

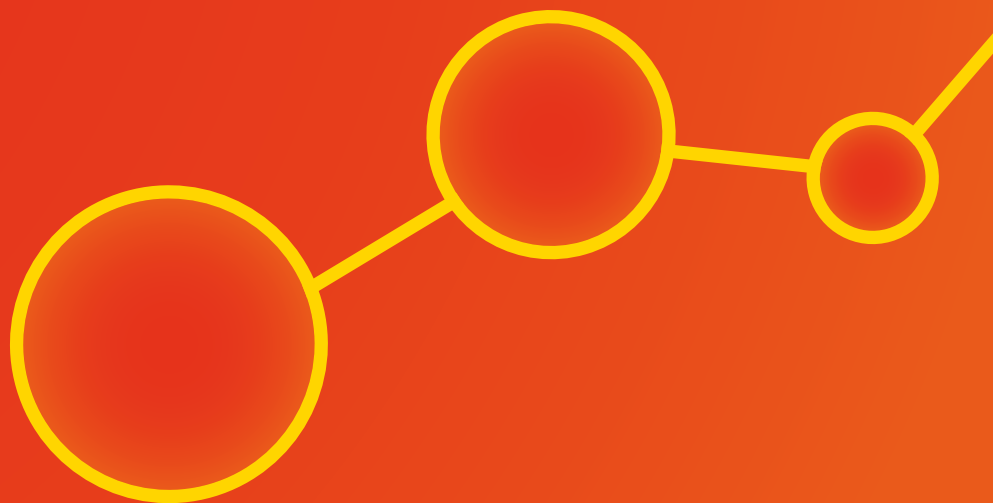
Contouren van een Routekaart Waterstof





Contouren van een **Routekaart Waterstof**

Jörg Gigler, Marcel Weeda







Inhoud

Vijf key messages over waterstof	4
Samenvatting	6
0. Achtergrond	11
1. Inleiding	15
2. Historie en waterstofinitiatieven uit het recente verleden	23
3. Energietransitiescenario's 2050	27
4. Toepassingen van waterstof	31
5. Productieroutes en kosten van waterstof	47
6. Infrastructuur voor transport en distributie	55
7. Niet-technische aspecten	61
8. Waterstofinitiatieven in Nederland	67
9. Innovatieopgaven	71
10. Plan van aanpak	77
Bijlagen	90
Bijlage 1. Geïnterviewde personen/organisaties	91
Bijlage 2. Onderbouwing van schattingen voor de toekomstige inzet van waterstof	92
Bijlage 3. Toelichting op kosten van waterstofproductie via elektrolyse en vergelijking met SMR	97
Bijlage 4. Emissiefactor van waterstof	102



Vijf key messages over waterstof

1

De klimaatdoelen voor 2050 realiseren kan met waterstof



Waterstof is belangrijk om de maatschappelijke opgave om CO₂-emissies drastisch te verminderen te kunnen realiseren. Het is een robuuste optie die veel productie- en toepassingsmogelijkheden kent en een systeemrol vervult. Waterstof kan aan alle transitiepaden een bijdrage leveren. Voor de industrie (hogetemperatuurwarmte en grondstoffen) en het vervoer (zwaardere segmenten) lijkt waterstof de hoogste toegevoegde waarde te hebben. Waterstof is een essentieel element in de energietransitie.

2

Waterstof vereist een integrale visie op de energietransitie



Waterstof heeft veel raakvlakken met andere grote thema's in het klimaatdebat: energie-efficiency, de ontwikkeling van wind- en zonne-energie, de wenselijkheid en mogelijkheden van CCS (Carbon Capture and Storage), de inzet van biomassa, het gebruik van bestaande infrastructuur en de aanleg van nieuwe, de behoefte aan systeemflexibiliteit en opslag, enzovoorts. Het Klimaat- en Energieakkoord dat in voorbereiding is, vormt een goede arena om deze discussies te voeren en een visie te presenteren met heldere keuzes voor de toekomst.

3

Grijze, blauwe en groene waterstof, als het eindbeeld maar duurzaam is



Waterstof heeft schaalgrootte nodig om succesvol te kunnen zijn. Grijze (fossiele), blauwe (klimaatneutrale waterstof via CCS) en groene (duurzame) waterstof kunnen alle drie helpen om snelheid te maken en schaalgrootte te bereiken. Elk van deze opties kent andere tijdschalen, volumes en kosten. Grijze waterstof helpt om de markt op gang te krijgen, maar de 'netto-ontwikkelrichting' is naar waterstof met een steeds kleinere CO₂-footprint, en uiteindelijk helemaal duurzaam. Dit doel moet in de aanpak geborgd worden, bijvoorbeeld via duidelijke CO₂-footprintdoelen voor waterstof.



4

Niet wachten, maar vandaag beginnen met waterstof; dan zijn we er straks klaar voor

Er is veel animo om met duurzame en klimaatneutrale waterstofprojecten aan de slag te gaan, blijkend uit een heel scala van meer dan 100 initiatieven in de industrie, het vervoer, de gebouwde omgeving en de elektriciteitsopwekking. Ook verscheidene regio's en industrieclusters willen serieus aan de slag. De projecten kunnen helpen om barrières op institutioneel en maatschappelijk vlak te slechten. En Nederland is geen eiland, internationaal – zeker met Duitsland en België, maar ook daarbuiten – moeten banden (verder) worden ontwikkeld. Industrie en overheden moeten beide investeren om pilots en demo's mogelijk te maken. Onderlinge coördinatie is nodig zodat maximaal geleerd en gedeeld wordt.

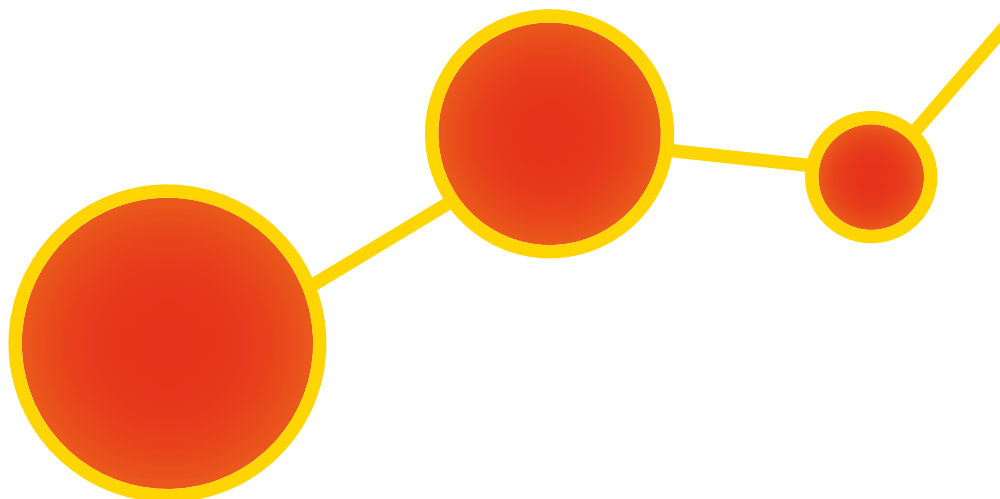


5

Blijf innoveren met waterstof



Een van de grote uitdagingen is om de kosten van de productie en toepassing van waterstof omlaag te krijgen. Dat kan door op te schalen (massa maken) en te innoveren. Een missiegedreven innovatieprogramma met ambitieuze doelen en een gecoördineerde aanpak is nodig om de gewenste voortgang te boeken. Nederland heeft een uitstekende kennisinfrastructuur om op dit gebied om internationaal tot de uitblinkers te horen.





Samenvatting

De aandacht voor waterstof als energiedrager is internationaal sterk in opmars en ook nationaal gebeurt er veel op dit terrein. Nederland kent momenteel ruim 100 waterstofinitiatieven die zich in diverse stadia van ontwikkeling bevinden en dat aantal groeit. In de uitwerking van de transitiepaden van de Energie-agenda komt waterstof, naast allerlei andere duurzame en klimaatneutrale opties, naar voren als een van de pijlers van de energietransitie. Om meer zicht te krijgen op de rol die waterstof voor de energietransitie kan hebben en de stappen die moeten worden genomen op weg naar realisatie, heeft het ministerie van Economische Zaken en Klimaat aan het TKI Nieuw Gas (Topsector Energie) gevraagd om de regie te nemen bij het opstellen van een Routekaart Waterstof. Dit document, dat in samenwerking met het TKI Energie & Industrie is opgesteld, beschrijft de contouren van zo'n routekaart. Bij de totstandkoming ervan is dankbaar gebruik gemaakt van de input van ca. 150 personen en organisaties.



Waterstof kan een grote rol spelen bij de enorme maatschappelijke opgave om de emissies van CO₂ drastisch te reduceren. Het is een robuust element voor de energietransitie dat kan voorzien in de duurzame invulling van de blijvende behoefte aan brandstoffen en grondstoffen – de ‘moleculen’ in met name de industrie en het vervoer – naast de sterk toenemende rol van duurzame elektriciteit (de ‘elektronen’) in deze en andere sectoren.

Productie van waterstof uit water via elektrolyse biedt een flexibel mechanisme voor de middellange en lange termijn om het grote potentieel aan wind- en zonne-energie vergaand te benutten. Het vervult een cruciale systeemrol. Dit mechanisme kan door buffering en opslag de inpassing van deze bronnen via de elektriciteitsroute ondersteunen, maar moet vooral worden gezien als optie om wind- en zonne-energie te kunnen benutten voor de verduurzaming en vervanging van fossiele brandstoffen en grondstoffen. Voorts biedt de waterstofroute een oplossing voor beperkingen bij het elektriciteitstransport. In de toekomst is ook grootschalige import van duurzame waterstof uit gebieden met een groot potentieel voor duurzame energie, met name wind- en zonne-energie, interessant en waarschijnlijk noodzakelijk, blijkend uit indicatieve berekeningen naar het potentieel van waterstof in verschillende toepassingen.

Waterstof als energiedrager is relatief nieuw, maar wereldwijd wordt het al lange tijd grootschalig geproduceerd als industrieel gas voor tal van industriële toepassingen. Productie vindt daarbij voornamelijk plaats op basis van aardgas. Decarbonisatie van aardgas door toepassing van CCS (Carbon Capture and Storage) en inzet van waterstof als energiedrager kunnen op de korte en middellange termijn een significante bijdrage leveren aan reductie van CO₂-emissies; door conversie naar waterstof kan aardgas klimaatneutraal worden ingezet in de energievoorziening. Bij brede benutting van waterstof als energiedrager voor mobiliteit en transport, in de industrie en de energiesector, en mogelijk ook in de gebouwde omgeving, biedt dit een reële kans om de vereiste grootschalige reductie van CO₂-emissies te realiseren en tegelijkertijd de transitie naar duurzaam te faciliteren door opbouw van een toekomstgerichte infrastructuur. Naar verwachting kunnen grote delen van het huidige aardgassysteem hiervoor worden gebruikt, wat kan bijdragen aan een kosteneffectieve energietransitie. Klimaatneutrale waterstof is de brug naar volledig duurzame waterstof; het kan productie en toepassing op gang helpen zolang duurzame elektriciteit nog gemakkelijk in bestaande elektriciteitsmarkten kan worden geabsorbeerd. CCS voor de productie van klimaatneutrale waterstof is qua technologie beschikbaar, maar grootschalige demonstratie onder Nederlandse condities is nog niet van de grond gekomen, onder meer vanwege de maatschappelijke discussie die over dit thema speelt. Overigens dient dit ‘verduurzamingsmechanisme’ bewaakt te worden om te voorkomen dat een fossiele lock-in ontstaat.



Naast de verschillende toepassingen van waterstof is de systeemrol die het kan vervullen van belang. Conversie van elektrische energie, opgewekt met zon en wind, naar chemische energie in waterstof zorgt ervoor dat wind- en zonne-energie relatief eenvoudig in grote hoeveelheden kunnen worden opgeslagen en over grote afstanden worden getransporteerd. Dat maakt het variabel aanbod van zon en wind beschikbaar, regelbaar naar tijd en locatie. Grootschalige import van duurzame energie van wind en zon in de vorm van waterstof of gerelateerde verbindingen zoals ammoniak behoort hiermee op termijn tot de mogelijkheden. Tot slot voegt de brede toepasbaarheid van waterstof nog extra flexibiliteit toe aan het energiesysteem doordat verschillende markten met elkaar worden verbonden, zoals de industrie, de mobiliteit en de gebouwde omgeving. Ook piekvragen naar energie kunnen zo in de toekomst volledig duurzaam worden ingevuld.

Naast deze potentie en de vele kansen zijn er voorlopig ook nog veel uitdagingen. De technologie om waterstof te produceren en toe te passen (elektrolyse, brandstofcellen, branders) is al beschikbaar, maar de kostprijs moet nog fors dalen om te kunnen concurreren met de huidige, vaak fossiele alternatieven. Het is de verwachting dat als gevolg van onderzoek en ontwikkeling van nieuwe materialen, het optimaliseren van componenten en systemen, en het opschalen van systeemgrootte en productieaantallen serieuze kostprijzdalingen bereikt kunnen worden. Ook duurzame elektriciteit als cruciaal ingrediënt voor elektrolyse zal vooralsnog qua kosten verder kunnen dalen, maar de vraag is tegen welke (markt)prijs deze straks bij grootschalige productie kan worden ingekocht. Naast technologie zijn ook financiering, wet- en regelgeving, marktontwikkeling, veiligheid, de human capital agenda (gericht op het beschikbaar krijgen van de benodigde workforce) en maatschappelijke acceptatie van groot belang voor een succesvolle ontwikkeling van waterstof. Daarom dienen deze thema's integraal te worden meegenomen bij de ontwikkeling van waterstof.

We stellen een driedelige aanpak voor om waterstof in Nederland te kunnen ontwikkelen:

1. Integrale plan- en visievorming voor waterstof

Dit spoor richt zich op de 'meta-issues' die bij waterstof als energiedrager een rol spelen. Onderdeel hiervan is uitwerking van de systeemrol van waterstof in samenhang met bijvoorbeeld de uitrol van duurzame elektriciteitsproductie op de Noordzee en elders, de verwachte positie van CCS, de termijn waarop grootschalige import van wind- en zonne-energie in de vorm van waterstof haalbaar zou kunnen zijn, de toekomst van de aardgasinfrastructuur en de rol van biomassa voor de productie van hernieuwbare gassen. Aan de vraagkant zijn plannen voor verduurzaming in de industrie van belang, de mate van elektrificatie in de transportsector, de rol voor regelbare gascentrales bij een groot aandeel zon en wind en aard en omvang van de behoefte aan hernieuwbaar gas in de gebouwde omgeving. Goede kwantitatieve onderbouwingen zijn hiervoor gewenst. Als tijdhorizon zijn 2030 en 2050 geschikte ijkpunten. Vanwege het belang voor het Klimaat- en Energieakkoord wordt voorgesteld om de plan- en visievorming daar onder te brengen, bijvoorbeeld bij de coördinatie tafel.



2. In praktijk brengen van waterstof in de komende 3-5 jaar

Om kennis en ervaring op te bouwen en waterstofprojecten aan stakeholders (inclusief de maatschappij) te tonen, zijn pilots nodig met toepassingen die al voorhanden zijn. Goede startpunten zijn toepassing in de industrie op grotere schaal voor de productie van waterstof als grondstof en voor hogetemperatuurwarmte, en in de vervoerssector (zoals logistiek, bussen, vuilniswagens). Dergelijke projecten bieden de mogelijkheid om naast de technische uitvoering ook de maatschappelijke, institutionele en economische aspecten te testen. Industrieclusters, logistieke centra en regio's zijn geschikte locaties voor een dergelijke aanpak.

3. Onderzoek, ontwikkeling en demonstratie voor waterstof

De belangrijkste R&D-vragen op waterstofterrein moeten worden geadresseerd en opgepakt om de kosten van waterstofproductie en -toepassing te verlagen, de efficiëntie van de technologie te verhogen, nieuwe processen te ontwikkelen, toepassing van minder schaarse materialen te ontwikkelen en deze in pilots te laten zien met als einddoel een duurzame, betrouwbare en betaalbare waterstofvoorziening. Hiervoor is een missiegedreven langjarig innovatieprogramma passend. De Topsector Energie zal hiervoor het initiatief nemen in samenwerking met andere topsectoren, zoals Chemie en Logistiek.

Binnen de voorgestelde aanpak is *regievoering* van belang, om de onderlinge samenhang tussen alle waterstofactiviteiten te borgen en toezicht te houden op ontwikkelingen van waterstof als onderdeel van een duurzaam energie- en grondstoffensysteem. Dit is de regiefunctie met als doel een efficiënte en effectieve realisatie van doelstellingen, prioritering van thema's, afstemming tussen projecten, programma's en regio's alsmede open communicatie daarover inclusief verantwoording en monitoring. Ook internationale issues, de human capital agenda en het ontwikkelen van een transparante markt zijn hier onderdeel van. Naast borging van de 'meta-issues' zoals onder 1. voorgesteld (koppelen aan de coördinatietafel van het Klimaat- en Energieakkoord), zou voor uitrol in de mobiliteit het H₂Platform een geschikt gremium kunnen zijn. Binnen de industrie zou dit misschien opgepakt kunnen worden per industriecluster waarbij informatie-uitwisseling tussen clusters een belangrijk element is.

Gegeven de robuustheid van waterstof in het energie- en grondstoffensysteem is het gewenst om de hiervoor genoemde activiteiten zo snel mogelijk te organiseren en van start te laten gaan. We adviseren daarom om in de komende tijd deze routekaart verder met stakeholders uit te werken en te verankeren in het Klimaat- en Energieakkoord, te bepalen wat de meest handige en effectieve organisatie(vorm) is, waar prioriteit gelegd moet worden en hoe private en publieke financiering gecommitteerd kan worden. Daarmee kunnen we aan een succesvolle introductie van (duurzame) waterstof in het energie- en grondstoffensysteem werken.



De contourenschets voor de Routekaart Waterstof schetst de wijze waarop waterstof aan de energietransitie kan bijdragen en bevat een plan van aanpak dat beschrijft welke stappen gezet kunnen worden om waterstof tot een serieuze optie in Nederland te ontwikkelen.



0 | Achtergrond

Aanleiding

In juli 2017 vroeg het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) aan het TKI Nieuw Gas om de regie te nemen bij de totstandkoming van de contouren van een routekaart voor waterstof. Er werd namelijk gesignaleerd dat het thema waterstof steeds meer belangstelling kreeg: via het H₂Platform (voorheen Nationaal Waterstof Platform), de leden van de NWBA (Nationale Waterstof en Brandstofcellen Associatie) en WaterstofNet werden al langere tijd waterstofinitiatieven ontplooid, op regionaal niveau zagen verscheidene gecoördineerde activiteiten het licht, zoals in Noord-Nederland, in de Rotterdamse regio en op Goeree-Overflakkee. Ook in de discussies over de transitiepaden van de energieagenda werd duidelijk dat duurzame en/of klimaatneutrale waterstof een belangrijk rol zou kunnen vervullen om de behoefte aan 'moleculen' in ons energie- en grondstoffsysteem in te vullen. Daarnaast werden de ideeën steeds sterker om het grote windpotentieel voor een deel in waterstof om te zetten en daarmee de inpassing in ons energiesysteem te faciliteren door opslag- en infrastructuuralternatieven te bieden. Vanuit het buitenland kwamen steeds meer berichten over grootschalige waterstofactiviteiten, zoals het H₂ Mobility project in Duitsland, de ontwikkeling van waterstofauto's in Japan en Zuid-Korea, de lancering van de Hydrogen Council en de ondertekening van een waterstofmanifest door internationale bedrijven in Zwitserland in 2017. Het thema waterstof leek weer nadrukkelijker op nationale en internationale agenda's te staan.

Doelstellingen

Door deze ontwikkelingen ontstond behoefte aan een routekaart die een beter inzicht geeft van de positie die waterstof in het Nederlandse energiesysteem kan vervullen en die aangeeft welke bijdrage aan de energietransitie geleverd zou kunnen worden. Deze routekaart zou dan een aanzet kunnen zijn voor verdere beleidsvorming, met name voor de ministeries van EZK en I&W. Het ministerie van EZK gaf aan de routekaart de volgende doelen mee:

1. Schetsen van de potentie van duurzame waterstof in de energievoorziening in 2050.
2. In kaart brengen van de diverse acties en actoren in Nederland rond duurzame waterstof.
3. Benoemen van eerste stappen en acties die helpen om de potentie van duurzame waterstof te verzilveren en de rol die daarbij van de Rijksoverheid en andere partijen wordt verwacht.

Het verzoek was om de sleutelspelers op het terrein van waterstof zo veel mogelijk te betrekken bij de totstandkoming van de routekaart zodat er een breed gedragen beeld ontstaat.



Proces/aanpak

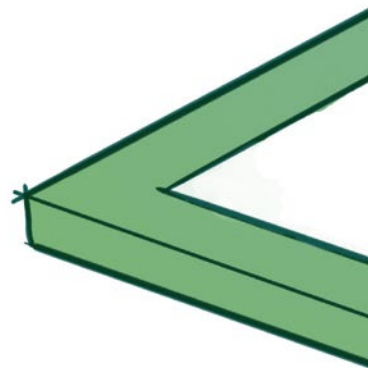
Om binnen de beschikbare tijd een routekaart op te kunnen stellen, is voor een driedelige aanpak gekozen. Ten eerste zijn twee inhoudelijke opdrachten uitgezet om informatie beschikbaar te krijgen over de volgende onderwerpen:

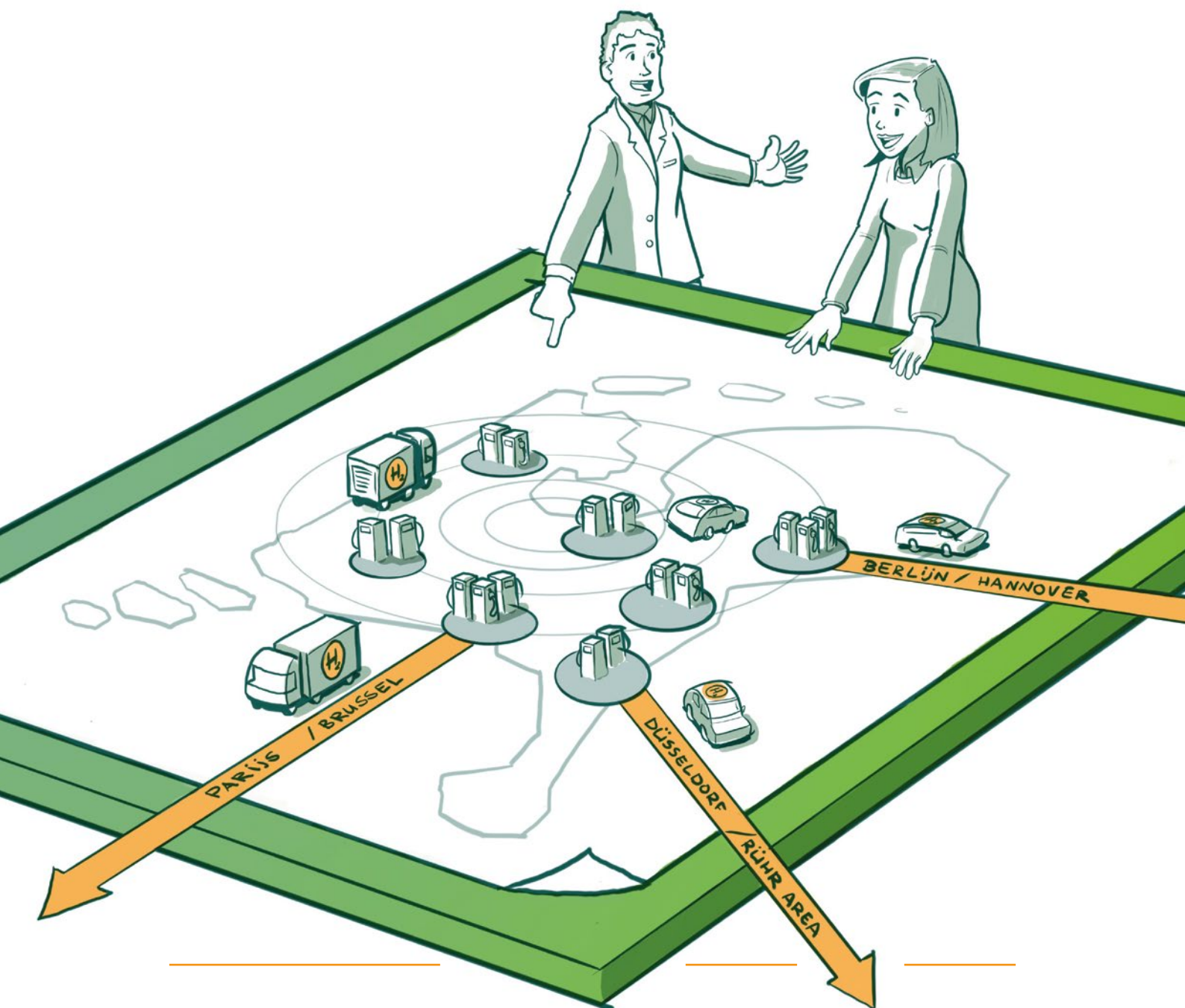
- Ontwikkelingen met betrekking tot waterstofprojecten in Nederland en de lessen die daaruit geleerd kunnen worden.
- De mogelijkheden van het aardgasnet om grotere hoeveelheden waterstof te accommoderen, inclusief potentiële locaties en beschikbaarheid in de tijd.

Ten tweede zijn gesprekken gevoerd met verschillende bij waterstof betrokken partijen, zoals WaterstofNet, TU Delft, TKI Nieuw Gas (bestuur) en TKI Energie & Industrie, ECCM-programma, Differ, VEMW, Akzo, Gasunie, VDL, Netbeheer Nederland en diverse anderen; bijlage 1 bevat een volledig overzicht.

Ten derde zijn in samenwerking met het H₂Platform drie workshops met haar leden georganiseerd. Tijdens deze workshops zijn ervaringen en inzichten gedeeld en getoetst en zijn elementen van de routekaart nader ingevuld. Aan elke bijeenkomst namen 30 tot 50 personen deel.

Deze input, in combinatie met de ervaring en expertise van de samenstellers van deze routekaart, heeft geleid tot deze contourenschets voor de Routekaart Waterstof. Het schetst de wijze waarop waterstof aan de energietransitie kan bijdragen en het bevat een plan van aanpak dat beschrijft welke stappen gezet kunnen worden om waterstof tot een serieuze optie in Nederland te ontwikkelen. De routekaart is nog niet compleet; er liggen nog diverse vragen die vanwege de beperkte tijd en middelen niet (volledig) beantwoord zijn. Deze vragen worden in de aanpak geadresseerd.







Vervanging van fossiele door hernieuwbare energiebronnen is uiteindelijk de belangrijkste optie om broeikasgasemissies volledig te reduceren en de duurzame energievoorziening vorm te geven.



1 | Inleiding

Algemeen kader

Op korte termijn is vergaande reductie van broeikasgasemissies nodig om de opwarming van de aarde en klimaatverandering te kunnen beteugelen. De doelstelling van internationale klimaatafspraken, vastgelegd in het Parijs-akkoord, is om opwarming te beperken tot ruim onder de 2 °C en te streven naar een maximale opwarming van 1,5 °C. In het regeerakkoord van het kabinet-Rutte III staat dit streven ook centraal en wordt gesteld dat het de plicht van Nederland is 'er alles aan te doen die doelstelling te halen'. Hiertoe wil het kabinet maatregelen nemen 'die ons voorbereiden op een reductie [van broeikasgasemissies] van 49% in 2030'. Op de COP23 in Bonn heeft minister Wiebes (EZK) aangegeven tot de koplopers in de EU te willen behoren en gezamenlijk een reductiepercentage van 55% te overwegen.

In Europees verband hebben we ons ten doel gesteld om in 2050 de uitstoot van broeikasgassen met 80-95% te reduceren ten opzichte van het niveau van 1990. Deze doelen vergen een snelle en ingrijpende aanpassing van het energiesysteem. Wordt hierbij rekening gehouden met lastig te reduceren broeikasgasemissies van bijvoorbeeld veeteelt en ertsverwerking¹, dan betekent de doelstelling *de facto* dat de netto-emissies van broeikasgassen gerelateerd aan het gebruik van fossiele energiebronnen² in 2050 tot nul moeten worden gereduceerd.

Drie grote uitdagingen voor een duurzame energievoorziening

Vervanging van fossiele door hernieuwbare energiebronnen³ is uiteindelijk de belangrijkste optie om broeikasgasemissies volledig te reduceren en de duurzame energievoorziening vorm te geven. Zon en wind spelen daarbij zonder twijfel een grote rol, naast biomassa dat momenteel nog het grootste deel aan duurzame energie levert. Zonne-energie is veruit de meest overvloedig beschikbare bron. Daarnaast is er in Nederland, vooral op de Noordzee, een aanzienlijk potentieel aan windenergie. Het aanbod uit deze bronnen varieert echter. Inpassing (systeemintegratie) en maximale benutting van deze bronnen vormt een van de grote uitdagingen voor de duurzame energievoorziening.

Omdat zon en wind voornamelijk worden gewonnen met technologie die elektriciteit levert, gaat de aandacht hier in eerste instantie uit naar inpassing in het elektriciteitssysteem.

1 Bijvoorbeeld emissies van het sterke broeikasgas methaan uit de veeteelt en CO₂-emissies die vrijkomen bij verwerking van carbonaathoudende erts en gesteenten.

2 Energiebronnen of primaire energiedragers: steenkool, bruinkool, aardolie en aardgas.

3 Zonne-energie, windenergie, duurzame biomassa, geothermie en waterkracht.



Oplossingen liggen in:

1. Het versterken van verbindingen tussen diverse markten (interconnectie) zodat pieken in aanbod over een groter gebied kunnen worden uitgesmeerd, dan wel het creëren van alternatieven zoals het transport van elektriciteit via waterstof.
2. Het organiseren van een optimale balans van vraag en aanbod door aanvullende flexibele productie (o.a. snel regelbare gascentrales) en afname (demand-side management).
3. De opslag van elektrische energie in bijvoorbeeld batterijsystemen en stuwmeren.
4. De toenemende elektrificatie op verschillende terreinen vergroot de afzetmogelijkheden voor elektriciteit. Hierbij kan worden gedacht aan vervoer (batterij-elektrische voertuigen), de warmtevoorziening in de gebouwde omgeving (hybride en elektrische warmtepompen) en de industrie (mechanische damprecompressie of industriële warmtepompen, directe elektrische verwarming en elektrochemie).

Het aandeel elektriciteit in het finale energieverbruik in Nederland bedraagt op het ogenblik ongeveer 20% en zal als gevolg van elektrificatie in 2050 naar schatting verdubbelen tot 40%.⁴ Dit betekent dat, zelfs wanneer elektrificatie sneller zou gaan, en bijvoorbeeld uit zou komen op 50% of nog hoger, er nog steeds een grote behoefte aan brandstoffen ('moleculen') zal bestaan. Volledige vervanging tegen het midden van de eeuw van de moleculen, te weten de huidige gasvormige en vloeibare, fossiele koolstof bevattende brandstoffen⁵, door klimaatneutrale varianten vormt dan ook de tweede grote uitdaging in de transitie naar een duurzame energievoorziening. Verduurzaming van de industrie vormt een derde grote uitdaging in het realiseren van een duurzame energievoorziening. Fossiele energiebronnen worden daar op grote schaal ook ingezet als grondstof en reactant voor de productie van een breed scala aan chemische producten en materialen (zoals kunststoffen), en van staal. Ook hiervoor moeten alternatieven worden ontwikkeld op basis van hernieuwbare energiebronnen en klimaatneutrale uitgangsmaterialen. Oplossingen worden tot nu toe vooral gezocht in opties gebaseerd op de inzet van duurzame biomassa, net als voor brandstoffen (biobrandstoffen, groen gas etc.). De beschikbaarheid van duurzame biomassa is echter waarschijnlijk niet toereikend voor volledige vervanging van fossiele energiebronnen voor deze toepassingen. Andere oplossingen op basis van klimaatneutrale koolstofbronnen (o.a. circulaire koolstof⁶ en de winning van koolstof van CO₂ uit de lucht, ook wel 'air capture' genoemd) in combinatie met energie van andere hernieuwbare bronnen zijn hier nodig.

Waterstof als basis voor klimaatneutrale moleculen

In de hiervoor geschetste uitdagingen – inpassing van variabele duurzame energie, vervanging van fossiele door hernieuwbaar brand- en grondstoffen, en verduurzaming van de industrie – kan waterstof in alle oplossingsrichtingen een potentieel belangrijke rol spelen. De redenen die hieraan ten grondslag liggen zijn de volgende:

⁴ Energy Roadmap 2050, EU, 2012. In deze roadmap gaat men uit van 21% elektrificatie in 2030 en 36-39% in 2050 (2016 = ca. 19%).

⁵ Secundaire energiedragers: benzine, diesel, LPG, aardgas (inclusief CNG en LNG).

⁶ Met circulaire koolstof wordt koolstof bedoeld van CO₂ of CO die wordt gevormd bij verbranding of vergassing van afval en vervolgens weer wordt benut als grondstof voor nieuwe chemische producten en materialen.



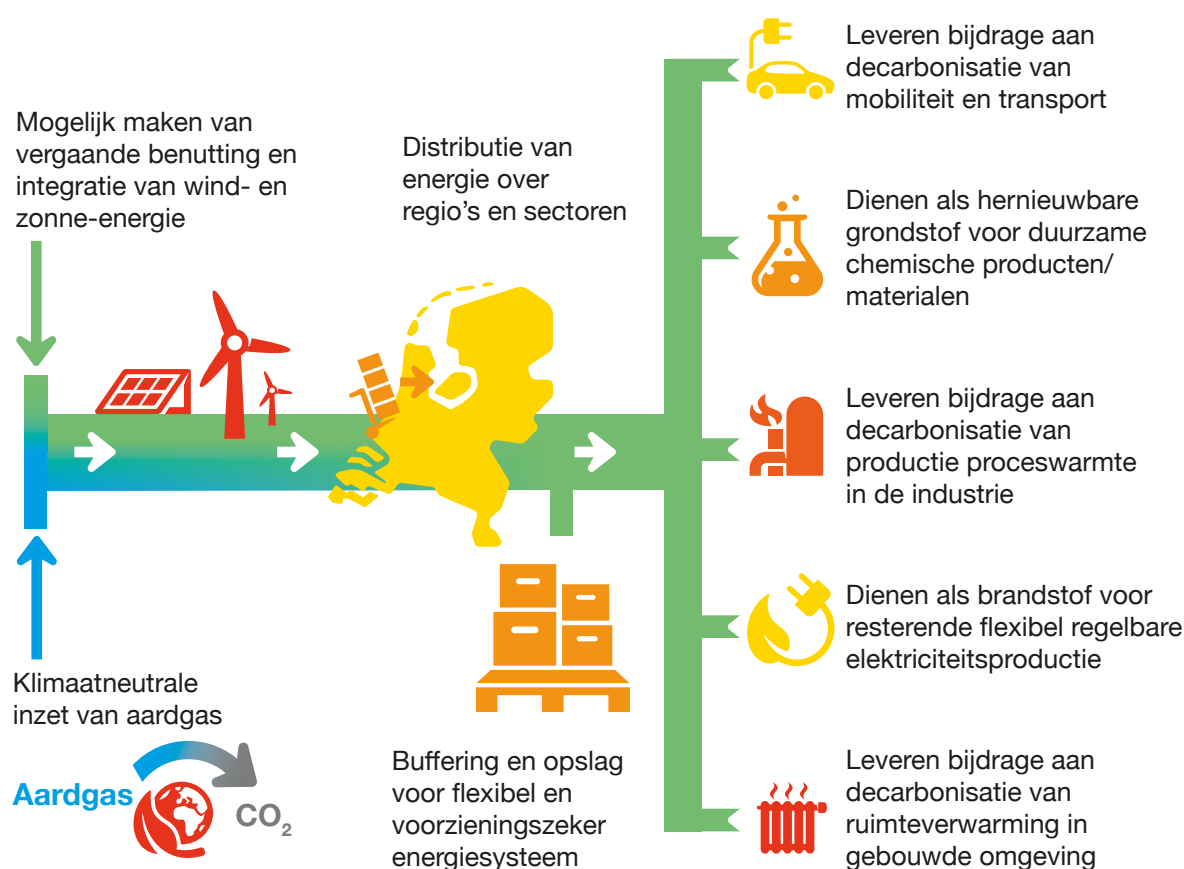
- **Waterstof is een belangrijk industrieel gas; het wordt op grote schaal ingezet in de industrie als grondstof, reductiemiddel of procesgas in tal van processen en toepassingen.** Grootverbruikers zijn de ammoniakproductie en olieraffinage. Productie vindt nu vrijwel volledig plaats op basis van aardgas. Deze waterstof kan worden vervangen door onder andere waterstof via de elektrolyseroute en zo volledig worden verduurzaamd. Ook kan waterstof grotendeels klimaatneutraal uit fossiele bronnen worden geproduceerd wanneer de bij puntbronnen vrijkomende CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen. In de toekomst zal de behoefte aan waterstof als grondstof voor de industrie verder toenemen: chemische producten en materialen, alsmede synthetische brandstoffen, zullen namelijk meer en meer worden gebaseerd op biomassa en circulaire koolstof. Deze grondstoffen vergen toevoeging van waterstof om de koolwaterstofverbindingen te kunnen produceren waar de meeste chemische producten en materialen, en brandstoffen uit zijn opgebouwd.
- **Waterstof is breed inzetbaar als brandstof in ketels en fornuizen voor de productie van hogetemperatuurproceswarmte in de industrie,** zeker voor temperatuurniveaus boven 250 °C waar in beperkt mate alternatieven beschikbaar zijn, en daar waar nodig ook voor lagetemperatuurwarmte voor ruimteverwarming in de bestaande gebouwde omgeving. Dit laatste kan indirect via het voeden van warmtenetten, maar mogelijk ook direct via een cv-ketel of hybride warmtepomp gekoppeld aan woningen, gebouwen en wijken.
- **De productie van waterstof door splitsing van water met behulp van elektriciteit (elektrolyse) biedt een flexibel mechanisme voor de inpassing van het variabele aanbod van wind- en zonne-energie.** Waterstof is, net als aardgas, relatief eenvoudig te transporteren en te bufferen in pijpleidingsystemen en op te slaan in tanks en ondergrondse voorkomens. Via de elektrolyseroute is het zo mogelijk grote hoeveelheden wind- en zonne-energie op te slaan om periodes te kunnen overbruggen waarin het aanbod uit deze bronnen beperkt is. Het voegt op die manier veel flexibiliteit toe aan het elektriciteitssysteem. Conversie terug naar elektriciteit is mogelijk via elektriciteitscentrales en WKK-installaties op basis van gasturbines of brandstofcellen, alhoewel deze optie hoge kosten zal hebben vanwege het verwachte geringe aantal draaiuren.
- **Waterstof is een geschikte transportbrandstof.** Samen met batterijen biedt waterstof, in combinatie met brandstofcellen, de mogelijkheid om een breed scala aan voertuigen, mobiele werktuigen en waarschijnlijk ook vaartuigen volledig te elektrificeren en emissievrij te maken. Voordeel van waterstof is dat relatief veel energie kan worden opgeslagen in tanks waarbij het gewicht en volume niet evenredig schalen met de hoeveelheid energie zoals bij batterijen. Daarnaast kan ook bij grotere hoeveelheden snel worden getankt. De optie leent zich hierdoor goed voor elektrificatie van de meer energie-intensieve mobiliteits- en transporttoepassingen, zeker daar waar langdurige en flexibele inzet van voertuigen is vereist. Voor toepassingen die (voorlopig) niet zijn te elektrificeren is waterstof een essentieel bestanddeel voor de (duurzame) synthetische brandstoffen die nodig zijn als vervanging van de huidige fossiel brandstoffen. Hierbij kan worden gedacht aan synthetische kerosine voor de luchtvaart en vloeibare brandstoffen voor de grote zeescheepvaart.



Gezien het beperkte oppervlak van Nederland en het intensieve ruimtegebruik is het de vraag of Nederland zelf voldoende mogelijkheden heeft voor de winning van alle duurzame energie die nodig is ten behoeve van de energietransitie. Daarbij kan het ook voordeliger zijn om duurzame energie te importeren. Import van duurzame energie vindt nu vooral plaats in de vorm van biomassa, in feite een vorm van zonne-energie, en als elektriciteit geproduceerd met windenergie of waterkracht in naburige landen. Waterstof voegt hier extra mogelijkheden aan toe. Elders op de wereld zijn grote gebieden met een enorm potentieel aan vooral zon- en windenergie. Met de sterk dalende kosten voor zonnepanelen en windturbines, en de vooruitzichten voor kostendaling van elektrolyse, kan daar op termijn op grote schaal en tegen lage kosten duurzame waterstof worden geproduceerd. Indien nodig of voordeliger kan deze vorm van duurzame energie-import voor de toekomst een goede aanvulling zijn op de eigen winning van duurzame energie en de import van biomassa. Import uit ver weg gelegen gebieden kan plaatsvinden via tankers, bijvoorbeeld in de vorm van vloeibaar waterstof of als verbinding met stikstof in de vorm van ammoniak. De rollen en functies die waterstof kan vervullen, zijn in figuur 1 schematisch weergegeven.

Figuur 1 | Schematische weergave van verschillende rollen en functies van waterstof

Bron: de figuur is een bewerkte versie; het origineel is afkomstig uit 'Hydrogen scaling up', Hydrogen Council (november 2017).





Waterstof als transitieversneller

Naast de perspectieven die waterstof biedt voor een toekomstige duurzame energie- en grondstoffenvoorziening, kan het ook op de korte termijn een belangrijke rol spelen in de transitie daar naartoe. Momenteel wordt waterstof zeer efficiënt op grote schaal geproduceerd uit aardgas voor diverse industriële toepassingen. Bij deze productie komt een relatief geconcentreerde stroom CO₂ vrij die zich leent voor afvang en ondergrondse opslag (CCS), dan wel voor hergebruik (CCU, Carbon Capture and Utilisation). Bij combinatie met een gascentrale voor productie van elektriciteit staat dit bekend als de ‘pre-combustion capture-route’.⁷ Gecentraliseerde productie met decentrale inzet van waterstof in de industrie, in vervoer, in elektriciteitscentrales en in de gebouwde omgeving is echter ook mogelijk. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van de huidige pijpleidinginfrastructuur voor aardgas voor transport en distributie van de waterstof. Op deze manier kan aardgas klimaatneutraal worden ingezet en er kan een aanzienlijke versnelling in de decarbonisatie van de energievoorziening worden gerealiseerd. Naarmate de transitie vordert waarbij duurzame energie verder wordt geïmplementeerd en duurzame waterstofproductie door ontwikkeling en schaalvergroting goedkoper wordt, kan duurzame waterstof vervolgens een steeds groter deel van de energiemix gaan vormen.

Samenvattend kan worden gesteld dat waterstof vanwege de diversiteit wat betreft de productie- en toepassingsmogelijkheden zeer kansrijk is om een belangrijke rol in het toekomstige duurzame energiesysteem te vervullen, en in de transitie daarnaartoe.

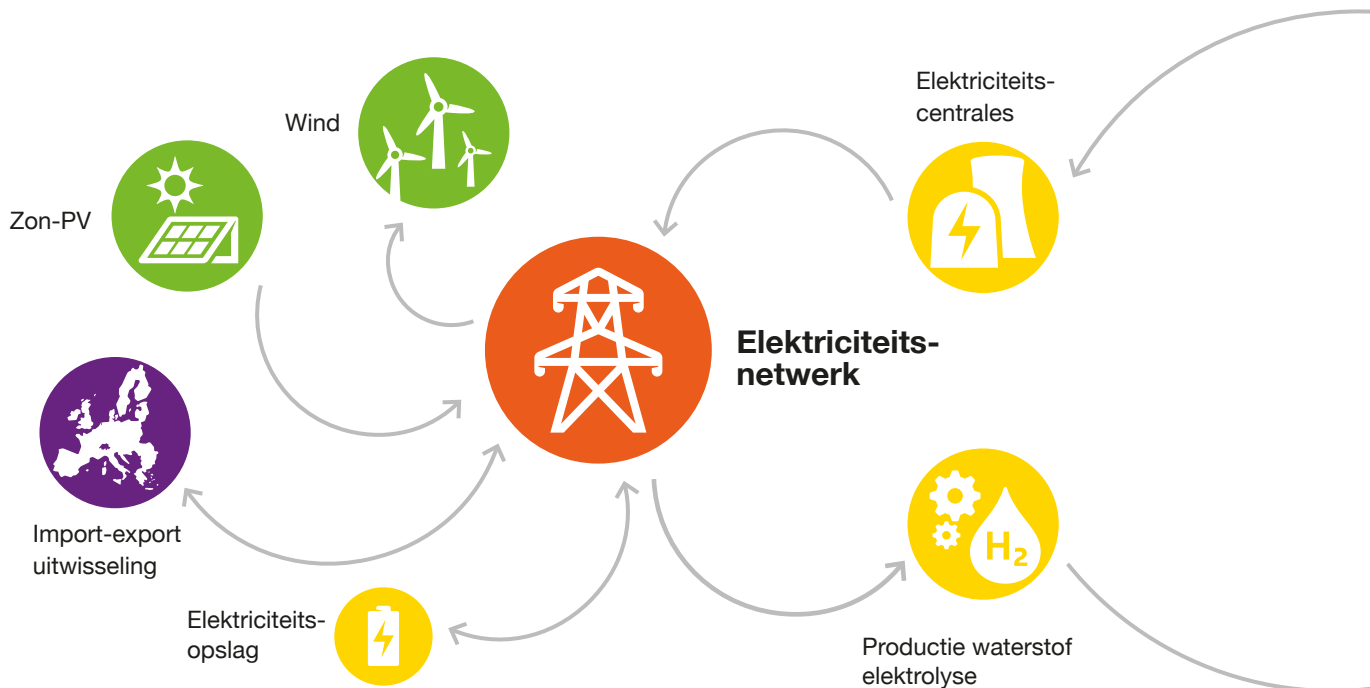
Het is een belangrijke basis voor de moleculenbehoefte in ons energie- en grondstoffen-systeem. Wellicht het grootste voordeel van waterstof is dat het een systeemrol kan vervullen. Waterstof biedt namelijk niet alleen voordelen in de verschillende toepassingsgebieden, zoals in de industrie, het vervoer en de elektriciteitsproductie; een belangrijke meerwaarde ligt in de integrerende rol die waterstof als flexibel intermediair tussen alle productiewijzen, toepassingsmogelijkheden en als opslag kan spelen. Hierdoor kan een volledig duurzaam, efficiënt, flexibel en geïntegreerd energie- en grondstoffensysteem ontstaan dat betrouwbaar en betaalbaar is en de juiste mate van voorzieningszekerheid kan bieden. Figuur 2 geeft een illustratie van de systeemfunctie van waterstof in een duurzaam energie- en grondstoffensysteem.

7 De rapportage ‘Waterstof in de energietransitie’ van Berenschot en TNO (november 2017) bevat een nadere uitleg.



Figuur 2 | Systeefunctie van waterstof in een duurzaam energie- en grondstoffensysteem

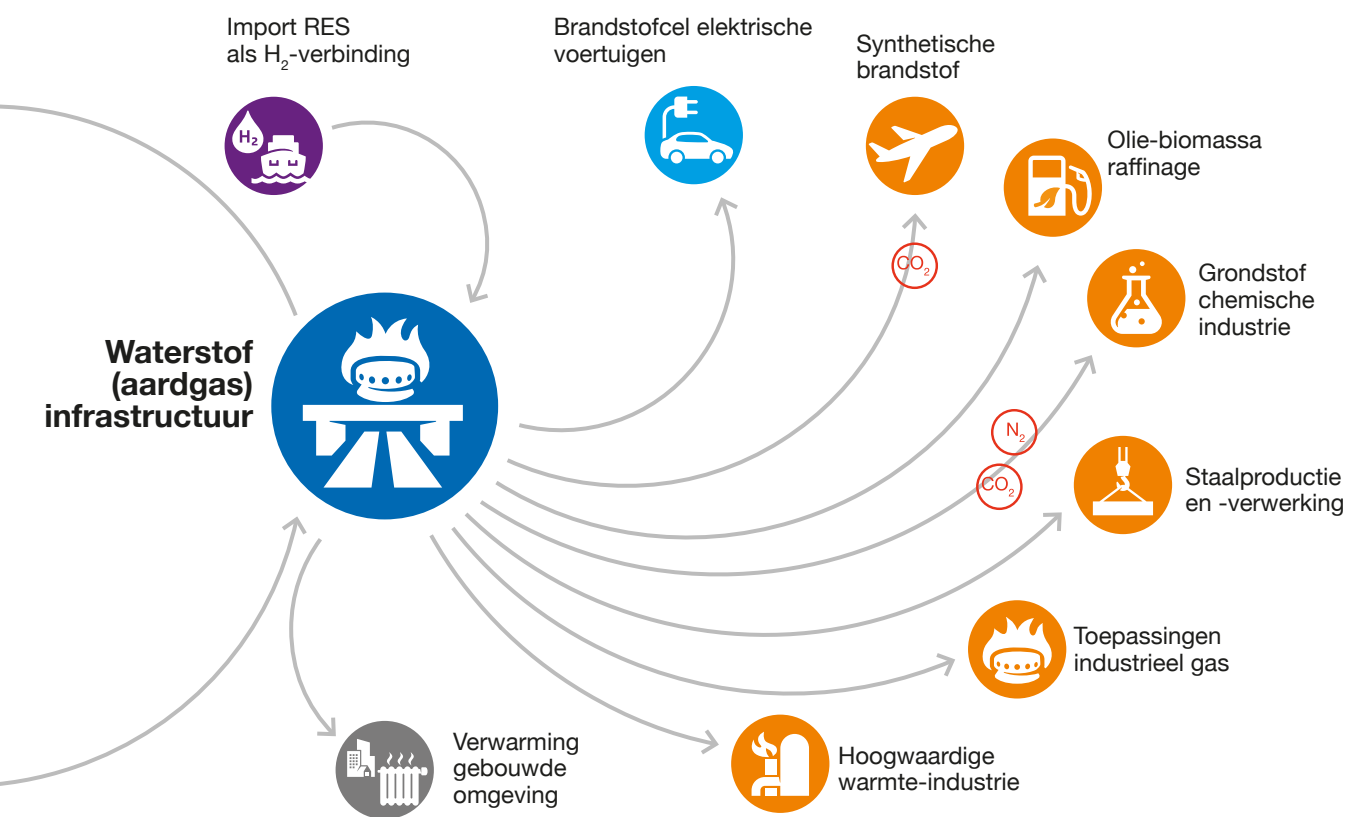
Bron: de figuur is een bewerkte versie; het origineel is afkomstig uit 'H2@Scale Workshop Report', NREL (maart 2017).



Waterstof in een krachtenveld aan opties

Een toekomstbeeld waarin waterstof een grote of zelfs dominante rol speelt, is zeker geen 'gelopen race'! De daadwerkelijke toepassing van waterstof zal mede afhangen van alternatieven die in ontwikkeling zijn of tot ontwikkeling komen en hoe serieus deze alternatieven daadwerkelijk zijn. Hierbij kan worden gedacht aan vervanging van fossiele gasvormige en vloeibare brandstoffen door op biomassa gebaseerde varianten en batterij-elektrisch vervoer. In de gebouwde omgeving worden woningen en gebouwen steeds beter geïsoleerd waardoor er in toenemende mate mogelijkheden ontstaan om de resterende warmtevraag in te vullen met hybride en volledig elektrische warmtepompen. Andere ontwikkelingen zijn het verwarmen en koelen van gebouwen via warmte-koude-opslagsystemen en verwarming van bijvoorbeeld tuinbouwkassen met aardwarmte (geothermie). Met industriële warmtepompen en diepe geothermie kan mogelijk een deel van de behoefte aan proceswarmte in de industrie worden ingevuld, terwijl er in de procesindustrie ook mogelijkheden liggen voor geheel nieuwe processen die gebruik maken van efficiënte elektrochemische syntheseroutes en daardoor een veel lagere warmtebehoefte kennen.

De onderlinge competitie en samenhang tussen alternatieven is een dynamisch en niet-lineair proces. Net als vele andere opties voor een duurzame energievoorziening is de inzet van waterstof in veel toepassingen nog geen gevestigde optie en moeten er nog veel ervaring worden opgedaan en ontwikkelingen plaatsvinden om te komen tot een optimale toepassing.



Sommige opties zijn al wat verder dan andere, maar ze zijn allemaal nog volop in ontwikkeling. Het is van belang alle serieuze opties die zich aandienen zo goed mogelijk te verkennen en uit te proberen, en niet op voorhand opties uit te sluiten. Daarvoor zijn de onzekerheden nu nog te groot. Een beoordelingskader dat een 'merit-order' van opties en toepassingen bevat, is hiervoor wenselijk.

Door de veelzijdige productie- en toepassingsmogelijkheden van waterstof, de inpasbaarheid in en geschiktheid voor ons veranderende energie- en grondstoffensysteem, en het feit dat het volledig klimaatneutraal is in te zetten, is waterstof potentieel zeer belangrijk voor de energietransitie. Vanwege de eerder geschetste diversiteit en kansrijkheid in verschillende markten, is het noodzakelijk om waterstof ook integraal te bekijken zodat de systeemrol tot uiting komt, zoals de mogelijkheid om flexibiliteit te genereren, (seizoens)opslag te bieden, energieopwekking en -toepassing van elkaar te scheiden omdat transport over grote afstanden mogelijk en efficiënt is, en pieken en dalen in vraag en aanbod op te vangen. Deze gewenste integraliteit moet niet leiden tot vertraging van de productie en toepassing van waterstof vanwege de complexiteit die hieraan verbonden is. Het is juist zaak om op tijd te beginnen zodat de systeemrol van waterstof ontwikkeld, verkend en optimaal benut kan worden. Kostprijsreductie van de technologie en het wegnemen van barrières zijn hier onderdeel van. De ruim honderd initiatieven die momenteel in Nederland spelen of in voorbereiding zijn (zie H8) en de vele internationale initiatieven op dit terrein zijn goede stappen in die richting.



De aandacht voor waterstof beperkt zich nu niet tot mobiliteits- en transporttoepassingen, maar richt zich breed op de gehele energie- en grondstoffenvoorziening. Dit komt onder meer door het sterk toegenomen gevoel van urgentie om broeikasgasemissies snel en vergaand terug te dringen.



2 | Historie en waterstof-initiatieven uit het recente verleden

In 1874 noemde Jules Verne in zijn roman ‘L’Île mystérieuse’ waterstof als de energiedrager van de toekomst. Door elektrolyse kan water in waterstof en zuurstof worden gesplitst en de waterstof kan kolen, destijds de belangrijkste brandstof, verdringen van de markt, zo schreef Verne. Nu, bijna anderhalve eeuw later, is waterstof als energiedrager nog maar in beperkte mate een realiteit geworden. Het wordt wel op grote schaal in de industrie toegepast, maar dan hoofdzakelijk als grondstof in de petrochemische industrie en als industrieel gas bij de productie van glas, metaal, vetten, en bijvoorbeeld microprocessoren en computerchips.

Wereldwijd wordt circa 60 miljoen ton waterstof geproduceerd, grotendeels uit aardgas. De energie-inhoud hiervan is bijna driemaal zo groot als het totale Nederlandse finale energieverbruik. Circa 90% wordt gebruikt voor de productie van ammoniak (veelal voor de productie van kunstmest), methanol en voor de raffinage van aardolie tot brandstoffen en basisproducten voor de chemische industrie. In Europa is Nederland na Duitsland de grootste producent van waterstof met een geschat volume van ordegrootte 10 miljard m³ per jaar. Circa 10% van het Nederlandse aardgasverbruik is voor de productie van waterstof.

Waterstof als brandstof voor schone en zuinige auto's

Het is niet voor het eerst dat er naar waterstof wordt gekeken als energiedrager. Sinds de oliecrises in het begin van de jaren zeventig van de vorige eeuw is het thema geregeld onderwerp van studie geweest, zowel in Nederland als elders. In het begin van deze eeuw was er even sprake van dat waterstof zijn belofte ging inlossen. De nadruk lag toen sterk op toepassing als brandstof voor brandstofcelauto's. Deze ontwikkeling was een vervolg op pogingen om schone en zuinige elektrische auto's te maken met batterijen. Omdat batterijen toen nog niet ver genoeg ontwikkeld waren, verschoof de aandacht naar de brandstofcel die meer potentie werd toegedicht. Ook voor de brandstofcel bleek het echter te vroeg om een doorbraak te forceren, mede omdat de verbrandingsmotor nog verbeterd kon worden.

Op die golf van aandacht voor brandstofcellen en waterstof in het begin van deze eeuw heeft Nederland enige tijd tot de voorlopers in Europa behoord. Zo maakte Nederland deel uit van het eerste grote demonstratieproject voor brandstofcel-elektrische bussen (CUTE-project Amsterdam), had Nederland de eerste lichte vrachtwagen op waterstof (HyTruck), is in Nederland de eerste volledig op waterstof gebaseerde (rondvaart)boot ontworpen en gebouwd (Fuel Cell Boat), en vond op Ameland het eerste demonstratieproject plaats waar waterstof



tot 20% werd bijgemengd in het aardgasnet voor inzet in huishoudens. Ook had Nederland in die tijd een waterstof- en brandstofcellenprogramma, gecoördineerd door een voorloper (Novem) van het huidige RVO. Ondanks het succes van de hiervoor genoemde projecten, zijn dit grotendeels individuele en eenmalige initiatieven gebleven.

Wereldwijd lag de focus vooral op auto's en met het ontbreken van een nationale automobiel-fabrikant in Nederland was er onvoldoende belang om de ontwikkelingen te continueren. Nederlandse bedrijven op het gebied van waterstof en brandstofcellen hadden te weinig massa om een doorbraak te forceren. Daarnaast ging op energiegebied de meeste aandacht uit naar het stimuleren van andere vormen van hernieuwbare energie en naar aardgas als transitiebrandstof. Samenvattend was er destijds geen vruchtbare voedingsbodem voor verdere ontwikkeling en inzet van waterstof.

Een nieuwe fase in het denken over waterstof

Ondertussen neemt de aandacht voor waterstof weer snel toe. De aandacht beperkt zich nu echter niet tot mobiliteits- en transporttoepassingen, maar richt zich breed op de gehele energie- en grondstoffenvoorziening. Dit komt onder meer door het sterk toegenomen gevoel van urgentie om broeikasgasemissies snel en vergaand terug te dringen. Het besef is toegenomen dat verduurzaming van ons energiesysteem meer behelst dan alleen het elektriciteitsdomein en dat juist het domein van de 'moleculen' ons voor grote uitdagingen stelt. Hierbij is waterstof steeds nadrukkelijker in beeld gekomen. Ook de verwachte zeer grootschalige en concurrerende productie van duurzame elektriciteit uit wind en zon en de mogelijke inpassingsproblemen die dit met zich meebrengt, heeft ertoe geleid dat wordt gezocht naar mogelijkheden om die duurzame elektriciteit in ons energiesysteem te accommoderen. Duurzame elektriciteit in combinatie met duurzame waterstof biedt daarvoor een heel goed perspectief.

De discussie over waterstof heeft zich dus verbreed en heeft meerdere dimensies die onderling raakvlakken hebben, maar ook vele verschillen kennen in aard, omvang, stand van zaken en betrokken partijen. Dimensies die daarbij kunnen worden onderscheiden zijn de volgende:

- Het tijdelijk verduurzamen van de huidige vraag naar industriële waterstof door decarbonisatie van de huidige productie via de toepassing van CCS/CCU en, daarnaast, vervanging van de huidige productie door duurzame waterstof.
- Het gebruik van waterstof als energiedrager als koolstofvrij alternatief voor aardgas voor de productie van hoge- en lagetemperatuurwarmte in de industrie en de gebouwde omgeving, en als transportbrandstof voor brandstofcel-elektrische mobiliteits- en transporttoepassingen.
- Het gebruik van waterstof in nieuwe duurzame processen voor de productie van duurzame chemische producten en materialen, duurzame synthetische brandstoffen en koolstofarme productie van ijzer en staal.



- Het gebruik van waterstof als medium voor opslag of inpassing van elektrische energie van zon-PV en windparken om periodes te kunnen overbruggen met een laag aanbod van zon- en windenergie. Gerelateerd hieraan, maar zeker niet hetzelfde, is de discussie over de inzet van elektrolyse voor het leveren van diensten op de onbalansmarkt om het elektriciteitsnet stabiel te houden. Ook de inzet van waterstof als transportmedium voor duurzame elektriciteit is hier onderdeel van waarmee knelpunten bij de (aanleg van de) elektriciteitsinfrastructuur kunnen worden opgelost.

Al deze onderwerpen hebben een eigen dynamiek en vragen een specifieke, op het onderwerp afgestemde aanpak. De routekaart adresseert de contouren van deze aanpak.





Op verzoek van een aantal ministeries is een verkenning uitgevoerd naar de mogelijke maatregelpakketten om voor 2050 een energievoorziening vorm te geven met 80 tot 95% minder uitstoot van broeikasgassen ten opzichte van 1990.



3 | Energietransitie-scenario's 2050

In navolging van de Energieagenda en de uitwerking van de transitiepaden is op verzoek van de ministeries van Economische Zaken en Klimaat (EZK), Infrastructuur en Waterstaat (I&W), Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (BZK), en Financiën door ECN en PBL een verkenning uitgevoerd naar de mogelijke maatregelpakketten om voor 2050 een energievoorziening vorm te geven met 80 tot 95% minder uitstoot van broeikasgassen ten opzichte van 1990⁸.

De studie is uitgevoerd voor vijf functionaliteiten waaronder de vier energiefunctiefunctionaliteiten uit de Energieagenda, te weten de transitiepaden Kracht en Licht, Hogetemperatuurwarmte, Lagetemperatuurwarmte, en Vervoer (bestaande uit mobiliteit, en transport en logistiek). De resultaten moeten de ministeries ondersteunen bij de invulling van het klimaatbeleid voor deze functionaliteiten. De resultaten van de studie vormen daarmee een goed uitgangspunt voor de routekaart waterstof omdat die betrekking heeft op alle vier energiefunctiefunctionaliteiten en de specifieke Nederlandse situatie het beste weergeeft.

In de studie zijn twaalf verschillende varianten met randvoorwaarden voor beschikbaarheid van voornamelijk windenergie, biomassa en afvang en opslag van CO₂ (CCS) verkend. Deze leveren verschillende detailinvullingen van de energievoorziening en kostenplaatjes. Waterstof als energiedrager komt op diverse plaatsen in de oplossingsruimte van de verkenning naar voren, vooral in varianten met 95% emissiereductie. Dat is verklaarbaar omdat bij 95% reductie 'alles uit de kast moet worden gehaald' om CO₂-emissies te reduceren. Daar ligt een van de grote waarden van waterstof.

Voor de positie van waterstof in deze scenario's van PBL en ECN zijn twee observaties van belang:

1. Waterstof zit voor een deel 'indirect' in de scenario's, het meest prominent is dat bij de CCS-opties en de elektrificatie-opties. Voor CCS-opties geldt dat die nu vooral als *end-of-pipe*- of *post-combustion*-optie in het model zitten. CCS bij waterstofproductie kan *pre-combustion* worden genoemd, maar heeft alleen betrekking op productie voor conventionele inzet van waterstof in industriële toepassingen. Voordelen van centrale waterstofproductie met CCS in combinatie met transport en distributie van waterstof voor zowel niet-energetische als energetische toepassingen lijken nog onvoldoende te worden onderkend. Deze opties verdienen meer aandacht gegeven de potentiële mate en snelheid waarmee klimaatneutrale energiedragers ('moleculen') kunnen worden ontwikkeld, inclusief een analyse van de kosten

⁸ 'Verkenning van klimaatdoelen. Van lange termijn beelden naar korte termijn actie. Policy Brief.' Jan Ros (PBL) en Bert Daniëls (ECN), oktober 2017.



en baten en het tijdframe waarbinnen de opties van belang zijn. Onder elektrificatie in de industrie is ook de inzet van elektriciteit voor de productie van waterstof een belangrijke optie. Zeker bij de productie van grondstoffen is dat interessant.

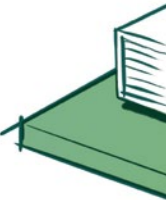
2. Het model kent een aantal beperkingen die gevolgen kunnen hebben voor de positie van waterstof. Een ervan is dat import van waterstof niet is meegenomen. Het is een interessante optie om grote hoeveelheden waterstof (of daaruit geproduceerde energiedragers) uit gebieden te importeren waar duurzame elektriciteit goedkoop en in grote hoeveelheden geproduceerd kan worden, zoals het Midden-Oosten (zon-PV) of de Atlantische Oceaan (floating wind), als aanvulling op eigen duurzame productie. Ook de limitatie dat waterstof tot maximaal 25% in het aardgasnet kan worden bijgemengd voor toepassing in cv-ketels en andere apparatuur, is vanuit deze routekaart gezien een te beperkende aanname omdat een van de studies voor deze routekaart (zie hoofdstuk 6) laat zien dat er goede mogelijkheden zijn om de infrastructuur voor 100% waterstofgeschikt te maken.

De illustraties duiden erop dat in de verkenningen nog onvoldoende rekening is gehouden met de mogelijke meerwaarde van de systeemrol die waterstof kan hebben als flexibel intermediair tussen alle toepassingen, productiewijzen en opslagmogelijkheden. Overigens was het doel van de verkenningen ook niet om specifiek naar waterstof te kijken, maar de problematiek vanuit de breedte te benaderen. Ook geven de auteurs terecht aan dat er nog onzekerheden zijn wat betreft de toepassing van waterstof. In de rapportage wordt het potentieel van waterstof en de mogelijkheden om aan meerdere functionaliteiten bij te dragen onderkend in de bespreking van de resultaten en de aanbevelingen voor acties en maatregelen voor de korte termijn.

De aanbevelingen in deze verkenning voor het aanbod van waterstof zijn, gegroepeerd naar drie typen acties:

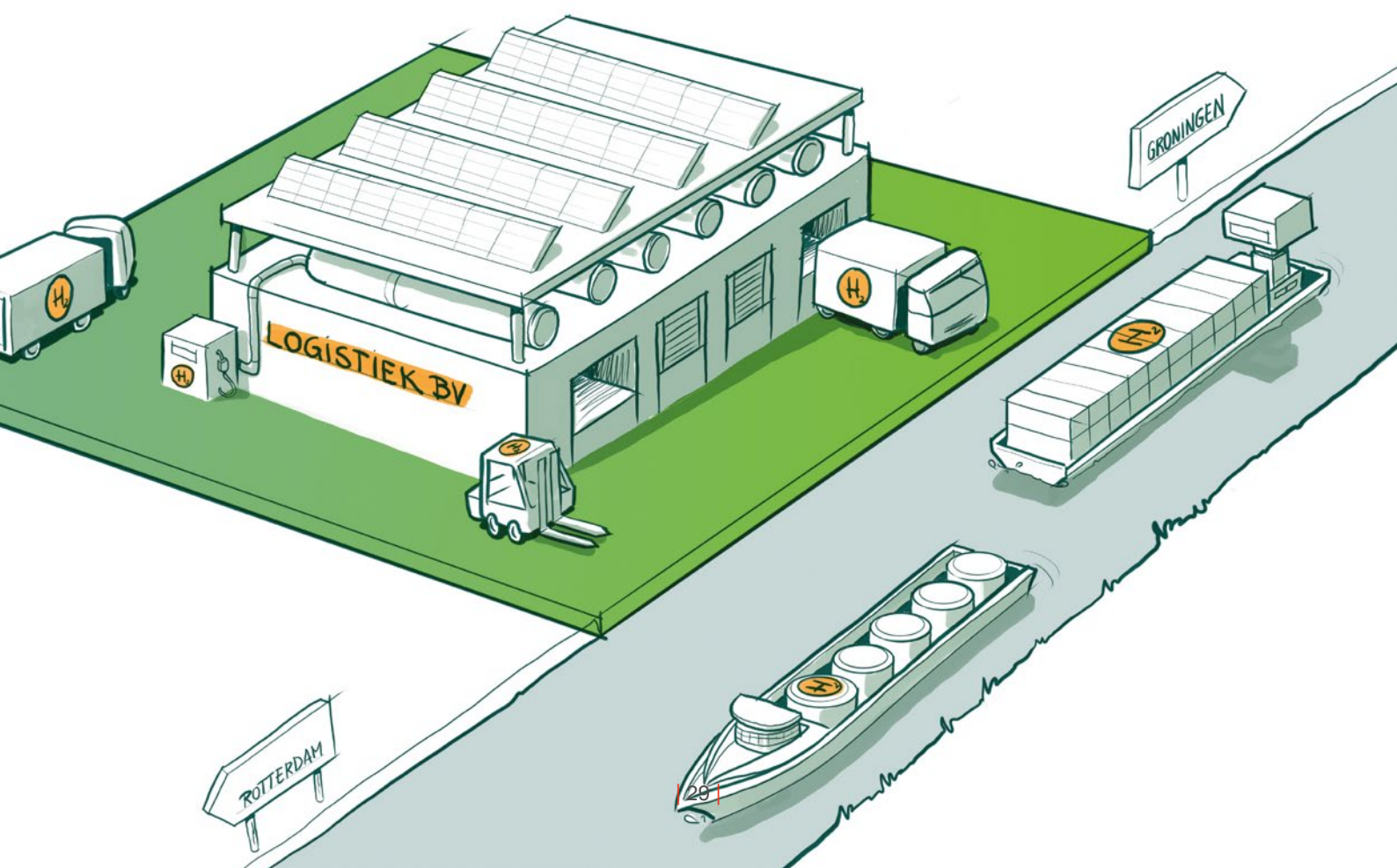
- Ondersteunende acties ter voorbereiding van grootschalige implementatie: onderzoek, ontwikkeling en demonstratie (RD&D), inzicht in mogelijkheden voor bijmenging van waterstof in het gasnet, en studies naar procesoptimalisatie en -integratie van de keten power-to-gas (waterstof)
- Implementatie van maatregelen die een groot potentieel hebben: demonstratieprojecten met waterstofproductie uit elektriciteit
- Aanvullende acties maar minder essentieel voor 2050: CCS bij waterstofproductie uit aardgas (waarbij lock-in een aandachtspunt is vanwege de mogelijke rem op de elektrificatie van waterstofproductie).

Tevens wordt specifiek voor vervoer geadviseerd om RD&D en pilots met waterstof te doen.





Naast deze PBL/ECN-verkenning zijn meerdere nationale en internationale rapporten verschenen waar waterstof een prominent onderdeel van uitmaakt (soms samengevat als elektrificatie-optie) of die specifiek voor waterstof zijn opgesteld. Goede voorbeelden zijn de McKinsey-studie voor VEMW (Energy Transition: Mission (Im)possible for Industry), de Roadmap Chemie 2050 van VNCI, adviezen van de Hydrogen Council (Hydrogen – Scaling Up), de Wuppertal-studie van Havenbedrijf Rotterdam, waterstofstudies voor Shell etc. Het voert te ver om die studies in deze routekaart in detail te behandelen. De boodschap uit deze studies is dat veel stakeholders in verschillende landen de betekenis van waterstof voor de energietransitie verkennen en dat waterstof een groot potentieel wordt toegekend. Alle verkenningen onderschrijven ook dat er nog veel technologische onzekerheden zijn en dat meer verdieping én toepassing nodig is.





Waterstof is een energiedrager die breed inzetbaar is in de industrie, in de mobiliteit, in de energiesector en in de gebouwde omgeving. Hierbij kunnen energetische en non-energetische toepassingen worden onderscheiden.



4 | Toepassingen voor waterstof

Waterstof is een energiedrager die breed inzetbaar is in de industrie, in de mobiliteit, in de energiesector en in de gebouwde omgeving. Hierbij kunnen energetische en non-energetische toepassingen worden onderscheiden.

Het energetisch gebruik betreft de mogelijke inzet van waterstof als brandstof in de volgende toepassingen:

- Productie van hogetemperatuurwarmte voor processen in de industrie, zoals de chemische industrie, de staalindustrie en in olieraffinaderijen.
- Elektrisch aangedreven nul-emissie brandstofcelvoertuigen zoals auto's, bussen, vrachtwagens, treinen en schepen.
- Productie van elektriciteit in flexibele gascentrales (combined cycle gasturbines), en in de toekomst wellicht ook in brandstofceleenheden, bijvoorbeeld gecombineerd met brandstofcelvoertuigen.
- Productie van warmte voor ruimteverwarming (lagetemperatuurwarmte) in de bestaande gebouwde omgeving en mogelijk ook voor warm tapwater.

Overigens geldt voor sommige toepassingen, zoals de chemische industrie, dat waterstof ook non-energetisch wordt ingezet. In de volgende paragrafen wordt per energiefunctie nader ingegaan op de verschillende toepassingen, gebundeld per thema en gerangschikt op niveau van marktrijpheid. De bedoeling daarvan is om een indicatie te geven van de benodigde ontwikkelingsspanning om een bepaalde optie grootschalig te kunnen toepassen. De indeling op marktrijpheid (of TRL-niveau) is indicatief; de afbakening zal in de praktijk minder scherp zijn dan het op basis van de indeling lijkt. Vervolgens is via een kleurcodering de mate van prioriteit aangegeven voor de ontwikkeling van activiteiten in Nederland waarbij voornamelijk is gelet op belang van de toepassing voor Nederland uit oogpunt van potentieel voor emissiereductie en kansen voor het Nederlandse bedrijfsleven. Groen betekent belangrijk (hoogste prioriteit), oranje betekent van belang (maar niet de hoogste prioriteit) en rood betekent beperkt van belang (op het ogenblik geen hoge prioriteit).

4.1 Energiefunctie Kracht en Licht

Voor de functie Kracht en Licht (K&L) wordt hier onderscheid gemaakt tussen productie van elektriciteit uit waterstof (de route waterstof naar elektriciteit), en de conversie en het eindgebruik van elektriciteit voor de productie van waterstof (de route elektriciteit naar waterstof). Voor beide routes geldt dat ze qua structuur lastig in het transitiepad K&L passen omdat dat vooral gaat over het eindverbruik van elektriciteit. Elektriciteitsproductie betreft de aanbodkant, terwijl bij inzet van elektriciteit voor waterstof in principe geen sprake is van



eindverbruik. Het gaat dan om de conversie van elektrische energie naar energie in de vorm van waterstof dat dan als energiedrager fungeert (net als bijvoorbeeld aardgas en benzine) of als grondstof voor de industrie. Het is geen eindproduct maar een intermediair product.

Wat betreft de productie van elektriciteit zijn in tabel 1 stationaire brandstofceltoepassingen opgenomen.⁹ Elektriciteitsproductie met brandstofcelcentrales is momenteel nog duur vanwege de kosten van brandstofcellen en van waterstof als brandstof. Deze optie speelt voorlopig vooral een rol bij elektriciteitstoepassingen waar leveringszekerheid veel waard is en de betrouwbaarheid van levering via het openbare net te wensen overlaat. Dat is minder relevant voor de Nederlandse situatie maar er zijn op dat gebied wel activiteiten in Nederland: Nedstack en MTSA zijn bijvoorbeeld bedrijven die al brandstofcel *power plants* in het buitenland hebben gerealiseerd tot een capaciteit van 2 MW. Deze categorie wordt daarom toch van belang geacht. Daarnaast heeft het bedrijf Bredenoord twee generatoren op basis van brandstofcellen op waterstof in haar productenpakket die kunnen worden ingezet bij evenementen en festivals. Het is echter een *niche*. Wanneer brandstofcellen robuuster en goedkoper worden, kan het op termijn wel een interessante markt worden omdat generatoren niet zelden op locaties in stedelijke gebieden staan waar luchtkwaliteit en geluidshinder belangrijke aspecten zijn.

Het thema conversie en eindgebruik in tabel 1 omvat verschillende elektrolyse-opties. Deze technologieën zetten elektrische energie om in chemische energie door splitsing van water in waterstof en zuurstof met behulp van elektriciteit. Elektrolyse van water is in vele opzichten een sleuteltechnologie voor de energietransitie en een duurzaam energiesysteem. De twee meest ontwikkelde elektrolyse-opties hebben op het ogenblik de hoogste prioriteit. Van beide technologieën is alkalische elektrolyse de meest volwassen technologie, hoewel PEM-elektrolyse (Proton Exchange Membrane) ook al behoorlijk ver ontwikkeld is. Beide zijn commercieel beschikbaar op MW-schaal, maar er is nog een aanzienlijk potentieel voor verbetering en optimalisatie.

Verder is opschaling nodig richting systemen van tientallen en uiteindelijk honderden MW's om een rol van betekenis te kunnen spelen in de industrie en energievoorziening. Opschaling en optimalisatie vinden volgtijdelijk plaats en vergen nog meerdere tussenstappen voordat standaardisatie en opschaling van productie kunnen bijdragen tot daling naar kostenniveaus die kunnen concurreren met conventionele waterstofproductie. Om deze ontwikkeling mogelijk te maken zijn projecten nodig waarbij de technologie op schaal kan worden toegepast om zodoende relevante praktijkervaring op te doen voor verdere opschaling richting volledig duurzame waterstof. In het volgende hoofdstuk wordt nader ingegaan op kosten en ontwikkelingen van de productie van waterstof via elektrolyse.

⁹ De toepassing brandstofcelgeneratoren in deze categorie is een twijfelgeval. In energiestatistieken worden generatoren ook wel onder mobiele werktuigen geschaard als onderdeel van de sector Vervoer.



In tabel 1 staan ook gasturbines die ingezet kunnen worden voor de productie van elektriciteit rechtevreeks uit waterstof. Hiervoor zijn meestal aanpassingen noodzakelijk om op puur waterstof bedreven te kunnen worden.

Tabel 1 | Overzicht van de status van waterstofproductie en -toepassingen voor de energiefunctionaliteit Kracht en Licht

Ontwikkelingsstadium toepassing H ₂	Verkenning van en onderzoek naar haalbaarheid	Industrieel onderzoek en experimentele ontwikkeling	Demonstratie, praktijkprojecten en marktintroductie
			
Energie- functionaliteit	TRL 1-3 marktrijp over 10+ jaar	TRL 4-7 marktrijp over 3-10 jaar	TRL 8-9 (bijna) marktrijp
	Kracht en Licht		
Productie elektriciteit		- Gasturbine (flexibele gasturbine centrales) - Brandstofcel powerplants (1-10 MW) - Brandstofcel gensets - Brandstofcel micro-WKK (kW-schaal)	Brandstofcel back-up en remote power systemen
Conversie en eindgebruik	Waterstofproductie m.b.v.: - AEM-elektrolyse - Solid Oxide elektrolyse		Waterstofproductie m.b.v.: - Alkalische elektrolyse - PEM-elektrolyse

Noot: Ordening is indicatief, afbakening van TRL en marktrijpheid zal in de praktijk minder scherp zijn. Kleurcodering: mate van prioriteit voor ontwikkeling van activiteiten in Nederland uit oogpunt van potentieel voor emissiereductie en kansen voor het Nederlandse bedrijfsleven; groen = hoogste prioriteit, oranje = wel van belang, niet hoogste prioriteit, rood = van beperkt belang, nu geen prioriteit.

4.2 Energiefunctionaliteit Hogetemperatuurwarmte

Toepassingen onder de functionaliteit hogetemperatuurwarmte (HTW) zijn onderverdeeld in drie thema's, te weten non-energetisch, energetisch en een mengvorm daarvan.

Non-energetische toepassing van waterstof

Het non-energetisch gebruik van waterstof betreft onder meer de inzet als grondstof, als reductiemiddel en als procesgas voor de oppervlaktebehandeling van materialen bij tal van industriële processen. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen huidige toepassingen en mogelijke toekomstige toepassingen.



In de industrie wordt waterstof al vele tientallen jaren op grote schaal non-energetisch ingezet. Veruit de grootste hoeveelheid wordt gebruikt als grondstof voor de productie van ammoniak waarvan het grootste deel weer dient als uitgangsstof voor de productie van kunstmest. Op de tweede plaats komt het gebruik in de raffinage van aardolie voor de ontzwaveling van brandstoffen en de opwerking van zware aardoliefracties. In toenemende mate is waterstof ook nodig bij de productie van biobrandstoffen. Verder wordt het gebruikt bij de productie van kunststoffen (plastics, polyester, nylon), voor het hydrogeneren van vetten en plantaardige oliën in de voedingsmiddelenindustrie, en als reductiemiddel en procesgas voor oppervlaktebehandeling in de glasindustrie, de metaalindustrie en de halfgeleider- en elektronica-industrie. Deze waterstof wordt voornamelijk geproduceerd met behulp van aardgas via SMR (Steam Methane Reforming). Decarbonisatie hiervan is mogelijk door vervanging van fossiele door duurzame waterstof, maar ook door toepassing van CCS. Gedeeltelijke decarbonisatie kan ook worden bereikt door conventionele productie van waterstof te vervangen door waterstof uit waterstofrijke restgassen die elders in de industrie ontstaan. Het project 'Waterstofsymbiose' met DOW, Yara en ICL in Zeeuws-Vlaanderen is hier een voorbeeld van.

Voor de toekomst wordt een grote toename van de vraag naar waterstof voorzien voor de productie van duurzame chemische producten. Nu vormen fossiele bronnen nog de basis voor deze producten, maar uiteindelijk moet ook hier de fossiele koolstof worden vervangen door de klimaatneutrale variant.¹⁰ Opties hiervoor zijn koolstof van duurzame biomassa, circulaire koolstof uit recycling of afvalverwerking van kunststofproducten, en koolstof van CO₂ die wordt gewonnen uit de lucht of uit water. Al deze vormen van koolstof vereisen in meer of mindere mate toevoeging van waterstof om er koolwaterstoffen mee te produceren.

Volledige verduurzaming vergt productie van waterstof met energie van duurzame bronnen, zoals elektrolyse met elektriciteit van zon en wind. De technologie voor productie van duurzame waterstof is nog niet ver genoeg ontwikkeld om de conventionele productie te vervangen. Wel leent de schaalgrootte van conventionele productie zich om projecten te faciliteren die ontwikkeling en opschaling van duurzame waterstof ondersteunen omdat de meerkosten van gedeeltelijke vervanging van fossiele waterstof door duurzame waterstof slechts tot beperkte kostenstijging op het totaal aan productiekosten leidt.

De mogelijkheid van de industrie om de productie in kleine eenheden uit te breiden kan verder interessant zijn om flexibel op groei van de markt in te spelen. Het kan helpen de risico's te beperken die een grote uitbreiding met zich zou meebrengen en zo een positieve bijdrage aan de businesscase leveren. Daarnaast betreft het hier grote bedrijven die voldoende kracht hebben om ketens te organiseren waarin meerkosten kunnen worden

¹⁰ Vanuit de nationale emissiereductie-opgave is er nog beperkt aandacht voor deze toepassingen. In de chemische industrie wordt het grootste deel van de fossiele koolstof die als grondstof wordt ingezet, voor langere tijd vastgelegd in producten. De koolstof komt pas na verloop van tijd vrij in de afvalfase. Bovendien wordt een groot deel van de producten geëxporteerd, en komt zo niet als CO₂ vrij in Nederland. Hetzelfde geldt voor brandstoffen die in Nederland of elders worden gebunkerd voor de internationale lucht- en scheepvaart. De CO₂ die hierbij vrijkomt valt niet onder nationale opgaves voor emissiereductie. De hoeveelheid is echter aanzienlijk. In Nederland is de afgelopen 5 jaar gemiddeld circa 700 PJ aan brandstoffen gebunkerd. Dat is ruim meer dan het totale eindverbruik van de vervoerssector in Nederland zelf (ca. 500 PJ). Ook bunkerbrandstof zal uiteindelijk klimaatneutraal moeten worden.



gedeeld of kunnen worden omgezet in producten met een duurzamer karakter die een hogere marktwaarde vertegenwoordigen. Dit speelt zeker bij industriële clusters waar productie- en gebruiksmogelijkheden dicht bij elkaar kunnen liggen.

Naast de huidige non-energetische vraag naar waterstof, kan verduurzaming van de koolstofchemie tot een aanzienlijke additionele vraag naar waterstof leiden vanuit de chemische industrie. In tabel 2 is dit 'nieuwe chemie' genoemd. Deze nieuwe chemie bevindt zich nog op een laag TRL-niveau maar kan van groot belang worden en heeft grote potentie voor Nederland, niet alleen vanwege de grote chemische industrie, maar bijvoorbeeld ook vanwege de vooraanstaande kennispositie van Nederland op het gebied van katalyse. Ook dit gebied verdient daarom hoge prioriteit zoals wordt onderkend in het programma Elektrochemische Conversie en Materialen (ECCM).

Non-energetische/energetische toepassing van waterstof

Toepassing van waterstof voor productie van duurzame synthetische brandstoffen voor bijvoorbeeld de luchtvaart en zeescheepvaart is ingedeeld in een aparte categorie, maar deze toepassing vertoont veel overeenkomsten met 'nieuwe chemie'. Bij de productie van de brandstoffen fungeert waterstof als grondstof, terwijl het bij inzet van de aldus geproduceerde brandstof om een energetische toepassing gaat. Net als bij 'nieuwe chemie' gaat bij de productie van synthetische brandstoffen de voorkeur uit naar de inzet van duurzame waterstof. Conversie van aardgas naar CO_2 en waterstof, met opslag van CO_2 , en vervolgens weer combineren van de waterstof met duurzame koolstof is weliswaar technisch mogelijk, maar ligt minder voor de hand.

Op het ogenblik vindt productie van vloeibare brandstoffen op basis van aardgas (gas-to-liquids) op grote schaal plaats. Hierbij vindt eerst reforming van aardgas plaats tot syngas, een mengsel van koolmonoxide (CO) en waterstof, waarmee synthese van nieuwe koolwaterstoffen plaatsvindt. Dit gebeurt op het ogenblik ook al met biomassa als uitgangsmateriaal in combinatie met fossiele waterstof. De uitdagingen liggen hier vooral op het vlak van duurzame waterstofproductie en toekomstige inzet van CO_2 als koolstofbron waarvoor efficiënte methoden voor de reductie van CO_2 tot CO nodig zijn.

Energetische inzet van waterstof voor HTW

Waterstof is een van de mogelijkheden om hogetemperatuurwarmte te produceren. In de industrie komen veel waterstofrijke restgassen voor, gevormd bij de raffinage van aardolie en het kraken van nafta en LPG tot basischemicaliën voor de chemische industrie. Ook cokesgas dat wordt gevormd bij de productie van cokes uit kolen bestaat voor het grootste deel uit waterstof. Bij het chlooralkaliproces voor de productie van chloor en natroloog (elektrolyse van zout opgelost in water) wordt zelfs puur waterstof als bijproduct gevormd. Deze gassen worden veelal direct, of in een mengsel met aardgas, ingezet in ketels en fornuizen voor de productie van stoom en hogetemperatuurproceswarmte, of voor de productie van elektriciteit in centrales met of zonder WKK.



Deze toepassing heeft vooral een hoge prioriteit omdat ervan te leren is welke aanpassingen nodig zijn voor een eventuele omschakeling naar pure waterstof. Dit kan van belang zijn voor inzet van pure waterstof in gasturbines, maar ook voor de ontwikkeling van producten met branders voor pure waterstof elders in de industrie of in de gebouwde omgeving.

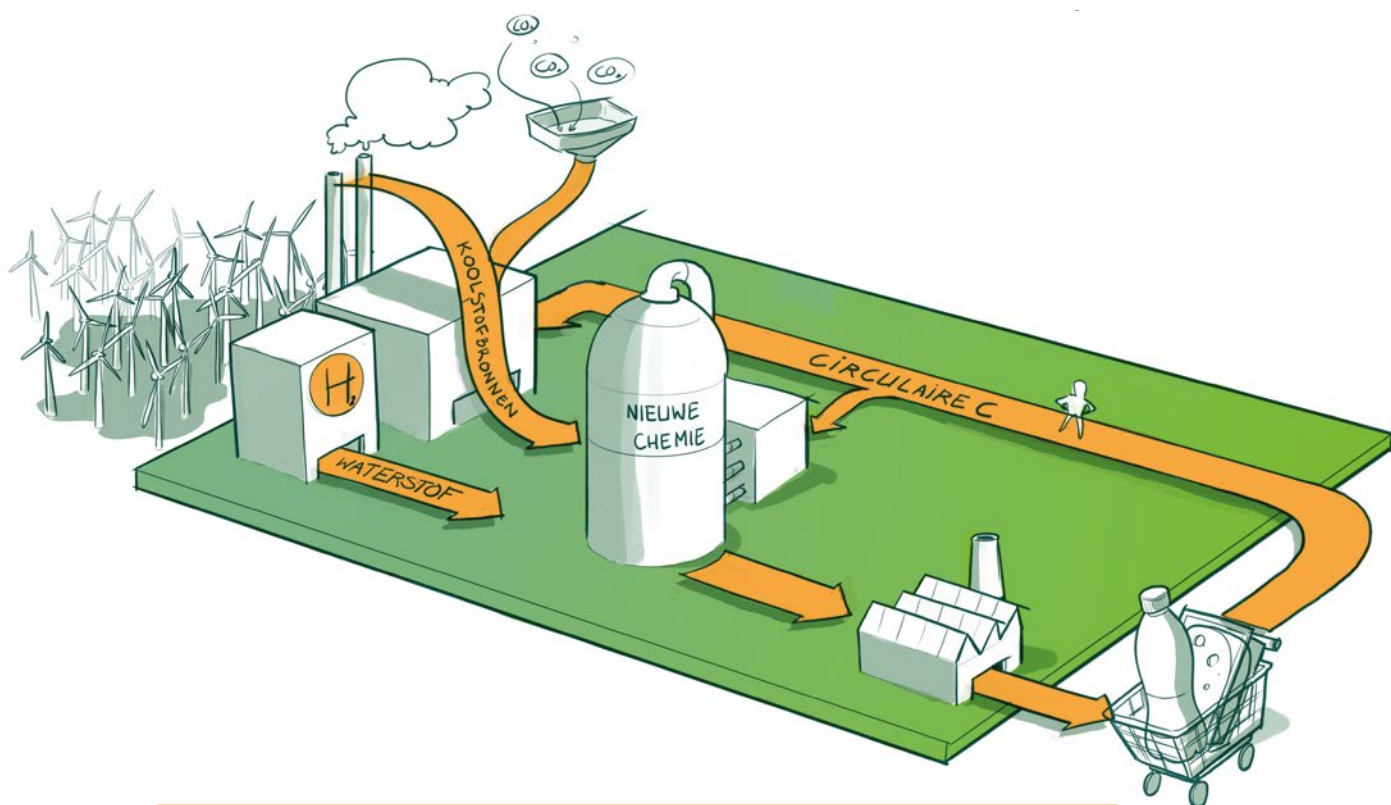
Tabel 2 | Overzicht en status van waterstoftoepassingen onder de energiefunctionaliteit Hogetemperatuurwarmte

Ontwikkelingsstadium toepassing H ₂	Verkenning van en onderzoek naar haalbaarheid	Industrieel onderzoek en experimentele ontwikkeling	Demonstratie, praktijkprojecten en marktintroductie
Energie-functionaliteit	TRL 1-3 marktrijp over 10+ jaar	TRL 4-7 marktrijp over 3-10 jaar	TRL 8-9 (bijna) marktrijp
Hogetemperatuurwarmte			
Non-energetisch	Grondstof nieuwe chemie: - Bio-based chemie - Waste-to-Chemicals	Grondstof nieuwe chemie: - Carbon2Chem (CCUS met cokes en BF-gas)	Standaard als grondstof, reactant of procesgas in breed scala van industriële processen
Non-energetisch / Energetisch	Productie duurzame(re) synthetische brandstoffen		
Energetisch: brandstof voor productie proceswarmte	Vervanging aardgas waar geen klimaatneutraal alternatief is		Inzet bijproduct H ₂ uit industrie voor ondervuring

Noot: Ordening is indicatief, afbakening van TRL en marktrijpheid zal in de praktijk minder scherp zijn. Kleurcodering: mate van prioriteit voor ontwikkeling van activiteiten in Nederland uit oogpunt van potentieel voor emissiereductie en kansen voor het Nederlandse bedrijfsleven; groen = hoogste prioriteit, oranje = wel van belang, niet hoogste prioriteit, rood = van beperkt belang, nu geen prioriteit.



Koolwaterstofsymbiose



4.3 Energiefunctionaliteit Lagetemperatuurwarmte

De energiefunctionaliteit Lagetemperatuurwarmte (LTW) heeft betrekking op warmte voor ruimteverwarming en tapwater in de gebouwde omgeving. Verduurzaming van de gebouwde omgeving richt zich in eerste instantie op het vermijden van warmtevraag door het bouwen van energiezuinige woningen en gebouwen, en het verminderen van de warmtevraag door na-isolatie van bestaande woningen en gebouwen. Daarnaast zijn er tal van alternatieven om de resterende warmtevraag klimaatneutraal in te vullen.

All-electric verwarming van nieuwe, energiezuinige woningen en gebouwen met elektrische warmtepompen is goed mogelijk. Verder is ook de aanleg of uitbreiding van warmtenetten in relatie tot nieuwbouw relatief eenvoudig. De mogelijkheden hiervoor moeten echter van geval tot geval worden bekeken in samenhang met de huidige en toekomstige mogelijkheden voor het voeden van die netten met klimaatneutrale of duurzame warmte, zoals restwarmte uit de industrie of van afvalcentrales, en geothermie.

Voor de bestaande bouw zijn deze opties echter minder eenvoudig. Hier ligt een enorme opgave zowel in aantal woningen en in omvang van de isolatiemaatregelen, als in aanleg van nieuwe warmte-infrastructuur of aanpassing van de bestaande elektriciteitsinfrastructuur.

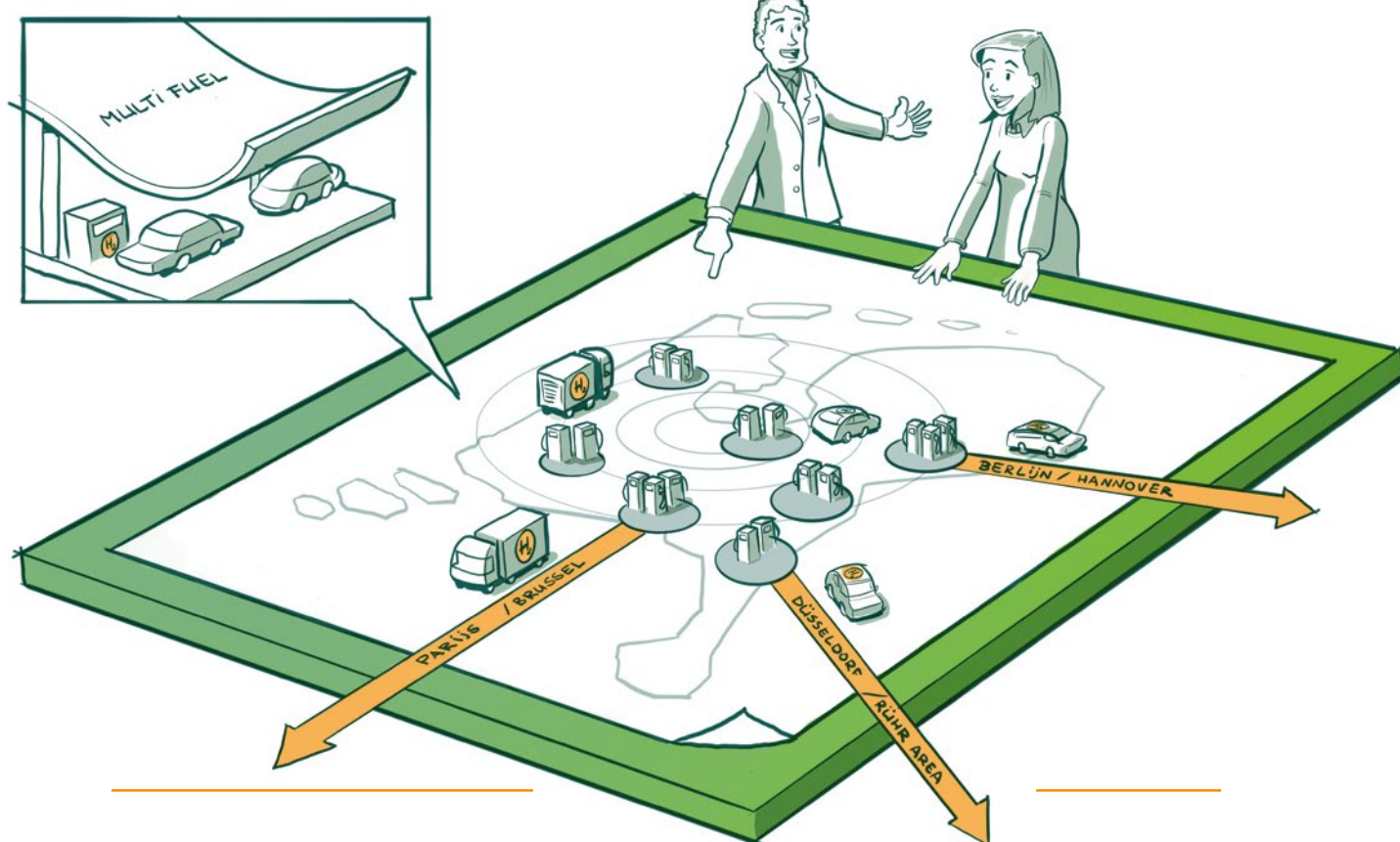


Als gevolg hiervan wordt ook gekeken naar alternatieven zoals hybride warmtepompen. Hierbij vindt verwarming grotendeels plaats met een elektrische warmtepomp maar wordt capaciteit voor invulling van de piekvraag naar warmte op de koudste momenten geleverd door een aardgasketel.

Daarnaast wordt nagedacht over de mogelijkheden voor vervanging van aardgas door een ander, klimaatneutraal gas. Als het aardgas kan worden vervangen door een klimaatneutraal gas dat geheel of grotendeels gebruik kan maken van dezelfde gasinfrastructuur, kan dat bijdragen aan oplossingen die zowel maatschappelijk acceptabel als kosteneffectief zijn. Vervanging van aardgas door groen gas is een optie, maar ook de inzet van klimaatneutrale waterstof komt hier in beeld.

Waterstof kan een bijdrage leveren aan productie van deze warmte voor woningen, gebouwen en bedrijfspanden. Dit kan als brandstof in verwarmingsketels, maar ook als brandstof in centrales voor warmtenetten, bijvoorbeeld op wijkniveau. Hierbij kan gedacht worden aan in de wijk opgestelde warmtekrachtunits die lokaal elektriciteit produceren en/of voor de balancering in het elektriciteitsnet zorgen en tevens de benodigde warmte leveren die via een lokaal warmtenet kan worden geleverd, als basislast of alleen als pieklast. Dit zal sterk afhangen van de lokale alternatieven.

Basisnetwerk openbare H₂-vulpunten





De waterstofoptie bevindt zich nog op een relatief laag TRL-niveau. Er zijn nog vele vragen die beantwoord moeten worden zoals over de geschiktheid van het regionale en lokale aardgassysteem voor waterstof, over de veiligheidsaspecten en de vereiste veiligheidsmaatregelen, en over de kosten van aanpassing om het systeem geschikt te maken voor waterstof. Hoewel er een lichte voorkeur voor pure waterstof lijkt te ontstaan, blijft ook de vraag of de transitie het best kan verlopen via het geleidelijk opvoeren van bijmenging van waterstof in het aardgas, of door regio voor regio in één keer om te zetten naar 100% waterstof de voorkeur verdient. Daarbij is van belang dat oplossingen in proeftuinen onder praktijkcondities gecontroleerd kunnen worden getest en geoptimaliseerd.

Gezien de grote en lastige opgave die voorligt voor de bestaande gebouwde omgeving en de mogelijk gelimiteerde beschikbaarheid van duurzame biomassa voor groen gas, is het zaak vroegtijdig de mogelijkheden voor inzet van waterstof voor LTW te verkennen, te ontwikkelen en te testen. Hierbij ligt de uitdaging met name bij maatschappelijke en institutionele issues.

Tabel 3 | Overzicht en status van waterstoftoepassingen onder de energiefunctionaliteit Lagetemperatuurwarmte

Ontwikkelingsstadium toepassing H ₂	Verkenning van en onderzoek naar haalbaarheid	Industrieel onderzoek en experimentele ontwikkeling	Demonstratie, praktijkprojecten en marktintroductie
Energie- functionaliteit	TRL 1-3 marktrijp over 10+ jaar	TRL 4-7 marktrijp over 3-10 jaar	TRL 8-9 (bijna) marktrijp
	Lagetemperatuurwarmte		
Energetisch/brandstof		- Vervanging aardgas in bestaande bouw waar elektrificatie of warmtenetten niet haalbaar zijn - Wijkcentrales in combinatie met lokale warmtenetten	

Noot: Ordening is indicatief, afbakening van TRL en marktrijpheid zal in de praktijk minder scherp zijn. Kleurcodering: mate van prioriteit voor ontwikkeling van activiteiten in Nederland uit oogpunt van potentieel voor emissiereductie en kansen voor het Nederlandse bedrijfsleven; groen = hoogste prioriteit, oranje = wel van belang, niet hoogste prioriteit, rood = van beperkt belang, nu geen prioriteit.



4.4 Energiefunctionaliteit Mobiliteit

De energiefunctionaliteit Mobiliteit is verantwoordelijk voor circa 20% van broeikasgasemissies in Nederland. Voor Europa ligt het aandeel iets hoger, en inclusief internationale lucht- en scheepvaart is vervoer met 27% van de emissies zelfs Europa's grootste klimaatprobleem. Daarnaast is het de belangrijkste oorzaak van luchtverontreiniging in steden. Emissiearm vervoer staat daarom hoog op de beleidsagenda, zowel in Nederland als in Europa.

Waterstof als brandstof voor brandstofcel-elektrische voertuigen kan een belangrijke bijdrage leveren aan de emissiearme invulling van de vervoersbehoefte van mensen en goederen. Samen met batterijen biedt de combinatie brandstofcellen en waterstof in potentie de mogelijkheid al het wegverkeer te elektrificeren. Naast een positief effect op de uitstoot van broeikasgasemissies, leidt dit tot het vermijden van emissies van onverbrande koolwaterstoffen, NO_x en SO_2 , en vergaande reducties van fijnstof en geluidemissies.

Elektrische voertuigen (met batterijen) en waterstofvoertuigen (met brandstofcellen) zijn beide elektrisch aangedreven voertuigen. Hoewel concurrentie in de markt kan optreden zijn de opties vooral complementair aan elkaar. Voordeel van waterstof is dat relatief veel energie kan worden opgeslagen in tanks waarbij het gewicht en volume niet evenredig schalen met de hoeveelheid energie zoals bij batterijen. Daarnaast kan ook bij grotere hoeveelheden snel worden getankt zonder hoge kosten voor versterking van de elektrische infrastructuur. De optie leent zich hierdoor goed voor elektrificatie van de meer energie-intensieve mobiliteits- en transporttoepassingen, zeker daar waar langdurige en flexibele inzet van voertuigen is vereist. In de huidige situatie zijn dit vooral dieselveertuigen. Hoewel het aantal hiervan kleiner is dan benzinevoertuigen, ligt het totale dieselvebruik wel aanzienlijk hoger dan dat van benzine. Op het ogenblik is de verhouding voor Nederland ongeveer 250 PJ diesel (18,5 Mton CO_2) en 165 PJ benzine (11,9 Mton CO_2). De inzet van waterstofvoertuigen heeft dus potentieel effect op een groter aandeel van de emissies in de sector vervoer dan elektrische voertuigen.

Tabel 4 toont een breed palet aan vervoerstoeppassingen die zich in verschillende stadia van ontwikkeling bevinden. Op het gebied van auto's is commercialisatie al van start gegaan met de introductie van drie modellen in de grotere autosegmenten door Hyundai, Toyota en Honda. In 2018 wordt de introductie van een plug-in brandstofcelhybride model verwacht van Mercedes als antwoord op de nog beperkte beschikbaarheid van vulpunten. Aanvullende modellen worden verwacht van deze en andere fabrikanten voor 2020, terwijl productieaantallen van de bestaande modellen worden opgeschaald naar enkele tienduizenden per jaar. In Nederland is gunstige fiscale ondersteuning aanwezig voor deze auto's. Continuering daarvan in combinatie met ondersteuning voor de opbouw van een basisnetwerk van openbare vulpunten kan een solide basis zijn om deze optie in Nederland snel van de grond te krijgen.



Tabel 4 | Overzicht en status van waterstoftoepassingen op het gebied van de energiefunctionaliteit Vervoer

Ontwikkelingsstadium toepassing H ₂		Verkenning van en onderzoek naar haalbaarheid	Industrieel onderzoek en experimentele ontwikkeling	Demonstratie, praktijkprojecten en marktintroductie
Energie-functionaliteit		TRL 1-3 marktrijp over 10+ jaar	TRL 4-7 marktrijp over 3-10 jaar	TRL 8-9 (bijna) marktrijp
		Vervoer		
Complementair aan batterij-elektrisch	Mobiliteit (personen)	- Rondvaartboten - Veerboten	Treinen	- Personenauto's - Bussen
		- Cruiseschepen - Vliegtuigen		
	Transport & Logistiek (goederen)	- Bestelauto's - Mobiele werktuigen	- Vuilniswagens - Veegwagens - Lichte vrachtwagens - Zware vrachtwagens	Heftrucks
		- Binnenvaartschepen - Vrachtschepen		

Noot: Ordening is indicatief, afbakening van TRL en marktrijpheid zal in de praktijk minder scherp zijn. Kleurcodering: mate van prioriteit voor ontwikkeling van activiteiten in Nederland uit oogpunt van potentieel voor emissiereductie en kansen voor het Nederlandse bedrijfsleven; groen = hoogste prioriteit, oranje = wel van belang, niet hoogste prioriteit, rood = van beperkt belang, nu geen prioriteit.

Waterstofbussen voor het openbaar vervoer zijn iets minder ver ontwikkeld maar staan wel sterk in de belangstelling. Op het gebied van bussen is Europa nog koploper en heeft Nederland met VDL een potentieel sterke speler. In het kader van het Europese Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking programma wordt gewerkt aan de gezamenlijke inkoop van honderden bussen door regio's om zo de kosten omlaag te krijgen. In het kader hiervan komen er 50 naar Nederland in de periode 2019-2020. Deze toepassing heeft hoge prioriteit om invulling te kunnen geven aan het Nederlandse streven om alle OV-bussen voor stad- en streekvervoer nul-emissie te hebben in 2030. Ook lijkt een versnelling op dit gebied aanstaande waar mogelijk van kan worden geprofiteerd. Zo is Zuid-Korea van plan om binnen enkele jaren 26.000 bussen te vervangen door bussen op waterstof, en werkt Shanghai aan een programma voor 3.000 bussen in 2020.



Belangstelling vanuit steden is er ook voor vuilniswagens en veegwagens op waterstof. In Nederland zijn diverse partijen actief op dit gebied. Na eerdere projecten met een en daarna twee vuilniswagens, is er recent een project gestart voor productie van nog eens 15 stuks waarvan er 9 in Nederland zullen worden ingezet en de rest elders in Europa. Het zijn geen grote markten maar vanwege de zichtbaarheid ervan en de rol die ze vervullen (schoonmaken) binnen de gebouwde omgeving zijn het wel belangrijke markten die kunnen bijdragen aan acceptatie van waterstof.

Toepassingen met grote potentie liggen op het gebied van goederenvervoer, variërend van bestelauto's tot zware vrachtwagens. Recent zijn in Zwitserland en Noorwegen de eerste projecten van start gegaan met zware vrachtwagens die in de praktijk worden getest voor distributie van goederen voor grote supermarktketens. In Nederland lopen projecten voor prototypes voor trucks van 40 ton en 27 ton. Een van de trucks gaat in ieder geval naar Colruyt (supermarktketen) in België. Met een aantal partijen die trucks in kleine aantallen (om)bouwen, en VDL en DAF voor opschaling van aantallen, liggen er kansen voor Nederland op dit gebied, ook vanwege de omvang van de transport- en distributiesector in Nederland. Activiteiten zouden in eerste instantie kunnen worden gebundeld rond een of meerdere grote logistieke hubs. Hier is een combinatie mogelijk met waterstofheftrucks en hefwerktuigen die al commercieel beschikbaar zijn. In de Verenigde Staten, waar reeds enkele tienduizenden in bedrijf zijn, blijken ze vooral voordelen te bieden in centra met intensief 24/7 continubedrijf. Naarmate de kosten dalen worden de mogelijkheden voor toepassing groter. Daarom begint de optie ook in Europa voet aan de grond te krijgen.

Toepassingen in boten en schepen biedt ook kansen voor Nederland met z'n sterke maritieme sector. Een deel van de vloot aan binnenvaartschepen is aan vervanging toe en omdat de schepen reeds lang in de vaart zijn en er niet al te veel momenten meer zijn tot 2050 om tot verduurzaming over te gaan. Waterstof staat hier nog in de kinderschoenen maar biedt mogelijkheden in combinatie met de trend van elektrificatie van de aandrijving, en ontwikkeling van modulaire concepten. Hierbij kan de *power*-module in eerste instantie nog een dieselgenerator zijn of een generator op LNG. Later zou deze kunnen worden vervangen door een brandstofcelkrachtbron op waterstof. Dit moet al worden meegenomen bij het ontwerp van nieuwe schepen. Daarvoor is het nu de tijd om zaken serieus in gang te zetten en via ontwerpstudies en pilotprojecten oplossingen te verkennen en testen.

De overige toepassingen in tabel 4 hebben een lagere prioriteit omdat de tijd nog niet rijp is voor deze toepassingen, er weinig herhalingspotentieel of doorgroeipotentieel is binnen Nederland, of omdat er geen of slechts een beperkt aantal Nederlandse spelers zijn op die markten.

4.5 Inschatting theoretisch potentiële vraag naar waterstof voor alle toepassingen

In deze paragraaf schetsen we de theoretisch potentiële vraag naar waterstof voor allerlei toepassingen om gevoel te krijgen voor de ordegroottes. De inschattingen zijn tekstueel onderbouwd om anderen mee te nemen in de redeneerlijn die tot de gegeven uitkomsten



leiden. In tabel 5 is in de eerste kolom een overzicht gegeven van (zeer indicatieve) schattingen van de mogelijke vraag die kan ontstaan naar waterstof voor verschillende doeleinden om een gevoel te krijgen voor de uitersten én de grote opgave waar we voor staan om de energietransitie te realiseren. Een nadere onderbouwing van de cijfers is beschreven in bijlage 2. In de tweede kolom is dezelfde vraag weergegeven, maar dan omgerekend naar miljoen ton waterstof. Alles bij elkaar opgeteld komen de inschattingen uit op bijna 1700 PJ, wat omgerekend neerkomt op ruim 14 Mton waterstof. Dat is meer dan 22 maal de huidige industriële waterstofvraag in Nederland, en qua ordegrrootte een kwart van de huidige wereldwijde productie van waterstof voor industriële doeleinden.

Tabel 5 | Overzicht van de indicatieve inschattingen van mogelijke vragen naar waterstof in Nederland in een klimaatneutrale energievoorziening met indicatieve vertaling naar de hoeveelheid wind op zee, of aardgas met CO₂-opslag die nodig is voor productie van die hoeveelheid.

Functionaliteit	Waterstofvraag		Wind op Zee Elektrolyse		Aardgas/CCS Reforming	
	PJ/j	Mton/j	TWh/j	GW	PJ/j	Mton CO ₂ /j
 Hogetemperatuurwarmte: - Non-energetisch gebruik - Proceswarmte - Duurzame chemie - Duurzame brandstoffen - Staalproductie	50	0,4	21	4,8	67	3,8
	100	0,8	42	9,6	133	7,5
	480	4,0	202	46,1	640	46,2
	700	5,8	295	67,3	933	52,8
	20	0,2	8	1,9	27	1,5
 Mobiliteit en Transport	125	1,0	53	12,0	167	9,4
 Kracht en Licht	115	1,0	48	11,1	153	8,7
 Lagetemperatuurwarmte	100	0,8	42	9,6	133	7,5
	1690	14,1	711	161	2253	128

Aannames: Energieinhoud waterstof is 120 MJ/kg of 33,3 kWh/kg (LHV); Elektriciteitsverbruik elektrolyse 50 kWh/kg H₂; Wind op Zee 50% vollasturen per jaar (4380 uur); Reforming 75% efficiency (LHV); Emissiefactor aardgas 56,6 kton CO₂/PJ.

De rest van de tabel geeft cijfers voor de productie van waterstof. De 3e en 4e kolom tonen resultaten voor het geval dat de waterstof volledig wordt geproduceerd door splitsing van water via elektrolyse met behulp van energie van wind op zee. De 3e kolom geeft een maat voor de hoeveelheid energie die nodig is voor productie, en de 4e kolom laat zien hoeveel windvermogen er ongeveer nodig is om die hoeveelheid energie te oogsten. In 2016 was het

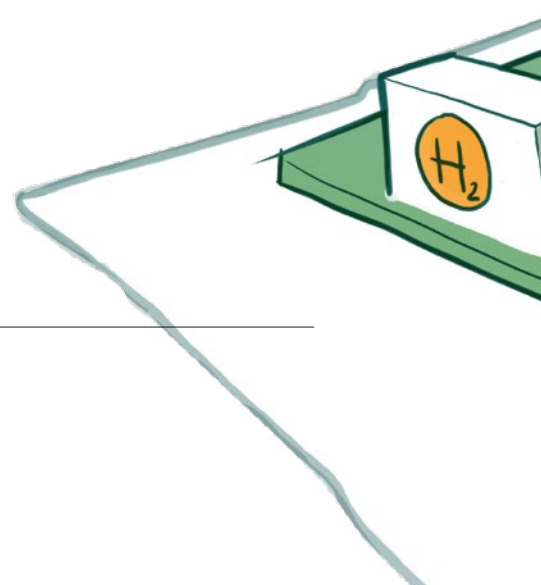


nettoverbruik van elektriciteit in Nederland ruim 113 terawattuur (TWh). Voor de productie van waterstof met energie van wind op zee zou dus nog eens ruim 6 maal zoveel energie nodig zijn. Het geïnstalleerd vermogen aan wind op zee is op het ogenblik 957 megawatt (MW), nog net geen 1 gigawatt (GW). Het resultaat in de tabel geeft aan dat dit meer dan 160 maal zou moeten worden uitgebreid. Dit gaat het eigen potentieel, dat voor Nederland op 40 tot 80 GW¹¹ wordt geschat, te boven. Productie van waterstof met ‘eigen’ wind op zee is dus erg belangrijk, maar import van waterstof is in de toekomst noodzakelijk als we de waterstofbehoefte volledig en volledig duurzaam willen invullen.

De 5e en 6e kolom geven de resultaten weer voor het geval dat de waterstof volledig wordt geproduceerd via reforming van aardgas waarbij de CO₂ die daarbij wordt gevormd volledig wordt afgevangen en opgeslagen. Met de aannamen die onderaan de tabel zijn weergegeven, komt de schatting voor de hoeveelheid aardgas op ruim 2250 PJ. Ter vergelijking, in 2015 bedroeg het totale aardgasverbruik in de energievoorziening bijna 1200 PJ. Volledige afvang en opslag van de CO₂ vergt een opslagcapaciteit van ongeveer 128 miljoen ton per jaar. Dit overstijgt ruimschoots de huidige inschatting van het Nederlands potentieel voor opslag dat 10 tot 50 miljoen ton per jaar bedraagt voor een periode van 30 jaar. Het mogelijke potentieel aan CO₂-opslag ligt dus een factor 2,5 tot 10 lager dan de berekende waarde. Voor deze optie zou ook ruimschoots van opslagpotentieel elders gebruik moeten worden gemaakt.

Nader beschouwd lijkt inzet van aardgas voor de productie van waterstof voor duurzame chemie en (vloeibare) transportbrandstoffen echter geen voor de hand liggende optie. Het betreft eerst splitsing van een koolwaterstof met afvang en opslag van de CO₂ waarna de waterstof die is geproduceerd weer wordt gecombineerd met CO₂ of koolstof van andere bronnen. Voor deze toepassingen ligt inzet van duurzame waterstof meer voor de hand. In dat geval reduceren de cijfers voor aardgas tot 680 PJ en een hoeveelheid CO₂ van ruim 38 miljoen ton per jaar. Dit valt wel binnen de bandbreedte voor het potentieel van mogelijkheden voor CO₂-opslag in Nederland.

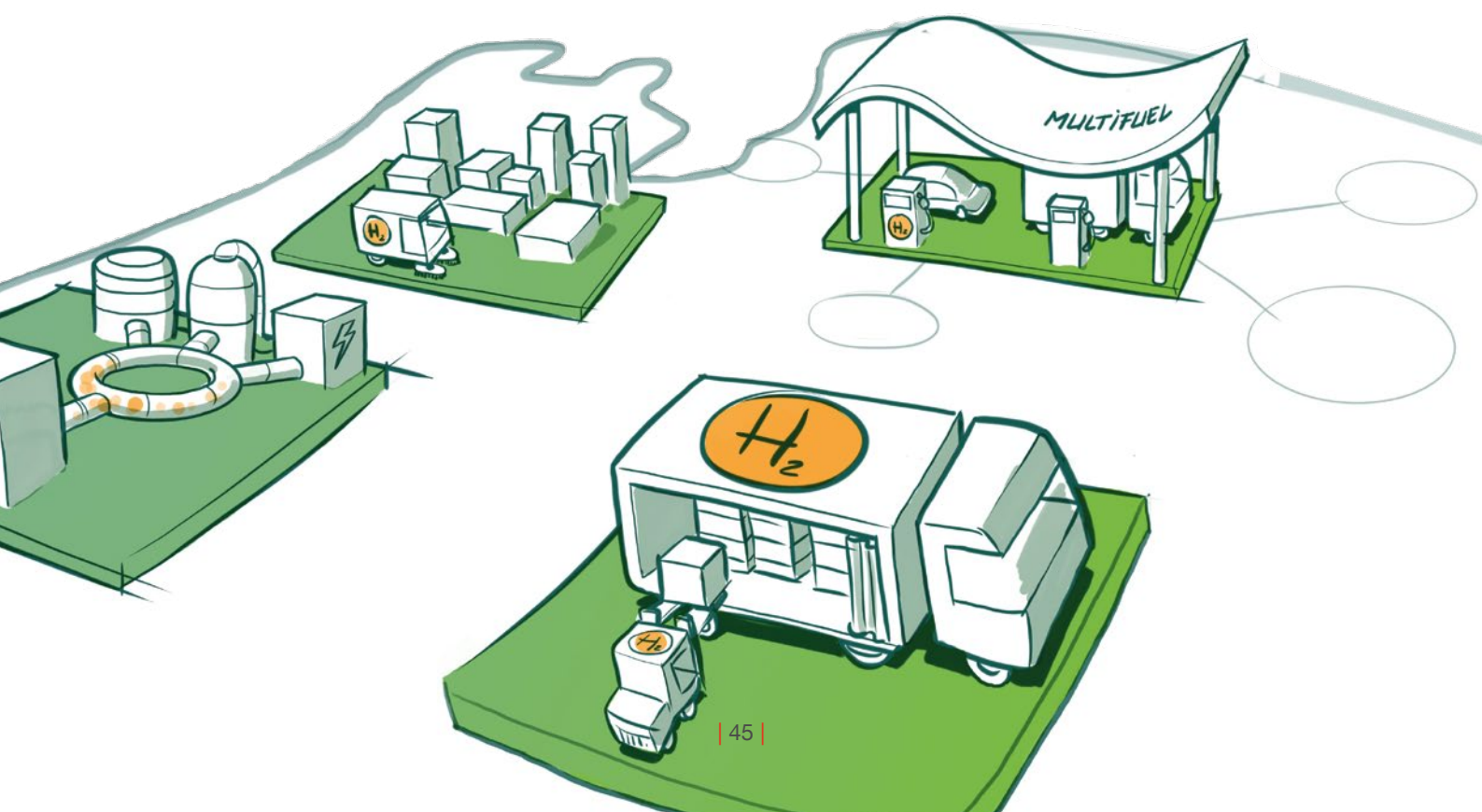
11 J. Ros en B. Daniëls, Verkenning van Klimaatdoelen, PBL, 9 oktober 2017.





Omdat voor productie van chemische producten en materialen en voor synthetische vloeibare brandstoffen koolstof nodig is, ligt inzet van duurzame biomassa hier (meer) voor de hand. Wanneer de hoeveelheid koolstof hierin niet voldoende is zal dit moeten worden aangevuld met koolstof uit afvalverwerking (circulaire koolstof) of koolstof van CO₂-afvang uit de lucht (air capture) of winning uit water. Het beschikbare potentieel van duurzame biomassa wordt voor Nederland in de eerdergenoemde PBL/ECN-studie (hoofdstuk 3) geschat op 250 tot 700 PJ per jaar 8. Als gevolg van conversieverliezen zal waarschijnlijk niet de volledige energiewaarde hiervan ten goede kunnen komen aan chemische producten en brandstoffen. Maar wordt hier geen rekening mee gehouden, dan daalt de inschatting van de waterstofvraag voor deze toepassingen naar 480-930 PJ. Productie van deze hoeveelheid waterstof vergt 200-388 TWh elektriciteit waarvoor ongeveer 46-88 GW wind op zee nodig is. Dit valt vrijwel samen met de potentiële schatting van 40-80 GW voor wind op zee. Hierbij moet echter worden bedacht dat inzet van wind op zee ook nodig is, samen met wind op land en zon-PV, voor de productie van direct gebruik van elektriciteit (batterij-elektrische auto's, rail, warmtepompen, apparaten, verlichting etc.).

Verder is het bij volledige benutting van het eigen potentieel aan wind en zon voor deze toepassingen ook niet meer mogelijk om de klimaatneutrale waterstof uit aardgas/CCS geleidelijk aan te vervangen door waterstof geproduceerd op basis van eigen duurzame energie. Vervanging zal dan moeten plaatsvinden door import van duurzame waterstof, d.w.z. waterstof die elders is geproduceerd met energie van duurzame bronnen. Een ander (ongewenst) scenario kan zijn dat de nieuwe duurzame chemische industrie en de productie van synthetische brandstoffen langzaam naar elders verhuisd waarmee er ruimte blijft voor eigen duurzame waterstof die kan worden ingezet in vervoerstoepassingen, in de energiesector en in de gebouwde omgeving.





Voor de productie van waterstof bestaan verschillende routes en technologieën. Hier worden de meest gangbare technologieën behandeld, inclusief een indicatie van de kosten.



5 | Productieroutes en kosten van waterstof

Voor de productie van waterstof bestaan verschillende routes en technologieën. Hier worden de meest gangbare technologieën behandeld, inclusief een indicatie van de kosten.

5.1 Grootschalige productie van waterstof uit aardgas via Steam Methane Reforming

Waterstof wordt wereldwijd grootschalig geproduceerd door reforming van aardgas. SMR, waarbij reforming plaatsvindt in een reactie met stoom, is de meest toegepaste variant. De capaciteit van een standaard fabriek bedraagt typisch 100.000 m³ per uur, ofwel 9 ton waterstof per uur.¹² Het proces bestaat uit meerdere stappen maar kan grofweg worden opgesplitst in twee delen. In het eerste deel vindt reforming van aardgas met stoom plaats bij temperaturen van 800-1000 °C. Hierbij wordt een syngas gevormd dat bestaat uit koolmonoxide (CO) en waterstof (H₂). Het tweede deel is de water-gas-shift-stap. Deze vindt bij lagere temperatuur plaats. De CO uit het syngas reageert hierbij met nog meer stoom (H₂O) waarbij CO₂ en meer waterstof wordt gevormd.

In een gasscheidingssectie worden het mengsel van CO₂ en waterstof vervolgens gescheiden waarbij een geconcentreerde stroom CO₂ ontstaat die zich goed leent voor CO₂-afvang en -opslag. Dit is een standaard industrieel proces dat op grote schaal wordt toegepast bij de productie van ammoniak en kunstmest vanwege de CO₂ die nodig is bij de conversie van ammoniak naar ureum.

Bij SMR wordt standaard een deel van het aardgas niet gebruikt voor omzetting naar waterstof maar voor productie van stoom en externe verwarming van de reactor. Hierbij ontstaan rookgassen met een lage CO₂-concentratie. Volledige afvang van CO₂ bij SMR is daarom lastig. Standaard ligt het afvangpercentage rond 50-60%. Door procesaanpassingen zijn hogere afvangpercentages mogelijk tot circa 90%, maar dit gaat wel gepaard met een daling van het rendement in de orde van 7%-punten.

Autothermal Reforming (ATR) en Partial Oxidation (POX) zijn twee varianten waarbij volledige afvang van CO₂ mogelijk is. Bij deze vormen wordt de hogetemperatuurproceswarmte geproduceerd door verbranding van een deel van het aardgas in de reactor met zuivere zuurstof. Hierdoor blijft alle CO₂ in de geconcentreerde processtroom. De investeringskosten voor het proces zijn echter hoger dan voor SMR vanwege de luchtscheider voor zuurstof.

¹² IEAGHG Technical report 2017-02, Techno-Economic Evaluation of SMR based Standalone (Merchant) Hydrogen Production Plant with CCS, IES Greenhouse Gas R&D Programme, February 2017.



De processen vereisen daarom nog meer schaalgrootte om concurrerend te zijn. Voor de toekomst ligt hier mogelijk wel een interessante combinatie met waterstofproductie via elektrolyse omdat hierbij zuurstof beschikbaar komt.

De productiekosten voor waterstof uit aardgas zijn sterk afhankelijk van de aardgasprijs. Bij grootschalige productie via SMR maakt aardgas 70-80% uit van de productiekosten. Grofweg liggen de productiekosten op 1,0-1,5 €/kg H₂.

5.2 Kleinschalige productie met aardgas via SMR

Transport van waterstof is relatief duur, zeker over grote afstanden. Het alternatief is om waterstof ter plekke bij de klant te produceren (op het tankstation, of bij een industriële klant met een beperkte vraag). Hiertoe zijn en worden door diverse partijen (o.a. het Nederlandse HYGEAR) kleinschalige SMR-eenheden ontwikkeld met capaciteiten van typisch 100 en 300 Nm³/uur; dit komt overeen met ca. 200 en 600 kg/dag.

Het principe van productie met de kleinschalige units is precies hetzelfde als bij grootschalige productie. De eenheden zijn echter niet naar beneden geschaalde fabrieken, maar volledig opnieuw ontworpen processen om kleinschalig een acceptabele efficiency te bereiken. Rendementen liggen in de orde van 60-65%. Voor de korte termijn (2020) is de inschatting dat de kosten voor productie van waterstof met dergelijke units kan dalen naar 4-5 €/kg, met uitzicht op verdere daling naar 3-4 €/kg, of zelfs iets daaronder, in de periode richting 2030. Dit kostenniveau is concurrerend met grootschalige productie in combinatie met transport.

De productie-units worden bij voorkeur continu bedreven. De huidige markt voor toepassing ligt daarom vooral in productie op locatie bij kleinschalige industriële verbruikers. Onderhoud en operationele kosten kunnen oplopen bij sterk variabel bedrijf zoals die te verwachten is in de beginperiode van tankstations. Ook wordt waterstof op relatief lage druk geproduceerd waardoor er ter plekke bij een vulpunt een aanzienlijke compressiebehoefte is. Een ander aandachtspunt is het ruimtebeslag op de locatie. Van geval tot geval zal daarom moeten worden bekeken welke optie het meest praktisch en kosteneffectief is. Lokale beschikbaarheid van groen gas of biogas voor productie van duurzaam waterstof kan hierbij ook een rol spelen, hoewel indirecte koppeling hiermee (via certificaten) natuurlijk ook mogelijk is.

5.3 Productie van waterstof via elektrolyse

Momenteel wordt elektrolyse van water bij uitstek beschouwd als de technologie voor de productie van duurzame waterstof. Voorwaarde is dan wel de inzet van duurzame elektriciteit. Bij de huidige elektriciteitsmix, met nog een groot aandeel steenkool, is de productie van waterstof via elektrolyse echter nog koolstofintensiever dan de productie met aardgas via SMR, alhoewel dit in de komende jaren door de snelle ontwikkeling van wind- en zonprojecten zal veranderen. In bijlage 4 wordt dit nader toegelicht. Er bestaan diverse elektrolysetechnologieën. In alle gevallen wordt elektriciteit ingezet voor de splitsing van water met als nettoresultaat de



productie van waterstof en zuurstof.¹³ De bekendste en verst ontwikkelde varianten zijn de conventionele alkaline-elektrolyse (AEL) en Proton Exchange Membrane-elektrolyse (PEM). Beide werken bij lage temperaturen van 60-70 °C. Een derde lagetemperatuurvariant is Alkaline Exchange Membrane-elektrolyse (AEM). Het is de minst ver ontwikkelde variant. De technologie bevindt zich nog op labschaal. Iets verder ontwikkeld, maar ook nog steeds op een laag TRL-niveau, is een vierde variant: de solid oxide electrolyse cell (SOEC). Deze technologie is verwant aan de hoge temperatuur vast-oxide brandstofcel (SOFC) en werkt bij temperaturen van 600-800 °C. Omdat het bij die temperaturen minder moeite kost om water te splitsen belooft de technologie een veel hoger elektrisch rendement dan de lagere temperatuurvarianten. Voorwaarde is wel dat klimaatarme hogetemperatuurwarmte beschikbaar is om dit ook te kunnen vertalen in een betere CO₂-prestatie.

Zowel AEL als PEM zijn commercieel verkrijgbaar op een schaal van 1-5 MW.¹⁴ De investeringskosten voor AEL-elektrolyse liggen op het ogenblik rond 1.000 €/kW. Innovatie, optimalisatie en toename van volumes kunnen leiden tot een daling tot 370-800 €/kW richting 2030.¹⁵ Een indicatie voor wat er nog mogelijk is wordt gegeven door een recente aankondiging van een contract voor levering van een 100 MW AEL-systeem voor omgerekend 450-500 €/kW.¹⁶ Naar verwachting stijgt het rendement van systemen van nu gemiddeld 61% (55 kWh/kg) naar minimaal 67% (50 kWh/kg).

Voor PEM-elektrolyse liggen de investeringskosten nu rond 1400 €/kW. De kosten kunnen snel dalen bij grotere systemen en grotere aantallen, maar schattingen voor 2030 door de markt laten een grote bandbreedte zien: 250-1270 €/kW, met een middenwaarde van 760 €/kW. Het elektriciteitsverbruik van PEM-systemen ligt met circa 60 kWh/kg op het ogenblik nog iets hoger dan voor AEL, maar verbetert snel en biedt naar verwachting iets meer ruimte dan AEL tot een niveau ruim onder 50 kWh/kg in 2030 (efficiency >70%). Bij een maximaal aantal draaiuren per jaar en elektriciteitskosten van 70-80 €/MWh worden de productiekosten met AEL nu rond 5,0-5,5 €/kg geschat en voor PEM op 6,0-6,5 €/kg. Richting 2030 zullen de kosten naar verwachting convergeren en voor MW-schaal on-site-productie uitkomen rond 3,0-3,5 €/kg. Tegen die tijd zullen er ook grote eenheden zijn van 10-100 MW (4-40 ton/dag), en mogelijk meer, die centraal zullen worden opgesteld. Productiekosten kunnen hiermee uitkomen ruim onder 3 €/kg, en mogelijk zelfs onder 2 €/kg. Hiermee zouden de kosten concurrerend worden met centrale productie op basis van aardgas, zeker als aardgas- en CO₂-prijzen oplopen, en productie wordt gecombineerd met CCS. Bij lage investeringskosten worden de productiekosten echter in toenemende mate afhankelijk van de elektriciteitsprijs, en de ontwikkeling daarvan is in hoge mate onzeker.¹⁷

13 Voor elke m³ waterstof wordt er 0,5 m³ zuurstof geproduceerd; ongeveer 8 kg zuurstof per kg waterstof. De marktwaarde van zuurstof weegt bij productie op beperkte schaal niet op tegen de investeringen die nodig zijn voor afvang, zuivering en opslag. Bij productie op grote schaal kan dit veranderen en zijn wellicht interessante combinaties mogelijk zoals inzet bij biomassavergassing, of reforming van aardgas met volledige CO₂-afvang.

14 Lympieropoulos, N. (2017), FCH JU support to Electrolysis for Energy Applications. Presentation at the International Conference on Electrolysis 2017, Kopenhagen, 12 June 2017.

15 Bertuccioli L., et. al., (2014), Development of Water Electrolysis in the European Union – Final Report. E4tech Sàrl with Element Energy Ltd for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, February 2014.

16 <http://h2vproduct.net/wp-content/uploads/2017/07/annonce-bourse-dOslo.pdf>

17 Voor een snelle indicatie van productiekosten: bij een verbruik van 50 kWh/kg nemen de productiekosten toe met 0,5 €/kg voor elke 10 €/MWh (of 1 €/kWh) stijging van de elektriciteitsprijs.



5.4 Overige opties voor duurzame waterstofproductie

In een recente studie uitgevoerd in opdracht van de FCH JU naar andere opties voor duurzame waterstofproductie dan via elektrolyse zijn in totaal elf opties geïdentificeerd.¹⁸ Na evaluatie zijn de volgende vijf opties als mogelijk kansrijk beoordeeld:

1. Pyrolyse en vergassing van biomassa
2. Vergisting van biomassastromen tot biogas in combinatie met reforming van biogas
3. Thermochemische splitsing van water
4. Fotokatalyse (Foto-elektrochemische cel, PEC)
5. Vergassing van biomassa in superkritisch water

In drie routes wordt de energie geleverd door biomassa waarbij de waterstof deels afkomstig is uit biomassa en deels uit water. Gezien de discussies over beschikbaarheid van duurzame biomassa, en de vele alternatieven voor inzet van biomassa in toepassingen waar naast duurzame waterstof behoefte is aan klimaatneutrale koolstof, is het de vraag of inzet van biomassa voor enkel waterstofproductie op de lange termijn nagestreefd moet worden. Er lijkt meer behoefte aan inzet van biomassa, direct of via syngas, waar ook benutting van de koolstof een rol speelt. Hierbij kan worden gedacht aan duurzame chemische producten en materialen, en aan duurzame biobrandstoffen en synthetische brandstoffen voor de lucht- en scheepvaart.

In de overige twee routes is zonne-energie de energiebron en komt de waterstof volledig uit water. Voor de thermochemische routes is hogetemperatuurwarmte van geconcentreerd zonlicht nodig (via CSP – concentrated solar power). Dit is op veel locaties niet mogelijk, en is voor Nederland geen optie. Het kan echter wel een rol spelen in importscenario's. Een alternatief is de inzet van warmte uit nucleaire reactoren.

De laatste optie betreft de productie van waterstof via een foto-elektrochemische cel. Dit is een interessante optie omdat deze technologie de functionaliteiten van zonnepanelen en elektrolyse combineert. Het is in feite een soort zonnecel die is ondergedompeld in water. Bij inval van licht wordt hierbij door reacties op het oppervlak direct waterstof geproduceerd. Tot op heden zijn echter nog geen materialen gevonden die efficiency, levensduur en kosten in voldoende mate verenigen om er haalbare systemen van te maken. Er is nog een lange weg te gaan voordat betere prestaties worden bereikt dan de combinatie van de afzonderlijke zon-PV en elektrolysesystemen. Deze combinatie heeft de flexibiliteit om zonne-energie in te zetten in de vorm van elektriciteit en als waterstof.

De TRL-niveaus van de opties variëren van 3 voor fotokatalyse tot 7 voor superkritische vergassing, tot 8 voor vergisting en reforming van biogas. Productiekosten voor de verschillende opties in 2030 zijn geschat op basis van praktijkgegevens en modelstudies. Voor kleinschalige (0,2-4 ton/dag) lokale productie zijn de kosten voor vergisting in combinatie met reforming het laagst ingeschat met 3,5-5,5 €/kg. De overige biomassa-opties komen op

¹⁸ <http://www.fch.europa.eu/publications/study-hydrogen-renewable-resources-eu>



4,5-6,5 €/kg. Voor meer grootschalige centrale productie (>20 ton/dag) zijn kosten berekend van 3,0-3,5 €/kg voor vergassing, van biomassa, 4,5-5,0 €/kg voor fotokatalyse en 6,0-6,5 €/kg voor productie via thermochemische cycli. De meeste opties vergen nog veel R&D, de kosten zijn daarom zeer indicatief.

5.5 Productiekosten en prijzen van waterstof

De vermelde kosten hebben betrekking op de kosten voor productie van waterstof met de diverse technologieën. Bij interne productie van waterstof als onderdeel van een samenhangend geheel van processen, zoals in een (petro)chemisch complex, zullen de productiekosten van waterstof vrijwel gelijk zijn aan de prijs van waterstof. Bij inzet elders komen er tal van kosten bovenop en ligt de prijs aanzienlijk hoger dan de productiekosten.

Bij externe levering zijn er bijvoorbeeld ook kosten voor het op druk brengen (compressie) of vloeibaar maken van waterstof ten behoeve van transport en eventueel voor tussenopslag tussen productie en transport. Bij vraag naar specifieke kwaliteiten zijn er extra kosten voor zuivering. Onderhoud en keuring van cilinders, tubes, en faciliteiten voor opslag op locatie brengen ook kosten met zich mee. Daarnaast zijn er algemene bedrijfskosten en zal er sprake zijn van een commerciële marge. Tot slot zijn er kosten voor transport die in de orde van 1,5-2,5 €/km bij levering per truck liggen. De uiteindelijke prijs van waterstof beslaat een grote bandbreedte en is op het ogenblik sterk afhankelijk van de gewenste kwaliteit, de geleverde hoeveelheid, de frequentie van levering en de transportafstand.

Naar schatting bedraagt de totale prijs van gecomprimeerd waterstof, geleverd aan een tankstation, op het ogenblik ongeveer 5 €/kg. Bij schaalgrootte kan door ketenoptimalisatie de prijs naar verwachting dalen tot onder 4 €/kg.¹⁹ Deze prijs is echter nog niet gelijk aan de prijs van waterstof 'aan de pomp'. Hiertoe dienen ook de kosten van het vulpunt en tankstation te worden meegenomen, evenals belastingen en eventuele heffingen.²⁰ De bijdrage van het vulpunt is sterk afhankelijk van de benuttingsgraad en kan zeker in de opstartfase aanzienlijk zijn en tot een grote onrendabele top leiden. Om deze zo klein mogelijk te houden qua omvang en tijdsduur is het organiseren en bundelen van vraag rond de eerste vulpunten van groot belang.

5.6 Onderlinge vergelijking SMR en elektrolyse

Figuur 3 toont een vergelijking van de productiekosten van waterstof via SMR en elektrolyse voor een brede set aan condities. Hier wordt het beeld op hoofdlijnen getoond. In bijlage 3 wordt nader ingegaan op de productiekosten voor elektrolyse en SMR in combinatie met CCS.

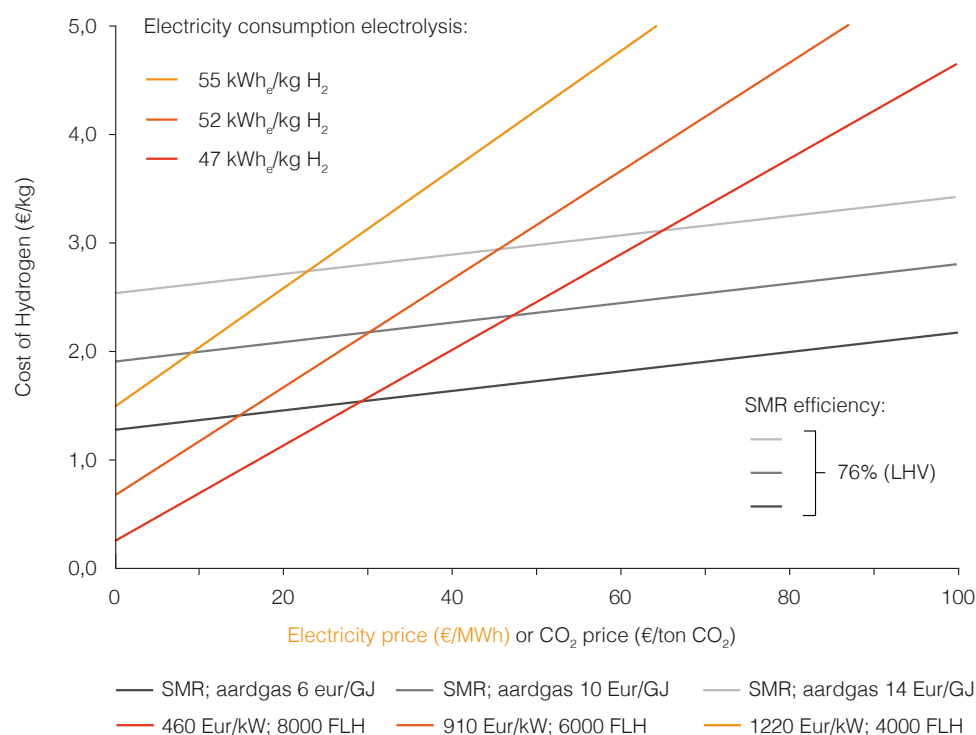
¹⁹ Deze cijfers sluiten aan bij de doelstelling dat waterstof geleverd aan een tankstation in 2023 zouden moeten liggen in de bandbreedte 4,5-7,0 €/kg H₂ zoals opgenomen in het Multi-Annual Implementation Plan (MAIP) 2014-2020 van de Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU).

²⁰ Dit betreft BTW en eventueel accijns op waterstof. Gezien de huidige zeer beperkte omvang wordt er nog geen accijns op waterstof geheven. Dit kan in de toekomst veranderen, en kan een grote impact hebben op de businesscase voor vulpunten en toepassing van waterstofvoertuigen. Het is daarmee ook een belangrijk instrument om groei te kunnen stimuleren.



De grijs gekleurde lijnen geven de productiekosten voor een standaard SMR-installatie met een capaciteit van 100.000 m³/h die volcontinu produceert (capaciteitsfactor 95%) met een totaalrendement van aardgas naar waterstof van 76%. De productiekosten zijn gegeven als functie van de CO₂-prijs, bij drie verschillende aardgasprijzen variërend van 6 tot 14 €/GJ. Op het ogenblik ligt de groothandelsprijs ruim onder de 5 €/GJ.²¹ De CO₂-prijs varieert rond 7 €/ton. De huidige productiekosten liggen daarmee rond 1 €/kg. De kosten nemen toe met stijgende CO₂-prijs, maar het effect is niet groot. Bij de gehanteerde cijfers wordt 9 kg CO₂ per kg waterstof geproduceerd. Bij een prijs van 100 €/ton voegt dit € 0,9 toe aan de productiekosten van een kg waterstof.

Figuur 3 | Vergelijking van de kosten voor de productie van waterstof via SMR en elektrolyse voor een grote bandbreedte aan condities.



²¹ De groothandelsprijs voor aardgas lag de afgelopen 2 jaar ruim onder 5 €/GJ. De verwachting is dat de prijzen voorlopig laag blijven maar na 2020 langzaam oplopen richting 9 à 10 €/GJ in de periode 2030–2035 (NEV2017).

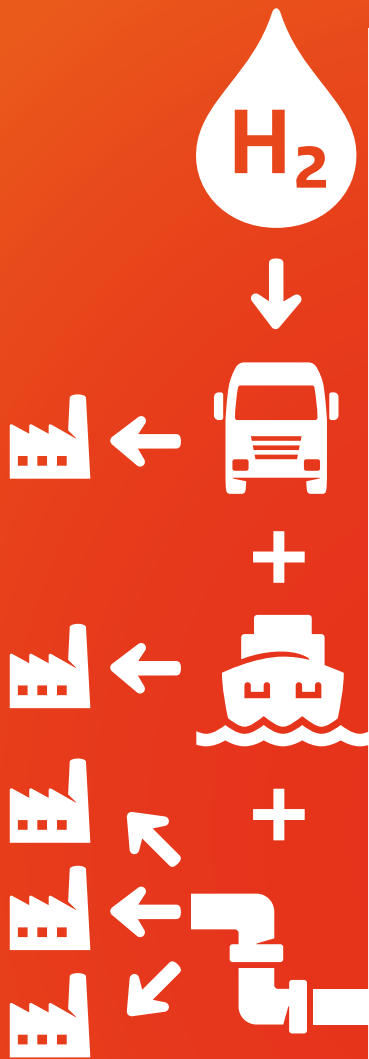


De oranje lijnen geven productiekosten van waterstof voor elektrolyse als functie van de elektriciteitsprijs. De lijnen vertegenwoordigen drie verschillende situaties wat betreft investeringskosten voor elektrolyse, bedrijfstijd (*Full Load Hours*, FLH), en specifiek energieverbruik. De huidige situatie voor elektrolyse ligt in de buurt van de bovenste licht oranje gekleurde lijn, waarbij de lijn ongeveer 0,75 €/kg lager zou liggen wanneer hiervoor ook een bedrijfstijd van 8000 vollasturen zou zijn gebruikt zoals voor de onderste oranje lijn. De vergelijking laat zien dat het op het ogenblik, ook bij hele lage elektriciteitsprijzen, lastig is om te concurreren met SMR. Wellicht dat het met de meest kosteneffectieve systemen lukt op momenten van overaanbod van duurzame elektriciteit waarbij de prijzen naar nul gaan. Maar gemiddeld over het vereiste grote aantal draaiuren dat nodig is om de bijdrage van de investeringskosten in de productiekosten voldoende omlaag te krijgen (ca. 4000 uur of meer; zie bijlage 3), zal de gemiddelde prijs voor geleverde elektriciteit op het ogenblik als snel op 40-60 €/MWh uitkomen.²²

Er ligt nog een behoorlijke ontwikkelopgave om te komen tot systemen met lage investeringskosten en een hoog rendement waarmee elektrolyse kan concurreren met SMR voor grootschalige industriële toepassingen. Maar tegelijkertijd moet er ook de beschikking zijn over elektriciteit tegen gemiddeld hele lage kosten. Een hoge CO₂-prijs helpt iets, maar concurrentie wordt pas echt eenvoudiger als de aardgasprijs naar een structureel hoger niveau gaat.

Zoals aangegeven ligt, vanwege allerlei bijkomende kosten, de prijs van waterstof voor kleinschaligere toepassingen een stuk hoger. In die gevallen is concurrentie van elektrolyse met grootschalige SMR-productie veel eerder, en zelfs nu al mogelijk. Door benutting van deze toepassingen, en ontwikkeling van innovatieve businesscases die toepassing als onderdeel van grootschalige SMR-productie mogelijk maken, zal moeten worden gewerkt aan verdere ontwikkeling en opschaling van elektrolyse om op termijn de nieuwe standaard te kunnen worden voor productie van waterstof.

²² Gemiddelde leveringskosten van elektriciteit voor grootzakelijk gebruik (150.000 MWh en meer), exclusief BTW en heffingen varieerde de afgelopen 10 jaar tussen 52 en 72 €/MWh. De echte grootverbruikers die zelf handelen op de APX zullen gemiddeld op lagere tarieven zitten. De leveringskosten omvatten niet de netwerkkosten die voor elektriciteit relatief hoog zijn t.o.v. gas.



Bij grootschalig gebruik van waterstof als energiedrager is een infrastructuur voor transport en distributie nodig om productielocaties van waterstof met afnemers te verbinden. Afhankelijk van de timing en van de productie- en gebruikslocaties kan de huidige hogedrukaardgas-infrastructuur hiervoor worden gebruikt.



6 | Infrastructuur voor transport en distributie

Waterstof is voor Nederland geen nieuw product. Het wordt al tientallen jaren in de industrie als grondstof ingezet. Er ligt een uitgebreid privaat waterstofnetwerk van Air Liquide met een totale lengte van ca. 1000 km dat Rotterdam/Zeeland, België en Noord-Frankrijk verbindt. Ook vlak over de grens in het Ruhrgebied is een aanzienlijk privaat netwerk van Air Liquide aanwezig. Air Products bezit daarnaast een waterstofnetwerk van ca. 140 km in de regio Rotterdam.

Er is echter geen goed ontwikkelde infrastructuur die zich qua omvang en penetratiegraad kan meten met de huidige aardgasinfrastructuur. De vraag is ook of dat nodig is en waar en in welke mate gebruik gemaakt kan worden van reeds aanwezige infrastructuur, zeker bij industriële clusters en logistieke knooppunten.

Gebruik van de gasinfrastructuur voor waterstof

Bij grootschalig gebruik van waterstof als energiedrager is een infrastructuur voor transport en distributie nodig om productielocaties van waterstof met afnemers te verbinden. Bij geleidelijke ontwikkeling vanuit kleine toepassingen kan in de beginfase met transport per vrachtwagen of per schip worden volstaan. Bij grootschalige toepassing is transport via een pijpleidinginfrastructuur een cruciale schakel, o.a. vanwege het kostenvoordeel bij langjarig en grootschalig gebruik.

Afhankelijk van de timing en van de productie- en gebruikslocaties kan de huidige hogedruk-aardgasinfrastructuur hiervoor worden gebruikt. Recent onderzoek van DNV GL en GTS²³ laat zien dat de leidingen van het hogedrukaardgasnet hoge percentages (tot 100%) waterstof aankunnen en dat er op voorhand geen grote technische en economische showstoppers zijn om de gasinfrastructuur voor waterstof te benutten. Voor specifieke componenten en onderdelen, zoals compressoren, meetstations en gasopslagen, zullen aanpassingen noodzakelijk zijn en er zijn aspecten inzake externe veiligheid en integriteit die nader beschouwd moeten worden.

Ook vergt het nader onderzoek om te bepalen welke specifieke leidingen (tracés) voor waterstof beschikbaar kunnen worden gesteld. De beschikbaarheid van specifieke tracés wordt onder meer bepaald door de ontwikkeling van de gasvraag, de ontwikkeling van de gaskwaliteit en de snelheid waarmee waterstof wordt ontwikkeld. Op basis van deze en andere gegevens is het mogelijk om een masterplan op te stellen waar en hoe de transitie van een aardgas- naar een waterstofinfrastructuur er in de tijd uit kan zien. In de eerdergenoemde rapportage van DNV GL en GTS zijn enkele globale schetsen opgenomen.

23 A. van den Noort *et al.* (2017), Verkenning waterstofinfrastructuur, DNV GL, OGNL.151886, oktober 2017.



Afhankelijk van de toepassing is het mogelijk om met een mix van aardgas en waterstof te werken, maar dat verdient niet de voorkeur. Het ‘uitfilteren’ van waterstof uit het aardgas is duur en vergt extra energie. Ook kan de sterk variabele gaskwaliteit die ontstaat als gecombineerd effect van ‘uitfilteren’ en variaties in debiet gedurende het jaar voor problemen zorgen.

Een goede illustratie van het gebruik van het aardgasnet voor waterstof is het waterstof-symbioseproject van Dow, ICL, Yara en Gasunie in Zeeuws-Vlaanderen waarbij een bestaande gasleiding gebruikt wordt om ‘restwaterstof’ van Dow als grondstof bij Yara in te zetten. Bij een toenemende inzet van waterstof in de industrie zullen meer van dergelijke projecten ontwikkeld kunnen worden. Daarom is het van belang om de wet- en regelgeving inzake de gasinfrastructuur zodanig aan te passen dat dit geen belemmering is voor de inzet ervan voor waterstof. Hoofdstuk 8 adresseert dit.

Bij benutting van het hogedrukgasnet voor waterstof is het wellicht een optie om waterstofleidingen in bestaande aardgasleidingen te leggen (pipe in pipe-concept). Naarmate de gasvraag en de bijbehorende behoefte aan transportcapaciteit voor aardgas in de toekomst afneemt, ontstaat er ruimte voor deze optie. Deze *dual-use* optie kan in een overgangsperiode aantrekkelijk zijn. Hiervoor dient nader te worden uitgezocht wat de haalbaarheid en daadwerkelijke uitvoerbaarheid is met betrekking tot techniek, kosten en veiligheid.

Gebruik van offshore-assets

Bij de offshoreproductie van waterstof uit water met elektriciteit afkomstig van windenergie kunnen mogelijk de huidige gas-assets (infrastructuur, compressoren en platforms) ingezet worden voor waterstof. Ook de combinatie met de productie van duurzame waterstof op een energie-eiland op (bijvoorbeeld) de Doggersbank, zoals recent door Tennet, Gasunie en Havenbedrijf Rotterdam is geschetst, is interessant om in de toekomst grote hoeveelheden duurzaam waterstof te produceren en naar land te transporteren, met name naar locaties waar een potentieel grote vraag naar waterstof is, zoals de regio Rotterdam (chemie, industrie) en IJmuiden (staalfabricage). Er zijn diverse studies geweest naar de mogelijkheden om bestaande olie- en gasplatforms te gebruiken voor de omzetting van elektriciteit naar waterstof.²⁴ Afhankelijk van de aannames lijkt het mogelijk om op termijn een businesscase te vinden voor een dergelijk hergebruik. De offshore-industrie heeft interesse getoond om hiermee aan de slag te gaan, bijvoorbeeld via een pilot. TNO heeft diverse stakeholders uit onderzoek en industrie bij elkaar gebracht in een project getiteld “North Sea Energy System Integration”. Het is de bedoeling dat dit initiatief uitgroeit tot een programma waarbij hergebruik van bestaande assets centraal staat, inclusief bijvoorbeeld de Human Capital Agenda.

Deze opties kennen momenteel nog veel onzekerheden en het zal waarschijnlijk nog 10-15 jaar duren voordat tot uitvoering overgegaan zou kunnen worden. Een belangrijke vraag is of vanuit het oogpunt van kosten, flexibiliteit en praktische mogelijkheden voor uitbreiding van de elektriciteitsinfrastructuur de productie van waterstof op zee of op land moet plaatsvinden

24 On the economics of offshore energy conversion Jepma et al, februari 2017



en in welke mate. Onmiskenbaar liggen hier mogelijkheden waarbij een aandachtspunt is om op termijn meer inzicht te ontwikkelen in mogelijke varianten vanuit een integrale benadering voor de landen rondom de Noordzee en de verbindingen met het achterland. Hierbij is de afnemende productie van aardgas op de Noordzee en de timing van decommissioning van deze assets een aandachtspunt.

Gebruik van lokale gasnetten

Op lokaal niveau is gebruik van aardgasdistributienetten in combinatie met waterstof mogelijk. Dit heeft vooral betrekking op het gebruik in de bestaande gebouwde omgeving waar vanuit maatschappelijk oogpunt waterstof als de meest haalbare optie voor verduurzaming van de warmtevraag tevoorschijn zou kunnen komen omdat elektrificatie of aansluiting op warmtenetten niet mogelijk of haalbaar is. Ook hier bestaan nog veel vragen. Een daarvan betreft de vraag of toepassing op woning- of wijkniveau de voorkeur heeft en wat vanuit kosten-, veiligheids- en acceptatieoogpunt de optimale oplossing is. Ook is nader onderzoek nodig hoe distributienetten geschikt kunnen worden gemaakt voor waterstof. KIWA is een studie gestart in opdracht van Netbeheer Nederland om deze vragen te kunnen beantwoorden. Enkele netbeheerders kijken met belangstelling naar deze optie. In het recente verleden is er op Ameland een pilot geweest met de toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving. Daarvoor is een zorgcentrum met appartementen aangepast om 20% waterstof in het aardgas te kunnen accommoderen. Uit de resultaten bleek dat dit geen belemmeringen opleverde. Ook wordt in GERG-verband (Europese vereniging van gasbedrijven, gericht op R&D-issues) naar de mogelijkheden gekeken om waterstof in aardgas bij te mengen, dan wel aardgasnetten volledig ten behoeve van waterstof te gebruiken. In het Verenigd Koninkrijk is een groot haalbaarheidsonderzoek uitgevoerd (H21 Leeds City Gate project²⁵) naar de mogelijkheden om de stad Leeds volledig om te zetten naar waterstof. Vervolgstappen worden momenteel voorbereid.

Waterstofinfrastructuur voor mobiliteit

Bij toepassing van waterstof voor mobiliteit spelen andere dan de hierboven geschetste infrastructuurissues. De discussie spitst zich hier met name toe op de beschikbaarheid van waterstofvulpunten. Bevoorrading zal in eerste instantie voornamelijk plaatsvinden over de weg met tube-trailers. Maar daar waar mogelijk en haalbaar kan ook aanvoer per pijpleiding plaatsvinden, zoals bij het tankstation in Rhooen, of worden gekozen voor productie op locatie met elektrolyse of kleinschalige SMR. Voor een succesvolle introductie van waterstof in de mobiliteit is ook de beschikbaarheid van een basisinfrastructuur met vulpunten noodzakelijk. Vanwege de relatief grote actieradius van brandstofcel-elektrische voertuigen (ordegrootte 500+ km) en de mogelijkheid om snel te kunnen tanken, kan hier met een relatief beperkt netwerk al een behoorlijke dekking worden gerealiseerd en de markt op gang worden gebracht.

Vulpunten zijn nog relatief duur waardoor het de uitdaging is om zoveel mogelijk benutting te realiseren zodat de onrendabele top behapbaar blijft. Er moet daarom worden gestreefd

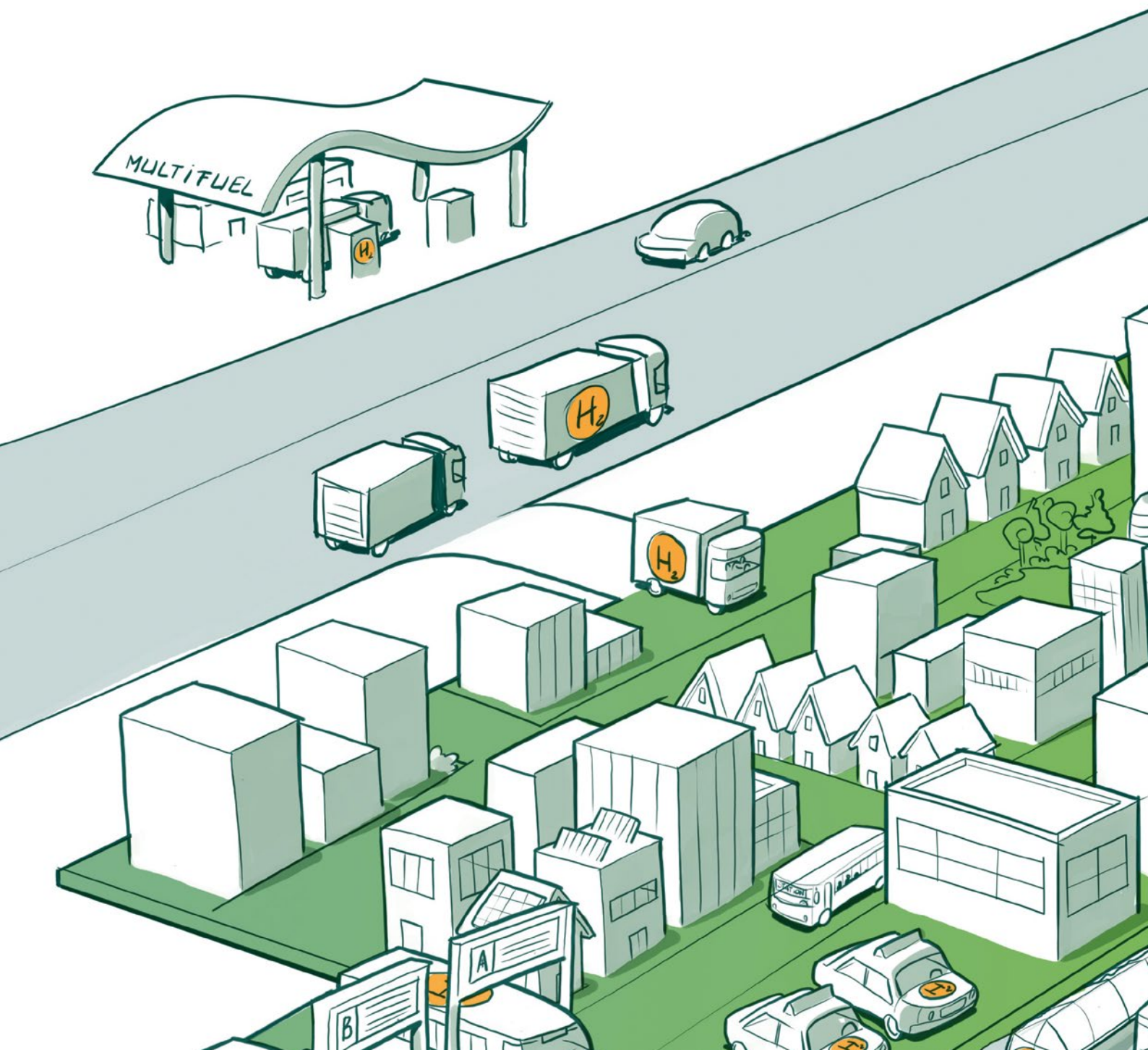
25 <https://www.northerngasnetworks.co.uk/wp-content/uploads/2017/04/H21-Executive-Summary-Interactive-PDF-July-2016-V2.pdf>



naar een netwerk op zo strategisch mogelijke locaties met bundeling van zoveel mogelijk waterstofvraag rond die locaties in de beginfase, bijvoorbeeld via regionale clusters waar verschillende productie- en toepassingsmogelijkheden van waterstof gecombineerd kunnen worden. Verdunning van voertuigen over een groot netwerk leidt tot een grote en langdurige onrendabele top waardoor marktpartijen hun interesse kunnen verliezen.

Aandachtspunt is verder dat voor de beginfase zoveel mogelijk wordt voortgebouwd op kennis en expertise die in de afgelopen 15 jaar in de markt is opgebouwd rond tal van demonstratieprojecten voor waterstoftankstations wereldwijd. Dit heeft al tot een behoorlijke mate van standaardisatie geleid wat ten goede komt aan de betrouwbaarheid van de vulpunten. Een beperkt netwerk waarin regelmatig storingen optreden bij vulpunten en klanten teleurgesteld worden, zal niet bijdragen aan een voorspoedige marktintroductie en -ontwikkeling. Daarom zal onder meer een goede balans moeten worden gevonden tussen tankstations van gevestigde partijen en nieuwe toetreders.

Voor bussen en voertuigen voor goederenvervoer geldt dat er vooral getankt zal worden op de locatie waar de voertuigen dagelijks naartoe terugkeren (thuisbasis). Omdat het aantal voertuigen vaak bekend is, kan de grootte van het vulpunt daar beter op worden afgestemd. Het is dan mogelijk om met een vulpunt een groot aantal voertuigen te bedienen. Daarmee is onderbenutting veel minder en issue en kan veel sneller een acceptabele business-case worden gerealiseerd. Wel speelt betrouwbaarheid een grote rol vanwege de grotere afhankelijkheid van het tankpunt, maar ook omdat stilstand van bussen en vrachtwagens grote financiële consequenties kunnen hebben. Betrouwbaarheid en goede afspraken over leveringszekerheid zullen daarom belangrijke onderwerpen zijn bij de vormgeving van projecten.





De niet-technische aspecten rondom waterstof verdienen minstens zoveel aandacht als de technische opties omdat de ervaring leert dat innovaties meestal worden vertraagd of zelfs stopgezet vanwege niet-technische issues.



7 | Niet-technische aspecten

De voorgaande hoofdstukken gingen over de technische opties die er zijn om waterstof te produceren, te transporteren en toe te passen. Niet-technische aspecten verdienen echter minstens zoveel aandacht omdat de ervaring leert dat innovaties meestal worden vertraagd of zelfs stopgezet vanwege niet-technische issues. In dit hoofdstuk worden deze niet-technische issues behandeld.

Beleid en wet- en regelgeving

Een belangrijk aspect is het overheidsbeleid en de wet- en regelgeving die de productie en het gebruik van waterstof stimuleren en eventuele knelpunten en barrières adresseren en oplossen. Voor waterstof als energiedrager bestaat momenteel alleen enig beleid voor auto's en bussen. Voor auto's lift het beleid vooral mee met dat voor elektrische auto's (geen accijnsheffing). Er is nog geen sprake van overkoepelend en structureel beleid dat kan helpen om waterstof in de breedte te ontwikkelen.

Ook wet- en regelgeving is nu nog niet volledig toegerust voor de introductie van waterstof. Veel regelgeving rond veiligheid en bijbehorende veiligheidseisen is gebaseerd op grootschalige inzet van waterstof als industrieel gas en als grondstof in de chemie. Bij toepassing als basis voor energie zijn de regels daardoor in vergelijking met andere opties relatief zwaar. Hier is het gewenst om te bekijken of wellicht met een aangepaste set van eisen kan worden volstaan die voldoet aan de geldende normen en die rekening houdt met deze nieuwe toepassingen.

De gaswet biedt weinig ruimte voor een grotere rol van netbeheerders bij transport en distributie van waterstof. Een voorbeeld is het in hoofdstuk 6 genoemde waterstof-symbioseproject van Gasunie in samenwerking met verschillende chemische bedrijven in Zeeuws-Vlaanderen. Dit project wordt niet door de netbeheerder GTS uitgevoerd maar door Gasunie; waterstof is namelijk niet in de gaswet opgenomen en valt daarom buiten de geregleerde taken van een netbeheerder. Voor een succesvolle introductie van waterstof is het noodzakelijk om waterstof in de gaswet op te nemen en te bezien of en wanneer het nodig is om regulering van waterstofnetten op te nemen. Een belangrijk aspect in deze discussie is de keuze tussen private dan wel geregleerde waterstofnetten en in welke situaties welke oplossing vanuit maatschappelijk oogpunt het meest kosteneffectief is.



Subsidies

Op sommige terreinen, zoals bij de introductie van brandstofcel-elektrische bussen en de uitrol van een basisinfrastructuur van waterstofvulpunten, is ondersteuning via verschillende Europese en nationale regelingen mogelijk. Daarnaast zijn via de Topsector Energie innovatiesubsidies (industriële onderzoek, experimentele ontwikkeling, demonstratie) voor waterstof beschikbaar maar dat is qua omvang en specifiek voor waterstof onvoldoende voor een brede ondersteuning van waterstofinitiatieven (minder dan 1 miljoen euro). Via NWO is financiering beschikbaar voor vroegefaseonderzoek. In Nederland is er nog geen sprake van structurele ondersteuning voor waterstof.

Op Europees vlak zijn er wel verschillende en omvangrijke programma's beschikbaar voor de ondersteuning van innovatieprojecten in de demonstratiefase. Een belangrijk programma specifiek voor brandstofcellen en waterstof is dat van het FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking), een Europese publiek-private samenwerking onder het Horizon2020-programma. Verder is ondersteuning mogelijk voor waterstofinfrastructuur vanuit de TEN-E (Energy) en TEN-T (Transport) programma's. Voorbeelden hiervan in Nederland zijn het synergieproject TSO2020 van Gasunie, Tennet, Akzo en partners, en het H2Benelux-project met realisatie van meerdere waterstofvulpunten. Verder bieden ook de Interreg-programma's mogelijkheden. De mogelijkheden voor ondersteuning zijn echter gefragmenteerd, niet altijd transparant en vaak lastig toegankelijk.

Veiligheid

Met betrekking tot veiligheid is door diverse stakeholders onder leiding van NEN het initiatief genomen voor een veiligheidsprogramma voor waterstof. De focus ligt in eerste instantie op toepassing van waterstof in vervoer waarbij er aandacht is voor veiligheidsaspecten in de gehele keten. Bij centrale productie van waterstof start die bij het verlaten van de productielocatie. Veiligheidsaspecten op de productielocatie vallen onder een industrieel regime en zijn voldoende afgedekt. Bij *on-site* productie op een tankstation valt productie wel onder het programma. De keten verloopt verder via tankstations en de gebruiksfase van voertuigen tot en met de onderhoud- en afvalfase van voertuigen, en hulpverlening bij incidenten. Het programma beoogt systematisch na te lopen of alle veiligheidsaspecten in beeld zijn, er adequate maatregelen voorhanden zijn en geïmplementeerd zijn, en of zaken helder en eenduidig in regelgeving zijn afgedekt.

In het programma komen ook veiligheidsaspecten rond de gebouwde omgeving aan bod, zoals bij het parkeren van waterstofauto's in ondergrondse parkeergarages of in individuele garages bij woningen. Inzet van waterstof als energiedrager voor verwarmingsdoeleinden in de gebouwde omgeving valt echter buiten de scope van het programma. Daar is op het ogenblik nog onvoldoende aanleiding toe. Maar als ontwikkeling van de optie wordt overwogen, zeker wanneer waterstof tot aan, of zelfs in woningen wordt gebracht, dan is een dergelijk veiligheidsprogramma specifiek voor de gebouwde omgeving cruciaal.



Hoewel er een beschrijving van een programma ligt en veiligheid als cruciaal is bestempeld, laat uitvoering nog op zich wachten in afwachting van voldoende financiering en deelname van de industrie. Dit dient in het kader van een actieplan waterstof een duidelijke plaats te krijgen.

Maatschappelijke inbedding

Maatschappelijke support voor waterstof is een belangrijke voorwaarde om waterstof succesvol uit te kunnen rollen, met name in toepassingen waar de consument er rechtstreeks mee in aanraking komt dan wel daar waar de interactie met consumenten het grootst is, zoals in de buurt van nieuw aan te leggen productielocaties, infrastructuur, vulpunten en toepassingen.

Het staat niet op voorhand vast dat waterstof tot veel discussie zal leiden, het is echter van belang om burgers goed voor te bereiden op initiatieven zodat er geen weerstand ontstaat op basis van (vermeende) risico's en gevaren. Het is ook van belang om in meer algemene zin te communiceren en voorlichting te geven over nut en noodzaak van nieuwe ontwikkelingen rond de energievoorziening, zoals waterstof, en het maatschappelijk belang daarvan in relatie tot het klimaat en de energietransitie zodat het publiek alvast kan wennen en zo mogelijk 'gewonnen' kan worden voor de nieuwe opties. Ook de discussie die momenteel wordt gevoerd over het afscheid nemen van 'gas' kan hier een element in zijn dat aandacht en uitleg behoeft.

Een andere situatie ontstaat bij de toepassing van op aardgas gebaseerde waterstof in combinatie met CCS. Het verleden heeft laten zien dat burgers hier uitermate kritisch tegenover (kunnen) staan en dat een goede informatievoorziening en betrokkenheid in een vroegtijdig stadium een noodzakelijke randvoorwaarde is. Daarom is het van eminent belang om lessen uit het verleden bij CCS-projecten mee te nemen. Overigens is het de verwachting dat bij nieuwe CCS-projecten voor opslag offshore zal worden gekozen maar dit is geen garantie dat dit probleemloos zal verlopen vanuit maatschappelijk oogpunt. Daarom is het eveneens noodzakelijk om hierover de dialoog met natuur- en milieuorganisaties te zoeken zodat duidelijk wordt of en onder welke condities er support is voor dergelijke routes. In het kader van de Routekaart CCS is deze dialoog opgestart. In het eerste kwartaal van 2018 zijn de eerste resultaten beschikbaar. Het is van belang om deze discussies 'uit elkaar te trekken' zodat de discussie over waterstof niet op voorhand wordt gedomineerd door de discussie over CCS.

Human Capital Agenda (scholing, opleidingen)

Een andere niet-technisch aspect betreft de voor waterstof benodigde expertise. Waterstof is niet nieuw, maar de toepassing van waterstof in nieuwe markten, zoals de mobiliteit of in de gebouwde omgeving, en ook nieuwe productiemethoden vergen gekwalificeerd personeel. Ook de mogelijkheid om offshore waterstof te produceren, stelt specifieke eisen aan de expertise en skills van medewerkers. Als waterstof grootschalig gebruikt wordt, zal het daarvoor benodigde personeel beschikbaar moeten zijn. Dat betekent dat er aandacht moet worden besteed aan het opleiden van technisch gekwalificeerd personeel, zowel bij nieuwe toetreders op de arbeidsmarkt als bij zij-instromers en personeel dat vanuit andere, minder gevraagde beroepen

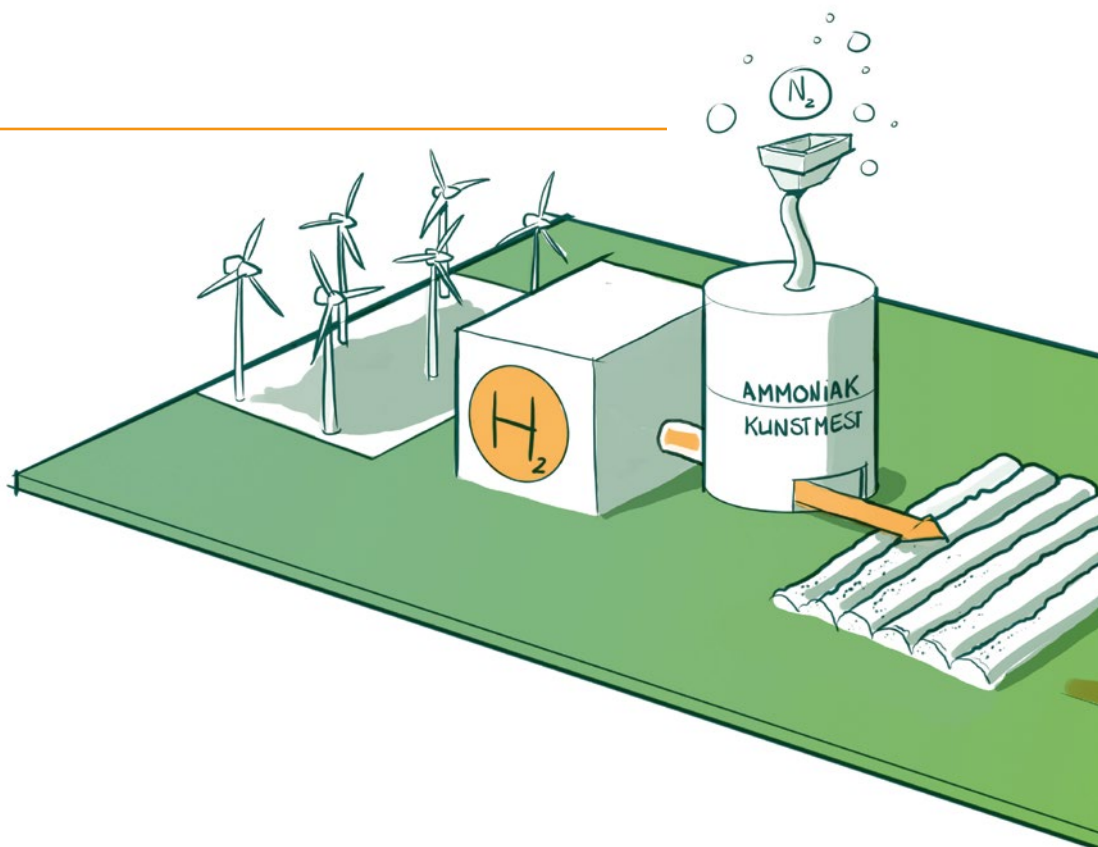


kan worden om- en bijgeschoold. Gegeven het feit dat technisch geschoold personeel over alle lagen heen schaars is en er steeds grotere tekorten worden verwacht, is dit nog een grote uitdaging. Dit is mede het geval omdat veel waterstofonderwerpen specifieke expertise op de terreinen werktuigbouw, elektrotechniek, chemie en fysica vergt. Het verdient daarom aanbeveling om waterstof bij de basisopleidingen onder de aandacht te brengen.

Handel in waterstof

Wanneer zich een grootschalige inzet van waterstof als energiedrager gaat ontwikkelen, is een van de vragen hoe de handel in die waterstof georganiseerd kan worden. Een mogelijkheid is om de handel te organiseren in een open handelsplatform waar producenten waterstof kunnen aanbieden, gebruikers waterstof kunnen kopen en iedereen die een rol wil spelen in het verhandelen van waterstof kan kopen of verkopen. Een voorbeeld voor een dergelijk handelsplatform is de Nederlandse gasmarkt die rondom het TTF is georganiseerd.

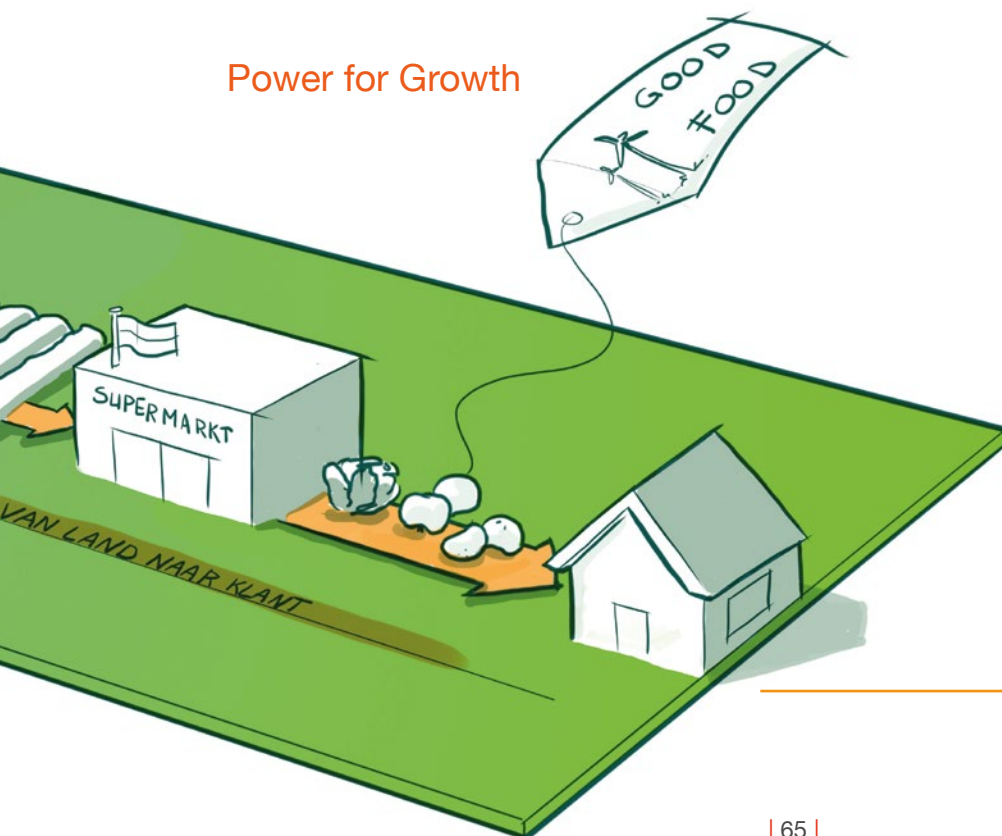
Op het ogenblik is het wellicht nog te vroeg voor zo'n handelsplatform voor waterstof. Maar het is van belang om vroegtijdig voor- en nadelen van een handelsplatform in beeld te brengen en te overdenken, en daar de ervaringen in het ontstaan van de huidige aardgasmarkt in mee te nemen. Een transparante en goed functionerende markt kan een aanzienlijke versnelling realiseren in het ontwikkelen van waterstof als energiedrager.





Een belangrijke vraag die in dat kader uiteindelijk zal moeten worden beantwoord is de productspecificatie van het te verhandelen product. Bij individuele contracten kunnen producent en gebruiker een specificatie afspreken die voor beide acceptabel is. Zo kan een zuiverheid worden afgesproken die de producent kan leveren en waarmee de gebruiker kan omgaan. In een open handelsplatform moeten in overleg met alle betrokkenen over de zuiverheid afspraken worden gemaakt. Om alle uitruil van producten binnen het platform door de onafhankelijke transporteur mogelijk te maken, betekent dit dat alle producenten aan dezelfde minimale eis van zuiverheid moeten voldoen bij levering van de waterstof en dat alle gebruikers met dezelfde eis van zuiverheid moeten kunnen omgaan.

Power for Growth





In de inventarisatie van huidige initiatieven, plannen en toepassingen voor waterstof zijn initiatieven opgenomen die momenteel in uitvoering zijn, projecten die recent zijn afgerond en waarop een vervolg overwogen wordt, en initiatieven in de idee- of planfase.



8 | Waterstofinitiatieven in Nederland

Voor deze routekaart zijn voor waterstof de huidige initiatieven, plannen en toepassingen in Nederland in kaart gebracht via een externe opdracht²⁶. 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 de idee- of planfase. De scope is hierbij voornamelijk de komende 5 jaar, maar sommige ‘verder weg gelegen’ plannen worden ook behandeld als deze prominent in de discussies van vandaag naar voren komen. De inventarisatie schetst daarnaast een beeld van de verwachtingen van de verschillende spelers en initiatieven voor de komende 5 jaar over de rol van de overheid en hun eigen sterkten, ambities, ideeën en ontwikkelrichtingen.

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 naar energiefunctie geordend, 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 technologieontwikkeling, vaak via EU-programma's, waarin Nederlandse spelers tamelijk succesvol zijn.

Projecten waarbij daadwerkelijk iets ‘in het veld’ gebeurd is, afgezien van de gevestigde toepassingen van waterstof in de industrie, voor het merendeel projecten op het gebied van mobiliteit en transport (tankstations, bussen, personen- en vrachtauto's, e.a.). Bij het bouwen van businesscases voor waterstof kijken partijen graag naar mobiliteit als sector met (potentieel) de hoogste toegevoegde waarde voor waterstof, maar de vloten en daarmee de afzetvolumes zijn nog klein. Er zijn concrete plannen om het aantal tankstations in de komende jaren uit te breiden van 3 naar 10-12 in 2020 en er zijn concrete plannen om het aantal bussen in die periode te laten stijgen tot 60. Verder wordt er gewerkt aan de realisatie van een kleine vloot vuilniswagens en prototypes voor trucks in de categorie 27 tot 40 ton.

Er zijn drie initiatieven voor grootschalige waterstofproductie uit aardgas met CO₂-afvang en -opslag voor inzet in gascentrales en de petrochemische industrie voor hogetemperatuur-warmte en als grondstof. Twee van de drie initiatieven zijn verkenningen en zijn bekend als het H-Vision-project en de ‘Berenschot-studie’. De laatste is een niet case-specifieke analyse van het concept. Het H-Vision-project situeert het concept op de Maasvlakte met gebruik van inzichten voor CO₂-opslag die zijn opgedaan in het kader van het ROAD-project.

²⁶ Overzicht van Nederlandse waterstofinitiatieven, -plannen en -toepassingen. Dwarsverband (R. Hoogma), november 2017. Zie www.topsectorenergie.nl/tki-nieuw-gas



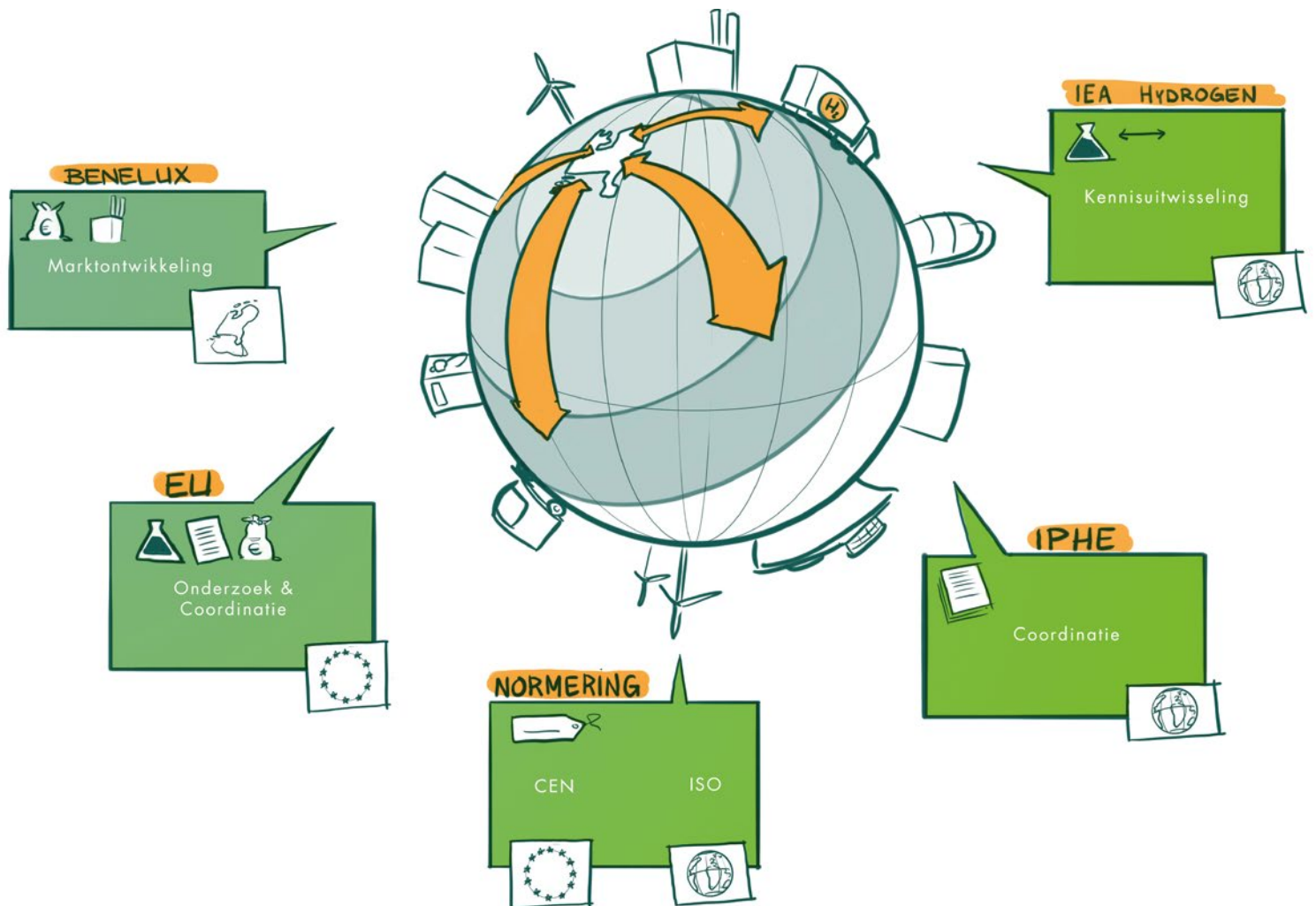
Het initiatief rond de Magnum-centrale in de Eemshaven is het meest concreet; het wordt getrokken door de potentieel sterke alliantie Nuon-Statol-Gasunie, met geplande realisatie in 2023. De kracht van het concept is de schaalgrootte waardoor er, bij voldoende draaiuren, substantieel CO₂-emissiereductie kan worden gerealiseerd, en het rechtvaardigt de opbouw van infrastructuur voor leidingtransport en seizoensopslag in zoutcavernes. Tegelijk is de schaal een uitdaging. Niet alleen zijn de investeringskosten hoog, ook de kosten van waterstof voor productie van elektriciteit zijn hoog waardoor de productie normaal gesproken pas na aardgas in de merit-order komt. Om het project te realiseren en de centrale te laten draaien, is een aanzienlijke financiële ondersteuning nodig.

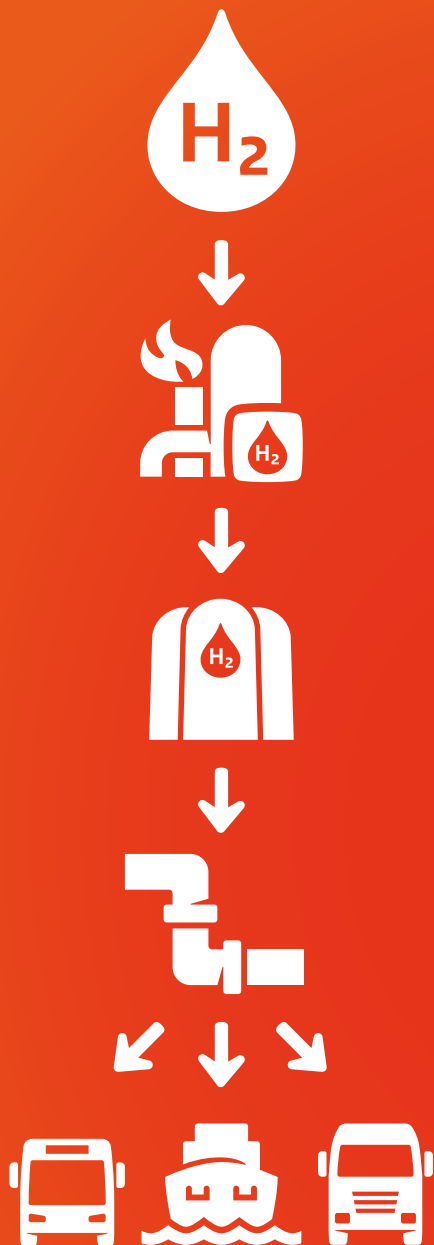
Regio's met waterstofinitiatieven zijn Noord-Nederland (potentieel sterke implementatie vanuit de Eemshaven en toepassingen in o.a. het chemiepark Delfzijl), Rotterdam/Goeree (bestaande waterstofindustrie, combinatie met CCS-initiatieven en energieproducerend eiland), Zuid-Nederland (productontwikkeling geïnitieerd en gecoördineerd vanuit WaterstofNet met regionale maakindustrie in een grensoverschrijdende samenwerking met Vlaanderen) en Arnhem/Gelderland (actief MKB-waterstofcluster in veel EU-projecten). Zeeland heeft één substantieel project (Green Deal Waterstof Symbiose). Amsterdam/Noord-Holland blijft momenteel achter maar dat kan snel veranderen. Initiatieven voor tankstations zijn verspreid over Nederland te vinden.

Voor de marktontwikkeling van klimaatneutrale en duurzame waterstof als grondstof en energiedrager (brandstof) is het naast de ontwikkeling van technologie en businesscases en de opbouw van productiecapaciteit en een transport- en distributie-infrastructuur, ook nodig dat regulering, normen en standaarden met betrekking tot veiligheid, certificering van 'duurzaam' en de vergunningverlening op orde zijn. Terugkerende behoeften uit de verschillende initiatieven zijn o.a. de positie van waterstof in de gaswet. Voor waterstof als onderdeel van het nationale en internationale energiesysteem is tot dusverre nog niet de wettelijke en regulatoire aandacht geweest als voor aardgas en elektriciteit. Voor een succesvolle opkomst van waterstof is dit echter wel nodig. Daarbij zullen vragen aan de orde komen die de afgelopen jaren ook bij gas en/of elektriciteit hebben gespeeld. Maar er zullen ook nieuwe aspecten aan de orde (moeten) komen omdat het een enorme groeimarkt betreft waarbij zich mogelijkheden aandienen om bestaande infrastructuur opnieuw te benutten. Andere issues die spelen zijn exploitatiesubsidies voor koolstofarme energiedragers (in plaats van hernieuwbaar), gezamenlijke communicatie over de rol van CCUS, en verruiming van ondersteuningsfaciliteiten voor RD&D. Er wordt daarom onder andere gewerkt aan stroomlijning van regelgeving, certificering van duurzame waterstof en ontwikkeling van normen voor het meten van kwantiteit en kwaliteit van waterstof bij afgifte door tankstations.



Internationale dimensies waterstof





Dit hoofdstuk beschrijft verschillende innovatieopgaven voor waterstof over de hele keten van productie, opslag, transport en distributie tot en met eindgebruik.



9 | Innovatieopgaven

Dit hoofdstuk beschrijft verschillende innovatieopgaven voor waterstof over de hele keten van productie, opslag, transport en distributie tot en met eindgebruik. Voor productie ligt de nadruk op elektrolyse. Opslag, transport en distributie omvat een grotere diversiteit aan onderwerpen gerelateerd aan alle elementen die onderdeel uitmaken van de huidige opslag- en pijpleidinginfrastructuur voor aardgas, als ook infrastructuur voor distributie of levering van waterstof aan mobiliteit en transporttoepassingen.

Brandstofcellen en branders zijn de voornaamste technologieën voor eindgebruikstoepassingen en daar liggen innovatieopgaven ook in het ontwikkelen, implementeren en testen van systemen, met name brandstofcellen systemen voor concrete toepassingen zoals bussen, trucks, mobiele werktuigen en schepen. Deze onderdelen worden op hoofdlijnen besproken. Meer details over specifieke innovatieopgaven voor diverse onderdelen zijn elders beschreven²⁷.

Productie van waterstof (en samenhang met CCS)

De productie van waterstof uit aardgas voor industriële non-energetische toepassingen is een standaard, grootschalig en al vergaand geoptimaliseerd proces. Voor deze toepassing ligt de uitdaging bij decarbonisatie van de huidige productie, en vervanging van de huidige productie door waterstof geproduceerd uit niet-fossiele bronnen met energie van duurzame energiebronnen. Decarbonisatie kan plaatsvinden door afvang en opslag van CO₂.

Ook dit is een standaard proces dat al grootschalig in de industrie wordt toegepast op plekken waar behoefte is aan een geconcentreerde CO₂-stroom, zoals voor de productie voor ureum en voor koolzuur in frisdranken. De kosten hiervan worden doorberekend in de kosten van producten. Daar waar CO₂-afvang tot op heden niet nodig was, leidt het echter tot hogere kosten in vergelijking met de huidige situatie. Om dit zo veel mogelijk te kunnen beperken is er behoefte aan verdere optimalisatie van CO₂-afvangprocessen, en aan nieuwe, efficiëntere en goedkopere processen.

Op het ogenblik wordt onderzoek naar CO₂-afvang gezien als onderdeel van het thema CCS. Dit omvat aandacht voor zowel *post-combustion*-, *oxy-fuel*-, als *pre-combustion*-afvangconcepten. Afvang bij de productie van waterstof is in feite een *pre-combustion*-proces. Aardgas wordt eerst van koolstof ontdaan voordat het als waterstof wordt gebruikt, alhoewel de geproduceerde waterstof tot op heden nog niet energetisch voor *combustion*²⁸ wordt

27 1. Topsector Energie en Topsector Chemie, Elektrochemische Conversie en Materialen, september 2017; 2. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Multi-annual Workplan 2014-2020, June 2014, en achtereenvolgende jaarlijkse werkplannen voor 2015, 2016 en 2017; en 3. US DOE, H2@Scale RD&D – Opportunities and Challenges, DRAFT, 2017.

28 Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen thermochemische conversie van waterstof met zuurstof via branders voor productie van hoge- of lagetemperatuurwarmte, elektriciteit, of een combinatie daarvan (WKK), en elektrochemische conversie van waterstof met zuurstof in brandstofcellen waarbij elektriciteit het primaire product is.



ingezet. Innovaties rond *pre-combustion*-technologie en concepten voor aardgas dienen in een innovatieprogramma te worden geadresseerd.

Voor de productie van duurzame waterstof is er een aantal alternatieven. Elektrolyse van water met behulp van duurzame elektriciteit is de voornaamste optie. Andere opties zijn reforming van biogas of groen gas, vergassing van duurzame biomassa en afval, en superkritische watervergassing van biomassa-areststromen. In al deze laatste gevallen speelt naast waterstof ook (duurzame) koolstof een rol. Vanwege de te verwachten toekomstige vraag naar duurzame koolstof voor chemische producten en materialen, en voor duurzame synthetische vloeibare brandstoffen, is biomassa waarschijnlijk relevanter voor de productie van duurzaam syngas dan voor productie van waterstof alleen. De focus voor waterstof ligt daarom bij elektrolyse.

Waterstofproductie door elektrolyse kan qua kosten op dit moment alleen onder specifieke condities concurreren met conventionele waterstofproductie uit aardgas. Systemen zijn beschikbaar op MW-schaal, maar de technologie moet goedkoper worden en systemen moeten worden opgeschaald richting GW-schaal. Doordat voor grotere systemen de randapparatuur minder evenredig schaalt dan de elektrolysecellen en stacks, zal door opschaling al kostendaling worden gerealiseerd. Daarnaast is optimalisatie van systemen nodig en vervanging van dure door goedkopere materialen, waarbij efficiency en levensduur verder moeten worden verbeterd.

Opslag, transport en distributie van waterstof

Belangrijke innovatieopgaven op het gebied van opslag, transport en distributie hebben betrekking op het gebruik van de huidige aardgasinfrastructuur voor waterstof. Belangrijke vragen hierbij zijn onder welke condities dit mogelijk is binnen de vereiste veiligheidsrandvoorwaarden, welke technische aanpassingen nodig zijn, en wat daarvan de kosten zijn. Dit geldt zowel voor het landelijke hogedruknet als voor regionale transportnetten en lokale distributienetten. Ook moet worden bepaald welke behoefte er is aan opslag, en waar en in welke vorm die te realiseren is. Hierbij kan worden gedacht aan pure waterstof als gecomprimeerd gas (bijvoorbeeld in zoutcavernes) of als vloeistof (in bovengrondse tanks), of opslag in een verbinding met stikstof (ammoniak) of koolstof (methanol, mierenzuur), of wellicht gebonden aan een vloeibare koolwaterstofdrager (Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC).

Daarnaast zal moeten worden bepaald hoe de transitie van de gaskwaliteit en de conversie van de infrastructuur vorm kan worden gegeven. Stappen we in een keer over naar puur waterstof, of vindt de transitie plaats via gasmengsels waarbij de waterstofconcentratie langzaam wordt opgevoerd? Wat is de rol van groen gas? En met welke fasering en snelheid kan de omzetting van (delen van) de gasinfrastructuur worden gerealiseerd? Bij ruimte die ontstaat door teruglopende behoefte aan transportcapaciteit voor aardgas kan ook worden gedacht aan dual-use oplossingen waarbij flexibele gasdichte composietleidingen voor waterstof worden aangebracht in de bestaande leidingen.

Specifiek voor mobiliteit en transport zijn innovaties rond tankstations van belang op onderdelen die nu nog tot knelpunten kunnen leiden, zoals nauwkeurigere debietmetingen,



en apparatuur en procedures voor het ijken en periodiek keuren van debietmeters. Ook is er grote behoefte aan betrouwbare en kosteneffectieve methoden en apparatuur voor het kunnen bepalen (online) van verontreinigingen op ppm- en ppb-niveau om de vereiste waterstofkwaliteit te kunnen garanderen. Daarnaast is er behoefte aan innovaties die bijdragen tot een significante verlaging van investeringskosten en operationele kosten. Verbeteringen zijn nog mogelijk op tal van onderdelen zoals compressoren, vulslangen, vulpistolen, hogedruktanks en methoden om binnen vastgestelde veiligheidseisen voertuigen zo snel mogelijk te laten tanken.

Op het gebied van meer kleinschalige opslag van waterstof in voertuigen, voor transport per truck of schepen, en op tankstations is er behoefte aan nieuwe materialen voor sterkere, lichtere en goedkopere hogedruktanks in diverse maten en voor diverse drukniveaus (350-700 bar). Materialen voor tanks in voertuigen zouden bij voorkeur tanken mogelijk moeten maken in een ruim temperatuurgebied (-60 °C tot 100 °C). Specifiek voor auto's is er behoefte aan optimalisatie van de tankgeometrie, verkleining van componenten en integratie van kleppen en drukregelaars in de tank om inpassing in voertuigen te vereenvoudigen. Ook zijn er ontwikkelingen om waterstof op andere manieren op te slaan (bijvoorbeeld in poedervorm) maar het potentieel hiervan is nog onduidelijk.

Eindgebruik van waterstof

Voor eindgebruik van waterstof zijn innovaties van belang die bijdragen aan ontwikkeling en introductie van energetische toepassingen in mobiliteit, transport en logistiek, de industrie en de gebouwde omgeving. Ontwikkeling van nieuwe processen voor toepassing van waterstof als grondstof valt buiten de scope van een routekaart waterstof, maar dit is zeker voor de industrie een belangrijk vakgebied.

Branders voor de productie van warmte en brandstofcellen voor productie van elektriciteit vormen de belangrijkste technologieën voor toepassing van waterstof. De belangrijkste innovatieopgaven liggen hier bij brandstofcellen en -systemen. De innovatiebehoefte is vergelijkbaar met die van elektrolyse. Een belangrijk verschil is dat voor brandstofcellen niet hoeft te worden gestreefd naar opschaling tot systemen van honderden MW. De behoefte aan dergelijke capaciteit kan namelijk ook worden ingevuld met gasturbines op waterstof.

Mobiliteit en transport vormt een belangrijk toepassingsgebied voor brandstofcellen. Nederland kan hier een rol van betekenis spelen bij het ontwikkelen van OV-bussen en vrachtwagens op waterstof, en *specialty* voertuigen zoals vuilniswagens en veegwagens. Daarnaast is er een grote variëteit aan mobiele werktuigen in havens en op luchthavens die zich mogelijk goed lenen voor toepassing van waterstof. Ook liggen er toepassingsmogelijkheden in de maritieme sector, zoals bij rondvaartboten, ponten, veerboten, binnenvaartschepen en allerlei boten die ingezet worden voor havendiensten (inspectie, havensleepboten etc.).

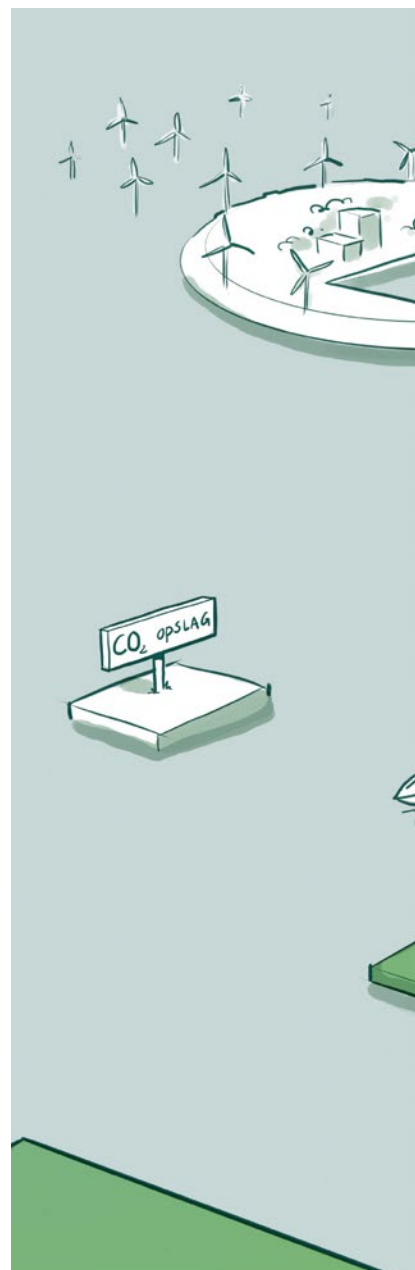
Naast mobiliteit en transport kan toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving een reële optie zijn. Er zijn nog vele vragen die moeten worden beantwoord omdat nu nog niet duidelijk is of, en op welke manier, toepassing vorm zou kunnen krijgen. Waterstof zou



bijvoorbeeld tot in woningen of tot aan woningen kunnen worden gebracht, of alleen tot in de wijk in combinatie met lokale warmtenetten op relatief lage temperatuur. Voorlopig ligt hier ruimte voor onderzoekopgaven gericht op de geschiktheid van het lokale gasdistributienet, de veiligheidsaspecten die een rol spelen, en de kosten voor aanpassing. En hier kan een innovatiebehoefte op volgen aan het gebruik van waterstof in cv-ketels en hybride warmtepompen en de ontwikkeling van kleinschalige brandstofcel-WKK-systemen.

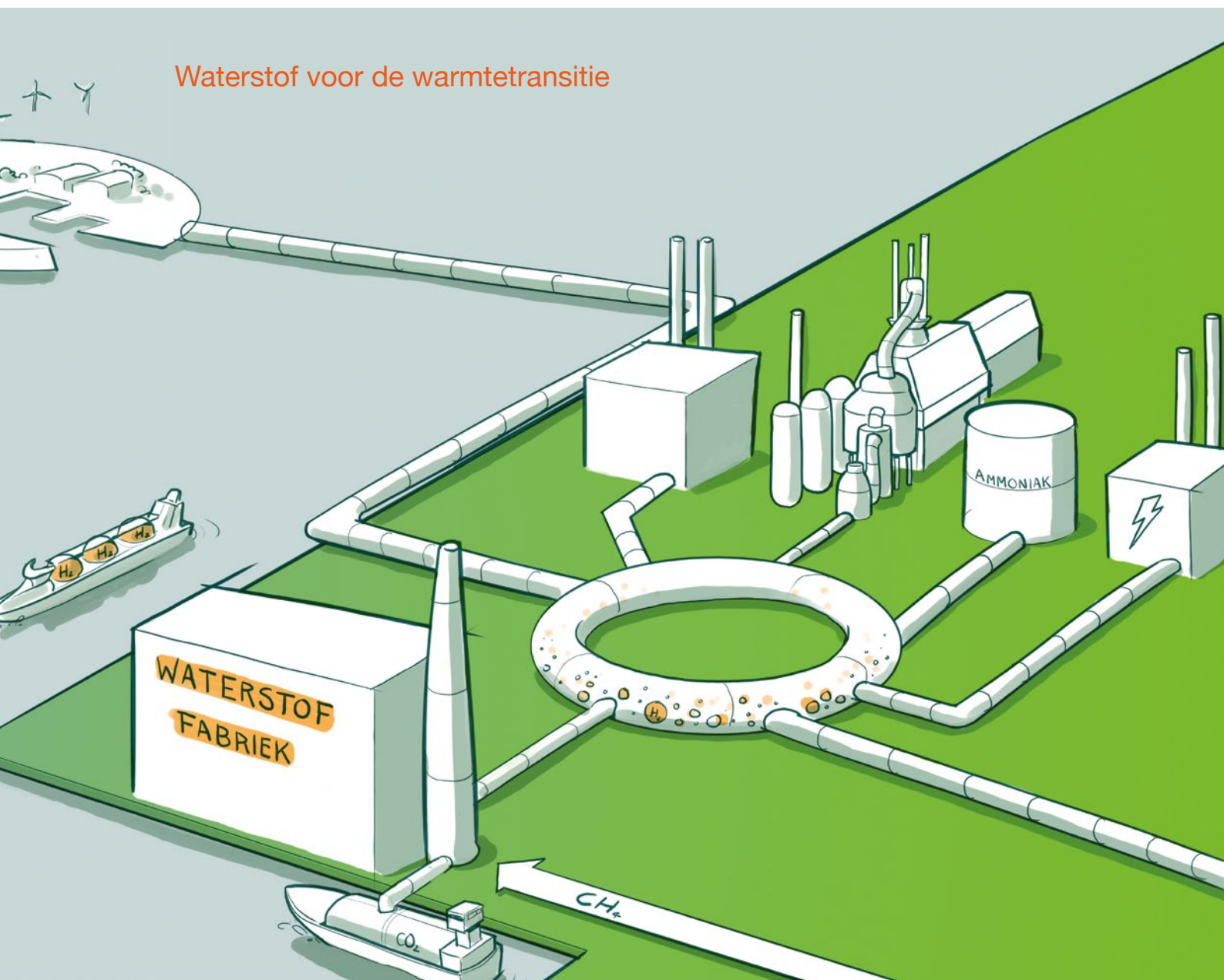
Overkoepelende aspecten en innovatieopgaven

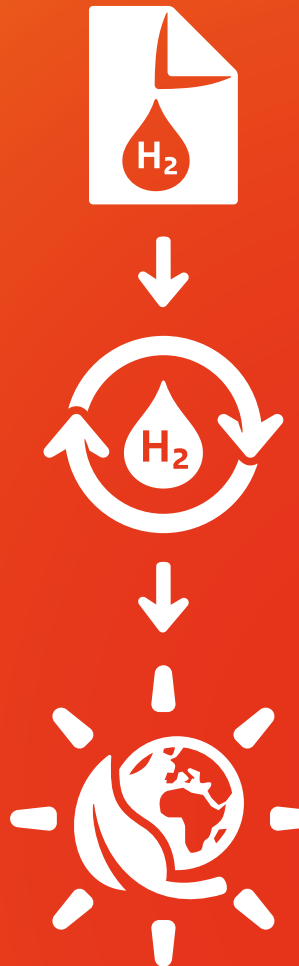
Voor alle ontwikkelingen op het gebied van vooral elektrolyse, brandstofcellen en hogedruktanks geldt dat in een vroegtijdig stadium rekening moet worden gehouden met de produceerbaarheid (*manufacturability*) en standaardisatie van de technologie en systemen zodat het mogelijk wordt grote hoeveelheden gestandaardiseerde producten van hoge kwaliteit tegen voldoende lage kosten te fabriceren. Dit is een vakgebied waar Nederland bijvoorbeeld via ASML internationaal sterk in is.





In aanvulling op innovatieopgaven op het gebied van technologie, zijn er ook verschillende meer overkoepelende innovatieopgaven. Een daarvan is om de kans op succesvolle introductie van waterstof te vergroten door tijdige communicatie met het grote publiek over nut en noodzaak van deze nieuwe energiedrager en de specifieke aspecten daarvan. Een andere innovatieopgave is het ontwikkelen van passende normen en standaarden rond waterstof en inpassing daarvan in alle relevante wet- en regelgeving. Hierbij kan onder andere worden gedacht aan normen en standaarden voor het veilig gebruik van waterstof, en het standaardiseren van de kwaliteit van waterstof als deze via een openbare infrastructuur wordt geleverd aan diverse klanten voor diverse toepassingen. In dat kader kan de ontwikkeling van een transparante waterstofmarkt ook als innovatieopgave worden gezien.





De bedoeling is om met een plan van aanpak een advies te geven over de wijze waarop waterstof in de komende jaren ontwikkeld en gestimuleerd kan worden, zodat een begin wordt gemaakt met de introductie van waterstof als klimaatneutrale en duurzame pijler in de energietransitie.



10 | Plan van aanpak

In dit hoofdstuk worden de contouren geschetst voor een plan van aanpak voor waterstof. De bedoeling is om een advies te geven over de wijze waarop waterstof in de komende jaren ontwikkeld en gestimuleerd kan worden zodat een begin wordt gemaakt met de introductie van waterstof als klimaatneutrale en duurzame pijler in de energietransitie. Het is noodzakelijk om *nu* met de introductie van waterstof te beginnen. De grote klimaatopgave én de robuustheid van waterstof als klimaatneutrale brandstof en grondstof in scenario's met grootschalige decarbonisatie van fossiele bronnen en maximale benutting van potentiële aan wind en zon voor drastische reductie van CO₂-emissies geven daar alle aanleiding toe.

Op fossiele bronnen gebaseerde waterstof speelt al tientallen jaren een grote rol in de industrie. De uitdaging is om langzaam maar zeker de transitie te maken naar – uiteindelijk – volledig duurzame waterstof. Hierbij lijkt een route met klimaatneutrale waterstof uit aardgas met CCS (de zogenaamde blauwe waterstof) onontbeerlijk om snelheid te kunnen maken, gegeven de resterende tijd voor drastische emissiereductie, de beperkingen aan de snelheid van implementatie van duurzame energie, en de technologische opschaling die nog nodig is voor de productie van duurzame waterstof. Bijkomend voordeel is dat deze route snel volume kan bieden en ombouw van de gasinfrastructuur voor waterstof kan rechtvaardigen.

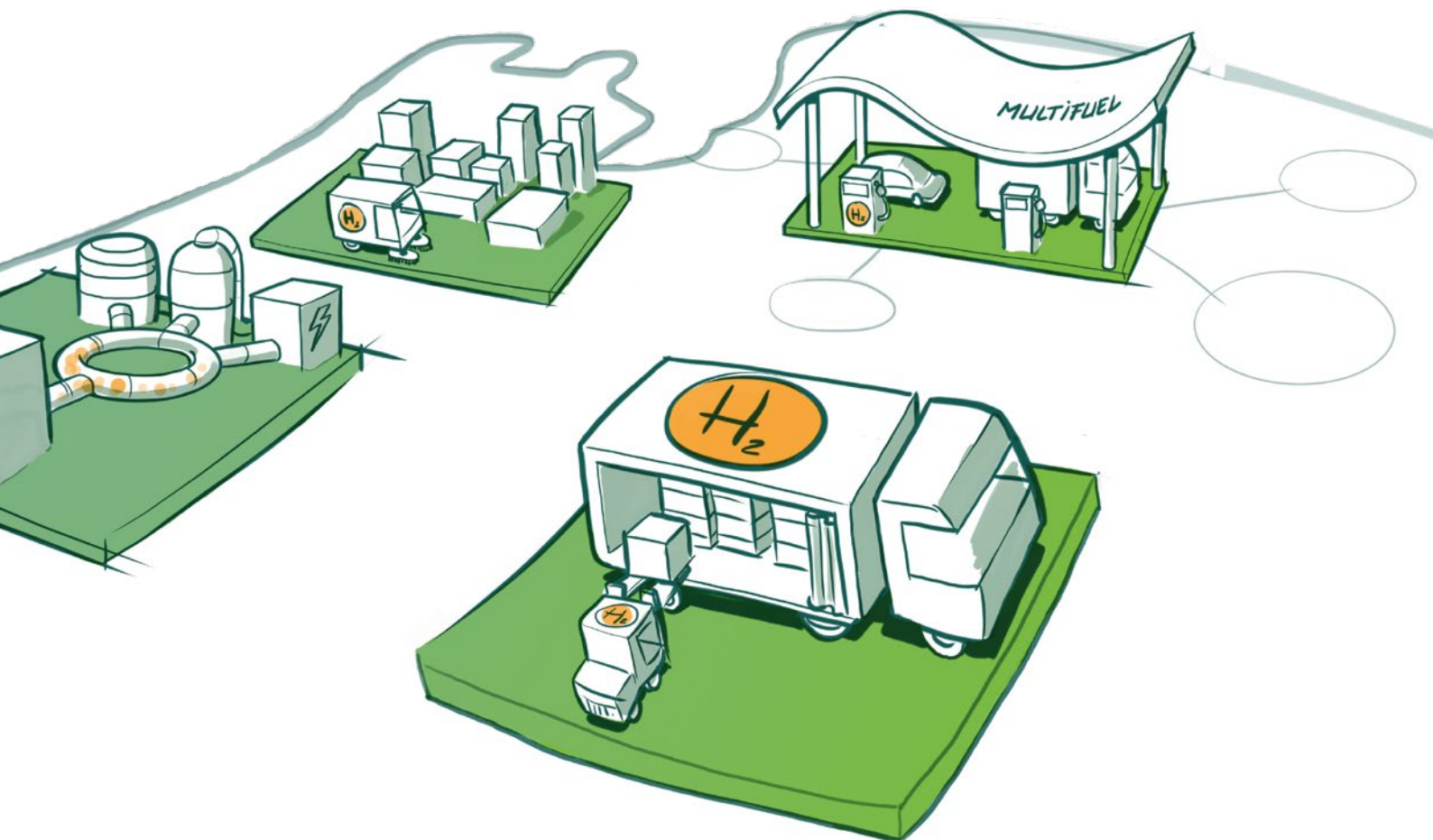
Bij het opstarten van de inzet van waterstof als energiedrager zal ook fossiele waterstof een rol kunnen spelen omdat het de projecten voor het opdoen van praktijkervaring en voor marktintroductie kan ondersteunen met waterstof die nu goed beschikbaar is tegen acceptabele prijzen. Dit kan zeker het geval zijn bij die toepassingen waar zelfs de inzet van fossiele waterstof al bijdraagt aan emissiereductie ten opzichte van de referentie, zoals bij inzet als transportbrandstof voor brandstofcel-elektrische auto's en bussen. Het perspectief richting 2050 is echter de productie en toepassing van *duurzame* waterstof: dit duurzame perspectief zal nadrukkelijk in het ontwikkelpad van waterstof ingebouwd moeten worden om te vermijden dat een fossiele lock-in ontstaat.

Om introductie en opschaling van waterstof succesvol te laten verlopen, is een aanpak langs meerdere sporen nodig. Waterstof vergt een systeemverandering en doet in veel nieuwe toepassingen zijn intrede. Daarom hebben projecten een minimale omvang of kritische massa nodig om succesvolle, representatieve resultaten te kunnen boeken. Er zijn ook verschillen in ontwikkelperspectief en -snelheid. Zo is toepassing van klimaatneutrale en/of duurzame waterstof in de industrie en de vervoerssector (relatief energie-intensieve toepassingen waarvoor langdurige en flexibele inzet van voertuigen is vereist) het meest urgent en robuust. Het zwaartepunt van activiteiten zou daarom bij deze toepassingen moeten liggen. In de gebouwde omgeving is een lager tempo denkbaar, maar gegeven de enorme opgave die in de bestaande gebouwde omgeving ligt om volledig te verduurzamen, is het verkennen van de potentiële rol van waterstof gewenst, inclusief een beperkt aantal pilots op kleine schaal. Voor elektriciteitsopwekking met waterstof (of afgeleiden daarvan, zoals ammoniak) zou de focus



kunnen liggen op het verkennen en demonstreren van de toekomstige behoefte aan flexibel regelbaar vermogen in situaties met veel wind- en zonvermogen.

Dergelijke projecten vergen een grote investering die niet alleen door de industrie en het bedrijfsleven kan worden opgebracht, niet in de laatste plaats omdat er nog geen *level playing field* is voor klimaatneutrale en duurzame alternatieven. Er is stevig commitment vereist van de industrie, bedrijfsleven én de overheid, met langjarige samenwerking tussen deze partijen, aangevuld met kennisinstellingen en maatschappelijke organisaties, om deze systeemverandering in gang te zetten en te laten slagen.





Voorstel voor een plan van aanpak

In deze routekaart is, mede op basis van consultaties ‘in het veld’ (zie bijlage 1), geschetst welke rol klimaatneutrale en duurzame waterstof in een duurzame energie- en grondstoffenvoorziening en in de transitie daarnaartoe kan spelen. Om meer inzicht in en grip op deze rol te krijgen, is een aanpak gewenst die in ieder geval de volgende drie elementen bevat die integraal en tegelijkertijd aangepakt moeten worden:

1. Integrale visie- en planvorming voor waterstof in de komende jaren

Het doel is visie- en planvorming voor een optimale ontwikkeling, toepassing en integratie van waterstof in samenhang met andere oplossingsrichtingen voor een zo snel mogelijke decarbonisatie en verduurzaming van ons energie- en grondstoffensysteem, met de emissiereductiedoelen van 2030 en 2050 en criteria voor betrouwbaarheid en betaalbaarheid als richtinggevend kader. Hierbij kunnen ‘grote issues’ worden geadresseerd om zicht en grip te krijgen op het potentieel van waterstof, de synergie met aanpalende ontwikkelingen zoals CCS en de inzet van biomassa voor biobrandstoffen en biograndstoffen, en de manier waarop ze elkaar beïnvloeden en kunnen versterken. Hierbij zal het ook noodzakelijk zijn om via scenario-analyses een beeld te krijgen van verschillende ontwikkelingen in ons energie- en grondstoffensysteem. De volgende ontwikkelingen verdienen in ieder geval aandacht:

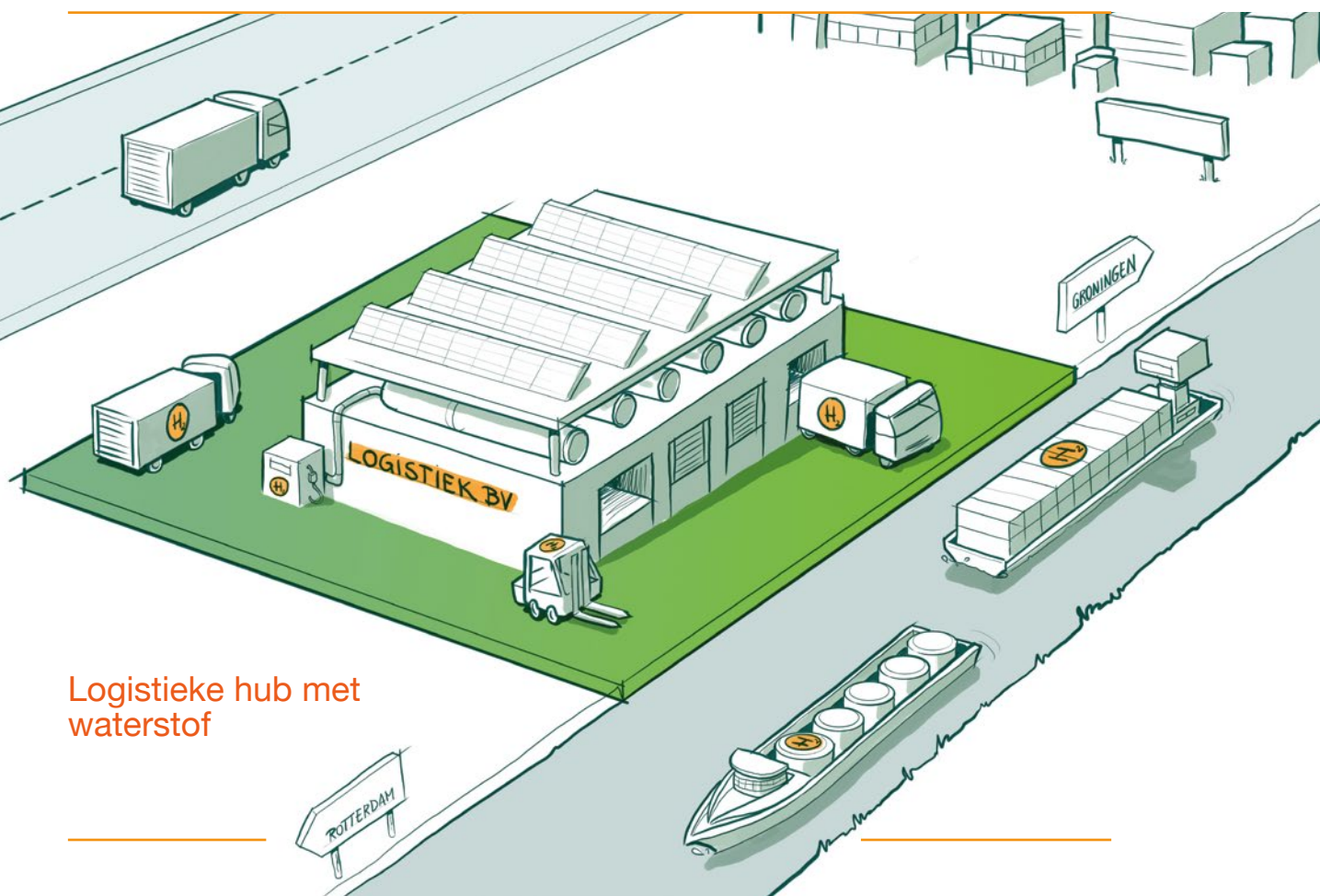
- De ontwikkeling van en relatie met offshore wind. Issues die hier spelen zijn de noodzaak en mogelijkheden voor conversie ten behoeve van de inpassing van duurzame elektriciteit, offshorewaterstofproductie, timingsaspecten, relatie met plannen van andere landen rondom de Noordzee wat betreft inpassing en productie van duurzame waterstof (waaronder een of meerdere energie-eilanden), opslagbehoefte voor elektriciteit, prijsontwikkelingen en kosten/verdienmodellen etc.
- Analyseer hoe het offshorewindvermogen op de Noordzee zich in de komende jaren/decennia ontwikkelt, rekening houdend met de plannen van andere landen rond de Noordzee, de ontwikkeling van de elektriciteitsinfrastructuur op de Noordzee en in deze landen, zodat inzichtelijk wordt op welke moment waterstof de benodigde flexibiliteit en behoefte aan conversie en opslag zou kunnen leveren. Betrek hierbij ook de ontwikkeling en eventuele uitfasering van de gasassets op de Noordzee en de bruikbaarheid daarvan voor waterstof. Het ligt voor de hand om Tennet bij deze exercitie een coördinerende rol te geven.
- De relatie met klimaatneutrale productie van waterstof uit aardgas in combinatie met CCS (blauwe waterstof), import van klimaatneutrale waterstof (zoals de ‘Noorwegen-optie’) en mogelijke spin-off daarvan voor duurzame waterstofproductie, zoals infrastructuurontwikkelingen die voor beide routes van belang zijn.



- Maak een implementatieplan voor de ontwikkeling van CCS op basis van de binnenkort te verschijnen routekaart CCS zodat duidelijk wordt hoe deze optie zich in de komende jaren kan ontwikkelen, bij welke industriële sectoren en tegen welke kosten. Daarbij speelt ook de beschikbaarheid van infrastructuur en opslaglocaties een rol, zoals recent door EBN en Gasunie in kaart is gebracht. Op basis van deze informatie kan worden bepaald waar CCS kan/moet bijdragen om de transitie te realiseren. Hier ligt een sterke rol voor de chemische industrie.
- De relatie met verduurzaming van de chemie en de industrie, zoals de waterstofbehoefte bij omschakeling van fossiele bronnen naar circulaire koolstof, biobased chemie en CO₂ van air capture in combinatie met duurzame waterstof. Hier speelt ook het tijdspad voor geleidelijke overschakeling en het effect op de behoefte aan duurzame waterstof.
 - Gebruik de roadmap(s) voor verduurzaming van de industrie om inzichtelijk te maken waar duurzame en/of klimaatneutrale waterstof een rol van betekenis kan spelen, welke vraag dat naar waterstof oplevert en hoe deze het beste kan worden ingevuld, wat de relatie is met CCS en biomassa, inclusief geografische aspecten (locaties, aanvoerroutes wanneer duurzame waterstof wordt ingezet etc.). Gebruik deze informatie om regionale actieplannen voor energieclusters uit te werken en indien mogelijk globale keuzes te maken.
- De rol van biomassa. In aansluiting bij het vorige punt is het van belang om een beeld te krijgen van de rol die biomassa, inclusief import, kan spelen in de verschillende toepassingen die in deze rapportage worden genoemd, met name in de industrie, voor het vervoer (mobiliteit en transport), en in de gebouwde omgeving.
 - Maak de benutting van biomassa, inclusief de mogelijkheid van import en maatschappelijk en politiek draagvlak daarvoor, inzichtelijk. Onder andere de Routekaart Groen Gas die door Groen Gas Nederland en TKI Nieuw Gas wordt voorbereid kan hierin behulpzaam zijn.
- De ontwikkeling van de behoefte aan waterstof als brandstof voor brandstofcel-elektrische voertuigen die voortvloeit uit aanscherpen van Europese CO₂-emissienormen voor voertuigen, maar ook uit de druk van het toenemend aantal milieuzones in steden en ambities op het gebied van zero-emissie mobiliteit en openbaar vervoer van de Nederlandse overheid. Daarnaast zou nagedacht moeten worden over de waterstofbehoefte die kan ontstaan voor synthetische brandstoffen voor de internationale lucht- en scheepvaart.
 - Gebruik onder andere de inzichten van de Green Deals zero-emissie OV-Bus en Stadlogistiek, de resultaten uit het Brandstofvisietraject en de doelstelling dat vanaf 2030 nieuwe auto's nul-emissies auto's zijn om inschattingen te maken van mogelijke inzet van waterstof voor mobiliteits- en transporttoepassingen.



- Infrastructuuraspecten, met name het hergebruik van assets van de gassector (leidingen, compressoren, meet- en regelsystemen, bergingen) en offshore-installaties voor waterstof en de samenhang met andere activiteiten, zoals CCS, aardgastransport en groen gas, timingsaspecten, risico's en regelgeving.
 - Stel een masterplan op voor hergebruik van de aardgasinfrastructuur in Nederland ten behoeve van waterstof, inclusief de offshore-infrastructuur en de timingsaspecten. Betrek hierbij ook de inrichting van een of meerdere energie-eilanden. Ook de positie van en planning voor CCS dient hierin te worden meegenomen, evenals de import van blauwe en duurzame waterstof. Gasunie en Tennet zouden hierbij het voortouw kunnen nemen.
- Integratie van de hiervoor genoemde thema's om inzicht te krijgen in de systeemrol die waterstof kan vervullen, inclusief de mate van flexibiliteit en opslag die geboden wordt en de toekomstige behoefte aan piekvermogen.
 - Analyseer, mede op basis van de voorgaande actiepunten, wat de behoefte aan flexibiliteit en opslag is, welke vraag naar waterstof gaat ontstaan, en op welke wijze deze behoeften optimaal ingevuld kunnen worden. Ook de marktontwikkeling van waterstof is hier onderdeel van. De overheid zou hierbij een sturende rol kunnen vervullen.

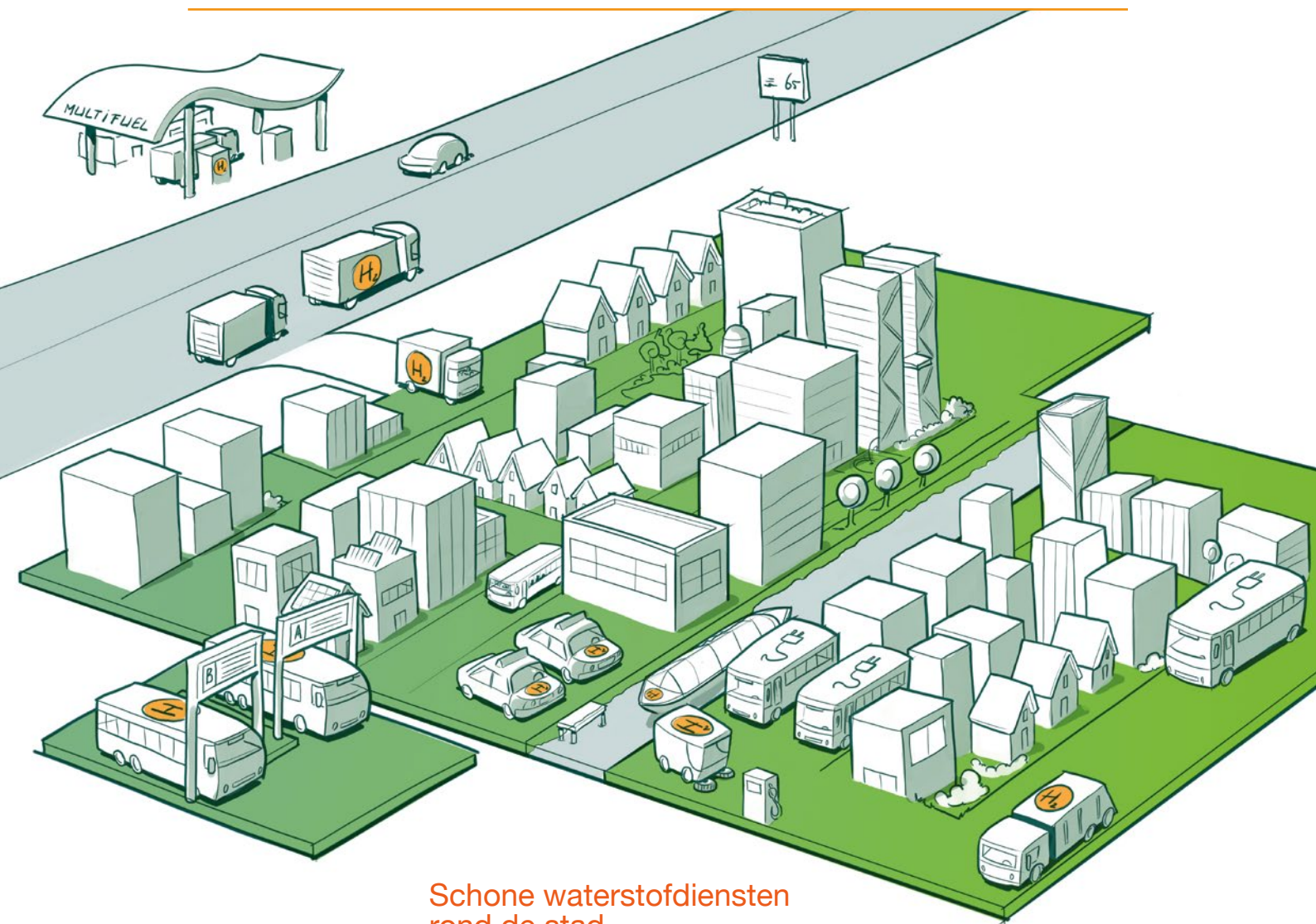




Het gewenste resultaat is een set aan duidelijke, breed gedragen visies op de deelonderwerpen, inclusief uitgewerkte (master)plannen, die inzicht geven in de betekenis en ontwikkeling van waterstof voor ons energie- en grondstoffensysteem als vervanging van fossiele brandstoffen en voor de inpassing van duurzame energie, bekeken vanuit een systeemperspectief. Hiervoor is een geregisseerd top-down proces denkbaar waarbij alle relevante stakeholders betrokken worden om te achterhalen hoe zij gezamenlijk de implementatie van waterstof kunnen faciliteren. Hierbij dient nog nader bepaald te worden op welke wijze en waar deze discussies het beste gevoerd kunnen worden met ondersteuning van deskundigen, inclusief het benodigde, onderbouwende rekenwerk zodat de uitkomsten daadwerkelijk waarde hebben. Het Klimaat- en Energieakkoord, dat in 2018 wordt opgesteld, leent zich bij uitstek voor het ontwikkelen van de genoemde ‘meta-issues’ omdat ze direct van invloed zijn op de inhoudelijke afspraken die daar worden gemaakt. Daarom wordt voorgesteld om de mogelijkheden te onderzoeken om deze onderwerpen in dat proces te borgen.

Er ligt binnen het thema visievorming ook een sterke verbinding met de routekaart CCS die momenteel op verzoek van EZK wordt opgesteld door een brede groep stakeholders onder leiding van adviesbureau De Gemeynt. Deze routekaart is naar verwachting in het eerste kwartaal van 2018 gereed. Vanwege deze verbinding is in de routekaart waterstof het thema CCS wel een paar keer benoemd, maar het wordt hier niet in detail uitgewerkt omdat de routekaart CCS daarvoor al een zorgvuldig stakeholderproces heeft opgetuigd en de benodigde inhoudelijke expertise aan tafel heeft. De uitkomsten van dat proces zijn van groot belang voor de route van blauwe waterstof.

Daarnaast wordt er gewerkt aan een routekaart Groen Gas waarbij de productie van hernieuwbaar gas uit biomassa centraal staat. Groen Gas Nederland werkt dit in nauwe samenwerking met het TKI Nieuw Gas en stakeholders uit. Deze routekaart heeft ook verbindingen met de routekaart waterstof omdat er gezamenlijke toepassingsgebieden zijn in bijvoorbeeld de industrie (brandstof en grondstof) en de gebouwde omgeving. Waterstof en groen gas/biomassa kunnen elkaar in die toepassingen versterken, onder meer omdat biomassa de benodigde groene koolstof levert. In het proces van de totstandkoming van beide routekaarten zal dit verder worden geconcretiseerd en afgestemd.



Schone waterstofdiensten
rond de stad



2. In praktijk brengen van waterstof in de komende 3-5 jaar

Naast het proces van visie- en planvorming is het noodzakelijk om productie en toepassingen van waterstof in de komende 3-5 jaar in de praktijk te brengen met aansprekende voorbeelden die het langetermijnperspectief kunnen illustreren. Dat is namelijk nodig om waterstof te introduceren en praktijkervaring op te bouwen ter voorbereiding van brede(re) marktintroductie. Het resultaat is een dekkend en goed afgestemd portfolio aan projecten en een goede organisatiegraad bij en tussen projecten waarbij van elkaar geleerd wordt en ervaringen gedeeld worden.

Om dit te kunnen realiseren is een geregisseerd bottom-upproces nodig waarbij lokale en regionale initiatieven tot bloei kunnen komen, passend in de visie voor de ontwikkeling van waterstof in Nederland. Demonstratieprojecten leveren waardevolle informatie op die met anderen wordt gedeeld zodat er maximaal van kan worden geleerd en waarbij vervolgpiloten deze ervaringen kunnen meenemen. Naast technologie dienen daarbij ook vraagstukken op het terrein van economie/businessmodellen, marktvorming, maatschappelijk draagvlak en wet- en regelgeving te worden meegenomen omdat de ervaring leert dat juist deze aspecten sterk remmend kunnen zijn voor implementatie en brede uitrol en daarom vroegtijdig moeten worden geadresseerd.

Voor implementatietrajecten geldt dat logisch opeenvolgende projecten de sleutel zijn en dat regie is vereist zodat het effect van ieder afzonderlijk project en het collectief maximaal is. Een goed voorbeeld is het rijden op waterstof waarbij de tankinfrastructuur logisch op elkaar moet aansluiten en gezamenlijke inkoop van voertuigen tot (kosten)voordelen kan leiden, waardoor deze optie sneller haalbaar kan worden met minder risico's voor alle deelnemers.

Voorbeelden van kansrijke projecten in de industrie die op korte termijn gestart kunnen worden:

- Een of meerdere opschalingsprojecten voor waterelektrolyse in een industriële omgeving, bijvoorbeeld met technologie die AkzoNobel gebruikt en met PEM-elektrolyse en alkalische elektrolyse. Een goed voorbeeld is het 20 MW elektrolyseproject van AkzoNobel en partners. Ook bij andere chemiebedrijven is er belangstelling om dergelijke projecten te starten.
- Stresstesten van grootschalige electrolyzers in een industriële setting met onder meer een fluctuerend aanbod aan duurzame elektriciteit.
- Pilots met het vervangen van fossiele brandstoffen bij de vraag naar hogetemperatuur-warmte in de industrie.
- Hergebruik van industriële restgassen in combinatie met waterstof.
- Een conceptstudie naar de ontwikkeling van een elektrolyseplant op GW-schaal.
- Haalbaarheid van gebruik van duurzaam waterstof ter vervanging van fossiel waterstof, bijvoorbeeld bij de olieraffinage of bij de ammoniakproductie.
- Supplychain-studie (opslag en transport) van waterstof, bijvoorbeeld in combinatie met off-shore/remote geproduceerde waterstof (bijvoorbeeld uit Australië).



Voorbeelden van kansrijke projecten op het thema vervoer/mobiliteit die op korte termijn gestart kunnen worden:

- De realisatie van een kosteneffectief basisnetwerk van openbare waterstofvulpunten, die zoveel mogelijk ook andere toepassingen kunnen ondersteunen (zoals openbaar vervoer, vuilniswagens en vrachtauto's).
- Bussen en opzet van bijbehorende tankinfrastructuur, en nadere uitwerking van een plan richting 2030 op basis van concessie- en vervangingsschema's.
- Opzetten van 3-5 stedelijke praktijkervaringsgebieden rond eerste concessies met waterstofbussen als testgebieden voor nieuwe waterstoftoepassingen zoals vuilnis- en veegwagens. Bij voorkeur maken de gebieden ook onderdeel uit van het basisnetwerk van openbare vulpunten zodat een combinatie met bijvoorbeeld taxi's en taxibusjes mogelijk is.
- Opzetten van een of meerdere praktijkervaringslocaties voor introductie, demonstratie en het testen van voertuigen voor vracht en logistieke toepassingen op waterstof, zoals heftrucks en -werktuigen. Geschikt zijn locaties met 24/7-activiteiten en beschikbaarheid van een breed scala aan voertuigen (o.a. trekkers met oplegger, bakwagens van verschillende afmeting en bestelwagens). Aansluiting bij een belangrijke waterweg voor mogelijke combinatie met elektrisch aangedreven binnenvaart op waterstof is ook interessant.

Voorbeelden van kansrijke projecten voor klimaatneutrale elektriciteitsopwekking:

- In Rotterdam en de Eemshaven wordt aan plannen gewerkt om klimaatneutrale elektriciteit te produceren in combinatie met CO₂-afvang en -opslag. In Groningen concentreren deze plannen zich rond de Magnum-centrale van Nuon-Vattenfall. In de regio Rotterdam worden plannen momenteel verder uitgewerkt.

Voorbeelden van kansrijke projecten in de gebouwde omgeving:

- Vanwege de maatschappelijke implicaties en vele vraagstukken met betrekking tot waterstof is het wenselijk om de mogelijkheden van toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving in een goed controleerbare setting te doen. Voorbeelden zijn The Green Village van TU Delft waar de mogelijkheid bestaat om in hun proeftuin te experimenteren onder gecontroleerde, real-life omstandigheden.



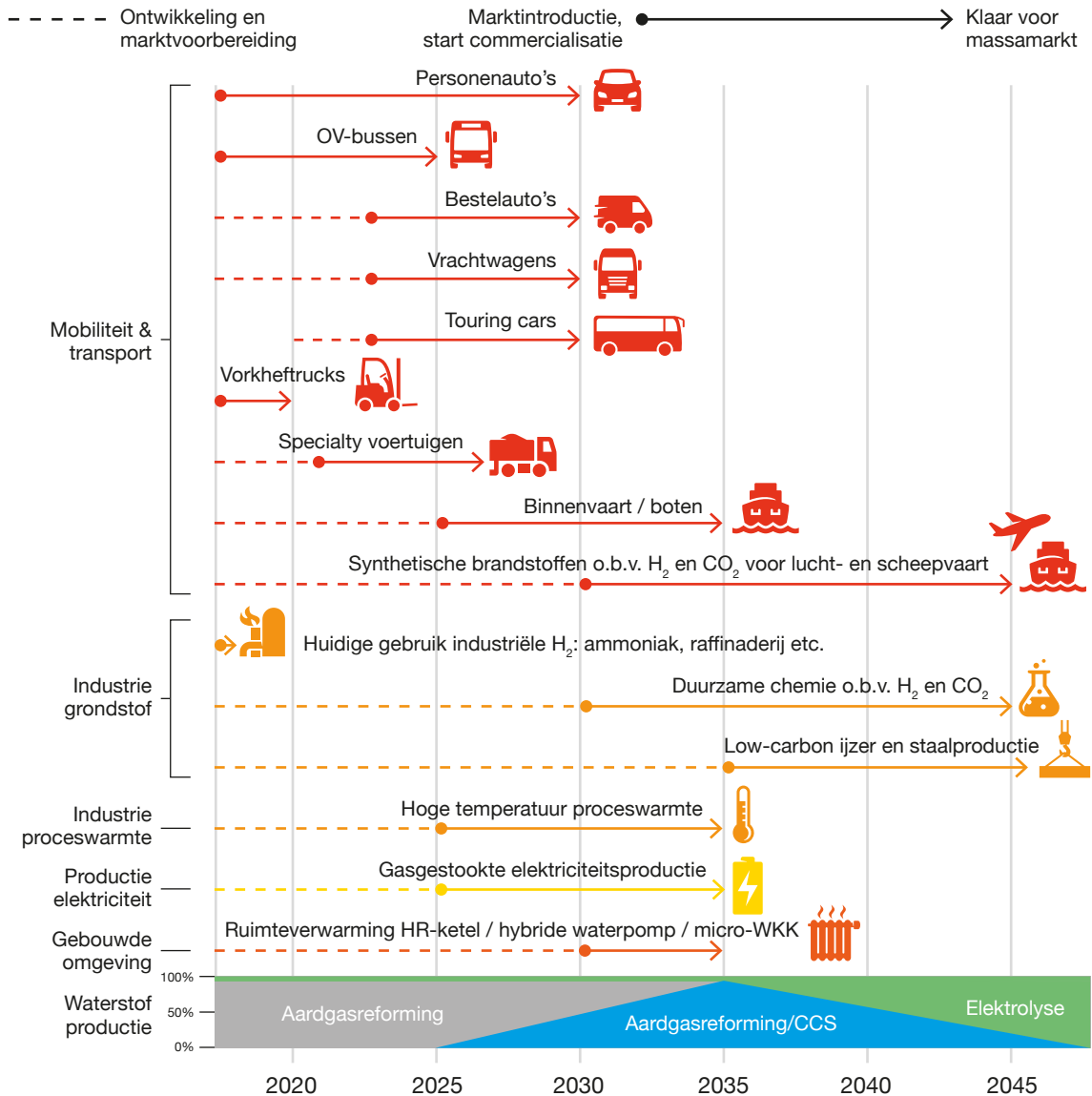
Zoals in de inleiding van dit hoofdstuk betoogd, hebben toepassingen in de industrie en de mobiliteit een hogere prioriteit dan toepassingen in de gebouwde omgeving en de elektriciteitsopwekking. Dat betekent niet dat de laatste twee toepassingen niet meegenomen moeten worden, maar wel met een andere intensiteit dan de industrie en de mobiliteit moeten worden ondersteund.

Voor veel van deze projecten zijn voorbereidende activiteiten noodzakelijk, zoals consortia-vorming, projectplanning en -uitvoering, timing, financiering, beleidsmatige ondersteuning, communicatie en maatschappelijke betrokkenheid. Dit zou in 2018 kunnen plaatsvinden waarbij aansluiting bij en/of samenwerking met de ruim 100 initiatieven die nu reeds bestaan aan te bevelen is.

Om een beeld te schetsen van de timing van de implementatie van verschillende toepassingen, is in figuur 4 een illustratie opgenomen. De geschetste routes zijn indicatief en geven de grote lijnen weer voor waterstoftoepassingen. Het figuur beoogt niet om 100% volledig te zijn maar wel om de belangrijke routes te schetsen. Het figuur laat zien dat een aantal toepassingen al voorhanden zijn en direct in praktijk gebracht kunnen worden. Voor andere toepassingen is nog ontwikkeling van technologie, en vooral van systemen nodig. Dit vormt dan ook het derde element van dit voorstel voor een plan van aanpak.



Figuur 4 | Schets van de timing van implementatietrajecten voor verschillende waterstoftoepassingen.





3. Onderzoek, ontwikkeling en demonstratie op sleutelonderwerpen voor waterstof

Naast visievorming en het in praktijk brengen van waterstof via concrete projecten, is het van belang om R&D-vragen op dit terrein op te pakken. Het doel is om de kosten van waterstof-productie en -toepassing te verlagen, de efficiëntie van de technologie te verhogen, nieuwe processen te ontwikkelen, toepassing van minder schaarse materialen te bereiken, en deze innovaties in pilots en demoprojecten te laten zien. Het einddoel is bijdragen aan een duurzame, betrouwbare en betaalbare waterstofvoorziening. Er bestaat binnen dit spoor ook een verbinding met de bij onderdeel 2. genoemde praktijkprojecten omdat deze projecten bij uitstek de kans bieden om innovaties te testen en demonstreren.

Het resultaat is een stevig RD&D-portfolio dat tot lagere kosten en een verbeterde performance van waterstof in de breedte (productie, toepassingen etc.) leidt. De rapportage van de commissie ECCM, die eerder in deze notitie is genoemd, geeft een goede opsomming van de innovatie-opgaven met betrekking tot de technologie om waterstof te maken en toe te passen.

Daarnaast speelt innovatie ook een rol bij andere dan technische componenten en bij de combinatie van verschillende reeds bestaande technologieën. Deze lijn is erop gericht om de kosten van waterstof(technologie), te reduceren, innovatieve demonstratieprojecten uit te voeren, nieuwe combinaties van concepten en technologie te testen, en componenten en systemen (door) te ontwikkelen. Hierin is een sterke rol voorzien van de Topsectoren Energie, Chemie, HTSM en Water. Binnen de Topsector Energie werken het TKI Nieuw Gas en TKI Energie & Industrie sinds 2017 gezamenlijk aan een programmaliijn waterstof. Het is de bedoeling om in 2018 een meerjarige, missiegedreven, programmatische aanpak voor waterstof uit te werken en via een subsidieprogramma vorm te geven.

We benoemen hier twee innovatiesporen, te weten:

1. Een langetermijnspoor, gericht op onderzoek en ontwikkeling van technologie voor waterstofproductie en gebruik van waterstof als energiedrager en grondstof (TRL 2-5/6)

Aansluiting bij nationale en internationale industrie op dit gebied is essentieel om resultaten en vindingen optimaal te kunnen exploiteren. Belangrijke onderzoeksonderwerpen zijn:

- vermindering van het gebruik van schaarse materialen
- verbetering van de betrouwbaarheid en robuustheid
- verhogen van de efficiency
- verlengen van de levensduur
- verlagen van de kosten
- verbeteren van de maakbaarheid/produceerbaarheid
- ontwikkeling van nieuwe technologie en processen



2. Demonstratie van technologie en ontwikkeling van nieuwe en verbeterde producten, systemen en (productie)processen (TRL 6-8/9)

Op het gebied van systemen en toepassingen kan hierbij worden gedacht aan brandstofcel-systemen en aandrijflijnen voor bussen, vrachtwagens, bestelauto's en vaartuigen. Voor productieprocessen is de productie van waterstof uit aardgas en/of uit biomassa in combinatie met CCUS een interessante optie. Voor de gebouwde omgeving is de toepassing van waterstof op bijvoorbeeld wijkniveau van belang.

Regievoering en facilitering van waterstof (doorsnijdende activiteit)

Naast de drie bovengenoemde inhoudelijke sporen signaleren we ook behoefte aan regievoering en bredere facilitering van waterstof. Deze regievoering en facilitering is erop gericht om de onderlinge samenhang tussen alle waterstofactiviteiten te borgen, waar nodig (bij) te sturen en toezicht te houden op ontwikkelingen van waterstof als onderdeel van een duurzaam energie- en grondstoffsysteem. Feitelijk adresseert dit thema de regiefunctie met als doel een efficiënte en effectieve realisatie van doelstellingen, prioritering van thema's, afstemming tussen projecten, programma's en regio's alsmede open communicatie daarover en verantwoording naar belanghebbenden. Onderdeel hiervan is ook de regionale regievoering zoals dat in Noord-Nederland via de Noordelijke Innovation Board gebeurt of in de regio Rotterdam via Deltalinqs en het Havenbedrijf Rotterdam. Door regionale samenwerking worden individuele, lokale initiatieven versterkt waardoor ze meer massa, snelheid, aandacht en financieringskracht kunnen ontwikkelen.

Andere belangrijke onderwerpen zijn:

- Veiligheid van waterstof, bijvoorbeeld via de uitvoering van een nationaal veiligheidsprogramma
- Maatschappelijke inbedding (o.a. informatie, voorlichting, publieke perceptie en maatschappelijke acceptatie)
- Internationale afstemming en samenwerking, bijvoorbeeld in Benelux-verband en met Duitsland en gericht op de EC/Brussel (Horizon2020, HFC JU)
- Visie en projecten aan elkaar verbinden, inzetten op maximaal leren en op toegevoegde waarde creëren, vooruitplannen en programmeren zodat projecten passen in een langetermijnbeeld
- Monitoring op de voortgang: waar staan we, in hoeverre worden doelen bereikt, wat leren we daarvan, wat is er nog nodig, hoe borgen we ervaringen
- Rol overheden versus rol bedrijven bepalen, commitment organiseren, maatschappelijke support regelen

De uitdaging bij deze regiefunctie is om er een effectieve invulling aan te geven (*lean and mean*) die doelgericht werkt, zonder dat daarmee veel overhead wordt gecreëerd die weer vertragend gaat werken. Op het gebied van mobiliteit is waarschijnlijk het H₂Platform een geschikt gremium om een dergelijke rol in te nemen. Voor industriële toepassingen zou deze rol bij een door de industrie of een industriecluster geleid gremium kunnen liggen, bijvoorbeeld als uitvloeisel van afspraken die in het kader van het Klimaat- en Energieakkoord worden gemaakt. Dit moet zich in de komende maanden verder uitkristalliseren.



Bijlagen





Bijlage 1 | Geïnterviewde personen/organisaties

Bij onder meer de volgende organisaties is tijdens de consultatie in persoonlijke gesprekken gedurende de periode augustus – december 2017 input opgehaald:

AkzoNobel, Gasunie, Tennet, Greenpeace, WaterstofNet, Shell, GasTerra, Stichting Natuur en Milieu, Stedin, Eneco, Alliander, Netbeheer Nederland, H₂Platform, Havenbedrijf Amsterdam, TU Delft / Green Village, RVO, Ministerie van EZK, Ministerie van I&W, TU/e & Differ, TKI Energie & Industrie, VEMW, Statoil, Havenbedrijf Rotterdam, SCW Systems, Noord-Nederland/Noordelijke Innovation Board, Energy Valley, E&E Advies.

Voorts hebben aan de drie voor het H₂Platform georganiseerde workshops op 28 september, 24 oktober en 5 december respectievelijk ca. 40, 45 en 30 personen deelgenomen, afkomstig van een brede groep stakeholders. Hun input is ook zoveel mogelijk verwerkt.

In het kader van de inventarisatie van waterstofinitiatieven (hoofdstuk 8) is door de betreffende opdrachtnemer met veel verschillende projecten gesproken. De input uit die gesprekken is ook in de routekaart opgenomen.

Op 29 november hebben we tijdens de werkconferentie van de Topsector Energie te Nieuwegein twee workshops georganiseerd over mobiliteit (ca. 45 personen) en industrie (ca. 50 personen) in relatie tot waterstof. De input die daaruit voortkwam is zoveel mogelijk verwerkt.

Voor het bestuur TKI Nieuw Gas zijn twee sessies gehouden om input op de concept-routekaart te ontvangen. Tot slot hebben diverse personen commentaar geleverd op het eindconcept van deze routekaart.



Bijlage 2 | **Onderbouwing van schattingen voor de toekomstige inzet van waterstof**

Deze bijlage bevat een onderbouwing van (zeer indicatieve) schattingen voor de toekomstige inzet van waterstof als energiedrager en als bouwsteen voor chemische producten en synthetische brandstoffen, bovenop bestaand non-energetisch gebruik van waterstof in de industrie. De inschattingen vormen een soort theoretisch technisch potentieel en zijn niet gebaseerd op economische overwegingen, kostenoptimalisatie, of beperkingen vanuit concurrerende claims op resources. De inschattingen zijn gemaakt per energiefunctionaliteit zoals gebruikt in de energieagenda, en zijn bedoeld als vingeroefening, om gevoel te krijgen voor ordegroottes.

Hogetemperatuurwarmte

De energiefunctionaliteit hogetemperatuurwarmte is volledig gekoppeld aan de industrie. Onder deze functionaliteit valt de inzet van energiedragers voor de productie van hogetemperatuurproceswarmte, die hier is gedefinieerd als warmte van meer dan 250 °C. Daarnaast wordt ook non-energetische inzet van energiebronnen voor productie van chemische producten en materialen tot deze functionaliteit gerekend. Voor waterstof is daarbij nog onderscheid gemaakt tussen het huidige non-energetische verbruik en het mogelijke toekomstige verbruik als de industrie niet alleen moet overschakelen op klimaatneutrale en duurzame energie, maar ook op duurzame grondstoffen. Tot slot is er nog een categorie die onder energetisch en non-energetisch gebruik kan vallen; het betreft het gebruik van waterstof voor productie van duurzame synthetische brandstoffen en de inzet van waterstof voor reductie van ijzererts in koolstofarme processen voor staalproductie.

Non-energetisch industrieel waterstofgebruik

Non-energetische inzet van aardgas in de industrie en in raffinaderijen bedraagt op het ogenblik ongeveer 100 Petajoule (PJ) waarvan ruim 80 PJ in de industrie en bijna 20 PJ in raffinaderijen. Met een conversierendement van 75% is dat 75 PJ waterstof. Wereldwijd ligt de verdeling iets anders met ca. 50% chemie, 40% raffinaderijen en 10% overige industrie. Met toenemende elektrificatie van het wegverkeer zal er minder brandstof uit raffinaderijen nodig zijn en is te verwachten dat de behoefte aan waterstof daar zal afnemen. Als gevolg van een resterende behoefte aan brandstof in bijvoorbeeld de (internationale) scheep- en luchtvaart is het mogelijk dat de vraag van raffinaderijen niet helemaal wegvalt. Hoewel de huidige situatie in Nederland afwijkt van het wereldgemiddelde wordt hier een behoudende schatting gemaakt. Aangenomen wordt dat de huidige vraag naar industriële waterstof daalt naar ordegrootte 50 PJ.

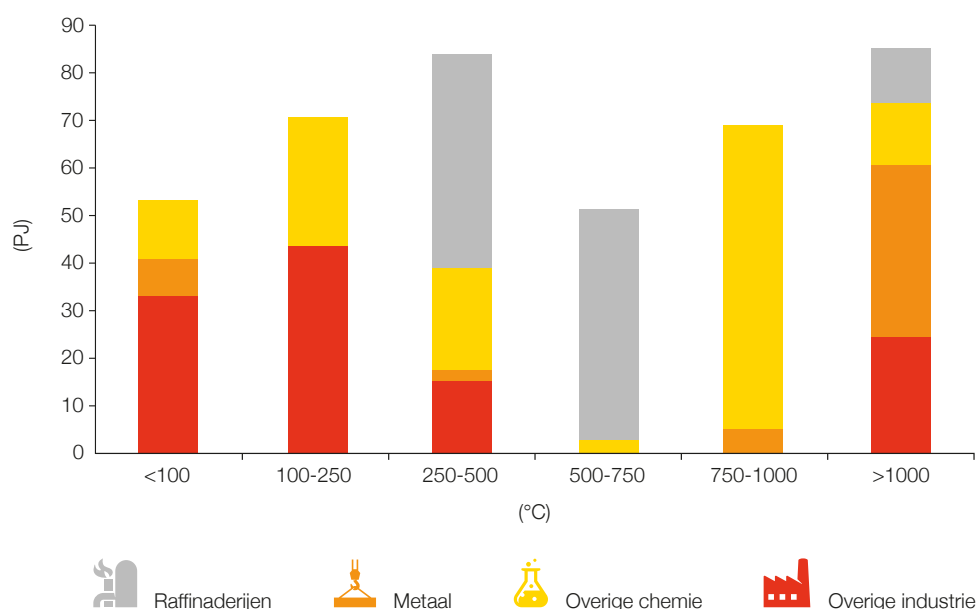


Inzet waterstof voor hogetemperatuurwarmte in de industrie en raffinaderijen

In de chemische industrie en in raffinaderijen worden veel restgassen uit raffinage en kraakprocessen ingezet voor de productie van hogetemperatuurwarmte. Zolang aardolie de grondstof is zal dit mogelijk zo blijven tenzij manieren worden gevonden om de restgassen kosteneffectief hoogwaardiger in te zetten. Voor een schatting van de mogelijke inzet van waterstof voor productie van hogetemperatuurproceswarmte wordt hier alleen gekeken naar vervanging van aardgas dat nu energetisch wordt ingezet. In 2014 was dit 202,6 PJ in de industrie waarvan 40,6 PJ in WKK, en 52,9 PJ in raffinaderijen²⁹. Met de aanname dat ongeveer twee derde van de aardgasinzet in WKK warmte oplevert komt de inzet van aardgas voor warmte in totaal op 242 PJ. Een schatting op basis van een indicatieve verdeling van de warmtevraag naar temperatuurniveau in industrie en raffinaderijen levert een warmtevraag van 124 PJ voor relatief lage temperaturen tot 250 °C (zie figuur 5). Deze vraag zal nu voornamelijk worden ingevuld met aardgas. Verondersteld wordt dat deze vraag goed is te elektrificeren en dat hier in de toekomst geen aardgas meer voor nodig is. Bij een rendement van aardgas naar warmte van 80 à 90% is voor een warmtevraag van 124 PJ een hoeveelheid aardgas nodig van 138-155 PJ. De resterende inzet van aardgas voor hogetemperatuurwarmte komt zo op ongeveer 100 PJ. Als richting de toekomst groei en besparing in de sector elkaar in evenwicht houden, en het conversierendement voor waterstof gelijk is aan dat voor aardgas, komt zo de schatting voor mogelijke inzet van waterstof voor hogetemperatuurwarmte uit op 100 PJ.

Figuur 5 | Warmtevraag Nederlandse industrie verdeeld naar temperatuurniveau

(Data in PJ voor 2010 conform verdeling in 2006. Bron: Warmte en koude in Nederland, RVO, 2013)



29 Op basis van achtergrondgegevens van de NEV2016.



Waterstof als grondstof voor duurzame chemische producten en materialen

Naast de huidige non-energetische inzet van waterstof in de industrie, met name de chemische industrie, kan de behoefte aan waterstof sterk toenemen als op termijn de inzet van koolstof van fossiele bronnen in de industrie moet worden uitgefaseerd. Voor duurzame chemie zal dan kunnen worden overgeschakeld naar klimaatneutrale koolstof, bijvoorbeeld afkomstig van duurzame biomassa, of van koolstofdioxide (CO₂) die wordt gewonnen uit de atmosfeer (air capture) of uit water. Deze koolstof wordt dan gecombineerd met duurzame waterstof voor de productie van chemische producten en materialen. In de afgelopen jaren is jaarlijks ongeveer 480 PJ aan aardolie non-energetisch ingezet in de industrie. Voor een deel zou de aardolie kunnen worden vervangen door biomassa. Voor Nederland wordt verondersteld dat het beschikbare potentieel aan duurzame biomassa in de orde grootte van jaarlijks 250 PJ tot 700 PJ ligt. Op het ogenblik wordt een deel hiervan ingezet voor de productie van biogas/groen gas, voor biobrandstoffen en voor de productie van warmte en elektriciteit in de gebouwde omgeving en in centrales. Wordt fossiele koolstof voor de chemie volledig vervangen door producten op basis van CO₂ en waterstof, dan is alle energie afkomstig van waterstof. Bij gelijkblijvende omvang van de sector en efficiency voor productie van chemische producten en materialen zal de vraag naar waterstof dan liggen rond 480 PJ. In de praktijk zal de hoeveelheid afhangen van de mate waarin aardolie kan worden vervangen door biomassa als grondstof, de beschikbaarheid van biomassa en de energiebehoefte van alternatieve routes en processen voor de productie van de chemische producten en materialen die nodig zijn.

Waterstof voor de productie van duurzame brandstoffen

Naast directe inzet van waterstof als brandstof voor brandstofcel-elektrisch wegverkeer, kan waterstof in de toekomst worden ingezet voor de productie van duurzame synthetische brandstoffen. Dit kan nodig zijn voor die segmenten die niet, niet praktisch of alleen tegen hele hoge kosten zijn te elektrificeren. Hierbij kan worden gedacht aan de luchtvaart en scheepvaart, en dan zeker voor de langere afstanden (intercontinentaal). Voor deze brandstoffen wordt bij voorkeur uitgegaan van klimaatneutrale koolstof, bijvoorbeeld afkomstig van duurzame biomassa, of van CO₂ die wordt gewonnen uit de atmosfeer of uit water. Deze koolstof wordt dan gecombineerd met duurzame waterstof (Power-to-Fuels, ook Solar Fuels). In Nederland is in de afgelopen 5 jaar gemiddeld ongeveer 700 PJ per jaar aan brandstof gebunkerd voor internationale lucht- en scheepvaart³⁰. Voor een deel zou dit brandstof op basis van biomassa kunnen zijn. Hiervoor zal waarschijnlijk competitie ontstaan met inzet van duurzame biomassa als grondstof voor de industrie. Worden de brandstoffen volledig vervangen door producten op basis van CO₂ en waterstof, dan is alle energie afkomstig van waterstof. Bij gelijkblijvende omvang van de sectoren en efficiency van inzet van brandstoffen zal de vraag naar waterstof dan minimaal 700 PJ bedragen. In de praktijk zal de hoeveelheid groter zijn vanwege conversieverliezen bij de productie van de brandstoffen.

30 Brandstoffen die in Nederland worden gebunkerd voor internationaal lucht- scheepvaartverkeer zitten wel in de statistieken voor de Nederlandse energievoorziening, maar blijven buiten de boekhouding voor berekening van de nationale broeikasgasemissies. De brandstoffen behoren daarmee niet direct tot de Nederlandse inspanningen voor verduurzaming en CO₂-emissiereductie. De brandstoffen worden ook niet allemaal in Nederland geproduceerd. Soms is er sprake van netto-import. Vooralsnog komt het overgrote deel van de brandstoffen echter uit Nederlandse raffinaderijen. Omdat uiteindelijk ook deze brandstoffen klimaatneutraal moeten worden is daarom het totaal aan bunkers ter indicatie hier als verduurzamingsopgave opgenomen.
<https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/83406NED/table?ts=1519924861625>



Staal

De productie van ruwijzer en staal is op het ogenblik een koolstofintensief proces. In principe is staal maken ook mogelijk zonder koolstof, maar dat vergt wel alternatieve processen. Een optie is het Direct Reduced Iron (DRI) proces. Dit is een bestaand proces waarbij reductie nu plaatsvindt met een reducerend gasmengsel dat bestaat uit koolmonoxide (CO) en waterstof dat wordt geproduceerd door reforming van aardgas. In de chemische industrie wordt een dergelijk gasmengsel syngas genoemd. Van het gereduceerde erts worden briketten gemaakt en daarna verwerkt tot staal in elektrische smeltovens. Reductie met alleen waterstof is mogelijk. Bij gebruik van duurzame waterstof kan zo een koolstofarm proces worden gemaakt waarbij de enige CO₂-uitstoot nog van het erts zelf afkomstig is. Voor reductie van ijzererts op deze manier is circa 570 Nm³ waterstof nodig per ton ruwijzer.³¹ De huidige productie van ruwijzer in Nederland bedraagt ongeveer 7 miljoen ton per jaar (Mton/j). Wordt aangenomen dat 50% van deze productie kan worden gereduceerd door recycling en de rest (3,5 Mton/j) wordt geproduceerd via het DRI-proces op waterstof, dan leidt dit tot een jaarlijkse vraag van 2 miljard m³ waterstof, omgerekend ongeveer 20 PJ.

Vervoer: Mobiliteit en Transport

Het finale energieverbruik in de vorm van benzine en diesel bedraagt op het ogenblik ongeveer 165 PJ benzine en 250 PJ diesel. Benzine is vooral een brandstof voor auto's in privégebruik. Diesel is vooral voor de segmenten vracht, licht commercieel (bestelbusjes) en zakelijke veelrijders. Daar waar elektrisch rijden een goed alternatief is voor de meeste "benzineauto's", sluit waterstof momenteel beter aan bij de karakteristieken van de dieselsegmenten. Verwacht wordt het energieverbruik van (toekomstige) brandstofcel-elektrische voertuigen op waterstof 50% lager ligt dan het gemiddelde van de huidige dieselvoertuigen. Dit betekent een halvering van 250 PJ en dus een schatting voor de waterstofvraag van 125 PJ.

Kracht en Licht

Met toenemende implementatie van wind op land (WoL), wind op zee (WoZ) en zon-PV neemt de behoefte aan aardgas voor de productie van elektriciteit af. Het uitschakelen van kolen en het sluiten van Borssele heeft echter een tegengesteld effect. Sowieso blijft regelbaar vermogen nodig om het variërende en onzekere aanbod uit wind en zon in evenwicht te brengen met de vraag naar elektriciteit. Op het ogenblik wordt ruim 150 PJ aardgas en ongeveer 200 PJ aan kolen ingezet voor de productie van elektriciteit. Recente analyses geven aan dat na uitschakelen van nucleair en kolen, en een toename van WoL, WoZ en zon-PV tot respectievelijk 7, 16 en 19 GW de behoefte aan inzet van aardgas ongeveer 230 PJ bedraagt³². Andere analyses laten een halvering van de inzet van aardgas voor elektriciteit zien bij grootschalige uitbreiding van WoZ, maar in een systeem waarin ook nucleair en kolen nog een rol kunnen spelen.³³ Combinatie van deze resultaten leidt tot de inschatting dat zelfs bij zeer grootschalige uitbreiding van WoZ er nog een behoefte blijft aan inzet van ordegrrootte 115 PJ aan gasvormige brandstof voor gascentrales. Dit levert dus een mogelijke waterstofvraag op van 115 PJ.

31 J.P. Birat, Steel & Hydrogen, IEA Hydrogen Roadmap meeting, 9-10 July 2013, Paris

32 M. Weeda, K. Smekens, Verkenning Energievoorziening 2035, ECN-E--17-026, juli 2017.

33 M. Weeda, M. van Hout, Verkenning Energie-functionaliteit Energie-Eilanden Noordzee, ECN---17-064, november 2017.



Lagetemperatuurwarmte (voor de gebouwde omgeving)

NEV2016 schetst een aardgasverbruik voor huishoudens en de dienstensector in 2035 van respectievelijk 240 PJ en 80 PJ. Een simplistische extrapolatie van trends richting 2050 zou uitkomen op respectievelijk 190 PJ en 50 PJ. Door versterkte inzet op isolatie van woningen, zon-thermisch etc. moet verdere reductie mogelijk zijn. Of het geheel zonder gasvormige brandstof kan is onderwerp van discussie en studie. Voor de gedachtevorming wordt hier simpelweg verondersteld dat nogmaals een halvering van de gasvraag kan worden gerealiseerd. Aardgas voor verwarming van kassen moet richting 2050 uitgefaseerd kunnen zijn. De halvering levert een resterende gasvraag van 120 PJ, die naar beneden afgerond tot een mogelijke waterstofvraag kan leiden van 100 PJ. Dit is ongeveer gelijk aan 2 miljoen woningen met een gemiddeld aardgasverbruik van 1500 m³ per jaar. Naast directe inzet van waterstof in CV-ketels in woningen is ook inzet in hybride warmtepompen mogelijk en inzet als brandstof in centrales voor (lokale) warmtenetten.



Bijlage 3 | Toelichting op kosten van waterstofproductie via elektrolyse en vergelijking met SMR

Deze bijlage bevat een nadere toelichting op de productiekosten van waterstof via elektrolyse en SMR.

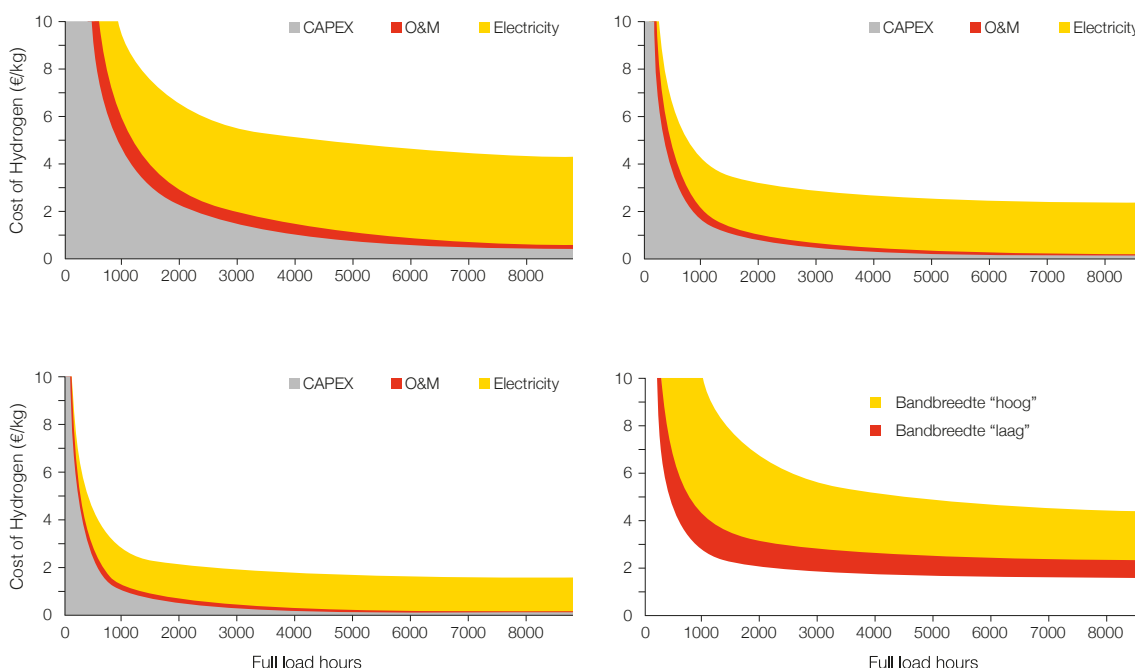
Figuur 6 toont de indicatieve kosten van waterstof op basis van de investeringskosten van een elektrolyse-eenheid (geleverd en geïnstalleerd), de vaste kosten voor onderhoud en bedrijfsvoering, en de elektriciteitskosten.³⁴ De figuur laat zien dat de bijdrage van de investeringskosten (CAPEX) aan de productiekosten voor waterstof sterk afhankelijk zijn van het aantal bedrijfsuren van de installatie. Bij de huidige hoge investeringskosten, zoals geïllustreerd door de figuur linksboven, bedraagt de bijdrage 1 €/kg of meer tot ongeveer 5000 bedrijfsuren. Naarmate de investeringskosten afnemen verschuift deze grens naar een lager aantal bedrijfsuren en worden elektriciteitskosten steeds eerder dominant in de productiekosten van waterstof. Bij investeringskosten van 300 €/kW duikt de CAPEX-bijdrage onder 1 €/kg bij meer dan 1000 bedrijfsuren. De bijdrage neemt snel af en het kostenprofiel is vrijwel vlak vanaf 2000 à 3000 uur.

³⁴ Investeringskosten zijn exclusief kosten voor civiel werk en overige kosten voor specifiek engineering, aanvraag van vergunningen etc. Er is geen rekening gehouden met aanloop- en opstartkosten, en kosten voor reserveonderdelen. Vaste kosten voor onderhoud en bedrijfsvoering bedragen 2% per jaar van de initiële investeringskosten voor de installatie. Er is geen rekening gehouden met stackvervanging. Doorrekening is gedaan voor een technische levensduur van 20 jaar. Financiering met 70% vreemd vermogen en 30% eigen vermogen. WACC is 8%, met afbetaling van de investering in 10 jaar.



Figuur 6 | Productiekosten van waterstof via elektrolyse als functie van bedrijfstijd voor een brede set aan condities wat betreft investeringskosten, efficiency en elektriciteitsprijs.

Linksboven: 1220 €/kW, 55 kWh/kg H₂, 70 €/MWh; Rechtsboven: 460 €/kW, 47 kWh/kg H₂, 45 €/MWh; Linksonder: 300 €/kW, 47 kWh/kg H₂, 30 €/MWh; Rechtsonder: bandbreedtes gevormd door de hoogste en middelste variant (Bandbreedte “hoog”) en de middelste en laagste variant (Bandbreedte “laag”).

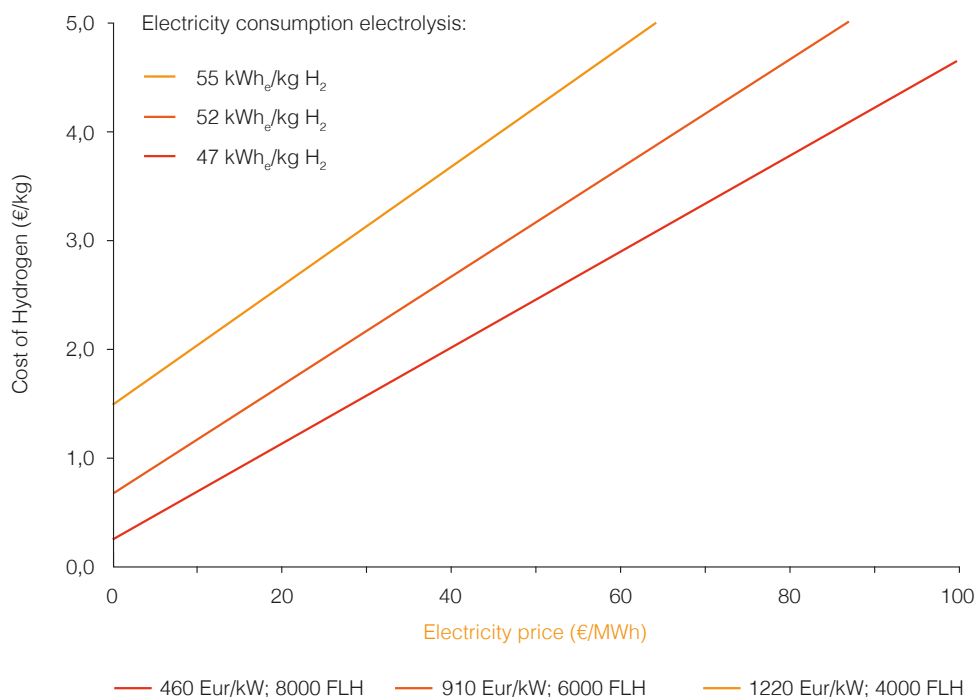


De figuur rechtsonder is een samenvatting van de drie andere en geeft een indicatie van de bandbreedte voor de productiekosten van waterstof voor huidige en toekomstige situaties. De productiekosten liggen alleen onder de bandbreedte als de kosten voor elektriciteit gemiddeld ruim onder 30 €/MWh uitkomen. De toekomstige elektriciteitsprijs is een grote onbekende. Sommigen verwachten dat de prijzen sterk zullen dalen als gevolg van een overvloed aan goedkope duurzame elektriciteit. Anderen vragen zich af wat het verdienmodel is bij dergelijke lage prijzen en verwachten meer evenwicht in de markt met prijzen die niet veel af zullen wijken van het huidige niveau.³⁵

³⁵ Doorrekeningen voor de Nationale Energieverkenning 2017 geven aan dat elektriciteitsprijzen op het ogenblik historisch laag zijn vanwege overaanbod van capaciteit. Dit houdt nog even aan maar door het uit de markt nemen van capaciteit zullen groothandelprijzen naar verwachting weer toenemen van 32 €/MWh in 2020 tot 48 €/MWh in 2035. Hierbij is de aangekondigde sluiting van alle kolencentrales voor 2030 uit het regeerakkoord 'Vertrouwen in de toekomst' nog niet meegenomen.



Figuur 7 | Productiekosten voor waterstof via elektrolyse als functie van de elektriciteitsprijs.



Figuur 7 geeft voor elektrolyse-eenheden met verschillende investeringskosten en rendementen, en voor verschillende bedrijfstijden, de productiekosten van waterstof als functie van de prijs van elektriciteit. De bovenste lijn is het meest representatief voor de huidige status van investeringskosten. Bij transactieprices voor elektriciteit van 40-60 €/MWh zullen de productiekosten van waterstof daarmee naar verwachting liggen in de orde van 4 à 5 €/kg. Bij lagere elektriciteitsprijzen zullen de productiekosten ook verder dalen.

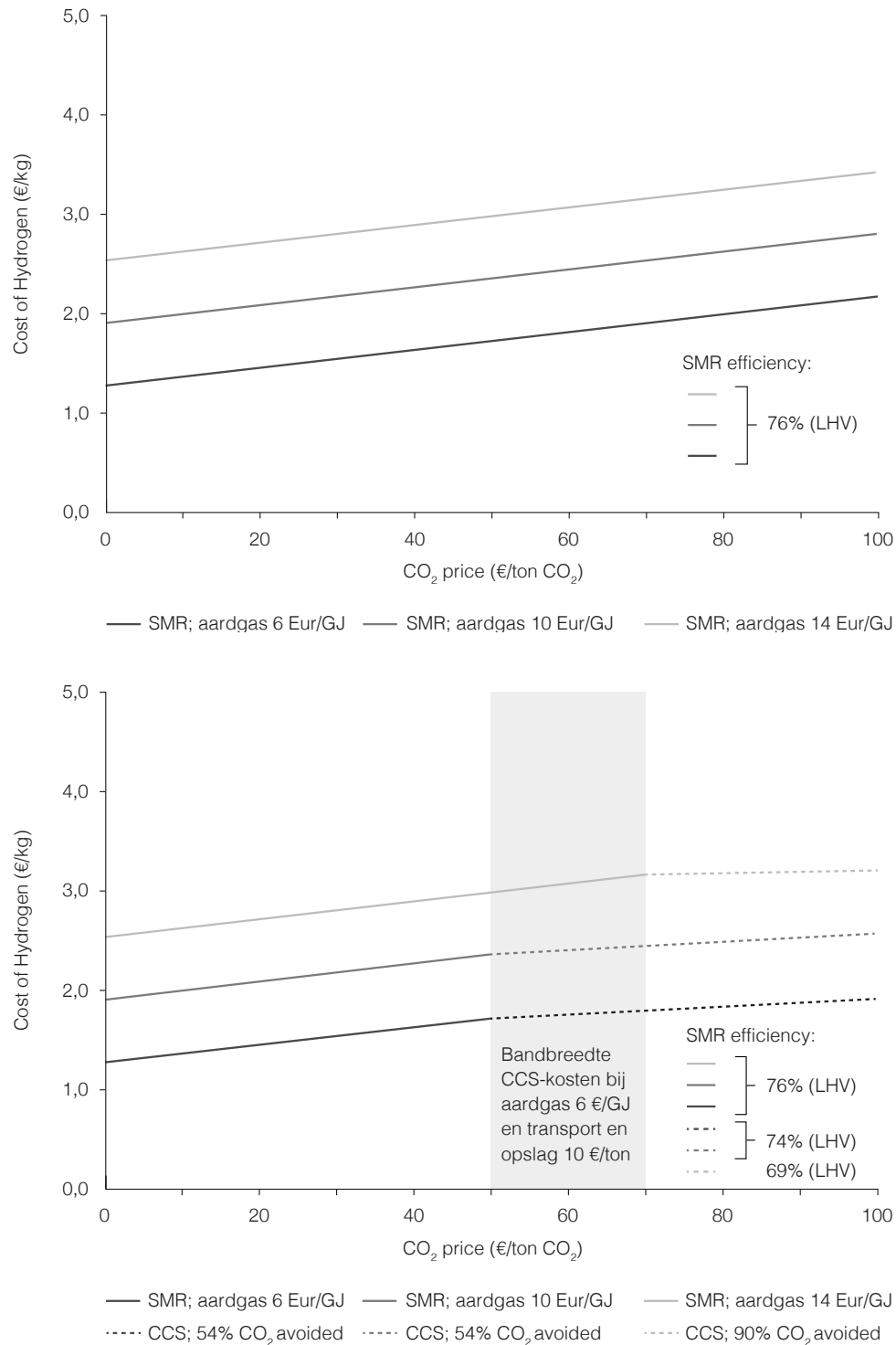
Figuur 8 toont de productiekosten van waterstof bij productie met aardgas via SMR. De kosten zijn weergegeven als functie van de CO₂-prijs voor drie verschillende aardgasprices. De onderste lijn in de figuur is het meest representatief. Op het ogenblik liggen groothandelsprices voor aardgas zelfs ruim onder de 6 €/GJ die is gehanteerd voor de onderste lijn.

Het linkerdeel van de figuur toont alleen resultaten zonder CCS. Zodra de CO₂-prijs waarden bereikt die hoger zijn dan de kosten voor afvang en opslag van CO₂ is te verwachten dat deze optie zal worden toegepast. Meerdere procesvarianten zijn mogelijk met elk een ander effect op investeringskosten, operationele kosten, het percentage vermeden CO₂-emissies en het rendement van de productie van waterstof. Grofweg nemen investeringskosten en operationele kosten toe en daalt het rendement naarmate een hoger percentage vermeden CO₂-emissies wordt nagestreefd. In een standaard variant met laagste kosten bedraagt het percentage vermeden emissies circa 54%. In een maximale variant is voor SMR circa 90% mogelijk. Omdat na afvang minder CO₂-emissie resteert, nemen de productiekosten van waterstof minder snel toe met stijgende CO₂-prijs.



Figuur 8 | Productiekosten van waterstof met aardgas via SMR met en zonder CCS voor verschillende aardgasprijzen, als functie van de CO₂-prijs.

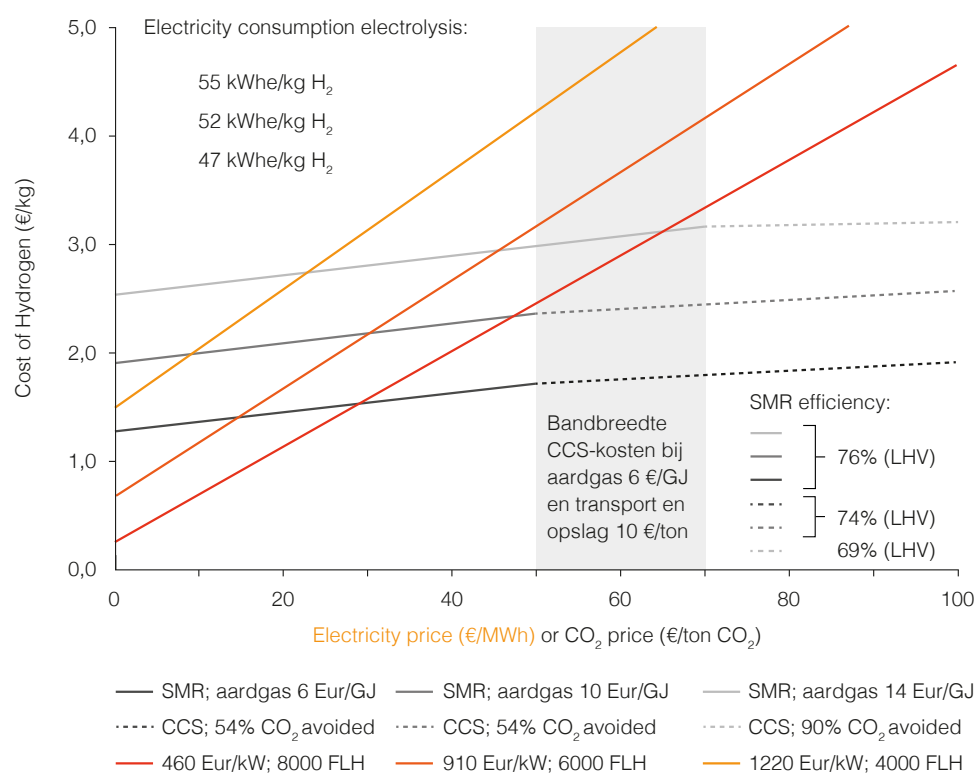
Boven: SMR zonder CCS; Onder: SMR met CCS vanaf het moment dat de CO₂-prijs hoger wordt dan de kosten voor afvang en opslag van CO₂.





In figuur 9, tenslotte, zijn figuur 7 en figuur 8 gecombineerd voor een onderlinge vergelijking van productiekosten van elektrolyse en SMR. De vergelijking laat zien dat het op het ogenblik zelfs bij hele lage elektriciteitsprijzen lastig is om tegen lagere kosten te produceren dan met SMR. Er ligt duidelijk nog een behoorlijke ontwikkelopgave om te komen tot systemen met lage investeringskosten en een hoog rendement waarmee elektrolyse kan concurreren met SMR voor grootschalige industriële toepassingen. Maar tegelijkertijd moet er ook de beschikking zijn over elektriciteit tegen gemiddeld hele lage kosten. Een hoge CO₂-prijs helpt iets, maar concurrentie wordt pas echt eenvoudiger als ook de aardgasprijs naar een structureel hoger niveau gaat.

Figuur 9 | Vergelijking van de productiekosten van waterstof via elektrolyse en SMR, zowel met als zonder CCS, voor een grote bandbreedte aan huidige en toekomstige condities.





Bijlage 4 | Emissiefactor van waterstof

Bij de productie van waterstof met aardgas via SMR wordt ongeveer 9 kilogram (kg) CO₂ gevormd per kg waterstof. Zonder afvang en opslag van de CO₂ (CCS) resulteert dit dus in een emissie van 9 kg CO₂/kg H₂. Afvang, of terugwinning van CO₂ uit het ruwe productgas, is een standaard industrieel proces. Dit wordt bijvoorbeeld toegepast bij de productie van waterstof voor ammoniak. De CO₂ wordt op grote schaal gebruikt in een reactie met ammoniak voor de productie van ureum. Bij tijdelijke vastlegging van de CO₂ in producten, of brandstoffen (Carbon Capture and Utilisation, CCU) neemt alleen de directe emissie af, maar de CO₂ komt uiteindelijk ergens vrij. Bij CCS wordt met het standaardproces de emissie teruggebracht tot ongeveer 4,1 kg CO₂/kg H₂. Er zijn echter procesvarianten mogelijk waarbij de emissie kan worden teruggebracht tot 1,0 kg CO₂/kg H₂. Het energieverbruik en de kosten nemen echter wel toe.

Bij gebruik van duurzame elektriciteit voor elektrolyse, die is geproduceerd met behulp van wind- en zonne-energie, is de emissiefactor van waterstof in principe (nagenoeg) nul (0 kg CO₂/kg H₂). Hier ligt echter een 'systeemissue': het is voor het systeem alleen nul als de elektriciteit niet op andere wijze kan worden gebruikt. Productie van waterstof via elektrolyse creëert een extra vraag naar elektriciteit ten opzichte van de huidige conventionele vraag van apparaten, verlichting etc. Gebruik van duurzame elektriciteit voor invulling van extra vraag betekent dat die elektriciteit niet meer kan worden gebruikt voor verduurzaming van de conventionele vraag. Voor dekking daarvan moeten dan centrales op kolen of aardgas draaien. Als gevolg van dit systeemeffect moet op het niveau van de energievoorziening voor de berekening van de emissiefactor van elektrolyse-waterstof de emissiefactor worden gebruikt van een gemiddelde kWh elektriciteit die in Nederland wordt geproduceerd, tenzij het windpark of de zonneweide exclusief wordt gebruikt voor waterstofproductie en er geen uitwisseling met het openbare net plaatsvindt. Dit geldt ook in situaties waar de infrastructuur beperkend is en de koppeling aan waterstofproductie een oplossing biedt.

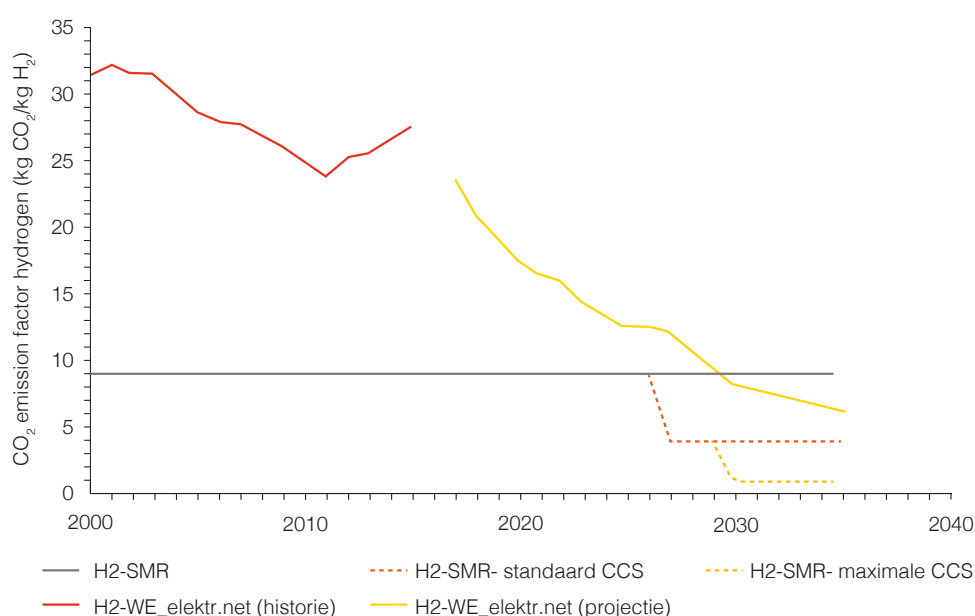
Bij elektrolyse is op het ogenblik voor de best presterende units ongeveer 50 kWh elektriciteit nodig voor de productie van een kilo waterstof. Dit betekent dat de emissiefactor voor de gebruikte elektriciteit lager moet zijn dan 180 g CO₂/kWh (9 kg CO₂/50 kWh) om beter te presteren dan SMR zonder CCS. In vergelijking met SMR met CCS, met een standaard afvangproces, moet de emissiefactor lager zijn dan 82 g CO₂/kWh om op systeemniveau een betere CO₂-prestatie te hebben dan elektrolyse.

In 2015 bedroeg de emissiefactor van elektriciteit in Nederland nog 527 g CO₂/kWh. Dit betekent dat grootschalige vervanging van de huidige waterstofproductie met aardgas door productie uit water via elektrolyse niet tot een reductie van CO₂-emissies zou leiden, maar juist tot een toename. Dit wordt nader geïllustreerd in figuur 10 die een vergelijking toont tussen de emissiefactor voor waterstof geproduceerd met aardgas via SMR, en waterstof geproduceerd uit water via elektrolyse.



Voor figuur 10 is aangenomen dat het elektriciteitsverbruik voor elektrolyse geleidelijk afneemt van 52 kWh/kg in 2000 tot 47 kWh/kg in 2030 en daarna constant blijft. Voor de emissiefactor van elektriciteit zijn historische waarden gebruikt t/m 2015 en zijn voor 2017 t/m 2035 waarden gebruikt zoals ingeschat voor de Nationale Energieverkenning 2017 (NEV2017) op basis van vastgesteld en voorgenomen beleid. De resultaten laten zien dat als er niet meer wind- en zonne-energie wordt geïmplementeerd dan voorzien in de NEV2017, het tot 2029 duurt voordat waterstof via elektrolyse tot minder CO₂ leidt dan waterstof via SMR van aardgas.

Figuur 10 | Vergelijking van de CO₂-emissiefactor van waterstof geproduceerd via elektrolyse en waterstof geproduceerd via SMR van aardgas.



Voor CCS variëren de kosten van vermeden CO₂-emissie van ongeveer 50 €/ton (standaard variant) tot 70 €/ton (maximale variant). In de NEV2017-projecties loopt de CO₂-prijs op van ongeveer 5 €/ton in 2017 tot 25 €/ton in 2035. Dit zou onvoldoende financiële prikkel zijn voor de markt om tot CCS over te gaan. Voor het geval er aanvullend beleid komt dat CCS wel stimuleert, is ook het CO₂-effect van CCS in de figuur opgenomen. Hoewel waterstof geproduceerd uit aardgas niet duurzaam is, levert het, zeker in combinatie met CCS, voorlopig een lagere CO₂-emissiefactor dan waterstof via elektrolyse.



Colofon

Dit is een uitgave van TKI Nieuw Gas

Met medewerking van TKI Energie & Industrie

Vormgeving en opmaak: Optima Forma bv, Voorburg

Maart 2018