijn. Ook is het platform de gesprekspartner voor de overheid op het gebied van stimulering en introductie van de toepassing van waterstof voor mobiliteit, grondstoffen en energie. Het Rijk en H2NL bereiden een convenant voor over samenwerking bij de ontwikkeling van een duurzame waterstofeconomie.

De multinationale industrie organiseert zich op het thema waterstof via de Hydrogen Council, een platform om kennis en ervaringen uit te wisselen en internationale denktank voor de waterstofauto (zie §8.4). Deelnemers hieraan staan in tabel 8.1 cursief gedrukt.

8.2 Regionale initiatieven en samenwerkingsverbanden voor waterstof

Green Deal Groene waterstofeconomie Noord-Nederland

De Noordelijke Innovation Board (NIB, een initiatief van VNO-NCW Noord) heeft in april van dit jaar het plan 'De Groene Waterstofeconomie in Noord-Nederland' uitgebracht. In dit plan wordt beschreven hoe groene waterstof uit wind en zon en uit biomassavergassing de energietransitie mogelijk maakt in de chemie, mobiliteit en elektriciteit. Het plan beoogt dat juist in Noord-Nederland hiervoor goede kansen zijn vanwege grootschalige offshore wind, de gaskennisinfrastructuur, chemieclusters, elektriciteitskabels voor import van groene elektriciteit, en aardgasleidingen die voor waterstoftransport kunnen worden aangepast. Het plan is opgesteld door prof. Ad van Wijk van TU Delft in opdracht van de NIB en enkele andere partijen (Noordelijke provincies, private partijen en Energy Academy Europe). Prof. van Wijk is tevens lid van de NIB.

Het plan vergt een investering van tussen de €17,5 en 25 miljard tot 2030. De bouw van windparken maakt hiervan €12-15 miljard uit, de waterstof-gerelateerde investeringen €5,5-10 miljard. Dit omvat 1.000 MW elektrolyzers voor €0,5-1 miljard, biomassavergassing idem dito, en zonneparken met nog eens 500 MW elektrolyzers worden geraamd op €2-3 miljard. Overige investeringen betreffen toepassingsmarkten en infrastructuur zoals tankstations. De kostprijs van waterstof wordt in de eindsituatie geschat op €2-3 per kilo, mits door de koppeling met de kabels naar Noorwegen en Denemarken het elektrolysevermogen continu kan worden geleverd.

Het plan heeft enthousiasme en discussie losgemaakt. Het heeft inzichtelijk gemaakt hoe al lopende en in ontwikkeling zijnde projecten en initiatieven in het Noorden samenhang kunnen krijgen. De slag die nu gemaakt gaat worden is om van plan naar project te gaan, draagvlak te organiseren en gerichte acties benoemen om het 'gat' tussen grijze waterstof (vandaag) en groene waterstof (toekomst) te

Tabel 1 Overzicht van stakeholders in waterstofinitiatieven

Soort stakeholder	Organisaties
Waterstofproducenten en -distributeurs	Air Liquide, Air Products, Hygear, Linde Group , Holthausen
Energie- en brandstoffenleveranciers	BP, ENECO, ENGIE , Gasterra, NOGEPa, Nuon/Vattenfall, <i>Shell, Statoil</i> , TAQA, Total, Uniper
Energienetwerkbedrijven	Alliander/Liander, Gasunie (Transport Services, Energystock, New Energy) , Netbeheer Nederland, Stedin/Joulz , TenneT
Voertuigproducenten en -leveranciers	Personenauto's: <i>Audi, BMW Group, Daimler, General Motors, Honda, Hyundai</i> , Pon Holding, Toyota Bussen, trucks: DAF Trucks, VDL Bus & Coach , E-trucks Europe, Hymove, Scania Overig: RAI, AutomotiveNL, Hyster-Yale
Producenten van overige voertuigen, vaartuigen, e.d.	Trein: Alstom Aggregaten: Bredenoord, Cikam, Wolter & Dros
Exploitanten van tankstations / laadinfrastructuur	Allego, BOVAG , Green Planet, GP Groot, Pitpoint , Shell, Van Peperstraten (Greenpoint), Van Tilburg Bastianen, WaterstofNet
Chemische en staalindustrie	AkzoNobel , BASF, Dow, ICL-IP, OCI Nitrogen, Proton Ventures, Shell , SynGasChem, Tata Steel, VOPAK , Yara
Techniekontwikkelaars en -toeleveranciers	Accenda, Ampleon, CarbonOro, CGI, Composite Agency, Coval Energy, Frames Energy Systems, Fujifilm, H2Fuel Systems, HyET Hydrogen, Hydron Energy, Hygear, Lagerweij, MTSA Technopower, Nedstack, Process Design Center, RESATO, Siemens, Tiels-Tech
Universiteiten, onderzoek- en adviesbureau's	Adviescommissie Elektrochemische Conversie en Materialen (ECCM), Alterra, Arcadis, Berenschot, CE Delft, DIFFER, DNV GL, ECN , Energy Academy Europe, Energy Delta Institute, EnTranCe, Hanzehogeschool Groningen, Hogeschool Arnhem Nijmegen, Infram, ISPT, KIWA, RU Groningen, Solliance, SWECO, TNO, TU Delft, TU Eindhoven, Wageningen UR, UvA, ULeiden, UTwente
Mobiliteit- en transportgebruikers	OV: Connexxion, Qbuzz, RET, Syntus Afvalinzamelaars: Baetsen Groep, Cure Afvalbeheer, HVC, Suez Vaartuigen: Lovers, Nedcargo, Private Transport Coöperatie Overig: Bovemij, Drone Hub GAE, Q-Park
Gebouwde omgeving	Ressort Wonen
Watersector	Allied Waters, Avecom, KWR, Volker Wessels, Waternet, Waterschap Rijn en IJssel
Biomassa (reststromen) sector	Attero, AVR, Dutch Torrefaction Association, Biolake, Cra-W, Mestverwerking Friesland, Topell Energy, TorrCoal Technology
Rijk	Ministerie van Economische Zaken & Klimaat , Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat, Rijkswaterstaat, Energiebeheer Nederland
Provincies en gemeenten	Drenthe, Friesland, Gelderland, Groningen, Zeeland, Noord-Brabant, Noord-Holland, Zuid-Holland; Amsterdam, Arnhem, Breda, Duiven, Goeree Overflakke, Groningen, Helmond, Rotterdam; Ontwikkelingsbedrijf Noord-Holland
Havenbedrijven	Havenbedrijf Rotterdam, Groningen Seaports , Havenbedrijf Amsterdam, Zeeland Seaports
Regionale organisaties, platforms	Amsterdam Economic Board, Deltalinqs, Energy Expo, Energy Valley/ New Energy Coalition , Energie Innovatie Board Zuid-Holland, H2Platform , Noordelijke Innovation Board, NWBA , Smart Delta Resources Platform, Smart Port, WaterstofNet
Projectontwikkelaars	Energy Matters, HYGRO
Funding agencies	FOM, NOW, RVO, STW, JU FCH (Europa), CEF
Normen en standaards	NEN, Nederlands Metrologisch Instituut
Consumenten-(organisaties)	Niet actief betrokken
Milieuorganisaties	Niet actief betrokken

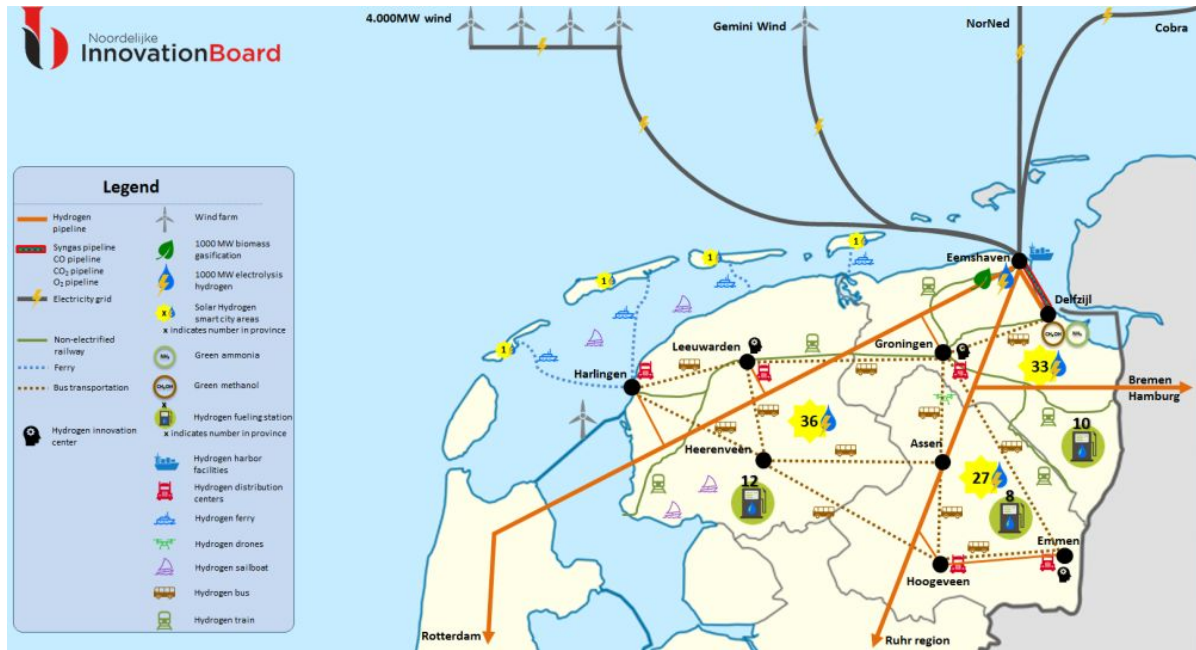


Fig. 32 Toekomstbeeld groene waterstof in Noord-Nederland

overbruggen. Het voornemen is om een Green Deal ‘Groene Waterstofeconomie Noord-Nederland’ te sluiten tussen de private sector (de funderende partijen), de drie noordelijke provincies en het Rijk. De Green Deal moet projecten die er nu zijn bundelen en synergie creëren onder leiding van een stuurgroep van bedrijven en instanties, die gezamenlijk fungeren als ambassadeur van deze ontwikkeling. In deze Green Deal krijgt zowel groene waterstof als grijze waterstof een plaats, evenals waterstof met CCUS.

Zuid-Holland: Haven Industrieel Complex Rotterdam en Goeree Overflakkee

In opdracht van Havenbedrijf Rotterdam heeft het Wuppertal Instituut transitie-scenario's naar een koolstofarme economie opgesteld. Waterstof speelt hierin een prominente rol. In Rotterdam/Rijnmond wordt al veel (grijze) waterstof gebruikt in de industrie. Er lopen meerdere studies naar vergroening van huidige waterstofvraag van raffinaderijen, naar toepassing in kolencentrales, ontwikkeling van nieuwe chemische industrie, en naar combinaties met wind op zee. Er wordt onder meer gekeken naar mogelijkheden om grootschalig waterstof te produceren met CCUS. Bij de initiatieven zijn veel partijen in wisselende samenstellingen betrokken. Er lijkt nog geen sprake van een gecoördineerde aanpak. Havenbedrijf en Delta-

linqs zijn de voor de hand liggende schakelpunten.

Ten zuiden van Rotterdam heeft Goeree Overflakkee de ambitie op energieproducerend eiland te worden. Er is een grote windopgave (225 MW), goede mogelijkheden voor zonneparken, en men streeft naar een getijdencentrale in de Brouwersdam. De provincie omarmt Goeree Overflakkee als testgebied voor energie-innovaties en ziet waterstof-(economie) als belangrijke kans voor het eiland. Vanaf 2020 wekt het eiland meer duurzame elektriciteit op dan nodig voor het eigen gebruik. De ambitie is om overschot om te zetten in waterstof voor mobiliteit (o.a. OV-bussen), ammoniakproductie en verwarming van huizen, en op termijn voor waterstoflevering aan Rotterdam.

Goeree Overflakkee, Rotterdam en provincie Zuid-Holland werken aan een convenant over waterstof, vergelijkbaar met en geïnspireerd door het Noordelijke initiatief voor een Green Deal. De ambitie is dat Goeree Overflakkee een showcase wordt voor een nationale aanpak.



Fig. 33 Projectoverzicht en schema: <http://www.waterstofnet.eu/nl/overzicht-projecten>

Waterstofregio Vlaanderen Zuid-Nederland

WaterstofNet is in 2009 opgericht om het Interreg-project Waterstofregio uit te voeren.¹¹⁷ Er zijn demonstratieprojecten ontwikkeld en gerealiseerd, waarbij Vlaanderen en (Zuid)-Nederland grensoverschrijdend samenwerken. De projecten betreffen de bouw van de eerste waterstoftankstations met elektrolyse in Vlaanderen en Nederland en de ontwikkeling, bouw en demonstratie van innovatieve voermiddelen op waterstof (vuilniswagen, sloep en bus). Mede op basis van dit Interreg-project werd de regio – via WaterstofNet – deelnemer in diverse Europese projecten, waarbij bedrijven uit Vlaanderen en Nederland werden betrokken. Voorbeelden zijn Toyota, Hydrogenics, Colruyt Group, Hyundai, VDL, Air Liquide, Van Hool en PitPoint. De komende jaren worden de initiatieven voortgezet in het vervolgproject Interreg Waterstofregio 2.0.

Figuur 7.2 toont de portfolio van waterstofprojecten waarin WaterstofNet en regionale partners actief zijn. Er zijn ook projecten voor de Vlaamse en Nederlandse overheid.

Zuidwestelijke deltaregio

Het project waterstofsymbiose tussen Dow, Yara en ICL-IP is één van de cases binnen Smart Delta Resources, het samenwerkings-verband van elf energie- en grondstof-intensieve bedrijven in de zuidwestelijke deltaregio: Arcelor Mittal Gent, Cargill, Delta, Dow, ICL-IP, Lamb Weston-Meijer, Sabic Bergen op Zoom, Trinseo, Suiker Unie, Yara en Zeeland Refinery. Ook provincie Zeeland, Zeeland Seaports en Impuls (facilitator) maken er onderdeel van uit. Doel van de samenwerking is om met energie- en grondstofconcepten in de regionale procesindustrie bij te dragen aan duurzaamheidsdoelstellingen en versterken van de industrie. De waterstofsymbiose betreft het uitwisselen van waterstof tussen bedrijven via geëigende gasleidingen. Dit zou kunnen uitgroeien tot een regionale waterstofinfrastructuur die meerdere partijen met een waterstofvraag en/ of -aanbod verbindt.

Amsterdam/Noord-Holland

Ook in Noord-Holland wordt nagedacht over inzet van waterstof. Havenbedrijf Amsterdam werkt aan een waterstofvisie en stappenplan. Partijen betrokken bij gesprekken zijn o.a. Tata Steel, AkzoNobel, Shell, TenneT, en Oil Tanking. De hoogspanningsinfrastructuur rond de Hemweg kolencentrale speelt hierbij een rol,

¹¹⁷ [http://www.waterstofnet.eu/nl/Partners in het project Waterstofregio 2.0](http://www.waterstofnet.eu/nl/Partners%20in%20het%20project%20Waterstofregio%202.0) zijn WaterstofNet, Colruyt Group, VDL, PitPoint, E-Trucks, ISVAG, POM Antwerpen, SPK, POM West-Vlaanderen en Automotive NL. Het budget bedraagt 14 M€, waarvan 6 M€ Interreg-subsidie.

evenals initiatieven voor waterstoftankstations, inzet van vuilniswagens en verkenning van gebruik van waterstof op luchthaven Schiphol. Busvervoerder GVB heeft gereden met brandstofcelbussen maar heeft de aandacht nu gericht op elektrische bussen. Er is een initiatief voor grootschalige inzet van vuilniswagens op waterstof uit windenergie (project Duwaal).

Arnhem/Gelderland

Arnhem huisvest meerdere waterstof-gerelateerde mkb zoals Hygear, Nedstack, HyET, MTSA Technopower en Hymove, is een centrum voor de elektriciteitssector met vestigingen van TenneT en Alliander en heeft een actieve Hogeschool Arnhem Nijmegen. Bedrijven als Allego, DNV GL en DEKRA hebben in Arnhem met provinciale steun het Clean Mobility Centre opgericht, dat via de Hogeschool is verbonden met het onderwijs. De gemeente heeft zich met de provincie sterk gemaakt voor vestiging van waterstof-tankstations. De provincie ondersteunt ontwikkelingen zoals waterstofbussen met innovatiegelden. Gemeente en bedrijven maken veelvuldig gebruik van Europese stimuleringsregelingen. De inzet van waterstofbussen concentreert zich in Apeldoorn en van auto's in Arnhem. Voor dit laatste wordt een lokale stimuleringsregeling inclusief vraagaggregatie voorbereid met middelen van Arnhem en de provincie.

Er wordt een regionaal masterplan voor waterstof opgesteld, dat eind 2017/begin 2018 klaar is. Verwachte kernpunten zijn: innovatie voor mobiliteit, energie en gebouwde omgeving, lokale productieketens, en systeemintegratie. Energie is de coördinerende portefeuille. Het plan wordt verbonden met het Gelders Energie Akkoord. De focus ligt op het kerngebied Apeldoorn-Arnhem-Nijmegen, aangevuld met Wageningen UR en samenwerking met Noord-Rijn-Westfalen.

8.3 Europa: Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking en Connecting Europe Facility

Een stuwende kracht voor de ontwikkeling en invoering van waterstof en benodigde technologie in Europa is het Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU). Dit is een publiek-private samenwerking op het gebied van waterstof- en brandstofcellen. FCH JU stelt zich als doel waterstof en brandstofcellen commercieel

haalbaar te maken. Het is een door de industrie geleid initiatief, gefinancierd door Horizon 2020 met ca. 700 M€ (2014-2020). De Europese Commissie is verantwoordelijk voor de uitgaven, de industrie is doorslaggevend bij de keuze van prioriteiten en inhoud van de calls for projects. Co-financiering van de industrie is een voorwaarde. Het initiatief biedt extra stimulering voor deelname van mkb. Nederlandse bedrijven en organisaties zijn redelijk succesvol als het gaat om deelname in door FCH JU gehonoreerde projecten. Een aantal bedrijven richt zich ook meer op internationale projecten via de FCH JU regeling dan op Nederlandse projecten.

De Connecting Europe Facility is een andere Europese subsidieregeling die vermeldenswaard is.¹¹⁸ Deze regeling ondersteunt initiatieven op het gebied van infrastructuurontwikkeling voor transport, energie en telecom. Met CEF-middelen zijn verscheidene projecten ondersteund voor de bouw van waterstoftankstations en inzet van bijbehorende voertuigen, waaronder in Nederland.

8.4 Industrieconsortia voor waterstof

De multinationale industrie organiseert zich op het thema waterstof via de Hydrogen Council. De aftrap is begin dit jaar gedaan door bedrijven als Shell, BMW, Honda, Hyundai, Mercedes-Benz en Toyota – partijen die ook in Nederland actief zijn. Zij kondigden aan de komende 5 jaar in totaal €10 miljard in waterstofgerelateerde producten te investeren. Binnen dit samenwerkingsverband gaat met name veel aandacht uit naar het bouwen van waterstoftankstations. Het doel is in 5 jaar te groeien naar 1.000 tankstations in de wereld, een verviervoudiging. Het aantal beschikbare automodellen met brandstofcel moet toenemen van 4 vandaag (waarvan 2 te koop in Nederland) naar 10 in 2020. De prijs van brandstofcellen moet in 8 jaar tijd met 90% omlaag. De Hydrogen Council is een open structuur waar meer partijen met interesse in de waterstofeconomie de komende jaren zullen aansluiten.¹¹⁹

De landen die het meest trekken aan waterstof zijn Duitsland, Japan en de Verenigde Sta-

¹¹⁸ <https://ec.europa.eu/inea/en/connecting-europe-facility>

¹¹⁹ <http://hydrogencouncil.com>

ten, in het bijzonder Californië. In Duitsland is een consortium van bedrijven en de overheid actief, genaamd H2 MOBILITY. Dit wil het huidige aantal van 20 waterstoftankstations in 6 jaar tijd laten groeien naar een totaal van 400. In 2018 en 2019 moeten er nog 100 nieuwe tankstations bij komen, vooral in de periferie van grote Duitse steden.¹²⁰

De meeste deelnemers in H2MOBILITY zijn ook in Nederland actief, te weten Shell, Daimler, Total, Air Liquide en Linde; Nederland zal dan ook profiteren van schaalvoordelen die de Duitse initiatieven opleveren. Dat geldt ook voor initiatieven in Japan. Daar is een samenwerkingsverband van grote ondernemingen gevormd om rijden op waterstof te bevorderen en een waterstofmaatschappij in Japan te realiseren. Doelstelling is om in 2020 160 tankstations operationeel te hebben en 40.000 waterstofauto's op de weg. In 2028 zouden er >300 stations moeten zijn.¹²¹ De ondernemingen overwegen het oprichten van een bedrijf voor de bouw en de exploitatie van de waterstoftankstations.¹²²



Fig. 34 Vloeibaar waterstof carrier (bron Kawasaki Heavy Industries)

Japan en Australië hebben een overeenkomst gesloten om vloeibaar waterstof te transporteren in speciaal ontwikkelde schepen.¹²³ In eerste instantie betreft het waterstof uit kolen, maar dit moet later waterstof uit hernieuwbare bronnen worden. In 2020 staat een pilotproject gepland waarvoor Kawasaki het schip bouwt. Dit project lijkt op eerdere initiatieven om waterstof grootschalig te produceren waar dat het goedkoopst kan en dan te transporteren naar eindgebruikmarkten, zoals van Hydro Quebec (waterkracht) en IJsland (geothermie). Het kan ook uit Midden-Oosten met zonne-energie. Transport van vloeibaar waterstof is vergelijkbaar met LNG-transporten en terminals, waar in Nederland inmiddels de nodige ervaring is opgedaan.

De focus die de internationale industrie legt op Duitsland, Japan en Californië kan aan de andere kant wel betekenen dat projecten in Nederland misschien minder hoge prioriteit krijgen van de bedrijven.

¹²⁰ <http://h2-mobility.de>

¹²¹ Automakers Toyota, Nissan en Honda, energieleveranciers JXTG Nippon Oil & Energy, Idemitsu Kosan, Iwatani, Tokyo Gas, Toho Gas, Air Liquide Japan, Toyota Tsusho, en Development Bank of Japan.

¹²² <http://opwegmetwaterstof.nl/2017/05/22/over-vier-jaar-40-000-waterstofautos-in-japan/>

¹²³ <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/may/19/how-australia-can-use-hydrogen-to-export-its-solar-power-around-the-world>

9. Conclusies

Inleiding

Het ministerie van EZK heeft aan TKI Gas gevraagd om de regie te voeren bij de totstandkoming van een routekaart voor waterstof op basis van een inventarisatie van initiatieven, plannen en toepassingen die als groeikernen voor waterstof in Nederland zouden kunnen dienen. In de inventarisatie zijn initiatieven opgenomen die momenteel in uitvoering zijn, projecten die recent zijn afgerond en waarop een vervolg overwogen wordt, en initiatieven in idee- of planfase. De scope is voornamelijk de komende 5 jaar, maar sommige verder weg gelegen plannen zijn toch behandeld als deze prominent in de discussies van vandaag naar voren komen.

Veel initiatieven en projecten

Er zijn veel initiatieven en projecten. Enigszins afhankelijk van waar grenzen tussen initiatieven worden getrokken, bijvoorbeeld of elk tankstation als apart initiatief wordt beschouwd, is sprake van ruim honderd initiatieven. De initiatieven zijn in dit rapport geordend naar energiefunctionaliteit:

- waterstof in de industrie voor verduurzaming van grondstoffen, hogetemperatuur-warmte en gascentrales
- waterstof in de energiesector voor systeemintegratie, flexibiliteit en energieopslag. (De functionaliteit kracht en licht is dus over twee hoofdstukken verdeeld.)
- waterstof voor nul-emissie verkeer en vervoer.
- waterstof voor laagtemperatuur-warmte in gebouwen voor verwarming.
- R&D voor groene waterstofproductie en solar fuels.
- ondersteunende projecten voor marktontwikkeling en beleid.

Vooraf ideeën, studies en R&D

In de meeste gevallen gaat het om ideeën, plannen en haalbaarheidsstudies. Ook zijn er veel R&D-projecten voor techniekontwikkeling, vaak via EU-programma's, waar Nederlandse spelers zich tamelijk succesvol in bewegen.

Projecten in het veld: vooral mobiliteit

Projecten waarbij daadwerkelijk iets "in het veld" gebeurt zijn, afgezien van de gevestigde toepassingen van waterstof in industrie, meestal projecten in mobiliteit (tankstations, bussen, auto's, vrachtwagens, e.a.). De grootteorde is tientallen auto's, nu 10 en over enkele jaren 60 OV-bussen, tientallen vuilniswagens en andere trucks, een of meer treinen, een of meer binnenvaartschepen, en 20 tankstations.

Zowel voertuigen als tankstations komen er voorlopig niet zonder subsidies of fiscale voordelen. Er is nog weinig aanbod van voertuigen mede omdat Nederland niet in het lijstje van prioritaire markten van de industrie staat.

Bij het bouwen van business cases voor waterstof kijken partijen graag naar mobiliteit als sector met (potentieel) de hoogste toegevoegde waarde voor waterstof, maar de vloten en dus afzetvolumes zijn nog klein. In de industrie zijn afzetvolumes groot maar vindt men groene waterstof nog te duur.

Overige projecten "in het veld"

Andere lopende of voorgenomen projecten "in het veld" (naast mobiliteit) zijn:

- power-to-gas Rozenburg loopt in principe nog door tot 2019. Er worden geen herhalingsprojecten verwacht want de techniek is nog te duur en aardgas te goedkoop.
- HyStock / TSO 2020: beproeving van elektrolyse voor netbalanceren/stabiliteit vanaf september 2018. Het perspectief is een verdienmodel voor elektrolyzers voor grid services en daarnaast verkoop van waterstof. In HyStock gebeurt dit eerst op kleine schaal maar wordt ook grootschalige toepassing gesimuleerd.
- Waterstofsymbiose Zeeland: uitwisseling van waterstof tussen bedrijven vanaf eind 2018. Het project is leerzaam voor infrastructuuropbouw met herbestemde gasleidingen. De aanpak kan navolging vinden in Limburg (Chemelot). In Delfzijl willen AkzoNobel en Groningen Seaports een waterstofbackbone aanleggen.
- AkzoNobel wil in stappen zijn elektrolyse-capaciteit uitbreiden. Naast de huidige

chloorelektrolyse gaat het dan om water-elektrolyzers in de grootteorde 30 MW.

- Er is een business case voor upstream blending van groene waterstof in benzine- en dieselproductie, mits dit wordt meegerekend in de prestatie voor de Hernieuwbare Energie Richtlijn vervoer. Dat is nu niet het geval. Een casus voor 20 MW elektrolyse is onderzocht.
- OCI Nitrogen gaat tijdens een grootonderhoudstop in 2018 zijn kunstmestfabriek in Geleen aanpassen om extern aangeleverd waterstof te *kunnen* gebruiken.
- Op Goeree Overflakke wordt een kleinschalige ammoniakproductie voorbereid op basis van lokaal met wind en zon opgewekte waterstof voor levering aan ammoniak/kunstmestfabrikanten. Realisatie wordt binnen 5 jaar verwacht.
- Op Goeree wordt lokaal met wind en zon opgewekte waterstof ook bestemd voor laagtemperatuur-warmte in bestaande bouw (eerst bijmenging, later 100%).
- Hanzehogeschool beproeft een reversibel brandstofcelsysteem.
- Projectontwikkelaar HYGRO wil in 2019 beginnen met waterstofproductie bij een windmolen voor omstreeks 100 vuilniswagens in Noord-Holland. De financiering hiervan is afhankelijk van overheidssteun.

Initiatieven elders, ontbrekend in Nederland

- In de VS rijden duizenden heftrucks op waterstof. Ook in België is sprake van opschaling (project met 75 en intentie voor meer), maar in Nederland ontbreken dergelijke projecten.
- In Leeds wordt een grootschalige overgang naar waterstof voor gebouwverwarming voorbereid maar er is nog geen definitief besluit. Stedin onderzoekt deze optie met name voor Goeree Overflakke.
- Nederlandse bedrijven leverden in China een 2 MW brandstofcelcentrale. In Nederland is nog wel een kleinere voorganger in gebruik.
- In Japan zijn honderdduizenden micro-wkk op basis van brandstofcel met aardgasreformer in gebruik, maar deze techniek valt buiten de scope.

Waterstofproductie uit aardgas met CC(U)S

Verwacht wordt dat er pas tegen 2030 voldoende (structurele) overschotten van wind- en zonne-energie zijn voor grootschalige elektrolyse. Om tegen grijze waterstof te concurreren zijn goedkope stroom en goedkopere elektrolyzers nodig. In de aanloop daarnaartoe kan “blauwe” waterstof uit aardgas met CCUS de huidige waterstofvraag CO₂-arm maken en nieuwe markten en infrastructuur ontwikkelen. Om tegelijk groene waterstofproductie op te bouwen kan men leveringsquota instellen.

Er zijn drie initiatieven voor grootschalig waterstofproductie uit aardgas met CO₂-afvang en opslag voor inzet in gascentrales en petrochemische industrie voor hogetemperatuur-warmte en feedstock. Het initiatief rond de Magnumcentrale is het meest concreet, getrokken door de potentieel sterke alliantie Nuon-Statol-Gasunie, met geplande realisatie in 2023. Er is overlap tussen de bedrijven die betrokken zijn bij het waterstofproject voor de Magnumcentrale en bij het Rotterdamse h-Vision. Hierdoor kunnen de projecten elkaar op enige wijze ondersteunen en versterken. Het initiatief van Berenschot en TNO is een meer generiek concept, met dezelfde transitievisie en technische uitgangspunten, maar zonder de uitwerking bij specifieke centrales.

De kracht van het concept van waterstof voor de Magnumcentrale is de schaalgrootte: er is substantieel effect op CO₂-uitstoot, en het rechtvaardigt de opbouw van infrastructuur voor leidingtransport en seizoensopslag in zoutcavernes. Tegelijk is de schaal een uitdaging: de absolute kosten zijn hoog, waardoor de totale financiële ondersteuning ook aanzienlijk zal moeten zijn. Dezelfde argumenten en bezwaren gelden voor h-Vision.

Beginnen met grote waterstofvolumes voor puntbronnen gascentrales en (petro)-chemie, en van daaruit decentralere oplossingen bedienen zoals mobiliteit en transport en verwarming van bestaande bouw: dat zou een geschikte lijn in de routekaart waterstof zijn.

Waterstof met wind op zee

Het inzicht dat je windenergie niet met stroomkabels alleen van de Noordzee kunt afvoeren leidt tot veel interesse in windwaterstof. Het gaat hierbij niet meer om power-to-gas in de zin van benutting van tijdelijke over-

schotten, maar om benutting van capaciteit bovenop de maximale afvoer via stroomkabels. Continu-productie is economisch gunstiger dan af-en-toe productie. Dit is wel een verhaal van lange termijn (energie-eiland na 2035, op uitgeproduceerde gasplatforms zou het eerder kunnen). Een proeftuin voor elektrolyse op zee is nuttig om techniek en implementatie te testen.

Solar fuels

Voor lucht- en scheepvaart is energieopslag in de vorm van solar fuels een oplossing. Hier lopen interessante onderzoeken, vooral fundamenteel maar er worden ook stappen gezet naar demonstratie. Er zijn twee routes: elektrolyse gevolgd door synthese, en foto-elektrochemische cellen. Waterstof is hierbij een tussenproduct. Ontwikkelingen voor waterstof en voor solar fuels kunnen elkaar versterken.

Behoeften van partijen

Genoemde behoeften van bij de initiatieven betrokken partijen zijn:

- een langere termijn visie op de waterstoftransitie (5 jaar is voor de industrie en onderzoeksinstituten te kort)
- volg buitenlandse initiatieven van multinationale spelers, die zijn richtinggevend voor mogelijkheden in Nederland
- waterstof opnemen in de Gaswet (socialisatie van kosten)
- wettelijke verplichting netaansluiting techniekneutraal maken (energieaansluiting), ook voor offshore windwaterstof
- exploitatiesubsidies voor koolstofarme (naast hernieuwbare) energiedragers
- gezamenlijke communicatie van overheid en markt over CCUS in de waterstoftransitie
- aanpassing van regelgeving voor terugleveren van elektriciteit aan het net vanuit een energieopslag
- verhogen van het toegestane aandeel waterstof in het aardgasnet
- langdurige zekerheid over fiscale voordelen voor waterstof en waterstofvoertuigen
- bij voertuigen niet het bezit maar rijden subsidiëren, prikkel voor lagere CAPEX
- voldoende en effectieve ondersteuningsregelingen voor RD&D

- programma voor geavanceerde elektrochemie, waaronder waterstofproductie
- creëren van Nederlandse proeflocaties voor waterstofgerelateerde technieken

Stakeholders

Hoofdstuk 8 geeft een overzicht van stakeholders die bereid zijn om mee te investeren/bouwen aan projecten, zoals bedrijven, overheden, en kennisinstellingen. Het gaat hierbij om zelfverklaarde stakeholders, dat wil zeggen partijen die door deelname aan samenwerkingsverbanden of projecten er blijk van geven belang te stellen in waterstofontwikkelingen. Daarnaast zijn er latente stakeholders: partijen die uiteindelijk wel nodig zijn voor, of te maken krijgen met, de grootschalige invoering van waterstof, maar daar nu (nog) niet actief mee bezig zijn. De meest opvallende ontbrekende stakeholdergroepen zijn consumenten-(organisaties) en milieuorganisaties.

Regio's

De regio's met de meeste waterstofinitiatieven zijn:

- Noord-Nederland: potentieel grote implementatie vanuit Eemshaven en Delfzijl
- Zuid-Holland: Rotterdams Haven Industrieel Complex met bestaande waterstofindustrie, groeiemarkt in (petro)-chemie, combinatie met CC(U)S-initiatieven en energieproducerend eiland Goeree Overflakkee
- Zuid-Nederland: productontwikkeling met regionale maakindustrie onder impuls van WaterstofNet, samen met Vlaanderen. Zee-land heeft één project maar dat is substantieel
- Arnhem/Gelderland: actief mkb, met name veel in EU-projecten)
- In de bovengenoemde regio's zijn ook de meeste initiatieven voor busprojecten en tankstations te vinden.
- Amsterdam/Noord-Holland, 10-15 jaar geleden koploper in Nederland, blijft nu achter op andere regio's maar dat kan zo veranderen.
- Conclusie: meerdere regio's zijn actief, met verschillende zwaartepunten. De (bestuurlijk) meest actieve regionale overheden zijn provincie Groningen en Zuid-Holland.

Bijlage: Lijst geraadpleegde personen

Naam	Organisatie	Informatie over:
Prof. Erik Bakkers	TU Eindhoven	Nanowires
Jaap Bolhuis	Siemens Nederland	Projecten Siemens
Waldo Bongers	DIFFER	Plasmaconversieprojecten
Peter Bouwman	Nedstack	Projecten Nedstack
Ruud Bouwman	VDL ETS	Bus- en truckprojecten
John den Brave	HyET	Projecten HyET
Simone te Buck, Jorg Gigler	RVO, TKI Gas	Projecten TKI Gas
André Buikhuizen	Provincie Groningen	Waterstofrein
Pieter Claassen	Wageningen UR	Biologische waterstofproductie
Patrick Cnubben	New Energy Coalition	Groene Waterstof Economie in Noord-Nederland
Maaik Dalhuisen	Havenbedrijf Rotterdam	Energy Island
Alice Elliott	Shell	Projecten Shell
Marcel Galjee *	AkzoNobel	Initiatieven AkzoNobel
Erik Geensen	Alstom	Waterstofrein
Aart-Jan de Graaf	Hogeschool Arnhem Nijmegen	NEFUSTA
Wouter Groenen	Provincie Zuid-Holland	Waterstof Zuid-Holland
Ernest Groensmit, Maurice Hanegraaf *	TNO	h-Vision
Jeffrey Haspels	Nuon	Magnumcentrale
Sander ten Hoopen	Hydron Energy	Projecten Hydron Energy
Gerard Jägers	Tata Steel	Waterstof bij Tata Steel
Prof. Catrinus Jepma	RU Groningen	H ₂ van olie- en gasplatforms
Alexander Jongenberger	Statoil	H ₂ met CCUS
Robert de Kler	TNO / Voltachem	Mierenzuur
Jan Willem de Kleuver	Twynstra Gudde	JIVE-2
Max Knipschild	NEN	Veiligheid Innovatie Programma
Jan-Willem Langeraar	HYGRO	W2H2, Duwaal
Rene Klein Lankhorst	Wageningen UR	Vloeibaar Zonlicht
Pieter Mans *	Netbeheer Nederland	KIWA onderzoek
Adwin Martens	WaterstofNet	Projecten WaterstofNet
Mart van der Meijden	TenneT TSO	TSO 2020, Energie-eiland
Laurens Meijering	Smart Delta Resources	Waterstofsymbiose Delta Regio
Albert van der Molen *	Stedin	Waterstof voor LT-warmte
Prof. Fokko Mulder	TU Delft	Battolyser, power-to-ammonia
Hans de Neve	Solliance	Fuelliance
Albert van den Noort	DNV GL	HYREADY
Els van der Roest	KWR	Power to X Nieuwegein
Eddy van Oort	Frames Group	FLEX-P2G
Bert den Ouden, Aart Kooiman	Berenschot	H ₂ uit gas met CCUS
Andras Perl	Hanzehogeschool Groningen	Flexnode
Robert van der Pluijm	Energystock	HYSTOCK / TSO 2020
Jean-Paul de Poorter	MMG Advies / H ₂ -Platform	Contact naar leden H ₂ -Platform
Gerard van Pijkeren *	Gasunie New Energy	Projecten Gasunie
Gigi van Rhee	Stratelligence	Goeree Overflakkee
Richard van de Sanden	DIFFER, Commissie ECCM	Solar Fuels, programma ECCM
Dirk Schaap *	Ministerie van I&W	TEN-T en FCH JU projecten
Jeroen Smits	Gemeente Duiven	InnoFasEnergy
Peter Swart	Gemeente Arnhem	Projecten Arnhem
Ruud Swarts, Jan-Jaap Nusselder	OCI Nitrogen	Projecten OCI
Marcel Weeda	ECN / TKI Gas	Projecten ECN
Prof. Ad van Wijk, Alexander Hablé, Jaco Reijerkerk *	TU Delft	Groene Waterstof Economie in Noord-Nederland, Green Village
Ellart de Wit	Hygear	Projecten Hygear

*) In deze rapportage is ook informatie opgenomen uit gesprekken met stakeholders die Jörg Gigler en/of Marcel Weeda namens TKI Gas hebben gevoerd om input te verzamelen voor de routekaart waterstof. Deze personen zijn met een * aangegeven; in een aantal gevallen heeft Remco Hoogma aanvullende vragen gesteld.

Index van initiatieven

- 3Emotion - 29
- Adviescommissie Elektrochemische Conversie & Materialen (ECCM) - 44
- AkzoNobel opschaling elektrolyse - 12
- Archypel - 23
- Battolyser - 46
- BENEFIC - 34
- Biologische waterstof – 52,53
- Bio-Mates - 41
- BiosolarCells - 50,51
- Car as powerplant - 28
- CEN-CLC TC 6 Hydrogen in energy systems - 55
- CertifHy - 54
- CH2P - 35
- Cikam noodstroomaggregaat - 38
- Connecting Europe Facility - 59
- Convenant over waterstof Zuid-Holland - 59
- Drone Hub GAE - 39
- Duwaal / Waterstofmolen - 32
- Duurzaam Ameland - 40
- ELECTRE (1 en 2) - 45, 46
- Electricity to Chemistry Catalysis for Energy Storage – 48,49
- Energie-eiland: North Sea Wind Power Hub - 25,26
- Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking - 59
- Flexnode – 24,25
- FLEX-P2G - 45
- Fuelliance - 50
- Giantleap – 30
- Grasshopper - 17
- Green Deal Groene Waterstofeconomie Noord-Nederland - 56
- h-Vision - 8,9
- H2Benelux - 34
- H2Fuel - 35,36
- H2FUTURE - 17
- H2GO – 38
- H2Mobility Europe (1 en 2) – 27
- H2Nodes - 34
- H2Share - 31
- High VLO City - 28,29
- HyGrid - 41
- HYLAW - 54
- HyPlasma - 47,48
- HYREADY - 40,41
- Hystoc - 35
- HYSTOCK/TSO 2020 – 18,19,20
- HYUNDER – 20
- JIVE-2 - 30
- Life'n Grab Hy! - 31
- Magnumcentrale - 6,7,8
- Marigreen - 38
- Memphys - 41
- MetroHyVe - 54
- Nederlandse normcommissie waterstof - 55
- NEFUSTA - 34
- Nemesis 2+ - 35
- NextgenH2 - 45
- North Sea Programme - 25
- OCI Nitrogen waterstof invoeding – 13,14,15
- OV-busprojecten I&W - 28
- PEM Powerplants - 17
- PGS 35 - 55
- Plasma Power-to-Gas - 48
- Power-2-FA (mierenzuur) - 52
- Power-2-Fuel / Gas Duiven - 23
- Power-to-Ammonia Goeree Overflakkee - 15
- Power-to-Flex - 35
- Power-to-gas Delfzijl - 22
- Power-to-gas Rozenburg - 21
- Power-to-gas Wijster - 22
- Power-to-Protein - 24
- Power-to-X Nieuwegein - 23,24
- PurifHy - 41
- Qualygrids - 46
- Races met waterstofauto's - 38,39
- REVIVE - 31
- SBIR Varigas - 11
- SolidStatePlasma - 48
- SOPHIA - 47
- Stepwise - 11
- STORE&GO - 21,22
- Studie duurzaam gasnetwerk - 41,42
- SUN-to-LIQUID - 52
- Synplasma (EnOp) - 48
- Tankstations in verschillende stadia van voorbereiding - 33,34
- UnifHy - 35
- Upstream blending raffinage Rotterdam - 13
- Vloeibaar zonlicht - 51
- W2H2 - 32
- Waterstof uit gas met precombustion CCS - 10,11
- Waterstof bij Tata Steel IJmuiden - 16,17
- Waterstof Innovatie Veiligheidsprogramma - 55
- Waterstofregio Vlaanderen Zuid-Nederland (1 en 2) - 34,58,59
- Waterstof Symbiose - 15,16
- Waterstofrein voor Noord-Nederland - 36
- Waterstof voor binnenvaartschepen - 37
- Waterstof voor LT-warmte Goeree Overflakkee - 42,43
- Windwaterstof op olie- en gasplatforms - 25