

Openbare versie

Waterstof

Brandstof voor Transitie

*Advies van het Platform Nieuw Gas
Werkgroep Waterstof*

Oktober 2006





Werkgroepleden

Kees van der Klein (voorzitter)
Jan-Job van Dijk (secretaris)

ECN / Platform Nieuw Gas
SenterNovem / Platform Nieuws Gas

Daan Maatman
Matthijs Hisschemöller
Bert Knoester
Onno Florisson
Gert-Jan Kramer
Erik de Nie
Hendrik de Wit
Erik Middelman
Marinus van Driel
Frank Denys
Peter Bout / Pim Meyboom
Frank de Bruijn
Marcel Weede
Menno van Groeningen
Remco Hoogma

Hiteq
VU-IVM
Min. van EZ
Gasunie Engineering & Technology
Shell Global Solutions
Nederlandse waterstofvereniging/H2NE
HoekLoos
Nedstack
HyGear
SenterNovem
Air Products
ECN
ECN
Nuon
secretaris Platform Duurzame Mobiliteit

Voorwoord

|

Een schone, betaalbare en maatschappelijke aanvaardbare energievoorziening. Met dat doel voor ogen werken marktpartijen, maatschappelijke organisaties en overheid samen aan Energietransitie. De inzet is hoog: (inter)nationaal-politieke en ecologische redenen nopen Nederland na te denken over haar toekomstige energievoorziening.

Om dit vraagstuk gedegen aan te pakken zijn binnen Energietransitie zes platforms opgericht die zich elk richten op een onderdeel van die energievoorziening. Het Platform Nieuw Gas is daar één van. Het richt zich op de transitie naar een duurzaam gassysteem, en beschouwt daarbij de gehele gasinfrastructuur van bron tot gebruiker. Nederland behoort als gasproducerend land tot de wereldtop. We hebben de potentie uit te groeien tot het meest innovatieve en schone gasland. Om aardgas te kunnen blijven gebruiken, zoeken we naar efficiëntere toepassingen van aardgas. Ook zijn er mogelijkheden van biogas en waterstof. Daarnaast wordt gezocht naar schone toepassingen van fossiele brandstoffen (Schoon Fossiel).

Hierbij treedt het Platform Nieuw Gas op als forum waarbinnen publiek-private instellingen gezamenlijk visies opstellen, bij overheden beleidsknelpunten agendeert en deze helpt op te lossen. Als onderdeel hiervan ligt nu voor u het rapport van het Platform Nieuw Gas 'Waterstof: Brandstof voor Transitie'. Dit rapport is geschreven door de werkgroep Waterstof van het Platform Nieuw Gas. Met dit rapport geeft het Platform Nieuw Gas invulling aan haar visie ten aanzien van waterstof, de toekomstige toepassingen ervan en de activiteiten die ontplooid dienen te worden om die visie te realiseren.

Want over de vraag of waterstof een rol zal gaan spelen in onze toekomstige duurzame energiehuishouding bestaat weinig twijfel. Het Platform Nieuw Gas anticipeert met dit rapport op die toekomstige rol van waterstof.

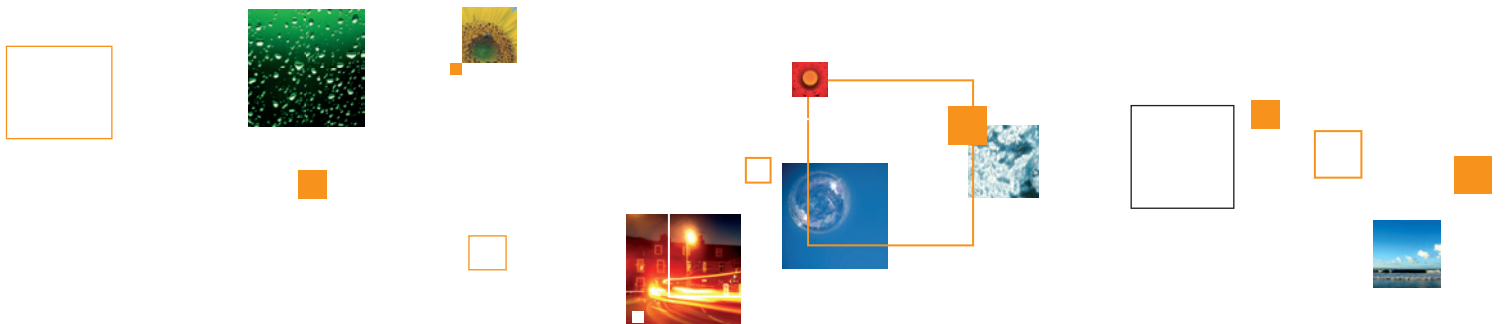
Waterstof kan namelijk bijdragen aan het vergroten van onze energievoorzieningszekerheid, aan het verbeteren van onze (stedelijke) luchtkwaliteit en aan het reduceren van emissies broeikasgassen zoals CO₂. En, waterstof kan innovaties en kansen bieden voor de Nederlandse toeleverende en maakindustrie.

Niet dat Nederland stil zit. Integendeel. Veel initiatieven worden in Nederland ontplooid. Maar middelen zijn schaars en om versnippering te voorkomen dient Nederland haar krachten te bundelen. Participatie van betrokken en actieve operationele en financiële ondersteuning van de overheid is van essentieel belang. Alleen dan kan Nederland als regio in Europa een volwaardige rol spelen. Daarbij wordt uitgegaan van de specifieke sterkten van Nederland: Nederland Gasland, Nederland Distributieland en, ook, Nederland Waterstofland. Daartoe dient dit rapport als leidraad.

Vele handen maken licht werk. Een oud gezegde, een goede raad. Het is bij uitstek toepasbaar op energietransitie en de uitdagingen die energietransitie met zich meebrengt. Het is zeker ook van toepassing op de totstandkoming van dit rapport. Zonder de inbreng van de vele handen van de werkgroepleden was dat niet mogelijk geweest. Mijn dank gaat dan ook uit naar de inzet die zij hebben geleverd.

Ik wens u veel plezier bij het lezen van dit rapport en ik spreek de hoop uit dat wij gezamenlijk de handen uit de mouwen steken om het 'waterstof-werk' in Nederland licht te maken. Dat dát een lange adem vergt, is inherent aan energietransitie.

Ulco Vermeulen
Voorzitter Platform Nieuw Gas



Waterstof

Waarom waterstof?

Waterstof is een universele energiedrager die gebruikt kan worden voor mobiele en stationaire toepassingen. Omdat waterstof klimaatneutraal geproduceerd kan worden uit elke primaire energiebron draagt het gebruik ervan bij aan de energievoorzieningszekerheid. Als transportbrandstof draagt het sterk bij aan de verbetering van de (stedelijke) luchtkwaliteit. De inzet van waterstof leidt tot een emissiereductie van CO₂, milieubelastende stoffen en fijn stof.

De rol van waterstof

De Nederlandse energiehuishouding zal in de toekomst significant veranderen. Energie zal worden opgewekt uit diverse (discontinue) energiebronnen. Het is daarom belangrijk dat naast elektriciteit een energiedrager wordt geïntroduceerd die uit meerdere energiebronnen gemaakt kan worden. Waterstof kan gebruikt worden als transportbrandstof en als energiebron voor de huishoudens. Waterstof kan energienetwerken met elkaar verbinden. De werkgroep ziet waterstof een centrale rol spelen in de toekomstige Nederlandse energiehuishouding.

De potentie van waterstof

In de mobiele sector kan waterstof in eerste instantie gebruikt worden in verbrandingsmotoren en daarna in voertuigen met brandstofcellen. De transitieroute mobiel kan in 2030 tot maximaal 7 Mton CO₂-besparing leiden. In 2050 is dat toegenomen tot maximaal 24 Mton per jaar. (bron: HyWays) Naast CO₂-reductie is de belangrijkste verdienste van de transitieroute mobiel de bestrijding van de stedelijke luchtverontreiniging (fijn stof en NO_x).

De opties voor waterstof

Nederland is een aardgasland en heeft een sterke petrochemische sector. Er is veel ervaring met het gebruik en transport van gassen inclusief waterstof. In de beginfase kan in de waterstofbehoefte worden voorzien door conventionele productie uit aardgas. Met toepassing van CO₂-afvang wordt deze optie klimaatneutraal.

In de omliggende gebieden zal waterstof decentraal geproduceerd worden, via decentrale reforming van aardgas of via elektrolyse gekoppeld aan duurzame bronnen. Elektrolyse biedt de mogelijkheid om via waterstof een overschot aan duurzame elektriciteit op te slaan. Op die manier kan het gebruik van waterstof leiden tot een sterke integratie van nu nog gescheiden en inflexibele energiesystemen.

De kansen voor waterstof

Nederland heeft veel ervaring met het produceren van waterstof uit aardgas. Deze kennis en ervaring kan uitgebuit worden. Door ECN, verschillende universiteiten en bedrijven wordt op nationaal en Europees niveau samengewerkt op het gebied van waterstoftechnologie. Deze hoogwaardige technologie biedt goede kansen voor groei en innovatie in de toeleverende en maakindustrie in Nederland. De introductie van waterstof heeft sterke synergie met Schoon Fossiel en versterkt ook de initiatieven die op dit gebied worden ondernomen.

De uitdaging

De introductie van waterstof betreft een grote systeemverandering. De (transport)brandstof zal gemaakt worden vanuit diverse bronnen en verbindt de tot nu toe gescheiden energiesystemen en energietoepassingen. Een dergelijk systeemverandering vraagt een sterke publiek-private samenwerking om de technologie geschikt te maken, de marktcondities te faciliteren en kansen te bieden aan nieuwe ondernemers.

Het advies van de werkgroep

De werkgroep ziet een duidelijke rol voor waterstof uitgaande van het gunstige effect op klimaat, verbetering van luchtkwaliteit en energievoorzieningszekerheid. Het ontwikkelen van innovatieve waterstoftechnologie biedt goede economische kansen voor de industrie. De werkgroep adviseert het Platform Nieuw Gas om drie ontwikkelgebieden in te richten waarbinnen met gerichte activiteiten stappen worden gezet op de transitieroute waterstof.

Executive summary

Inleiding

Er is ondertussen weinig discussie meer over de vraag of waterstof een rol zal spelen in de toekomstige mondiale energievoorziening. De internationale aandacht voor waterstof is zo massaal dat het niet de vraag is of waterstof een rol gaat spelen in de toekomstige energiehuishouding maar hoe. Voor Nederland ligt er nu de kans om op dit terrein een stevige positie in te nemen.

De werkgroep Waterstof, resortend onder het Platform Nieuw Gas van de Energietransitie, heeft een integrale visie op de inzet van waterstof voor een schone en betrouwbare energievoorziening opgesteld. Op basis van deze visie zijn een aantal transitieroutes en -doelen gedefinieerd, waarbij aandacht is besteed aan de mogelijkheden en barrières bij de realisatie daarvan. Aan de hand van deze transitieroutes worden transitieactiviteiten in drie specifieke ontwikkelgebieden voorgesteld. Hierdoor wordt inzichtelijk gemaakt onder welke randvoorwaarden de transitie naar waterstof realiteit kan worden.

Visie: waarom waterstof?

Er zijn vier belangrijke redenen om waterstof in het energiesysteem te introduceren:

- **Energievoorzieningszekerheid.** Waterstof is direct of indirect uit elke primaire energiebron te produceren. Daarmee biedt het de mogelijkheid om te komen tot grotere diversificatie van de inzet van primaire bronnen en minder afhankelijk te worden van de import van energie uit politiek instabiele en minder welgezinde regio's.
- **Klimaat.** Het toekomstig post-Kyoto klimaatbeleid zal in hoge mate bepalend zijn voor de grootschalige inzet op opties die gepaard gaan met belangrijke emissiereductie van CO₂. De inzet van waterstof kan een bijdrage leveren aan het terugdringen van CO₂-emissies. Voorwaarde is wel dat bij de productie van waterstof geen CO₂ naar de atmosfeer wordt geëmitteerd.
- **Milieu/(stedelijke) luchtkwaliteit.** Vooral de mobiele sector levert een groot aandeel aan de luchtkwaliteitsproblemen in stedelijke gebieden. Het beleid om de stedelijke luchtkwaliteit te verbeteren heeft met name invloed op de conversietechnologie. De inzet van brandstofcellen is een veelbelovende optie voor drastische reductie van verschillende soorten emissies. Aangezien waterstof de brandstof voor brandstofcellen in het vervoer is, kan waterstof een belangrijke rol spelen om de lokale luchtkwaliteit te verbeteren.
- **Innovatie en kansen voor de Nederlandse industrie.** Nederland heeft een sterke industriële positie op het gebied van aardgas, zowel wat betreft infrastructuur als maak- en toeleveringsactiviteiten. Deze kunnen bij uitstek profiteren van nieuwe ontwikkelingen op dit gebied. Daarnaast biedt waterstoftechnologie, en de introductie daarvan, grote kansen voor nieuwe kennisgebaseerde kleine bedrijven. Het gebruik van waterstof en gerelateerde technologieën bieden uitzicht op nieuwe markten en initiëren veel nieuwe processen en producten met bijbehorende nieuwe bedrijvigheid en economische ontwikkeling.

Voor ieder van de vier hierboven genoemde problemen zijn een aantal alternatieve oplossingen denkbaar. De werkgroep Waterstof is van mening dat waterstof de meest effectieve oplossing is voor het integraal aanpakken van de stedelijke luchtkwaliteit, het beperken van de emissie van CO₂ en het versterken van de energievoorzieningszekerheid.

Op dit moment bevindt de omschakeling naar waterstof, de waterstoftransitie, zich in de voorontwikkelingsfase. Diverse prototypes zijn ontwikkeld en worden in ruwe vorm voor het eerst in tijdelijke projecten gebruikt. In eerste instantie zal de waterstoftransitie een geheel of gedeeltelijke overgang betreffen van het gebruik van koolstofhoudende energiedragers naar waterstof als energiedrager in de zogenaamde eindgebruiksectoren. De waterstoftransitie krijgt uiteindelijk volume door toepassingen in twee categorieën, namelijk mobiele en stationaire toepassingen. Hierbij kent elke categorie in feite een eigen transitie:

- de transitie van vloeibare koolstofhoudende brandstoffen naar waterstof als energiedrager in mobiele toepassingen,
- de transitie van aardgas naar waterstof voor de productie van warmte en kracht in stationaire toepassingen.

De werkgroep verwacht dat mobiele toepassingen het meest effect zullen hebben ten aanzien van de drie hierboven beschreven redenen. De stationaire toepassing van waterstof biedt veel mogelijkheden maar heeft meer concurrentie van efficiënte op koolstof gebaseerde energietechnologieën.

Visie uitgewerkt: transitieroutes – en doelen voor waterstof

Om de visie te concretiseren heeft de werkgroep Waterstof een aantal toekomstbeelden onderzocht. Daarbij is gekeken naar de huidige situatie en de toekomstige situaties in 2020 en 2050. Voor ieder van deze situaties heeft de werkgroep de gehele waterstofketen onderzocht. De waterstofketen bestaat uit de energiebron die omgezet wordt in waterstof, het transport en de opslag van waterstof en de toepassing van waterstof. De gerelateerde technologieën bevinden zich op dit moment in verschillende stadia van ontwikkeling. Dit heeft sterke invloed op de introductie van waterstof in het energiesysteem en daarom is het belangrijk om nu duidelijke keuzes te maken. Het is de mening van de werkgroep dat de introductie van waterstof versneld kan worden door op de korte termijn te kiezen voor beschikbare technologie. Deze technologie zal weliswaar minder sterk bijdragen aan de eerder genoemde drivers maar baant wel een pad voor de eerste introductie. Op die manier kan een eerste infrastructuur voor de toepassing van waterstof worden gedemonstreerd.

De mobiele en stationaire toepassing van waterstof

De waterstoftransitie voor mobiele toepassingen voor de periode van 2006 tot 2050 zal moeten beginnen met waterstofbussen (initieel met verbrandingsmotoren en brandstofcellen, later hybride brandstofcelconcepten). De werkgroep verwacht dat rond 2020 ongeveer 25% van het openbaar busvervoer in de grote steden op waterstof zal rijden. Eveneens zal rond die tijd

een eerste introductie plaatsvinden van hybride/brandstofcelpersonenvoertuigen. Als belangrijkste bron voor klimaatneutrale waterstofproductie wordt aardgas met CCS (Carbon Capture and Storage) ingezet, maar andere bronnen (steenkol met CCS, biomassa en offshore wind) zullen hun intrede doen. In 2050 wordt voorzien dat 40-75% van de voertuigen rijden op waterstof. Steenkool met CCS, biomassa en offshore wind zijn dan naar verwachting de energiebronnen. Waterstof zal in 2050 toegepast worden in het vervoer en in de gecombineerde warmte-krachtenopwekking. Ten minste de helft van het aantal voertuigen zijn brandstofcelauto's met waterstof als brandstof. Voor de stationaire opwekking van elektriciteit, is dit in de vorm van warmte-kranchkoppeling. De penetratiegraad van waterstof in die sector is echter nog bescheiden, zo'n 10 tot 30%. Door combinatie van de inzet van waterstof voor stationaire en mobiele toepassingen ontstaat integratie en synergie van de energiesystemen.

De waterstoftransitie voor stationaire toepassingen voor de periode van 2006 tot 2050 zal beginnen met de introductie van mini-wkk brandstofcelinstallaties met aardgas als brandstof en demonstraties van mini-wkk brandstofcelinstallaties met waterstof uit aardgas en met de benutting van industrieel waterstof. Tot 2020 zal het aandeel wkk-installaties op aardgas afnemen en meer waterstof worden ingezet in micro-netwerken, met name in nieuwe wijken. In 2020 zal een verschuiving optreden van decentrale naar centrale waterstofproductie (aardgas met CCS). In 2050 zal de verspreiding van wkk-systemen op waterstof zich verder uitbreiden, en zal aardgas met CCS, steenkool met CCS en biomassa als bronnen dienen. Voor stationaire toepassingen moet daarnaast onderscheid worden gemaakt tussen bestaande bouw en nieuwbouw. In het eerste geval zal het neerkomen op het benutten van de mogelijkheden van bijmengen. Hier kan worden gekeken naar vergroening van aardgas met alternatief gas, bijvoorbeeld waterstof. De stationaire toepassing kan een aanzet geven tot transitie door het gebruik van de een aardgas gestookte micro-wkk installaties met brandstofceltechnologie. In deze systemen zal aardgas door systeemgeïntegreerde reforming omgezet worden in kortlevend waterstof. Voor nieuwbouw is het verstandig bij de nieuw aan te leggen gasinfrastructuur rekening te houden met waterstof als toekomstige energiedrager.

Het transport, distributie en de opslag van waterstof

Het transport, distributie en de opslag van waterstof wordt sterk beïnvloed door de gebruikte energiebron en de toepassing van de waterstof. De ontwikkeling hangt ook sterk af van de bestaande infrastructuur en de behoefte aan een nieuwe specifieke infrastructuur. De werkgroep is van mening dat in het eindbeeld het grootschalige transport van waterstof zal plaatsvinden via pijpleidingen. Dit is gebaseerd op de veronderstelling dat waterstof niet alleen voor mobiele toepassingen, maar ook grootschalig voor stationaire toepassingen zal worden ingezet.

Het wijdverbreide gebruik van waterstof in 2050 zou een pijpleidingensysteem voor waterstof kunnen rechtvaardigen. Dit systeem is in de loop van de decennia gegroeid vanuit de integratie van decentrale leidingsystemen. Het landelijke systeem koppelt en

vervangt eventueel de in de loop der jaren geïnstalleerde, decentrale productie-eenheden. Het landelijk netwerk zal de sterk groeiende behoefte aan waterstof kunnen bedienen door de levering vanuit grootschalige waterstofproductiefaciliteiten. Als waterstof alleen in mobiele toepassingen plaats zal vinden dan is een landelijke infrastructuur mogelijk niet rendabel. In dat geval zal lokale productie uit (groen) aardgas, en vervoer per trailer langer stand houden.

De werkgroep is van mening dat de rol van waterstof als opslagmedium voor overtollige duurzame elektriciteit in de stationaire energievoorziening gering zal zijn. Verwacht mag worden dat elektriciteit uit duurzame bronnen direct gebruikt wordt. Het energieverlies door de conversie naar waterstof (elektrolyse) en eventueel de opslag van waterstof wordt zo vermeden. Slechts in niche toepassingen en bij een grote (over)productie van duurzame elektriciteit lijkt het de werkgroep zinvol om via elektrolyse duurzame waterstof te produceren ten behoeve van mobiele toepassingen.

De energievoorziening, energiebronnen en de productie van waterstof

Omdat waterstof in de beginfase vooral uit aardgas zal worden geproduceerd, lijkt de waarde van de transitie naar waterstof in mobiele toepassingen op voorhand groter dan de transitie naar waterstof in stationaire toepassingen waar aardgas nu reeds een grote rol speelt en relatief schoon en efficiënt wordt ingezet. Daarnaast geldt voor waterstof, nog meer dan voor aardgas, dat het zoveel mogelijk in warmtekrachtoepassing omgezet zou moeten worden.

Naar alle waarschijnlijkheid zal in 2050 de piek in de olieproductie gepasseerd zijn. Bij het schaarser worden van olie zal ook de druk op de gasreserves toenemen, zodat steenkool de enige overgebleven fossiele bron in 2050 is waarvan voldoende reserves aanwezig zijn. Door de geografische verspreiding van de schaarse fossiele bronnen ontstaat er steeds meer de behoefte om gebruik te maken van lokaal beschikbare bronnen, zoals zon, wind en biomassa, om in de eigen energiebehoefte te voorzien. De werkgroep verwacht dat universele energiedragers, die de schakel vormen tussen de primaire bronnen en het eindgebruik, waterstof en elektriciteit zullen zijn. De mix van energiebronnen wordt gedomineerd door aardgas, kolen, windenergie en biomassa. In de periode tot 2050 zal aardgas voor de productie van waterstof de dominante rol spelen. Om de productie van waterstof uit kolen en aardgas klimaatneutraal te maken wordt tijdens de waterstofproductie de CO₂ afgescheiden en opgeslagen.

Visie concreet: transitie-activiteiten in ontwikkelgebieden

Praktijkevaluaties van waterstoftechnologieën zijn van vitaal belang voor een succesvolle transitie. Alleen door het demonstreren van nieuwe technologie in een realistische omgeving, zoveel mogelijk lijkend op de praktijksituatie van de toekomst, kunnen deze verder ontwikkeld worden tot betrouwbare, robuuste technologie die zal voldoen aan de verwachtingen van de gebruikers. Het stelt gebruikersgroepen en publiek in staat kennis te maken met

technologieën, en draagt zodoende bij aan de acceptatie ervan.

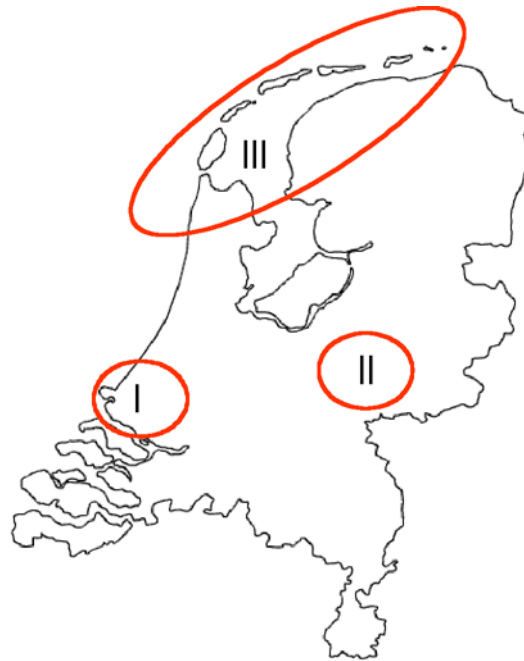
De werkgroep heeft zich gerealiseerd dat het versnellen van de transitie naar waterstof een geïntegreerde aanpak behoeft. Er is gekozen voor een benadering waarbij technologische, infrastructurele en niet-technologische aspecten in onderlinge samenhang worden aangepakt. Dit kan het beste gebeuren in zogenaamde ontwikkelgebieden. De werkgroep stelt voor om in drie verschillende gebieden demonstratieprojecten en ondersteunende activiteiten op te starten ter ondersteuning van de voorgestelde transitieroutes. De invulling van de activiteiten binnen deze regio's volgt direct uit deze transitieroutes en beantwoordt aan de beleidsdoelstellingen energievoorzieningszekerheid, verbetering van lokale luchtkwaliteit en verlaging van de CO₂-uitstoot. Men dient de transitieactiviteiten wel te zien in het grotere verband: de activiteiten zullen richtinggevend zijn voor de latere marktintroductie en het overheidsbeleid, zijn bedoeld om de institutionele barrières in kaart te brengen en te overwinnen en om te komen tot optimalisatie op systeemniveau. De activiteiten zullen op zichzelf niet een wezenlijke bijdrage leveren aan de verlaging van CO₂-uitstoot en verhoging van de leveringszekerheid. Lokaal kunnen zij wel direct leiden tot verbetering van de luchtkwaliteit, bijvoorbeeld wanneer een bepaald gebied alleen nog bediend wordt met openbaar vervoer op waterstof.

Ook buiten Nederland worden op Europees en mondiaal vlak activiteiten ontplooid die leiden tot de ontwikkeling van waterstoftoepassingen. De invullingen van de Nederlandse activiteiten sluiten hier op aan, maar buiten nadrukkelijk de specifieke situatie in Nederland uit:

- een wijd verbreid gebruik van aardgas gekoppeld aan de eigen gasreserves
- een dominante rol van de transportsector aan de lokale luchtverontreiniging
- een opkomende Nederlandse maakindustrie op het gebied van waterstoftechnologie
- een op Europese schaal zeer grote waterstofproductiecapaciteit en waterstofinfrastructuur geconcentreerd op één locatie.

De verschuivingen op institutioneel en infrastructureel vlak zijn bij grootschalige inzet van waterstof zo groot, dat men niet ontkomt aan het zelf opbouwen van praktijkervaringen om deze inzet mogelijk te maken: de werkgroep is van mening dat meekijken met het buitenland volstrekt onvoldoende is.

De transitieactiviteiten die de werkgroep voorstelt zijn gegroepeerd in drie ontwikkelgebieden: het Rijnmondgebied, de regio Arnhem en de regio Petten/Waddengebied.



Aansluiten bij bestaande infrastructuur en productiecapaciteit: Het Rijnmondgebied

Gebied I bestaat uit het Rijnmondgebied, waar voldoende waterstofproductiecapaciteit beschikbaar is, en ook een infrastructuur is aangelegd voor industriële gebruikers. Het gebied wordt gekenmerkt door sterke luchtverontreiniging en intensieve vervoersstromen, zowel op de weg, als op het water en het spoor. Het is bij uitstek geschikt voor het naar het publiek brengen van applicaties die gekenmerkt worden door een zekere rijpheid. Ontwikkelgebied I staat model voor de eerste marktintroductie in publieke toepassingen van op industriële schaal geproduceerd waterstof. Uitbreiding met andere vervoerstoepassingen vanuit deze bestaande infrastructuur ligt voor de hand. Hoewel geografisch niet binnen het Rijnmondgebied, zou kennis kunnen worden benut voortkomend uit het brandstofcellenproject (CUTE) in Amsterdam.

Technologie-ontwikkende regio: Arnhem

Gebied II bestaat uit de regio Arnhem. Dit gebied wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van de waterstoftechnologieproducenten, enthousiaste lokale politiek, en grenzend aan NoordRhein-Westfalen dat zeer actief met waterstofdemonstraties is. Het is bij uitstek geschikt voor het in praktijk brengen van eerste prototypen van Nederlandse makelij, zij het dat die demonstraties eerst buiten de regio plaats zullen vinden, namelijk in de regio Rijnmond en Petten/Waddengebied. Het zal gaan om decentraal geproduceerd waterstof uit aardgas voor kleinere applicaties die gebruikt wordt door bedrijven, "early adapters" die bedrijfseconomisch baat hebben bij stille en schone technologie, als vorkheftrucks, bedrijfsvoertuigen, noodstroomvoorzieningen e.d. Ontwikkelgebied II staat model voor technologie-innovatie en toepassing in de dienstensector.

Systeeminnovaties en diversificatie van bronnen: Petten en Waddengebied

Gebied III bestaat uit twee delen: onderzoekslocatie Petten en het Waddengebied. Er bestaat behoefte aan een locatie waar concepten getest kunnen worden alvorens deze in de praktijk te demonstreren. De nadruk ligt daarbij op systeeminnovaties. Onderzoekslocatie Petten is hiervoor goed geschikt. Daarnaast wordt als doorkijk naar een praktijksituatie het Waddengebied aanbevolen. Dit gebied staat model voor de dunbevolkte gebieden, en mikt op verduurzaming van hun energiehuishouding.

Het is de locatie om de systeeminnovaties te ontwikkelen. Aan de aanbodzijde wordt waterstof geproduceerd uit een mix van primaire bronnen: aardgas met CO₂ afvang, windenergie, zonne-energie en biomassa. Aan de gebruikszijde wordt de voeding van waterstof aan mobiele en stationaire applicaties gekoppeld, zodat infrastructuur en opslagcapaciteit optimaal benut kunnen worden. Ontwikkelgebied III staat model voor Security of Supply en het streven naar minimalisatie van de CO₂-uitstoot door de samenleving.

Ontwikkelgebied	I	II	III
Locatie	Regio Rijnmond	Regio Arnhem	Regio Petten en Wadden
Waterstofproductie	Industrieel, bestaand	Decentraal	Decentraal
Bronnen	Aardgas	Aardgas	Aardgas; Wind; Zon; Biomassa
Sector	Openbaar Vervoer Warmte/Kracht Flats Boten	Kleinschalig vervoer en stationair in dienstensector	Kleinschalig Vervoer en stationair en Warmte/Kracht; Toeristisch vervoer; taxi's; fietsen; boten; Warmte/Kracht toeristische attracties
Aansluiting bij transitieprogramma	Lokale luchtkwaliteit Publieksacceptatie Infrastructuur	Applicatie- en technologie-innovatie Acceptatie dienstensector	Voorzieningszekerheid Minimalisatie CO ₂ uitstoot Systeeminnovatie Publieksacceptatie

Budget

De financiële omvang van de voorgestelde activiteiten in de drie ontwikkelgebieden zal in de orde van 40 mln euro bedragen. Deze financiering kan voor een groot deel via de bestaande instrumenten aan de relevante projecten, c.q. programma's of projectclusters worden toegewezen, maar is voor de drie ontwikkelgebieden essentieel verschillend van karakter:

- voor de Rijnmond is, als aanvulling op de beschikbare private financiering, publieke financiering noodzakelijk voor het afdekken van risico's en voor de financiering van het onrendabele deel bij marktintroductie.
- In Arnhem moeten industriële ontwikkelingen op de zogenaamde "S-curve" vanuit de laboratoriumfase naar pilotproductie worden gebracht. Daartoe is financiering voor product- en productieontwikkeling nodig in combinatie met de financiering van onrendabele demonstratieprojecten/veldtesten. Gezien het karakter van het betrokken bedrijfsleven is de mogelijkheid van private financiering maar beperkt beschikbaar, zodat aanvullende subsidies voor deze activiteiten noodzakelijk zijn.
- Voor de activiteiten in Petten en Waddengebied zal weinig private financiering beschikbaar zijn en is de behoefte aan publieke financiering het grootst.

De financiering kan op basis van het bestaande instrumentarium op de behoefte en het karakter van de specifieke projecten worden toegesneden, maar om het Nederlandse waterstofprogramma structuur te geven is daarbij inhoudelijke samenhang en afstemming noodzakelijk. Daartoe wordt voorgesteld om per ontwikkelgebied een projectorganisatie als onafhankelijk orgaan in te stellen voor de organisatie, structurering en de realisatie van de voorgestelde activiteiten.

Gezien het essentieel verschillende karakter van de drie ontwikkelgebieden zullen dat op de specifieke behoefte van de gebieden toegesneden organisaties moeten zijn.

- In de Rijnmond ligt het accent op de realisatie van economisch interessante, korte termijn gerichte activiteiten, waarbij met name bestuurlijke en organisatorische problemen moeten worden opgelost. (zie hoofdstuk 6.1)
- In Arnhem ligt het accent op het ontwikkelen en ondersteunen van de industriële ontwikkelingen en het organiseren van aansluiting bij initiatieven elders. (zie hoofdstuk 6.2)
- Voor het Waddengebied is een programma-organisatie noodzakelijk die de gewenste systeemontwikkeling met de deelnemers kan organiseren. (zie hoofdstuk 6.3)

Voor het werk van de drie projectorganisaties is een financiering van 5-6 mln in de aanloopfase noodzakelijk om de gewenste structurering van de activiteiten van de grond te krijgen.

Het nationale en internationale beleid

De mate waarin waterstof een rol gaat spelen in onze energiehuishouding wordt sterk bepaald door de ontwikkelingen in het buitenland. De actieve betrokkenheid van Nederland bij de internationale ontwikkelingen en de introductie in Nederland wordt in hoge mate bepaald door nationaal beleid. Stimuleren en structureren van Nederlandse activiteiten, financiële en beleidsmatige incentives, het toekennen van subsidies voor ontwikkeling en introductie van nieuwe technologieën en betrokkenheid bij demonstratieprojecten zijn in hoge mate bepalend voor de penetratie van de waterstoftechnologie in Nederland.

Actief Nederlands beleid richting waterstof heeft niet alleen invloed op de snelheid van introductie op zichzelf, maar ook de mate waarin Nederlandse bedrijvigheid ontstaat op dit gebied. Deze bedrijvigheid kan enerzijds gestimuleerd worden door industriebeleid, maar vroege introductie zal ook via natuurlijke weg het Nederlandse bedrijfsleven een voorsprong geven op bedrijven uit landen waar de introductie later plaatsvindt.

Ondersteuning innovatieve, industriële bedrijvigheid

Waterstof biedt de mogelijkheid tot innovatieve, industriële ontwikkelingen. De overheid kan hier een rol in spelen door de markt zo vorm te geven, dat bedrijven opportuniteiten zien. Eisen vanuit de gemeenschap omgezet in regulering door de overheid leiden vaak tot grote marktvernieuwingen, lokken innovaties uit en leiden tot efficiëntere marktwerking. De uitwerking van de Californische “zero emission vehicles wetgeving” is in dit verband een treffende illustratie. In Nederland zouden lokale overheden met een dergelijke “regelgeving op termijn” belangrijke ontwikkeling voor lokaal vervoer kunnen initiëren.

Een belangrijk instrument daarbij zou kunnen zijn het opzetten van zogenaamde buyers pools. Een buyers pool is, bijvoorbeeld, een aantal ministeries dat via een tenderprocedure brandstofcelsystemen koopt en deze bij diverse eigen gebouwen of afdelingen inzet. Op deze wijze kunnen leveranciers hun veldtestseries financieel afdekken en de nodige ervaringen opdoen in een beschermde milde omgeving.

Een doelbewuste ondersteuning door de overheid om de Nederlandse waterstof- en brandstofcelinitiatieven te stuwen naar Industriële Clusters zal de industriestructuur zeer versterken, waar de ontwikkelingsgebieden in eerste aanzet toe kunnen dienen. Deze nieuwe technologieën en industrieketens geven relatief veel mogelijkheden voor versterking van de maakindustrie, hetgeen wel een voor bedrijven aantrekkelijk en concurrerend industrieklimaat vraagt.

Aanbevelingen

Keuzes, structuur en coördinatie noodzakelijk

In Nederland worden veel losstaande initiatieven ontplooid, waarvoor per initiatief dikwijls onvoldoende middelen beschikbaar zijn om de ambities te realiseren. Voorgesteld wordt om initiatieven te bundelen in de drie voorgestelde ontwikkelgebieden om daarmee slaagkans, onderlinge synergie en financiële armslag te vergroten. De effectiviteit van de ingezette overheidsmiddelen en de follow-up van de activiteiten kan daardoor sterk worden verbeterd. Participatie van betrokkenen bij de invulling en uitwerking van de transitieroutes met een actieve operationele en financiële betrokkenheid van de overheid is de belangrijkste aanbeveling van de werkgroep. Alleen op die manier kan Nederland in de Europese programma's een volwaardige rol spelen.

Uitwerking transitieroutes en analyse van institutionele aspecten

Wergroepen van betrokken stakeholders dienen met ondersteuning van de overheid de voorgestelde transitieroutes uit te werken in concrete activiteiten. Lokale overheden kunnen een belangrijke rol vervullen bij het samenvoegen van lokale activiteiten tot een nationale aanpak en in de begeleiding daarvan. Onderdeel van deze nationale programmering is de analyse van institutionele aspecten die de succesvolle uitwerking van de transitieroutes bepalen.

Industriële betrokkenheid en financiële ondersteuning

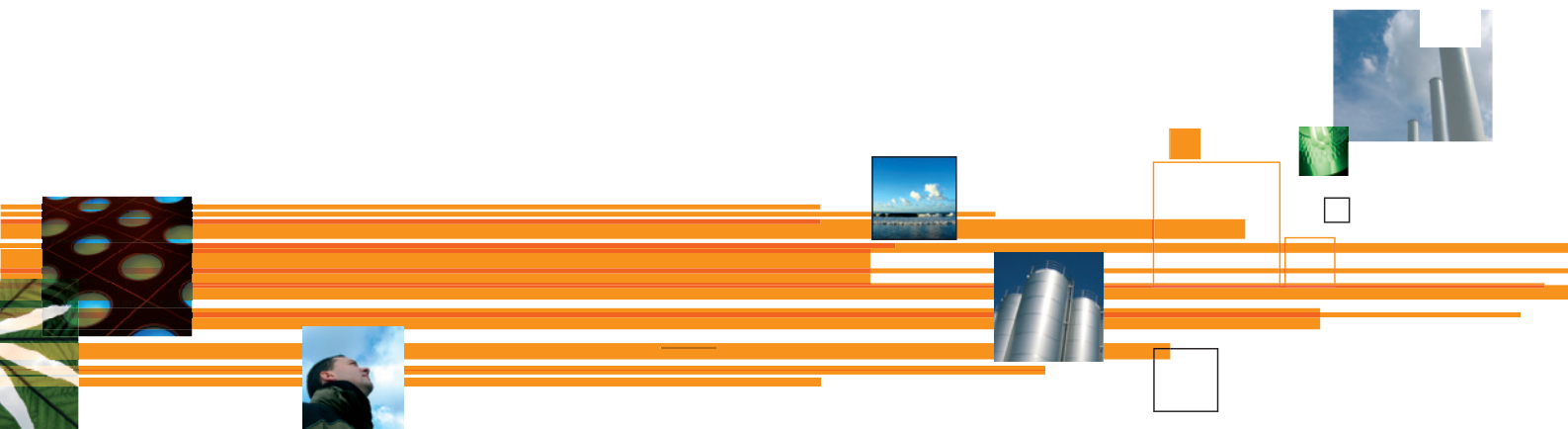
De transitieroute waterstof is een activiteit met een lange adem. Publiek-private financiering met een grote publieke rol in de eerste fase en een toenemende rol van private partijen daarna is essentieel. Met name de financiering van demonstratieprojecten die nog geen economisch rendabel perspectief hebben, maar wel onmisbaar zijn in het doorlopen van de leercurve, vergt de aandacht van de overheid.

Overheid als afnemer

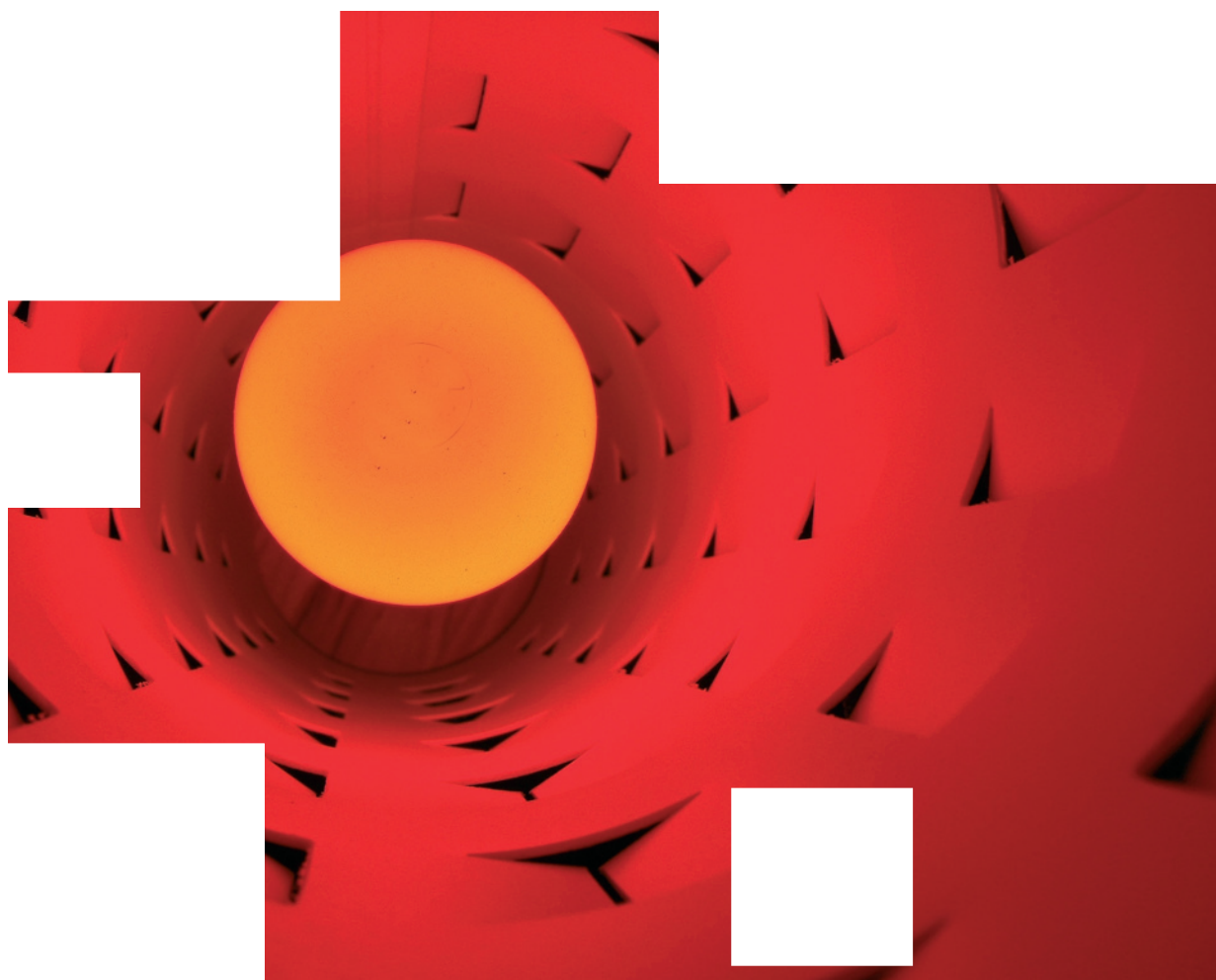
Een zogenaamde buyers pool vanuit de overheid zou voor het bedrijfsleven een interessante manier zijn om niche markten tot ontwikkeling te brengen.

Inhoudsopgave

IX



	<i>Voorwoord</i>	<i>I</i>
	<i>Waterstof</i>	<i>II</i>
	<i>Executive Summary</i>	<i>iii</i>
	<i>Inhoud</i>	<i>IX</i>
Hoofdstuk 1	<i>Inleiding</i>	<i>1</i>
Hoofdstuk 2	<i>Visie op de inzet en ontwikkeling van de optie waterstof</i>	<i>3</i>
	2.1 De argumenten voor gebruik van waterstof	3
	2.2 Toekomstbeelden op de rol van waterstof in onze energiehuishouding in 2005	4
	2.3 Kanttekeningen en overwegingen	5
Hoofdstuk 3	<i>Transitieroutes en -doelen</i>	<i>9</i>
Hoofdstuk 4	<i>Ondersteuning innovatieve, industriële bedrijvigheid</i>	<i>15</i>
Hoofdstuk 5	<i>Knelpunten en beleidsprioritering</i>	<i>17</i>
Hoofdstuk 6	<i>Transitieactiviteiten in ontwikkelgebieden</i>	<i>21</i>
	6.1 Aansluiten bij bestaande infrastructuur en productiecapaciteit: Rijnmond	23
	6.2 Technologie-ontwikkellende regio: Arnhem	24
	6.3 Systeeminnovaties en diversificatie bronnen: Petten en Waddengebied	26
Hoofdstuk 7	<i>Budget en organisatie</i>	<i>28</i>
Hoofdstuk 8	<i>Aanbevelingen</i>	<i>29</i>
Bijlagen	Bijlage 1: Visies	31
	Bijlage 2: Ketenbenadering en prestaties van waterstofketens voor een tweetal toepassingen	35
	Bijlage 3: Waterstofinitiatieven in Nederland	37
	Bijlage 4: Enkele demonstraties en ontwikkelingen in het buitenland	41
	Bijlage 5: Overzicht van waterstoftechnologieën	43



1 Inleiding

1



Algemeen

De transitie naar een duurzame energiehuishouding, de energietransitie, richt zich op systeeminnovaties in de energievoorziening zodat de belasting van het milieu en het klimaat, en de afhankelijkheid van fossiele energiebronnen afneemt.

Dit rapport is geschreven door de werkgroep Waterstof van het Platform Nieuw Gas (PNG). Dit platform richt zich op de verduurzaming van de inzet van gas voor energetische toepassingen, en heeft zowel betrekking op de productie, het transport als het gebruik van gas. Onderwerpen die hieronder vallen zijn:

- Energiebesparing in de gebouwde omgeving en bij de glastuinbouw
- Productie en gebruik van andere gasvormige energiedragers, zoals biogas en waterstof
- De inzet van micro- en miniwarmtekracht
- Schoon fossiel, ofwel het afvangen en opslaan van CO₂, dat vrijkomt bij conversie van koolstofhoudende energiebronnen.

De transitieroute Waterstof behelst de stapsgewijze introductie van waterstof in de Nederlandse energievoorziening, voor zowel stationaire als mobiele toepassingen, waarbij gebruik wordt gemaakt van specifieke Nederlandse karakteristieken. Hierbij staat de aansluiting bij internationale ontwikkelingen en de economische en maatschappelijke haalbaarheid centraal.

Uitgangspunt voor de transitieroute is dat waterstof op de lange termijn (> 30 jaar) een maatschappelijk geaccepteerde energiedrager zal zijn, die kan concurreren met andere energiedragers, en een relevant marktaandeel heeft.

Doel van het rapport

Dit rapport beschrijft een integrale visie op de inzet van waterstof voor een schone en betrouwbare energievoorziening. Op basis van deze visie zijn transitieroutes en -doelen gedefinieerd, waarbij aandacht is besteed aan de mogelijkheden en barrières

bij de realisatie van die routes. Aan de hand van deze transitieroutes zijn transitieactiviteiten voorgesteld, die zicht moeten geven op de haalbaarheid van de transitieroutes, en een impuls kunnen geven aan technologische ontwikkelingen. Tevens wordt aandacht gevraagd voor de beleidsimplicaties. De notitie beoogt de keuzes die moeten worden gemaakt aan de orde te stellen, en daarmee richting te geven aan noodzakelijke activiteiten in Nederland op dit gebied.

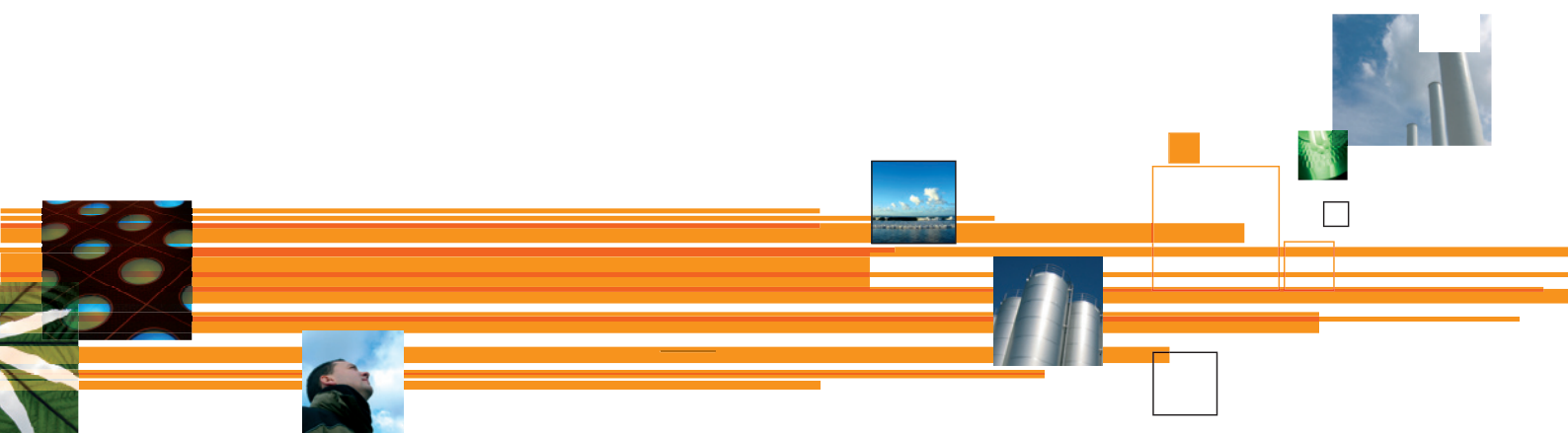
Doelstelling van de werkgroep Waterstof

De werkgroep Waterstof valt qua verantwoordelijkheid onder het PNG. De werkgroep rapporteert middels deze notitie haar bevindingen aan het platform¹. De werkgroep heeft zich beziggehouden met de ontwikkeling van een visie op de inzet van waterstof als energiedrager in Nederland, het ontwikkelen van bijbehorende transitieroutes voor de realisatie van de visie, en het geven van invulling aan de 'regiefunctie' rond de implementatie van de transitieroutes (monitoring en evaluatie). De contouren hiervan worden in dit rapport geschetst. Als onderdeel heeft de werkgroep zich tot doel gesteld te komen tot concrete en onderbouwde aanbevelingen voor enkele concrete transitieroutes voor de introductie van waterstof, waarbij de bijdrage aan het doorlopen van leercurven, het herhalingspotentieel, het uitzicht op milieuwinst, energie- en CO₂-besparing, en economische ontwikkeling in Nederland belangrijke overwegingen zijn geweest.

De werkgroep is evenwichtig samengesteld met vertegenwoordiging van stakeholders over de gehele keten, met vertegenwoordiging van de technologieontwikkelaars, producenten van waterstof, fabrikanten van eindgebruiktoepassingen, energiebedrijven die waterstof aan de consument gaan leveren, de diverse overheden, kennisinstellingen, NGO's en consumentenorganisaties.

¹ De bevindingen worden ook gerapporteerd aan het Platform Duurzame Mobiliteit (PDM).

2. Visie op de inzet en ontwikkeling van de optie waterstof



2.1. De argumenten voor gebruik van waterstof

Er is ondertussen weinig discussie meer over de vraag of waterstof een rol zal spelen in de toekomstige mondiale energievoorziening. De internationale aandacht voor waterstof, met name in de Verenigde Staten en in Japan, maar inmiddels ook in Europa, is zo massaal dat niet de vraag **of** maar **hoe** de waterstofeconomie wereldwijd gaat worden ingevuld en gerealiseerd. Voor Nederland geldt de vraag hoe zij aan deze ontwikkeling wil bijdragen. De discussie spitst zich daarbij toe op vragen als wat de bijdrage van Nederland kan zijn gezien de specifieke Nederlandse mogelijkheden en op basis daarvan, in welke toepassingen en in welke mate waterstof in Nederland een rol zal spelen, hoe en waar het waterstof te produceren en hoe het te transporteren.

De redenen om de inzet van waterstof na te streven zijn divers en hebben zonder uitzondering betrekking op grote thema's:

Voorzieningszekerheid van energie

Waterstof is direct of indirect uit elke primaire energiebron te produceren. Daarmee biedt het de mogelijkheid om te komen tot grotere diversificatie van de inzet van primaire bronnen en minder afhankelijk te worden van de import van energie uit politiek instabiele en minder welgezinde regio's. Door via elektrolyse van water elektrische energie om te zetten, of op te slaan in de vorm van chemische energie, kan waterstof de implementatie van grote hoeveelheden niet stuurbare hernieuwbare bronnen in de energievoorziening faciliteren. Dit biedt de flexibiliteit om op (lange) termijn een volledig door hernieuwbare bronnen gedekte energievoorziening te realiseren. Het terugdringen van de afhankelijkheid van het 'buitenland' en diversificatie waren reeds ten tijde van de energiecrises in de jaren '70 en begin jaren '80 aanleiding om serieus na te denken over waterstof en is op dit moment met name in de Verenigde Staten nog steeds de belangrijkste drijvende kracht. Als gevolg van de sterk toenemende vraag naar energie wereldwijd die leidt tot schaarste en stijgende prijzen,

en het nog steeds wankel politieke evenwicht in de regio's die over de grootste voorraden aardolie en aardgas beschikken, staan vermindering van afhankelijkheid en diversificatie thans weer hoog op de agenda.

Klimaat

Het toekomstig post-Kyoto klimaatbeleid zal in hoge mate bepalend zijn voor de grootschalige inzet op opties die gepaard gaan met belangrijke emissiereductie van CO₂. Zowel de "Schoon Fossiel optie" (de inzet van fossiele energiedragers met Carbon Capture and Storage, CCS) als de inzet van hernieuwbare bronnen kunnen invulling geven aan het beleid om de emissie van CO₂ te beperken.

De inzet van waterstof kan een bijdrage leveren aan het terugdringen van CO₂-emissies en daarmee aan het beperken van het broeikaseffect en de wereldwijde klimaatverandering die daar het gevolg van is. Voorwaarde is wel dat bij de productie van waterstof geen CO₂ naar de atmosfeer wordt geëmitteerd. Dit is het geval bij productie van waterstof uit hernieuwbare bronnen en met behulp van nucleaire energie. Wanneer waterstof wordt geproduceerd uit steenkool, aardolie of aardgas zal de productie moeten worden gecombineerd met afvangst en opslag van CO₂ om bij te kunnen dragen aan de reductie van CO₂-emissies.

Milieu / luchtkwaliteit

Het beleid om de stedelijke luchtkwaliteit te verbeteren heeft met name invloed op de conversietechnologie, veel meer dan op de primaire bron die ingezet wordt. De inzet van brandstofcellen is een veelbelovende optie voor drastische reductie van emissies van fijn stof, stikstofoxiden, koolwaterstoffen, koolmonoxide en zwaveloxiden. Geen andere emissiereductietechnologie is in staat al deze emissies lokaal tot nul te reduceren. Aangezien waterstof de brandstof voor brandstofcellen in het vervoer is, kan waterstof een belangrijke rol spelen om de lokale luchtkwaliteit te verbeteren.

Voor de mobiele sector levert een groot aandeel aan de luchtkwaliteitsproblemen in verstedelijkte gebieden. Het voordeel geldt gedeeltelijk ook bij inzet van waterstof in verbrandingsmotoren, hoewel fijn stof emissies niet helemaal tot nul worden gereduceerd en de NO_x-vorming nog een aandachtspunt blijft.

Waterstof als de meest effectieve oplossing voor de drie hoofdproblemen

Voor ieder geïsoleerd probleem zijn een aantal alternatieve oplossingen denkbaar. Voor de mobiele toepassingen is waterstof een route die het toelaat de drie hoofdproblemen gelijktijdig te adresseren. Dit geldt niet in dezelfde mate voor de alternatieven.

De inzet van biobrandstoffen in verbrandingsmotoren bijvoorbeeld, is weliswaar deels klimaatneutraal, maar heeft slechts een beperkte positief effect op de lokale luchtkwaliteit. Een aantal emissies gaat zelfs omhoog bij inzet van (sommige) biobrandstoffen.

Gebruik van aardgas in het vervoer kan op korte termijn de niet-CO₂ emissies van het vervoer sterk reduceren, maar niet volledig en voor de niet-CO₂ emissies is dit nog geen oplossing tenzij de stap naar groen gas kan worden gezet. Bij totale afwezigheid van klimaat- en stedelijk milieubeleid zal de verwachte schaarste van olie en gas in ieder geval tot een systeemwijziging leiden om in de behoefte aan mobiliteit te kunnen voorzien. Zoals hier boven aangegeven zal waterstof ook in dat geval een belangrijke rol spelen. Echter bij een afwezigheid van klimaatbeleid kan dit door inzet van kolen bij waterstofproductie, zonder CCS, leiden tot een aanzienlijke toename van de CO₂-uitstoot. Zoals eerder aangegeven is de rol van waterstof in de overige sectoren niet zo evident. Waterstof kan ook in deze sectoren de schakel vormen tussen alternatieve bronnen en bijvoorbeeld industrieel en huishoudelijk energiegebruik, maar synthetisch aardgas kan dat ook, in combinatie met een toenemende rol van elektriciteit.

Economische ontwikkeling

Waterstof past goed in een streven naar innovatieve economische ontwikkeling. Het biedt uitzicht op nieuwe markten en biedt ruimte voor veel nieuwe processen en producten, met bijbehorende nieuwe bedrijvigheid en economische ontwikkeling.

Internationale context en de invloed van nationaal beleid

De waterstoftechnologie zal de komende decennia wereldwijd doorbreken. De inzet van alle automobielbedrijven in de wereld en de brede ondersteuning van de Amerikaanse, Japanse en Europese overheden is schier onomkeerbaar. De mate waarin waterstof een rol gaat spelen in onze energiehuishouding wordt bepaald door deze activiteiten in het buitenland. Door actief beleid richting waterstof in bijvoorbeeld de Verenigde Staten en Japan komt technologie beschikbaar voor mobiele en stationaire toepassingen. Het beleid dat Nederland voert is voor die ontwikkeling nauwelijks relevant. De actieve betrokkenheid van Nederland bij de internationale ontwikkelingen en de introductie in Nederland wordt wel in hoge mate bepaald door nationaal beleid.

Stimuleren en structureren van Nederlandse activiteiten, financiële en beleidsmatige incentives, het toekennen van subsidies voor ontwikkeling en introductie van nieuwe technologieën en betrokkenheid bij veldtesten en demonstraties zijn in hoge mate bepalend voor de penetratie van de waterstoftechnologie in Nederland. Er kan daarbij gedacht worden aan accijnsaanpassingen voor alternatieve brandstoffen, vrijstelling van BPM (Belasting van Personenauto's en Motorrijwielen) op waterstofvoertuigen of subsidiëringstimuli.

Actief Nederlands beleid richting waterstof heeft niet alleen invloed op de snelheid van introductie op zichzelf, maar ook de mate waarin Nederlandse bedrijvigheid ontstaat op dit gebied. Deze bedrijvigheid kan enerzijds gestimuleerd worden door industriebeleid, maar vroege introductie zal ook via natuurlijke weg het Nederlandse bedrijfsleven een voorsprong geven op bedrijven uit landen waar de introductie later plaatsvindt.

De waterstofinfrastructuur zal op nationaal niveau ingericht worden. Juist vanwege het ingrijpende karakter van grootschalige infrastructuur is een vroegtijdige regie en planning hiervan noodzakelijk. Ieder land op zich zal wel zijn eigen mix van bronnen bepalen waaruit waterstof geproduceerd wordt, al zal ook hier de benodigde technologie mede in het buitenland ontwikkeld worden.

2.2. Toekomstbeelden op de rol van waterstof in onze energiehuishouding in 2050

Met betrekking tot de vragen in welke toepassingen en in welke mate waterstof een rol zal spelen, hoe en waar de waterstof te produceren en hoe het te transporteren, heeft binnen Nederland reeds uitvoerige gedachtevorming plaatsgevonden. Met name de Nederlandse bijdrage aan de Europese waterstof roadmap "HyWays" is in dit opzicht uiterst relevant. In bijlage 1 zijn de resultaten van HyWays en enkele aanvullende visies behandeld. Mede op basis van deze informatie komt de werkgroep tot haar analyses. De hier gepresenteerde visie op de rol van waterstof anno 2050 gaat ervan uit dat zowel voorzieningszekerheid, als klimaatbeleid en beleid voor verbetering van lokale luchtkwaliteit een sterke rol spelen bij de inrichting van de energiehuishouding in Nederland en de EU. De energiebronnen en de conversietechnologieën die in 2050 gebruikt worden zijn, vloeien voort uit actief beleid op deze drie gebieden. Daarnaast zijn de specifieke Nederlandse omstandigheden in de overwegingen meegenomen.

Nederland is dichtbevolkt en vormt qua omvang een regio in Europa. De sense of urgency is daarmee in Nederland expliciet, maar door een regionaal gerichte aanpak ook goed beïnvloedbaar. Van eminent belang is het feit dat Nederland aardgasland bij uitstek is. Nederland heeft een unieke aardgasinfrastructuur, maar huisvest ook intensieve petrochemische activiteiten. De kennispositie op het gebied van aardgas, waterstofprocessing, transport en logistiek is bij de industrie ruim voorhanden, terwijl de kennisinfrastructuur op gebied van waterstof en brandstofcellen wereldwijd gerespecteerd wordt.

Waterstof voor mobiele en stationaire toepassing

Naar grote waarschijnlijkheid zal in 2050 de piek in de olieproductie gepasseerd zijn, resulterend in een hoge prijs en het onvermogen om te voorzien in de vraag naar brandstoffen voor alle sectoren op de wijze waarop dat momenteel geschiedt. Bij het schaarser worden van olie zal ook de druk op de gasreserves toenemen, zodat steenkool de enige overgebleven fossiele bron in 2050 is waarvan voldoende reserves aanwezig zijn. Door de geografische verspreiding van de schaarse fossiele bronnen ontstaat steeds meer de behoefte om gebruik te maken van lokaal beschikbare bronnen, zoals zon, wind en biomassa, om in de eigen energiebehoefte te voorzien. De universele energiedragers die de schakel vormen tussen primaire bronnen en eindgebruik zullen elektriciteit en waterstof zijn.

Op basis van de huidige technologische inzichten en perspectieven heeft waterstof voor vervoerstoepassingen aanzienlijke voordelen boven de elektrische optie. Tenzij op gebied van elektriciteitsopslag voor vervoerstoepassingen baanbrekende vooruitgang wordt bereikt, zal waterstof dan ook de brandstof zijn voor vervoer over de weg. Geen enkele andere brandstof kan immers uit zoveel bronnen geproduceerd worden als waterstof.

Voor de stationaire energievoorziening is dit veel minder evident. Omdat ook in 2050 het bruikbare energieaanbod uit hernieuwbare bronnen nog niet overadig zal zijn, moet de energiehuishouding zo efficiënt mogelijk zijn. Daar waar verliezen beperkt kunnen worden zal dat gebeuren. Dit heeft als consequentie dat duurzame elektriciteit direct gebruikt zal worden zonder tussenkomst van waterstof. Conversie van elektriciteit naar waterstof en weer terug naar elektriciteit zal nooit een aantrekkelijke optie worden. Dit betekent dat de rol van waterstof als opslagmedium voor overtollige duurzame elektriciteit in de stationaire energievoorziening slechts beperkt zal zijn, maar waterstof kan wel een rol spelen m.b.t. het stabiliseren van het elektriciteitsnet. Dit heeft aanzienlijke consequenties voor de stationaire voorzieningsstructuur. Verwacht mag worden dat onze huidige energiehuishouding, gebaseerd op maximale benutting van de capaciteit voor elektriciteitsproductie in combinatie met de inzet van vernieuwbare bronnen, overgaat naar het maximaal benutten van vernieuwbare bronnen voor elektriciteitsproductie, waarbij de inzet van op fossiele brandstoffen gebaseerde conversietechnologie voor elektriciteitsproductie als reservecapaciteit benut zal worden. De overcapaciteit hierbij kan benut worden voor de directe productie van waterstof voor transporttoepassingen. Op die manier ontstaat er een koppeling tussen waterstof in de vervoersector en de energiebehoefte van de stationaire sector. Deze synergievoordelen kunnen tot interessante systeeminnovaties leiden, waardoor onverwachte patronen zullen ontstaan.

Bronnen

In 2050 wordt waterstof uit een mix van bronnen geproduceerd. Deze mix is zo samengesteld dat voorzieningszekerheid is gewaarborgd, dat de productie van waterstof niet gepaard gaat met emissies van CO₂. Daarnaast wordt zoveel als economisch toelaatbaar en optimaal voor de energievoorziening in zijn totaliteit de waterstof geproduceerd met behulp van hernieuwbare bronnen.

De mix van bronnen wordt gedomineerd door aardgas, kolen, windenergie en biomassa. In de aanloopperiode naar 2050 zal aardgas voor de productie van waterstof de dominante rol spelen, maar rond 2050 zullen de voorraden van aardgas en de prijs ervan in grote mate bepalend gaan worden voor de besteding van die rol. In mindere mate wordt zonne-energie gebruikt voor de productie van waterstof, omdat zonne-energie direct in de elektriciteitsvoorziening zal worden geïntegreerd. Om de productie van waterstof uit kolen en aardgas klimaat neutraal te maken wordt de CO₂ afgescheiden tijdens het waterstofproductieproces. Door procesoptimalisatie is de energiepenny daarvoor minimaal.

Transport en distributie

Het wijdverbreide gebruik van waterstof in 2050 zou een pijpleidingensysteem voor waterstof kunnen rechtvaardigen. Dit systeem is in de loop van de decennia gegroeid vanuit de integratie van decentrale leidingsystemen. Het landelijke systeem koppelt de, in de loop der jaren geïnstalleerde, decentrale productie-eenheden maar voorziet in die periode vooral in de groeiende behoefte door de levering vanuit grootschalige waterstofproductiefaciliteiten naar grote tankstations voor het vervoer, en grote stationaire gebruikers of clusters van gebruikers.

Voor kleinschaliger gebruik wordt ook in 2050 nog steeds waterstof op locatie geproduceerd. Dit gebeurt met name daar waar de afname van waterstof te klein is, of de afstand tot centrale productie te groot.

Conversietechnologie

De technologie waarmee in 2050 waterstof wordt omgezet is brandstofceltechnologie. Dit vanwege de schone en efficiënte omzetting van waterstof middels brandstofcellen. In de vervoerssector zijn de auto's revolutionair ontwikkeld, waarbij de brandstofcel naast de aandrijffunctie ook benut wordt als mobiele generator. In de stationaire sector is een bijkomend voordeel het modulaire karakter van de technologie, waardoor naar behoefte vermogen kan worden bijgeplaatst. Brandstofcellen zullen in die toepassing met name de preferente technologie zijn bij omzetting van waterstof op een schaalgrootte tot ca. 200 kWe. Bij grotere vermogens zullen de brandstofcellen concurrentie hebben van gasmotoren en gasturbines. Ook de combinatie van hoge temperatuurbrandstofcellen met gasturbines zal ingezet worden.

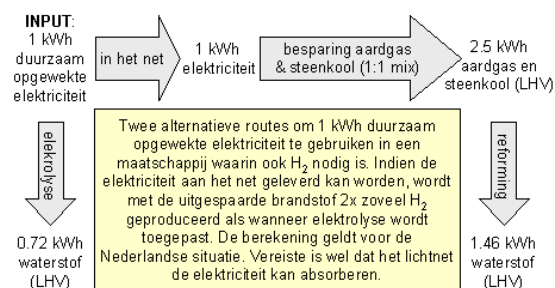
2.3. Kanttekeningen en overwegingen

Waterstof en brandstofcellen

De discussies over waterstof en brandstofcellen zijn nauw verweven. Het beeld lijkt: 'geen waterstof zonder brandstofcellen' en 'geen brandstofcellen zonder waterstof'. Voor de eindsituatie zijn brandstofcellen, dat wil zeggen PEMFC's², inderdaad de meest efficiënte technologie voor inzet van waterstof en het combineren van waterstof met brandstofcellen zal leiden tot de hoogste energetische rendementen en bijdragen aan het verbeteren van het milieu. Om de ontwikkeling van de optie waterstof als energiedrager van de grond te krijgen is echter een nauwe koppeling tussen waterstof en brandstofcellen niet noodzakelijk. Waterstof kan namelijk ook worden geïntroduceerd zonder brandstofcellen, met gebruikmaking van meer conventionele technologieën. De prestaties en kosten van brandstofcellen voor de beoogde grootschalige toepassingen zijn nog lang niet marktconform. Combinatie van brandstofcellen met waterstof, waar eveneens nog weinig ervaring mee is in de dagelijkse praktijk en dat zeker in de beginfase ook relatief hoge kosten met zich mee zal brengen, kan leiden tot een zodanige stapeling van knelpunten dat een moeilijk te nemen barrière ontstaat voor realisatie van initiatieven. Dit kan remmend werken op de introductie en verdere ontwikkeling van de optie waterstof als energiedrager, het primaire doel van de beoogde transitie.

De herkomst van waterstof

De strategische keuze tussen wel of niet een harde koppeling tussen waterstof en brandstofcellen speelt ook rond de koppeling tussen waterstof en duurzame energie. Uit oogpunt van werken aan publieke acceptatie wordt vaak geforceerd de koppeling gemaakt tussen waterstof en hernieuwbare bronnen, vooral windenergie. In het licht van het ontwikkelingsstadium en de kosten van waterstof



² In de discussie over brandstofcellen moet er onderscheid worden gemaakt tussen de diverse typen die er zijn. In het algemeen wordt impliciet de Proton Exchange of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cel (PEMFC) bedoeld. Dit type werkt bij lage temperatuur (thans 70-80 °C met ontwikkelingen naar >100 °C), en is het beoogde type voor gebruik in mobiele en kleinschalige stationaire toepassingen. Voor hoge temperatuur brandstofcellen (600 - 1000 °C) zoals Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC) en Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) is puur H₂ niet vereist. Bij SOFC's is ook direct gebruik van aardgas mogelijk. Met aardgas zijn zelfs hogere rendementen mogelijk dan met H₂.

en duurzame energie is deze koppeling contraproductief, in termen van energieverbruik en CO₂-emissie. Wanneer de duurzame elektriciteit direct als elektriciteit zou worden benut, dan kan met de hoeveelheid fossiele energie die daarmee in de centrale wordt uitgespaard meer waterstof worden geproduceerd dan wanneer die duurzame elektriciteit wordt gebruikt voor productie van waterstof via elektrolyse. Ergo, zolang er geen sprake is van directe productie van waterstof uit duurzame bronnen of van overschotten aan duurzame elektriciteit kan waterstof beter uit fossiele bronnen worden geproduceerd. De keuze lijkt dan makkelijk, maar vergt wel pro-actieve uitleg naar het publiek. Onderstaand schema geeft dit weer. Daarbij is het duidelijk dat bij gebruik van fossiele bronnen het positieve effect van het gebruik van waterstof op de emissie van CO₂ niet al te groot zal zijn, en bij gebruik van kolen zelfs negatief zal zijn, zolang de CO₂ niet wordt afgevangen en wordt opgeslagen. Een koppeling tussen waterstof en Schoon Fossiel ligt hier voor de hand en zal zo snel mogelijk moeten worden gerealiseerd, maar bij aanvang van de transitie naar waterstof zal fossiel elektriciteit, dus zonder CCS, de preferente energiedrager zijn. Bij de koppeling tussen waterstof en Schoon Fossiel moet rekening worden gehouden met een CO₂-infrastructuur.

Wanneer de bovenstaande koppelingen niet hard worden gelegd zal waterstof op korte termijn slechts beperkt effect hebben in termen van energiebesparing en CO₂-reductie. Natuurlijk is winst te behalen bij efficiënte productie van waterstof uit aardgas. Dit is voorlopig ook de goedkoopste optie om waterstof te produceren. Gezien de specifieke sterkte van Nederland als aardgasland is deze optie in de transitiebenadering dan ook logisch en aan te bevelen. De introductie van waterstof als energiedrager, met name in het verkeer, biedt daarbij direct een antwoord op problemen met de luchtkwaliteit en biedt sowieso nieuwe economische kansen. Daarnaast kan de opbouw van een vraag/markt en een infrastructuur voor waterstof belangrijk zijn voor het versneld leggen van de koppelingen na introductie door het bevorderen van een aantal ontwikkelingen:

- Het geeft een impuls aan de ontwikkeling van brandstofcellen omdat het 'kip-ei' probleem wordt doorbroken
- Ontwikkeling en implementatie van technologie voor afvangst van CO₂ omdat afvangst bij grootschalige productie van waterstof uit aardgas relatief eenvoudig is ten opzichte van CO₂ afvangst bij conventionele elektriciteitscentrales

- Implementatie van offshore wind omdat waterstof een extra mogelijkheid biedt om de energie uit windparken die in de huidige voorzieningsstructuur niet direct inzetbaar is toch te integreren in het energiesysteem.

Bijmengen van waterstof in aardgas

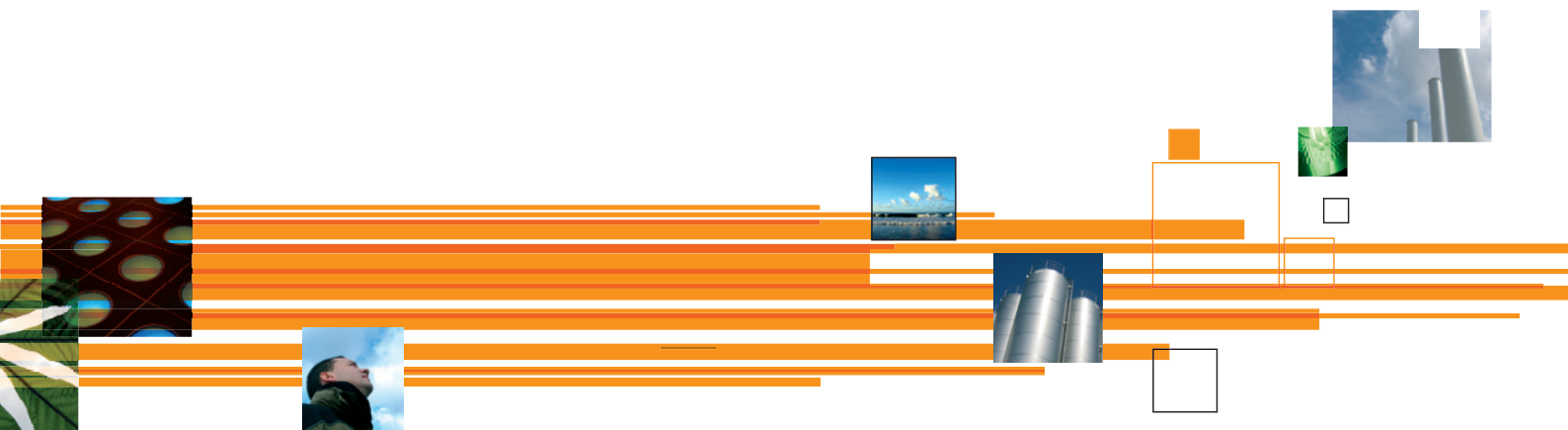
Uit praktische overwegingen lijkt het niet verstandig om waterstof grootschalig en structureel bij te mengen in het Nationale hoge druk transportnet. Dit net wordt namelijk ook, en in toenemende mate, gebruikt voor internationaal gastransport. Daarnaast zal het onttrekken van waterstof aan het mengsel, hoewel technisch in principe wel mogelijk, kostbaar zijn en tot rendementsverlies leiden. Daarbij zijn praktische complicaties niet uit te sluiten omdat het percentage waterstof gaat variëren afhankelijk van de hoeveelheid waterstof die onderweg aan het mengsel wordt onttrokken. Daarmee kan een bepaalde eindkwaliteit niet gegarandeerd worden. Als waterstof wordt onttrokken voor toepassingen op puur waterstof ligt het meer voor de hand om de vraag naar, en aanbod van, waterstof direct kort te sluiten en niet via het aardgasnet.

Toch is de bijmengoptie wel een optie die in een overgangperiode op relatief korte termijn perspectief biedt voor het vergroenen van ons aardgas. Ook bij een gering bijmengpercentage zou een aanzienlijke waterstofomzet kunnen ontstaan.

Een interessante gedachte in dit verband kan zijn om in een transitie naar waterstof als energiedrager de mogelijkheid te verkennen om in een vroegtijdig stadium een centrale transportinfrastructuur voor waterstof aan te leggen waar vanuit waterstof in de middendruk en/of lagedruk aardgasnetten kan worden gevoed op een constant niveau. Met geleidelijke aanpassing van de eindtoepassingen zou dit percentage in de loop van de tijd kunnen stijgen, maar tegelijkertijd kunnen zich ook allerlei pure waterstoftoepassingen rond deze centrale productie ontwikkelen. Ook kan een dergelijke infrastructuur de ontwikkeling van (klimaatneutraal) waterstofaanbod vereenvoudigen omdat de productie grootschalig kan plaatsvinden, veel minder plaatsgebonden is en vraag en aanbod niet direct gekoppeld zijn zoals bij on-site productie wel het geval is.

Bijmengen van waterstof bij aardgas is ook een mogelijkheid om ervaring op te doen met waterstof op vulstations zolang er geen brandstofcelvoertuigen beschikbaar zijn. Bepaalde mengsels met lage doses waterstof kunnen in aardgasvoertuigen worden toegepast. Er zijn enkele projecten met dergelijke mengsels ('hythane') in Europa, en in Nederland wordt hierover gedacht in Den Haag. In deze gevallen wordt het waterstof ter plekke bij aardgas gemengd na elektrolyse of on-site reforming. Snelle beschikbaarheid van waterstofvoertuigen met verbrandingsmotoren kan deze optie echter inhalen.

3. Transitieroutes en -doelen



Algemeen

Een transitie is een structurele verandering van een belangrijk deelsysteem van de samenleving die gepaard gaat met grootschalige technologische, economische, milieutechnische, sociaal-culturele (maatschappelijke) en institutionele ontwikkelingen die op elkaar inwerken en elkaar versterken. De overgang naar een op waterstof gebaseerde energiehuishouding kan worden gezien als een dergelijke transitie.

In de theorie worden binnen transities verschillende fasen onderscheiden. Deze fasen zijn: voorontwikkeling, take-off, versnelling en stabilisatie. Primair betreft de waterstoftransitie een geheel of gedeeltelijke overgang van het gebruik van koolstofhoudende energiedragers naar waterstof als energiedrager in de eindgebruiksectoren, te weten verkeer en vervoer, huishoudens, handel diensten en overheid, land en tuinbouw en de industrie. De transitie bevindt zich momenteel nog in de voorontwikkelingsfase (prototype-ontwikkeling, demonstraties).

Het initiëren, ontwikkelen en beheren van een transitie vereist een plan van aanpak:

- Kiezen van een gezamenlijk transitiedoel. Wat moet er in de nieuwe stabilisatiefase zijn bereikt.
- Verkennen van toekomstbeelden bij het transitiedoel. Het transitie-toekomstbeeld schetst ambities en omvat verschillende mogelijkheden. Het is geen puntdoel maar een interval. Het beeld is nog niet scherp. Het wordt concreter in de loop van de tijd.

- Formuleren van tussendoelen. Voor zowel de mobiele als de stationaire toepassingen kunnen diverse marktsegmenten worden onderscheiden met elk hun eigen karakteristieken die maken dat ze meer of minder geschikt zijn om een rol te spelen in de start van de transitie en om bij te dragen aan de transitie. De tussendoelen zouden betrekking kunnen hebben op de diverse marktsegmenten, met doelstellingen voor de penetratiegraad van waterstof, de herkomst van het waterstof, de productie het transport en de distributie van het waterstof.
- Evaluatie van tussentijdse doelstellingen via ontwikkelingsronden (regiefunctie)
- Creëren van maatschappelijk draagvlak
- Een stakeholders analyse waarbij met name de betrokkenheid van industriële partners essentiële randvoorwaarde is. Rol van de overheid en het aanbod vanuit de kennisinstellingen zijn voor het bedrijfsleven voorwaarden voor hun betrokkenheid.

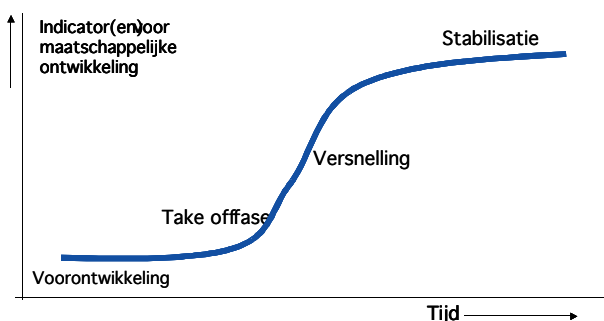
In dit hoofdstuk zal het transitiepad waterstof worden ingevuld door een tweetal routes:

1. waterstof voor mobiele toepassingen
2. waterstof voor stationaire toepassingen

Deze routes zijn niet per sé onafhankelijk van elkaar. Voor de beeldvorming en de analyse van knelpunten en beleidsprioriteiten is een beschrijving van de afzonderlijke routes functioneel.

Waterstoftransities

De toepassingen van waterstof zijn legio, maar in essentie komt het er op neer dat de energie-inhoud van waterstof, aanwezig als potentiële chemische energie, uiteindelijk wordt omgezet in kinetische energie om voertuigen en voorwerpen van A naar B te verplaatsen en warmte en kracht voor de energievoorziening in huishoudens en gebouwen (lage temperatuur warmte) en in de industrie (hoge temperatuur warmte).



Figuur 1 Energietransitiefasen

Zo bezien vallen de toepassingen dus uiteen in twee categorieën, namelijk mobiele toepassingen en stationaire toepassingen. Hierbij kent elke categorie in feite een eigen transitie:

- de transitie van vloeibare koolstofhoudende brandstoffen naar waterstof als energiedrager in mobiele toepassingen,
- de transitie van aardgas naar waterstof voor de productie van warmte en kracht in stationaire toepassingen.

Omdat voor waterstof (nog méér dan voor aardgas) geldt dat het zoveel mogelijk, en dus ook in huishoudens, in warmtekrachttoepassing omgezet zou moeten worden, komt in het stationaire geval de transitie van centrale naar decentrale (lokale) productie van elektriciteit (plus warmte) boven op de transitie van aardgas naar waterstof.

Omdat waterstof in de beginfase vooral uit aardgas zal worden geproduceerd lijkt de waarde van de transitie naar waterstof in mobiele toepassingen op voorhand groter (milieu, klimaat, voorzieningszekerheid/afhankelijkheid) dan de transitie naar waterstof in stationaire toepassingen waar aardgas nu reeds een grote rol speelt en relatief schoon en efficiënt wordt ingezet. De stationaire toepassingen worden pas echt interessant bij inzet van klimaatneutraal waterstof, maar kunnen niet worden genegeerd. Op langere termijn is de huidige situatie namelijk onhoudbaar. Ons eigen aardgas is over 30 jaar op en aardgas zal dan moeten worden geïmporteerd of uit eveneens geïmporteerd biomassa moeten worden geproduceerd (SNG-Synthetic Natural Gas), hetgeen extra afhankelijkheid betekent. Daarnaast biedt de huidige kleinschalige inzet van aardgas geen mogelijkheden voor CO₂ reductie door CCS.

In het nadenken over opties en alternatieven in stationaire toepassingen moet onderscheid worden gemaakt tussen bestaande bouw en nieuwbouw. In het eerste geval is er een bestaande situatie, waarbij met name de bestaande infrastructuur niet op eenvoudige wijze kan worden aangepast. Aanpassing kan hier alleen worden gerealiseerd door aanpassing van hetgeen er door de pijpleiding gaat. Hier kan worden gekeken naar vergroening van gas door bijmenging van waterstof, maar dat kan niet echt gezien worden als een bijdrage aan de transitie naar een waterstofeconomie. In deze sector zal wel een aanzet tot transitie worden gegeven door de toepassing van aardgas gestookte micro-wkk installaties met benutting van de brandstofceltechnologie. In deze systemen zal aardgas door systeemgeïntegreerde reforming omgezet worden in kortlevend waterstof.

Voor nieuwbouw, dat wil zeggen alles dat vanaf nu wordt gebouwd, zullen elektrisch gedreven warmtepompen de concurrent voor gastecnologie kunnen worden. Terughoudendheid is daarom geboden. Maar bij de aanleg van een nieuwe gasinfrastructuur, is het verstandig rekening te houden met waterstof als toekomstige energiedrager. Dit voorkomt vroegtijdig afschrijven van infrastructuur die alleen voor aardgas geschikt is, en verlaagt toekomstige aanlegkosten voor een waterstofinfrastructuur. Later zijn verschillende vormen denkbaar zoals een waterstofnetwerk tot aan of in de woning, of waterstof-wkk-centrales in de wijk in combinatie met lokale warmtenetten.

Onderstaande tabellen geven de mogelijke routes voor de mobiele en de stationaire toepassingen. De trajecten zijn gebaseerd op interne discussies in de werkgroep en geïnspireerd door de visies zoals ontwikkeld in de Europese HyWays studie.

Tabel 1: waterstoftransitie voor mobiele toepassingen

Waterstoftransitie voor mobiele toepassingen			
	Eindtoepassing	Productie en infrastructuur	Bronnen
2006-2010	<ul style="list-style-type: none"> Demonstraties met diverseprototypes waterstofbussen in kleine aantallen, zowel ICE als brandstofcellen. Early markets via "speciale purpose voertuigen" Niche toepassingen en early markets (APU) 	<ul style="list-style-type: none"> Aanvoer via trucks, zowel gecomprimeerd als vloeibaar waterstof Waterstofpijpleiding (R'dam) On-site productie van H₂ (elektrolyse) benutting beschikbaar restwaterstof 	<ul style="list-style-type: none"> Aardgas Elektriciteit/water
2010-2015	<ul style="list-style-type: none"> Uitbreiding demonstraties met kleine aantallen naar een of meerdere busvloten op waterstof Demonstraties voertuigen op waterstof als onderdeel van lokale voertuigparken (o.a. gemeenten, lokale distributie van goederen en personen in bv. havens en luchthavens) 	<ul style="list-style-type: none"> Aanvoer via trucks, zowel gecomprimeerd als vloeibaar waterstof Waterstofpijpleiding (R'dam) On-site productie van H₂ (reforming en elektrolyse) benutting beschikbaar restwaterstof 	<ul style="list-style-type: none"> Demonstratie aardgas met CCS Elektriciteit/water Aardgas met deel biogas bijgemengd uit landfill, mest-vergisters, rioolwaterzuivering, etc.
2015-2020	<ul style="list-style-type: none"> Openbaar busvervoer in en rond grote steden op H₂ ≥ 25% Uitbreiding demonstraties lokale voertuigparken tot "vloten" Eerste introductie (1-3%) hybride/BC auto's op H₂ Parkeerprivileges en rekeningrijdenbonus voor nulmissievoertuigen 	<ul style="list-style-type: none"> Aanvoer via trucks, vnl. vloeibaar waterstof Waterstofpijpleiding (R'dam en omgeving) On-site productie van H₂ (reforming) 	<ul style="list-style-type: none"> Aardgas (voor een deel) met afvangst en opslag van CO₂ (samengaan met transitiepad Schoon Fossiel)
2020-2030	<ul style="list-style-type: none"> Openbaar busvervoer en taxi's in en rond grote steden op H₂ 5-25% auto's op H₂ 	<ul style="list-style-type: none"> Waterstof beschikbaar op ≥ 50% van alle tankstations: Aanvoer via trucks, vnl. vloeibaar waterstof lokale productie (reforming) Waterstofpijpleiding (R'dam en omgeving) 	<ul style="list-style-type: none"> 20-40% van het waterstof is klimaatneutraal: <ul style="list-style-type: none"> Aardgas met CCS Steenkool met CCS Biomassa Off-shore wind
2040	Toegang tot binnensteden alleen met nulmissie voertuigen <ul style="list-style-type: none"> Bussen Busjes en lichte vrachtwagens Auto's Scooters e.d. 	<ul style="list-style-type: none"> In grote steden tankstations op waterstof Alle snelwegtankstations in de grote Randstad op een centrale ringleiding (ZH, NB, Gelderland, Utrecht, NH), elders aanvoer van LH₂ per vrachtwagen of on-site productie met CCS Verbinding ringleiding met België en Duitsland 	
2050	<ul style="list-style-type: none"> 40-75% van auto's, bussen en busjes rijden op H₂, vnl. BC-hybrides 	<ul style="list-style-type: none"> Verdere uitbreiding en integratie van de centrale ringleiding tot landelijke systeem 	<ul style="list-style-type: none"> 60-100% H₂ is klimaatneutraal: <ul style="list-style-type: none"> Steenkool met CCS Biomassa Off-shore wind

Afkortingen: CCS=Carbon Capture and Storage, ICE=Internal Combustion Engine, APU=Auxiliary Power Unit, UPS=Uninterrupted Power Supply, BC=Brandstofcel, WKK=Warmte Kracht Koppeling, LH₂=Vloeibaar waterstof

Tabel 2: Waterstoftransitie voor stationaire toepassingen

Waterstoftransitie voor stationaire toepassingen			
	Eindtoepassing	Productie en infrastructuur	Bronnen
2006-2010	<ul style="list-style-type: none"> • Introductie mini-wkk, met aardgas gestookte brandstofcellen • Demonstratie waterstof brandstofcel mini-wkk op gebouwniveau (kantoor, appartementen, flat, etc) 	<ul style="list-style-type: none"> • Systeem-geïntegreerde reforming • Benutting waterstofleiding (R'dam) voor lokale demonstraties • Nieuwe aardgasleidingen zijn geschikt voor H₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • Lokaal beschikbaar restwaterstof • Aardgas
2010-2015	<ul style="list-style-type: none"> • Introductie micro-wkk, met aardgas gestookte BCs als opvolger Stirling in bestaande bouw • Bijmengen van vast % H₂ in lokale aardgasnetten voor de bestaande bouw • Nieuwe wijken met mini-wkk op aardgas • Demonstraties mini-wkk op waterstof • Niche toepassingen zoals APU, UPS 	<ul style="list-style-type: none"> • Systeem-geïntegreerde reformer • Koppeling lokale netten aan Waterstofleiding (R'dam) • Aanvoer per vrachtauto, gecompriemd waterstof of vloeibaar waterstof, met injectie in lage druk distributienet. • Bijmengen vanuit de waterstofpijpleiding (R'dam & omgeving) 	<ul style="list-style-type: none"> • Aardgas decentraal, • Demonstratie aardgas met CCS • Aardgas met deel biogas bijgemengd uit landfill, mest-vergisters, rioolwaterzuivering, etc.
2015-2020	<ul style="list-style-type: none"> • Introductie micro-wkk, met waterstof gestookte BCs in nieuwbouw • Nieuwe wijken met mini-wkk op waterstof • Demonstratie waterstof gestookte wkk voor early markets 	<ul style="list-style-type: none"> • Centrale aanvoer naar lokale netten lokale waterstofnetten in nieuwe wijken i.c.m. decentrale reforming en inkoppeling van warmte in lokaal warmtenet 	<ul style="list-style-type: none"> • Aardgas (voor een deel) met afvangst en opslag van CO₂ (samengaan met transitiepad Schoon Fossiel)
2030	<ul style="list-style-type: none"> • Uitbouw wijken met mini-wkk op aardgas • Demonstratie nieuwe wijk(en) met mini-wkk op waterstof • Introductie waterstof gestookte wkk systemen 	<ul style="list-style-type: none"> • Decentrale reforming met CCS • Uitbouw lokale waterstofnetten • benutting centrale infrastructuur voor mobiel 	<ul style="list-style-type: none"> • Waterstof is klimaatneutraal: <ul style="list-style-type: none"> – Aardgas met CCS – Steenkool met CCS – Biomassa – Off-shore wind
2040/2050	<ul style="list-style-type: none"> • Uitbouw wkk systemen (van 1 tot 500 kWe) op waterstof 	<ul style="list-style-type: none"> • Koppeling decentrale netten met waterstofinfrastructuur voor mobiel 	<ul style="list-style-type: none"> • Waterstof is klimaatneutraal <ul style="list-style-type: none"> – Aardgas met CCS – Steenkool met CCS – Biomassa – Off-shore wind

Afkortingen: CCS=Carbon Capture and Storage, ICE=Internal Combustion Engine, APU=Auxiliary Power Unit, UPS=Uninterrupted Power Supply, BC=Brandstofcel, wkk=warmte kracht koppeling, Mini-wkk: hiermee wordt de vermogensrange van 1-100 kWe bedoeld.

Infrastructurele aspecten van de routes nader beschouwd

In bovenstaande transitieroutes is nog niet eens zozeer de productie en het eindgebruik van waterstof maar de wijze van transporteren en distribueren een belangrijke parameter. Dit hangt samen met de behoefte aan een specifieke infrastructuur. Voor het eindbeeld lijkt er consensus over transport per pijpleiding. Dit is echter ook gebaseerd op de veronderstelling dat waterstof niet alleen voor mobiele toepassingen, maar ook grootschalig voor stationaire toepassingen zal worden ingezet. Als waterstof uiteindelijk alleen in mobiele toepassingen een plaats zal vinden, is een landelijke infrastructuur mogelijk niet rendabel. In dat geval zal het leidingennet beperkt blijven tot een ringleiding die de Randstad en de grote steden in Brabant, Gelderland en Zuid-Limburg verbindt, en zal lokale productie uit aardgas en trailervervoer langer stand houden. De energie-inhoud van aardgas dat thans door het net wordt getransporteerd is ruim een factor twee groter dan de energie-inhoud van de brandstoffen voor het wegverkeer. Als alleen tankstations van waterstof hoeven te worden voorzien, zal het net niet zo uitgebreid hoeven te zijn (thans circa 3750 tankstations).

Totdat er meer duidelijkheid is over de penetratiesnelheid van waterstof, zowel mobiel als stationair, is het zaak de opties open te houden en de infrastructuur zo flexibel mogelijk in te richten. Dit kan met on-site productie. Echter, met toename van de vraag zal op een gegeven moment de infrastructuur moeten worden aangepast: bij on-site reforming zal de aardgasaansluiting niet meer toereikend zijn. Aanvoer per vrachtwagen lijkt hier de maximale flexibiliteit te bieden.

Hierbij moet worden opgemerkt dat aanvoer per vrachtwagen van gecombineerd waterstof al snel leidt tot veel extra vrachtwagens. Aanvoer per vrachtwagen van vloeibaar waterstof kent dit nadeel veel minder, vanwege de grote energie-inhoud van vloeibaar waterstof. Vloeibaar waterstof heeft bovendien als voordeel dat het alle vormen van on-board opslag kan bedienen zodat ook hier flexibiliteit blijft bestaan. Nadeel van vloeibaar waterstof is echter het hoge energiegebruik voor het vloeibaar maken. Bovendien is de productiecapaciteit voor vloeibaar waterstof op het ogenblik beperkt zodat ook hier op een gegeven moment geïnvesteerd zal moeten worden, maar dan in grootschalige centrale installaties.

Een dergelijke fasering van decentrale, on-site productie naar centrale productie staat ook beschreven in de voor Nederland ontwikkelde visie van het HyWays project (zie bijlage 1).

Voorontwikkeling, aanwezige elementen voor de waterstoftransitie in Nederland

De waterstoftransitie bevindt zich nog in de voorontwikkelingsfase. De ervaringen uit deze fase tot nu toe en de investeringen die daarin gedaan zijn dienen een rol te spelen bij de invulling van de transitieroutes, en met name bij het ontwikkelen van de eerstvolgende concrete activiteiten.

Vanuit de huidige fase zullen concrete demonstratieprojecten moeten worden gedefinieerd waarin waterstof in nichemarkten wordt geïntroduceerd. In Nederland aanwezige elementen, die een rol zouden kunnen spelen in het definiëren en ontwikkelen van eerstvolgende concrete projecten, zijn:

- Grootschalige waterstofproductie op basis van aardgasreforming in de Rijnmond
- Productie van waterstof als bijproduct bij de productie van chloor in de Rijnmond en Delfzijl
- Industriële waterstofpijpleidinginfrastructuur in de Rijnmond (Air Products)
- Kleinschalige waterstofproductie-eenheid op basis van elektrolyse in Amsterdam
- Ervaring met het opereren van een drietal brandstofcellbussen op waterstof in Amsterdam (het CUTE-project)
- Betrokkenheid van grote Nederlandse bedrijven: Gasunie en Shell Hydrogen
- Bedrijven met waterstoftechnologie
 - brandstofcellen en brandstofcellstacks (Nedstack)
 - kleinschalige reformer (HyGear)
 - productie en transport/distributie (Air Products, Linde, Air Liquide)
- Interesse van diverse lokale overheden om activiteiten te ontplooien (o.a. Arnhem, Rotterdam, Amsterdam, Enschede, Texel, Almere)
- Betrokkenheid van Nederlandse partijen in Europese projecten en internationale gremia

Daarnaast is er een goed ontwikkelde kennisinfrastructuur op het gebied van waterstof (o.a. ECN, TNO, TU Delft en RIVM). Deze partijen, en met name ECN en TNO, zijn goed vertegenwoordigd in de meest relevante Europese onderzoeksprojecten en projecten ter voorbereiding van grootschalige Europese demonstraties.

Tot slot is reeds een aantal initiatieven ontplooid waarbij door diverse partijen werk is verricht aan ontwerp en ontwikkeling van waterstofsysteem, onderzoek is gedaan naar marktomvang, en de technisch en economische haalbaarheid van waterstoftoepassingen. Een overzicht van de initiatieven in Nederland is bijgevoegd in bijlage 3.

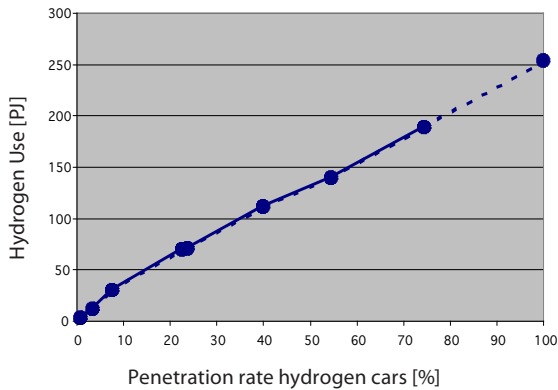
Opbrengsten

Omdat de transitieroute stationair in eerste instantie via directe inzet van aardgas in mini- en micro-wkk zal verlopen zal dit in 2030 nog weinig CO₂-reductie opleveren. Zodra micro-wkk op waterstof wordt bedreven is de ratio daarvoor dat de waterstofproductie dan wel klimaatneutraal zal moeten zijn. In dat geval zal de CO₂-reductie, met name de indirecte, substantieel worden.

De transitieroute mobiel kan in 2030 tot maximaal 7 Mton CO₂-besparing leiden (ref.: de HyWays studie). In 2050 is dat toegenomen tot maximaal 24 Mton per jaar. Naast CO₂-reductie is de belangrijkste verdienste van de transitieroute mobiel de bestrijding van de stedelijke luchtverontreiniging (fijn stof en NO_x).

Energiebeschouwingen

Indien waterstof in de transitieroute mobiel zijn plaats zal krijgen, is het interessant na te gaan welke implicaties dit zal hebben voor de beschikbaarheid en benodigde capaciteit van bronnen. Indien uitgegaan wordt van 100% penetratiegraad van waterstof voor transportdoeleinden (auto's, bussen en busjes, exclusief zware vrachtwagens) dan blijkt daarvoor circa 250 PJ aan waterstof nodig te zijn, zoals blijkt uit onderstaande figuur.



De benodigde energie kan daarvoor uit verschillende bronnen worden geproduceerd, zoals wind, kernenergie, biomassa, kolen en aardgas. Hieronder volgen voor elk van deze bronnen welke implicaties een volledige overgang van de mobiele sector op waterstof, volgens een ruwe schatting, kunnen worden aangemerkt.

Voor de productie van 250 PJ aan waterstof uit wind via elektrolyse is circa 32.100 MW aan offshore windturbines nodig. Dit is een windpark met een oppervlak van 78 x 78 km, oftewel 6.100 km². Voor onshore windturbines zijn de cijfers 42.800 MW en 8100 km². Ter vergelijking: het oppervlak van Nederland is ongeveer 40.000 km².

Voor de productie van 250 PJ aan waterstof via elektrolyse van water met elektriciteit van kerncentrales is ongeveer 14.200 MW aan kerncentrales benodigd (bij een elektrisch rendement van 33%). Ter vergelijking: Borselle heeft een capaciteit van 250 MW, waarbij moet worden opgemerkt dat Borselle een kleine centrale is. Kerncentrales van 1000 MW zijn geen uitzondering.

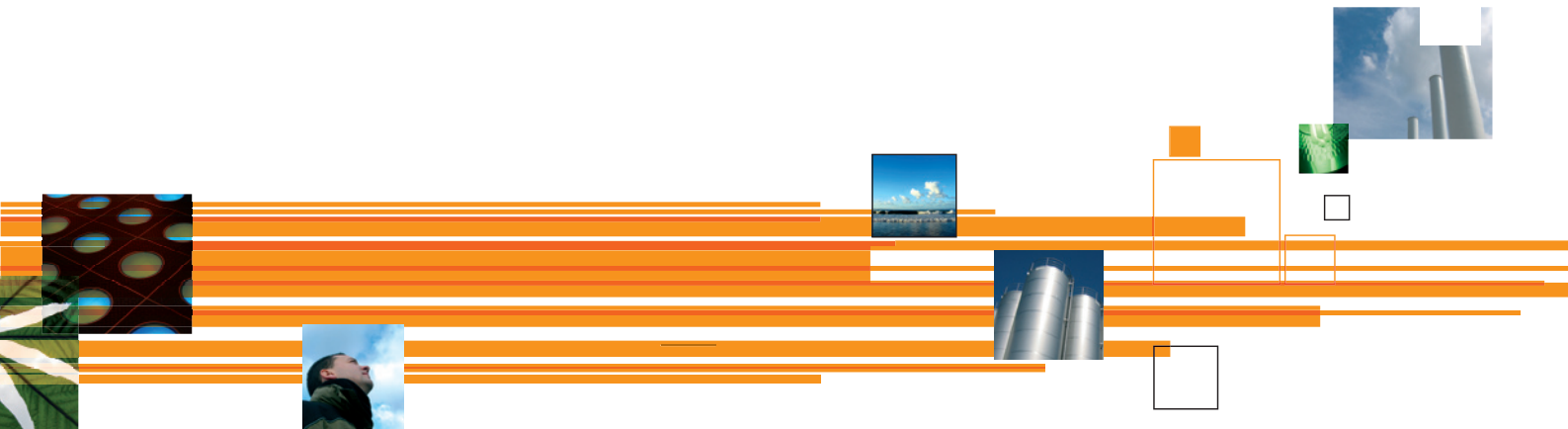
Aan elektriciteit voor elektrolyse is ongeveer 385 PJ nodig. Het verbruikssaldo aan elektriciteit in 2002 was nationaal 396 PJ. Dit betekent dus een verdubbeling van het elektriciteitsverbruik in 2002.

Als 250 PJ aan waterstof uit biomassa geproduceerd wordt via vergassing dan is daar ruwweg 20 miljoen ton droge biomassa voor nodig. Van oorsprong heeft biomassa een vochtgehalte van circa 30% wat betekent dat ongeveer 29 miljoen ton moet worden geoogst. Om dit te verbouwen is een oppervlak nodig van 143 x 143 km, oftewel ruim 20.000 km², ongeveer de helft van het oppervlak van Nederland (bij 18 GJ/ton droge stof en 10 ton droge stof per hectare per jaar).

Als 250 PJ aan waterstof uit kolen geproduceerd wordt via

vergassing dan is daar ruwweg 15 Mton kolen voor nodig (bij 26,7 GJ/ton hard coal (LHV)). De CO₂ emissie die hiermee gepaard gaat bedraagt ruim 36 Mton. Wordt afvangst en opslag van CO₂ toegepast dan is er ca. 16 Mton kolen nodig en bedraagt de CO₂ emissie bijna 4 Mton (bij 90% afvangst). In dit geval moet 34 Mton CO₂ jaarlijks worden opgeslagen. De hoeveelheid kolen die nodig is vertegenwoordigt een energetische waarde van ca. 420 PJ. Het verbruikssaldo aan kolen in Nederland bedroeg in 2002 353 PJ. Volledige productie van waterstof uit steenkool zou dus ruim een verdubbeling inhouden van het gebruik van kolen in Nederland.

Tenslotte, als aardgas als bron voor de productie van 250 PJ aan waterstof wordt ingezet dan is daar ongeveer 360 PJ aan aardgas voor nodig. Het nationale verbruikssaldo voor 2002 bedroeg 1524 PJ. Het aardgasverbruik zou dus ongeveer met 25% toenemen.



Waterstof biedt de mogelijkheid tot innovatieve, industriële ontwikkelingen. Op dit moment kent Nederland een aantal industriële initiatieven met interessante perspectieven. Zo is Nedstack actief als fabrikant van brandstofcelstacks, terwijl HyGear actief is op het gebied van reforming en gasconditionering. Daarnaast onderzoekt een aantal kleine bedrijven de mogelijkheden op het gebied van waterstoftechnologie actief te worden, zowel voor stationaire als voor vervoerstoepassingen.

De Nederlandse Waterstof en Brandstofcel Vereniging (NWX) heeft recent bij het Ministerie van Economische Zaken aandacht gevraagd voor de positie van het Nederlandse bedrijfsleven op dit gebied. En terecht, want de mogelijkheden voor nieuwe innovatieve bedrijvigheid is één van de argumenten om in Nederland op dit gebied actie te ondernemen.

De overheid moet hierin een rol spelen door de markt zo vorm te geven, dat bedrijven opportuniteiten zien. Eisen vanuit de gemeenschap omgezet in regulering door de overheid leiden vaak tot grote marktvernieuwingen, lokken innovaties uit en leiden tot efficiëntere marktwerking. Het stellen van scherpe milieueisen op langere termijn, bijvoorbeeld, blijkt zeer krachtige impulsen te geven voor nieuwe technologie ontwikkeling passend binnen dit industriebeleid.

De termijn dient daarbij niet te kort te zijn omdat ad hoc reageren op milieuproblemen marktpartijen niet de gelegenheid geeft om hun eigen transitie door te maken. Een lange termijn visie met duidelijke ecologische streefwaarden op termijn geeft een goed kader voor transitie-investeringen. De uitwerking van de Californische "zero emission vehicles wetgeving" is in dit verband een treffende illustratie. In Nederland zouden lokale overheden met een dergelijke "regelgeving op termijn" belangrijke ontwikkelingen voor lokaal vervoer kunnen initiëren.

Een belangrijk instrument daarbij zou kunnen zijn het opzetten van zogenaamde buyers pools. Een buyers

pool is bijvoorbeeld het ministerie van volkshuisvesting dat 60 brandstofcelssystemen koopt en op diverse eigen gebouwen/afdelingen inzet. Via een tenderprocedure worden dan bijvoorbeeld 3 maal 20 stuks van 3 leveranciers geselecteerd ter levering. Op deze wijze kunnen de 3 leveranciers hun veldtestseries financieel afdekken en de nodige ervaringen opdoen in een beschermde milde omgeving.

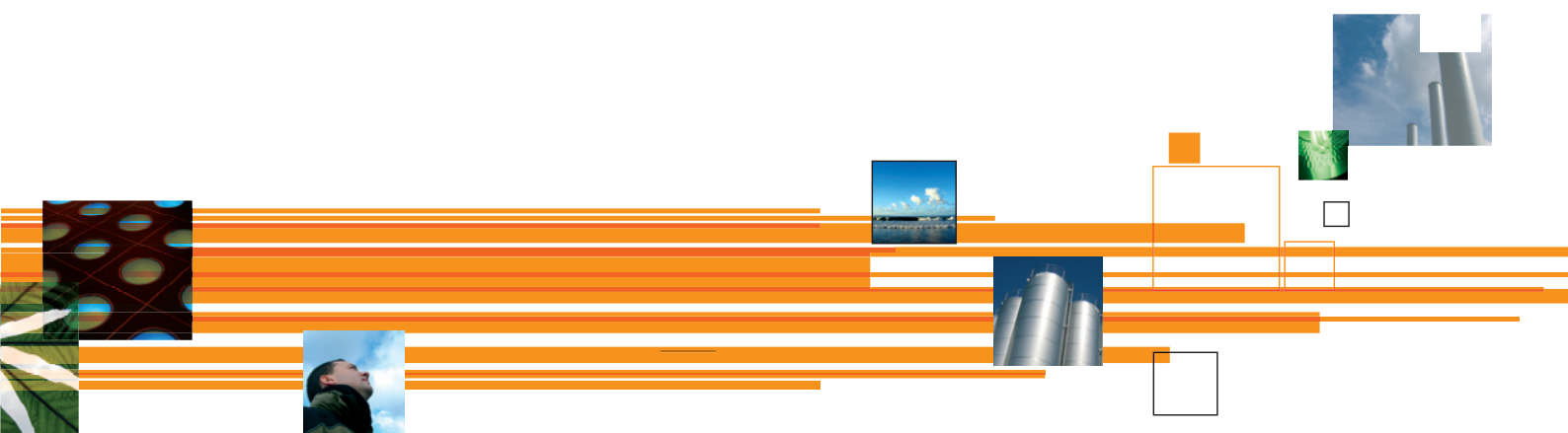
Dit betekent ook het actief opsporen en definiëren van steeds nieuwe marktniches, bouwen van de bijbehorende bedrijfsketens en het stimuleren van nieuwe toetreders en starters voor ontbrekende schakels in de keten. De startende bedrijven zijn nu gedwongen dit zelf op te pakken, en zelf veldtesten voor hun apparaten te creëren. Daaraan veel aandacht besteden gaat echter ten koste van de aandacht voor de eigen core business: het op gang brengen van een bedrijf met een goede technologische focus. Een doelbewuste ondersteuning door de overheid om de Nederlandse waterstof- en brandstofcelinitiatieven te stuwten naar Industriële Clusters zal de industriestructuur zeer versterken.

Deze nieuwe technologieën en industrieketens geven relatief veel mogelijkheden voor versterking van de maakindustrie. De transitie zal immers feitelijk plaatsvinden door de vervanging van een breed scala van installaties door apparaten van de nieuwe technologie, in de gehele energieketen vanaf productie, via opslag tot verbruik. Dit is een kans om via innovatiemechanismen de markteconomie van de maakindustrie te verbeteren.

Dit vraagt wel een voor bedrijven aantrekkelijk en concurrerend industrieklimaat. Op dit moment maakt de waterstof- en brandstofcelindustrie cruciale keuzes. De meeste belovende massaproducten (wkk-systemen, auto's) zijn nog niet marktrijp. Toch ontstaan er nu beperkte nichemarkten voor de eerste commerciële producten. De bedrijven betreden deze markten om hun productievolumes te verhogen. Daarmee kunnen zij en

hun toeleveranciers de investeringen voor automatisering van de productie verantwoord en tevens door kostprijsverlaging nieuwe markten openen. Om dit proces te versnellen, worden in veel landen subsidies gegeven om deze bedrijven levensvatbaarder te maken en hun productie op te zetten. Deze ontwikkelingen hebben een directe impact op de nabije arbeidsmarkt. Indien Nederland daadwerkelijk overgaat tot het invoeren van een waterstofeconomie kan dat leiden tot een aanwas van circa 20.000 banen, zowel in de OEM-sector als in de toeleverende industrie, zoals berekeningen van de Nederlandse Waterstof- en brandstofcellen Vereniging (NWV) laten zien. De vraag naar (bij)geschoolde medewerkers zal dan ook gestaag groeien en kennisopbouw en kennisdiffusie zijn daarbij belangrijk aspecten. Recentelijk is daarom op initiatief van Hiteq de initiatiefgroep Waterstof en Onderwijs opgericht onder de vlag van dezelfde NWV die als doelstelling heeft het proces van kennisdiffusie te regisseren.

5. Knelpunten en beleidsprioritering



Economische knelpunten

Voor de introductie van waterstoftechnologie zijn er momenteel nog geen directe economische drivers. Lange termijn maatschappelijke argumenten zijn nog niet vertaald in operationele marktcondities. Waterstof- en brandstofceltechnologie is nog te kostbaar voor economisch verantwoorde marktintroductie. Kostenreducties zijn noodzakelijk, daartoe moeten leercurven worden doorlopen en moet praktijkervaring worden opgedaan. De eerste demonstratieprojecten kunnen nog niet beschouwd worden als voorbereiding op marktintroductie, zodat de kosten voor een groot gedeelte publiek zullen moeten worden gefinancierd. Gezien de grote maatschappelijke belangen op langere termijn zal de overheid in deze verantwoordelijkheid moeten nemen. Anderzijds zullen marktpartijen betrokken moeten zijn en moeten de noodzakelijke demonstratieprojecten efficiënt georganiseerd worden tegen zo laag mogelijke kosten. Publiek-private samenwerking is essentieel. Een concrete korte termijn actie is afstemming van de vele initiatieven om te voorkomen dat op meerdere plaatsen identieke projecten worden opgestart.

De transitieroute stationair verloopt via de directe inzet van aardgas in mini- en micro-wkk installaties. Afstemming met de transitieactiviteiten op het gebied van micro-wkk/stirling ligt voor de hand. De transitieroute mobiel wordt gestimuleerd door de lokale noodzaak tot vergaande beperking van stedelijk luchtverontreiniging. Dit is de drijvende kracht voor het entameren van demonstraties op korte termijn. Maar uit het technisch succesvolle verlopen CUTE-project is gebleken dat commerciële exploitatie van de technologie nog ver weg ligt. Ook voor deze toepassingen zullen kostenreductie voor de technologie en vooral systeemverbeteringen noodzakelijk zijn.

Technologische knelpunten

De technologie om waterstof grootschalig te produceren is bekend en beschikbaar binnen de petrochemische

industrie. Er bestaat in Nederland heel veel ervaring op dit gebied die kan worden ingezet voor de noodzakelijke demonstratieprojecten. Het is van belang om aan te sluiten bij bestaande voorzieningen om van daaruit de infrastructuur verder te ontwikkelen.

De brandstofceltechnologie is nog te duur, hetgeen ook geldt voor kleinschalige productieprocessen voor waterstof uit aardgas, zeker in combinatie met CCS. Op het gebied van waterstofopslag zijn eveneens verbeteringen nodig of zelfs hele nieuwe oplossingen. Goed gecoördineerd onderzoek en ontwikkeling in samenwerking met de bedrijven in Nederland die actief zijn op het gebied van technologie-ontwikkeling is vereist.

Institutionele knelpunten

Institutionele factoren en bijbehorende politieke keuzes hebben, naast technologische en economische factoren een verregaande invloed op de ontwikkelingskansen van nieuwe energieopties. Institutionele dimensies van strategisch niveau zijn het belang van een continue energievoorziening (de voorzieningszekerheid) en het beperken van milieubelasting (klimaatbeleid en lokale luchtkwaliteit). Daarnaast spelen institutionele dimensies op tactisch niveau: wie verzorgt aanleg en beheer van infrastructuur, vindt productie en levering centraal dan wel decentraal plaats en in hoeverre heeft de consument keuzevrijheid?

Bij sturing op genoemde dimensies zijn in extremo twee opties te onderscheiden: sturing door de overheid (publiek) of sturing door het bedrijfsleven (privaat). Naast publiek en privaat is de afgelopen jaren een mengvariant opgekomen: netwerksturing. De energietransitie probeert via actieve participatie van alle betrokkenen tot innovatieve trajecten te komen. Een 'vergeten' sturingsvariant is sturing door uitdaging, waarbij door het stellen van thans technisch onhaalbare doelen partijen worden uitgedaagd om onconventionele oplossingen te verkennen.

Op welk niveau is sturing mogelijk? Traditioneel concentreerde overheidssturing op energiegebied zich op nationaal niveau. Vanwege politieke en marktontwikkelingen is dat steeds minder haalbaar: veel energievragen kunnen alleen internationaal worden aangepakt. Een 'vergeten' optie is de lokale/regionale schaal: nieuwe energieopties kunnen tot decentrale, min-of-meer zelfvoorzienende, systemen uitgroeien.

In het algemeen moet bij een institutionele beschouwing uitgegaan worden van:

- het belang van de factor infrastructuur. Opties die kunnen profiteren van bestaande infrastructuur hebben betere kansen dan opties waarvoor een infrastructuur ontwikkeld moeten worden;
- centrale productie en levering zijn gemakkelijker te sturen dan decentrale opties. Dit betekent een voordeel voor de -traditioneel centraal producerende- gevestigde bedrijven.

Wat betekent dit voor de waterstofopties die in voorgaande paragrafen naar voren zijn gekomen? We vertrekken vanuit het gebruik en maken onderscheid tussen, a) vervoer, en, b) stationair-bestaande infrastructuur en stationair-decentraal.

a) Waterstof in het vervoer

De verwachtingen zijn hoopvol over grootschalige toepassing van waterstof rond 2050. Om technische, economische en CO₂-reductie redenen wordt verwacht dat, na een introductieperiode, centrale productie dominant wordt. Aanvankelijke distributie met tankwagens zal, bij voldoende schaalgrootte, plaatsmaken voor pijpleidingen. De dominante verwachting (centrale productie, levering met tankwagens) leent zich typisch voor private sturing: oliemaatschappijen vervangen op termijn benzine door waterstof, zo mogelijk verloopt dit stapsgewijs via aardgas en aardgas/waterstofmengsels. Bestaande energiebedrijven hebben een gunstige uitgangspositie. Het internationale niveau is dominant, nationaal is weinig te sturen. De rol van consumenten is passief. De overheden stellen randvoorwaarden op gebied van milieu en veiligheid.

Het introduceren van distributie per pijpleiding roept diverse institutionele vragen op. Komt er een aparte waterstofinfrastructuur, of maakt men gebruik van bestaande gasnetten? Is er een gebruiker of zijn er meerdere gebruikers? Bij meerdere gebruikers, is publiek netbeheer wenselijk en mogelijk? Hoe garanderen we toegang voor nieuwe toetreders tot de markt?

b) Waterstof stationair- bestaande infrastructuur & stationair-decentraal

De verwachtingen zijn gematigd over decentrale toepassing van waterstof in de stationaire sector (woningen en gebouwen). Dominante toepassing is (micro) warmtekracht. Introductie vindt plaats onder blijvend grote concurrentie van bestaande infrastructuur voor gas en elektriciteit.

Ontwikkeling en gebruik van infrastructuur spelen een sleutelrol bij stationaire toepassingen. Uitgaande van de thans dominante sturingsfilosofie, zullen de netwerken gelijkkelijk toegankelijk moeten zijn voor concurrerende producenten. Dit vraagt publieke sturing in de vorm van een onafhankelijke netwerkbeheerder. Infrastructuur functioneert overwegend nationaal, dus is er op nationale schaal behoorlijk te sturen. Vanwege schaalvoordelen bij de productie hebben gevestigde energieleveranciers een gunstige uitgangspositie. De rol van consumenten is passief.

In theorie kan grootschalige toepassing van micro warmte-kracht het elektriciteitsnet overbodig maken. Bij de verwachte langzame penetratie van waterstof is dat voorlopig niet aan de orde. Toch kan het nuttig zijn ook deze optie te verkennen, in samenhang met het mogelijk ontstaan van decentrale waterstofeilanden.

Knelpunten t.a.v. publieke acceptatie, veiligheid en regelgeving

Waterstof is een energiedrager met unieke eigenschappen. Dat betekent dat wet- en regelgeving, veiligheidscultuur en vergunningsverlening specifiek moeten worden ontwikkeld. In het kader van de eerste demonstraties is dit proces reeds op gang gebracht, maar veel werk rest nog. Van belang is dat deze aspecten integraal onderdeel uitmaken van de demonstratieprojecten en dat resultaten nationaal worden gedeeld. Ook op dit gebied hoeft het wiel maar één keer te worden uitgevonden en de grote chemische en petrochemische bedrijven hebben al veel ervaring op basis waarvan kan worden doorgewerkt.

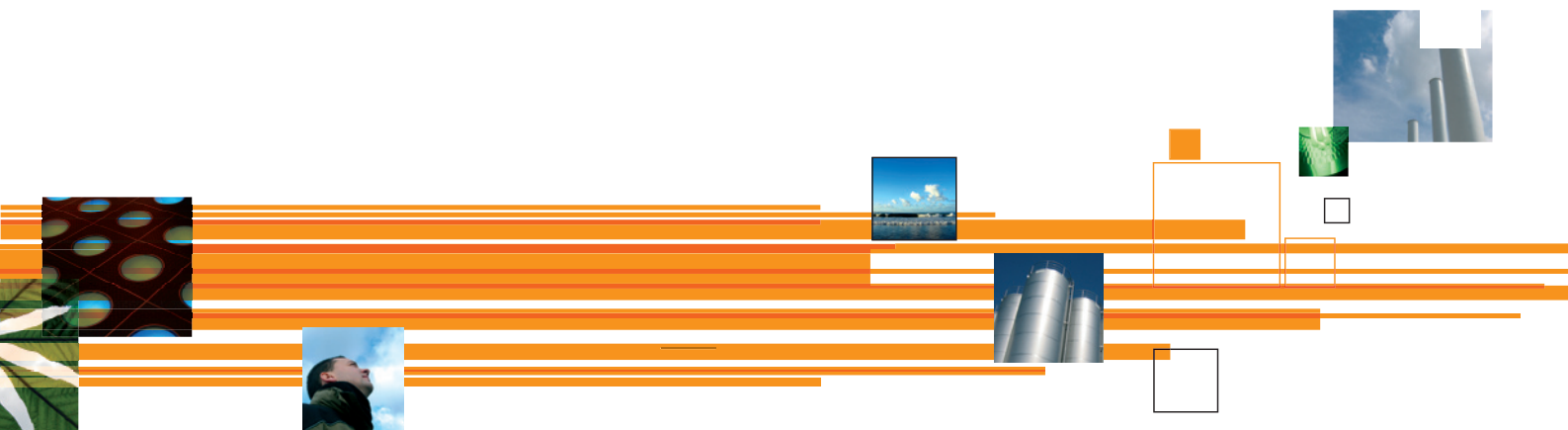
Iedere nieuwe technologie zal daarnaast in de markt publieke acceptatie moeten verkrijgen. Het is nog onduidelijk hoe het publiek zal reageren op grootschalige inzet van waterstof en wat de (technologie) voorkeuren zullen zijn. Alhoewel de eerste ervaringen o.a. met het CUTE-project in Amsterdam hoopgevend zijn, is dit aspect niet te onderschatten. Demonstratieprojecten zullen aandacht moeten besteden aan de niet-technologische barrières, waarvan publieke acceptatie er één is. De reeds eerder genoemde Initiatiefgroep Waterstof en Onderwijs zal op basis van een gestructureerde kennisdiffusie ook het proces van publieke acceptatie trachten richting te geven.

Beleidsprioriteiten

De werkgroep doet ten aanzien van de genoemde knelpunten een aantal suggesties die zouden moeten worden overwogen in het te vormen beleid. Deze suggesties zijn onderstaande tabel opgenomen.

Knelpunt	Oplossing	Oplosser	Termijn
<i>Economisch: geen stimulans om waterstof te introduceren</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Uitnutten van de niet-economische drivers • Waterstof opnemen in stimulerings-instrumentarium voor duurzame energie Beleid gericht op ontwikkeling van markt voor nul-emissie voertuigen, met name in stedelijke gebieden (bijv. accijnsaanpassingen voor alternatieve brandstoffen, vrijstelling van BPM op waterstofvoertuigen, biobrandstoffen-verplichting verruimen met waterstof, parkeerprivileges, rekeningrijdenbonus)	Gemeentelijke instanties, provincies en Min. EZ, VROM en V&W	2010 tot 2020
<i>Technologisch: brandstofcel- en waterstof-technologie niet commercieel beschikbaar</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Markt en overheid zetten in op doorontwikkeling brandstofceltechnologie; • Demonstratie CO₂-afvang en opslag 	EZ, VROM en V&W en markt	tot 2015
<i>Institutioneel en publieke acceptatie, veiligheid en regelgeving</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ondersteuning van transitie met demonstraties die noodzakelijke praktijkinformatie genereren en input leveren voor praktijkgerichte oplossingen • Onderwijs en opleiding • Creëren van leeromgevingen met flexibele regelgeving, vergunningverlening e.d. 	EZ, VROM, OC&W en V&W en markt, o.a. project-ontwikkelaars	vanaf heden

6. Transitieactiviteiten in ontwikkelgebieden



Praktijkevaluaties van waterstoftechnologieën zijn van vitaal belang voor een succesvolle transitie. Alleen door het demonstreren van nieuwe technologie in een realistische omgeving, zoveel mogelijk lijkend op de praktijksituatie van de toekomst, kan deze verder ontwikkeld worden tot betrouwbare, robuuste technologie die zal voldoen aan de verwachtingen van de gebruikers. Het stelt gebruikersgroepen en publiek in staat kennis te maken met technologieën, en draagt zodoende bij aan de acceptatie ervan.

Voorgesteld wordt om in drie verschillende gebieden de ontwikkeling van waterstoftoepassingen op te starten ter ondersteuning van de voorgestelde transitieroutes. De invulling van de activiteiten binnen deze regio's volgt direct uit deze transitieroutes en beantwoordt aan de beleidsdoelstellingen t.a.v. energievoorzieningszekerheid, verbetering van lokale luchtkwaliteit en verlaging van de CO₂-uitstoot. Men dient de transitieactiviteiten wel te zien in het grotere verband: de activiteiten zullen richtinggevend zijn voor de latere marktintroductie en het overheidsbeleid, zijn bedoeld om de institutionele barrières in kaart te brengen en te overwinnen en om te komen tot optimalisatie op systeemniveau. De activiteiten zullen op zichzelf niet een wezenlijke bijdrage leveren aan de verlaging van CO₂-uitstoot en verhoging van de leveringszekerheid. Lokaal kunnen zij wel direct leiden tot verbetering van de luchtkwaliteit, bijvoorbeeld wanneer een bepaald gebied alleen nog bediend wordt met openbaar vervoer op waterstof.

Ook buiten Nederland worden op Europees en mondiaal vlak activiteiten ontplooid die leiden tot de ontwikkeling van waterstoftoepassingen. De invullingen van de Nederlandse activiteiten sluiten hier op aan, maar buiten nadrukkelijk de specifieke situatie in Nederland uit:

- een wijd verbreid gebruik van aardgas gekoppeld aan de eigen gasreserves
- een dominante rol van de transportsector aan de lokale luchtverontreiniging
- een opkomende Nederlandse maakindustrie op het gebied van waterstoftechnologie
- een op Europese schaal zeer grote waterstofproductiecapaciteit en -infrastructuur geconcentreerd op één locatie

De verschuivingen op institutioneel en infrastructureel vlak zijn bij grootschalige inzet van waterstof zo groot, dat men niet ontkomt aan het zelf opbouwen van praktijkervaringen om deze inzet mogelijk te maken: de werkgroep is van mening dat meekijken met het buitenland volstrekt onvoldoende is.

De transitieactiviteiten die de werkgroep voorstelt zijn gegroepeerd in drie ontwikkelgebieden: het Rijnmondgebied, de regio Arnhem en de regio Petten/Waddengebied.



Aansluiten bij bestaande infrastructuur en productiecapaciteit: Het Rijnmondgebied

Gebied I bestaat uit het Rijnmondgebied, waar voldoende waterstofproductiecapaciteit beschikbaar is, en ook een infrastructuur is aangelegd voor industriële gebruikers. Het gebied wordt gekenmerkt door sterke luchtverontreiniging en intensieve vervoersstromen, zowel op de weg, als op het water en het spoor. Het is bij uitstek geschikt voor het naar het publiek brengen van applicaties die gekenmerkt worden door een zekere rijpheid. Ontwikkelgebied I staat model voor de eerste marktintroductie in publieke toepassingen van op industriële schaal geproduceerd waterstof. Uitbreiding met andere vervoerstoepassingen vanuit deze bestaande infrastructuur ligt voor de hand. Hoewel geografisch niet binnen het Rijnmondgebied, zou kennis kunnen worden benut voortkomend uit het brandstofcelbussen-project (CUTE) in Amsterdam.

Technologie-ontwikkende regio: Arnhem

Gebied II bestaat uit de regio Arnhem. Dit gebied wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van de waterstoftechnologieproducenten, enthousiaste lokale politiek, en grenzend aan NoordRhein-Westfalen dat zeer actief met waterstofdemonstraties is. Het is bij uitstek geschikt voor het in praktijk brengen van eerste prototypen van Nederlandse makelij, zij het dat die demonstraties eerst buiten de regio plaats zullen vinden, namelijk in de regio Rijnmond en Petten/Waddengebied. Het zal gaan om decentraal geproduceerd waterstof uit

aardgas voor kleinere applicaties die gebruikt wordt door bedrijven, "early adapters" die bedrijfseconomisch baat hebben bij stille en schone technologie, als vorkheftrucks, bedrijfsvoertuigen, noodstroomvoorzieningen e.d. Ontwikkelgebied II staat model voor technologie-innovatie en toepassing in de dienstensector.

Systeeminnovaties en diversificatie van bronnen: Petten en Waddengebied

Gebied III bestaat uit twee delen: onderzoekslocatie Petten en het Waddengebied. Er bestaat behoefte aan een locatie waar concepten getest kunnen worden alvorens deze in de praktijk te demonstreren. De nadruk ligt daarbij op systeeminnovaties. Onderzoekslocatie Petten is hiervoor goed geschikt. Daarnaast wordt als doorkijk naar een praktijksituatie het Waddengebied aanbevolen. Dit gebied staat model voor de dunbevolkte gebieden, en mikt op verduurzaming van hun energiehuishouding. Het is de locatie om de systeeminnovaties te ontwikkelen. Aan de aanbodzijde wordt waterstof geproduceerd uit een mix van primaire bronnen: aardgas met CO₂ afvang, windenergie, zonne-energie en biomassa. Aan de gebruikszijde wordt de voeding van waterstof aan mobiele en stationaire applicaties gekoppeld, zodat infrastructuur en opslagcapaciteit optimaal benut kunnen worden. Ontwikkelgebied III staat model voor Security of Supply en het streven naar minimalisatie van de CO₂-uitstoot door de samenleving.

Ontwikkelgebied	I	II	III
<i>Locatie</i>	Regio Rijnmond	Regio Arnhem	Regio Petten en Wadden
<i>Waterstofproductie</i>	Industrieel, bestaand	Decentraal	Decentraal
<i>Bronnen</i>	Aardgas	Aardgas	Aardgas; Wind; Zon; Biomassa
<i>Sector</i>	Openbaar vervoer Warmte/Kracht Flats Boten	Kleinschalig vervoer en stationair in dienstensector	Kleinschalig vervoer en stationair en Warmte/Kracht; Toeristisch vervoer: taxi's; fietsen; boten; Warmte/Kracht toeristische attracties
<i>Aansluiting bij transitie-schema</i>	Lokale luchtkwaliteit Publieksacceptatie Infrastructuur	Applicatie- en technologie-innovatie Acceptatie dienstensector	Voorzieningszekerheid Minimalisatie CO ₂ uitstoot Systeeminnovatie Publieksacceptatie

6.1 Aansluiten bij bestaande infrastructuur en productiecapaciteit: Rijnmond

1. Beschrijving ontwikkelgebied

1.1. Doelstelling m.b.t. energietransitie

Als eerste ontwikkelgebied is gezocht naar een regio waar snel op basis van bestaande voorzieningen concrete waterstofprojecten van de grond kunnen komen. Bestaande optimale omstandigheden moeten het mogelijk maken om:

- tegen minimale investeringen grootschalige en diverse H₂-projecten te realiseren waarmee Nederland een voortrekkersrol in de wereld zou kunnen spelen.
- projecten te realiseren die een positieve kasstroom genereren en daarmee blijvend kunnen worden.
- op relatief korte termijn (2007 – 2010) grootschalige projecten te realiseren.

Uitgangspunt moet zijn dat, door de gunstige kostenpositie op het gebied van waterstof, van de regio een demonstratiezone bij uitstek gemaakt moet worden die qua kostenniveau zeer gunstig zal afsteken t.o.v. regio's als Californië en het westen van Duitsland. De keuze is gevallen op de regio Rijnmond, omdat daar goedkope waterstof, kennis, markt en noodzaak tot verandering in sterke mate gebundeld zijn. Dat Nederland door veel internationale bedrijven als een ideale economie voor het testen en demonstreren van nieuwe producten en concepten wordt gezien, kan hier alleen maar aan bijdragen. De uitstralingseffecten naar de Nederlandse economie kunnen in zo'n situatie aanzienlijk zijn.

1.2. Karakteristieken

De Rijnmond regio (Rotterdam en omstreken) kenmerkt zich door het volgende:

- Ernstige luchtkwaliteitsproblematiek
- Bestuurlijke wil en ambitie om deze problematiek te verhelpen
- Bestuurlijke wil en ambitie om het gebied een spilfunctie te geven op het gebied van energieopwekking, - distributie en -opslag
- Aanwezigheid van grootschalige en efficiënte productie van waterstof. Er wordt in de regio meer dan 1,000 ton waterstofgas per dag geproduceerd, welke gedeeltelijk direct voor de transitie ingezet kan worden. Duizend ton per dag is het equivalent van de dagelijkse energiebehoefte van 1.000.000 huishoudens of 2.000.000 auto's.
- Eén van de slechts drie fabrieken voor vloeibare H₂ in Europa staat in de Rijnmond met een productiecapaciteit van zo'n 5 ton per dag. Tevens beschikt het over een vulstation en een aanzienlijke bestaande vloot van tankwagens voor vloeibare H₂. Daarnaast bevindt zich in Rijnmond ook een grootschalig vulstation voor tubetrailers voor het transport van gasvormige waterstof op hoge druk (200 bar), ook hier weer gepaard gaand met een grote bestaande vloot van tubetrailers.
- Er is een bestaande, 50 km lange, waterstof-pijpleiding van Europoort naar Zwijndrecht. Deze leiding ligt midden in een grote markt (meer dan 2 miljoen mensen wonen en verplaatsen zich binnen een straal van 30 km rond deze infrastructuur). Er bevinden zich meer dan

10 benzinestations binnen 500 meter van deze leiding. Vele woonwijken en flatgebouwen bevinden zich ook in de nabijheid van deze leiding, waarmee aansluitkosten laag kunnen blijven. Het feit dat deze leiding hier al jaren probleemloos ligt kan sterk bijdragen aan de publieke acceptatie.

- Aanwezigheid van een aantal belangrijke spelers, een aantal met ruime internationale ervaring, op het gebied van de ontwikkeling en toepassing van duurzame toepassingen van waterstof zoals daar zijn: Air Products, Akzo Nobel, AVR, BP, ENECO, HoekLoos (Linde) en Shell.

1.3. Gewenste organisatorische, en beleidsmatige middelen

Ondanks het grote aantal gunstige omgevingsfactoren zoals hierboven beschreven, zou de oprichting van één overkoepelend onafhankelijk orgaan voor de coördinatie van de waterstoftransitie met zware vertegenwoordigers van de lokale en provinciale bestuurders van Rotterdam en omgeving (Drechtsteden, Spijkenisse, Brielle, ...) nodig zijn. Doel van dit orgaan moet zijn (niet uitputtend):

- "Single point of contact" voor iedere partij die initiatieven in de Rijnmond wil ontplooiën of informatie daaromtrent zoekt
- Zorgdragen voor internationale promotie van de Rijnmond als optimale regio voor H₂-ontwikkelingsprojecten (en alles wat daarmee samenhangt), ook in samenhang met de promotie van Rotterdam als energiehaven
- Voorbereiden van regelgeving omtrent H₂-projecten, waarmee zaken als ontwerprichtlijnen en vergunningverlening sterk kunnen worden vereenvoudigd
- Promotie bij lokale overheden en bevolking van de H₂-transitie
- Hulp bij de subsidieverlening van H₂-transitieprojecten.
- Financieren van publieke infrastructuur, zoals verdere uitbreiding en vertakking van het bestaande H₂-leidingnetwerk
- Financiering van voertuigen op waterstof die door gebruikers geleased kunnen worden tegen voorwaarden die niet slechter of beter zijn dan voor conventionele voertuigen (in eerste instantie alleen lokale vloten)

6.2 Technologie-ontwikkende regio: Arnhem

1. Beschrijving ontwikkelgebied

1.1 Doelstelling m.b.t. energietransitie

De doelstelling voor dit ontwikkelgebied is te opereren als regio die technologie en diensten ontwikkelt en deze toelevert door het ontwikkelen van de industrie, die de apparaten en systemen levert voor de energietransitie. Voor dit ontwikkelgebied is de keuze gevallen op Arnhem, omdat de activiteiten in ontwikkelgebied Arnhem rechtstreeks inspelen op de transitiedoelstelling om tegelijk met de opbouw van een duurzame energiehuishouding industriële bedrijvigheid te creëren. Ook wordt hiermee de beschikbaarheid van apparatuur én de kennis van het toepassen vergroot en makkelijker bereikbaar voor Nederlandse transitieprojecten.

In en rond Arnhem wordt een sterke industriekern gevestigd, een technologisch topcentrum voor de innovatie, productie en marketing van waterstofapparaten en hun toepassing. Startend met de bestaande producenten van waterstofapparaten wordt het

lokaal bestaande industriepotentieel betrokken bij de waterstoftechnologie als toeleverancier of apparatenbouwer.

In ontwikkelgebied Arnhem gaat het om de innovatie van produceerbare producten en bijbehorende productielijnen. Startpunt zijn de d.m.v. onderzoek en ontwikkeling geleverde prototypes (Proof of Concepts), onder andere vanuit ontwikkelgebied Petten/Waddengebied. Deze worden in een ontwikkelafabriek via re-engineering gemaakt tot betrouwbare, goedkope en recyclebare producten. Proof of Producebility wordt verkregen door een testserie van enkele stuks in marktomstandigheden te beproeven. Bij gebleken Producebility wordt in een grootschalige demonstratie (ontwikkelgebied Rijnmond en Waddengebied) de betrouwbaarheid en de levensduur onderzocht, alsmede een goed bij de marktomstandigheden aansluitende uitvoering. Zowel de testseriebeproeving als de demonstratie betekenen voor de betreffende regio een stap voorwaarts in haar transitie.

Transitie van kennis naar markt Leidend tot commerciële producten

Fase	Stand van zaken	Ontwikkelgebied
Kennis opbouw	Veel kennis aanwezig	Petten Wadden
Ontwikkeling van apparatuur	Sterke troeven	Arnhem
Ontwikkeling van systemen	In opkomst	Arnhem
Gebruik door intermediaire groepen	Hebben belangstelling	Rijnmond
Gebruik door klanten	Kunnen nog weinig kopen	Rijnmond

Bij de Arnhemse transitiedoelstelling om een sterk Industrieel Cluster op het gebied van de Waterstof- en Brandstofcel apparatenindustrie te realiseren hoort een krachtig onderwijs initiatief.

Bij de Hogeschool Arnhem Nijmegen lopen projecten om dit te realiseren. Voor een deel zijn deze geïntegreerd in de projecten van de industrie. Daarnaast zijn er projecten voor opbouw van kennis en curricula, inclusief de daarbij behorende infrastructuur.

1.2 Karakteristieken

Arnhem ligt centraal in de streek van de Nederlandse maakindustrie van Eindhoven via Noord-Limburg, Midden-Gelderland en Overijssel tot Enschede.

Arnhemse industriële activiteit heeft zich onder andere geconcentreerd rond energie. Arnhem heeft bovendien nu binnen haar grenzen diverse productiebedrijven die actief zijn op het gebied van brandstofcellen en waterstoftechnologie.

Provinciale en gemeentelijke overheden voeren een actief luchtkwaliteitsbeleid en stimuleren de toepassing van innovatieve energie- en milieutechnologie. De gemeente Arnhem heeft in aanvulling daarop de stimulering van projecten en bedrijvigheid rond waterstof en brandstofceltoepassingen expliciet als speerpunt van haar beleid benoemd en daarvoor menskracht en middelen vrijgemaakt. Ook het eigen stedelijk milieu heeft hoge

gemeentelijke prioriteit, reden om onder andere te kiezen voor handhaving van een trolleybussysteem.

In het verlengde daarvan zetten Arnhemse onderwijsinstellingen sterk in op waterstof- en brandstoftechnologie. Het Centrum voor Mobiliteitstechnologie van de Hogeschool Arnhem Nijmegen neemt met twee lectoraten, docenten en studenten deel aan industriële projecten en voert eigen onderzoeksprojecten uit. Dit geeft een impuls aan het onderwijs op HBO- en VMBO-niveau om de waterstoftechnologie en de elektrochemie onderdeel van het normale curriculum te maken.

Sinds twee jaar wordt in Arnhem een ontwikkelingsprogramma uitgevoerd onder de vlag van "Het Arnhemse Waterstof Netwerk". Deelnemers aan dit netwerk zijn de in en rond Arnhem gevestigde en werkende bedrijven en instanties op het gebied van de waterstofeconomie:

- De in Arnhem gevestigde wereldwijd leverende industrie voor waterstofapparaten en brandstofcellen (Nedstack, HyGear).
- Engineering- en consultancybedrijven op het gebied van waterstof, milieu, regelgeving en industriële organisatie (Syncera, STC, Adjuvant).
- Kennis- en Opleidingsinstituten. (Hogeschool Arnhem Nijmegen HAN, KEMA).
- Launching Customers (bewonersorganisaties, woningbouwverenigingen, pompstationhouders).
- De Gemeente Arnhem (stimulerend, faciliterend, ondersteuningsbudget van € 450.000 voor drie jaar).
- Vertegenwoordigers nutsvoorzieningen (NUON, Brandweer).

Binnen dit netwerk is met Europese subsidie een vooronderzoek gedaan naar mogelijkheden om de waterstofapparatenindustrie systematisch en gecoördineerd uit te bouwen zodat;

- Innovatieve industriële bedrijvigheid gecreëerd wordt.
- Alle voor de energietransitie benodigde apparatuur ontwikkeld en geleverd kan worden.
- Een Technologisch Topcentrum ontstaat voor de productontwikkeling, productietechnologie en marketing van waterstofapparaten en hun toepassing.

1.3 Knelpunten en mogelijkheden

Om Arnhem in te richten als technologie-ontwikkende regio is het vormen van een doelgericht netwerk van toeleveranciers, producenten en eindafnemers van belang. Alle activiteiten voor dit netwerk moeten nu uitgevoerd worden door het innoverende bedrijf. Het organiseren van deze industrietekens geschiedt nu ad hoc door één der bedrijven, maar alléén wanneer dit urgentie heeft vanuit de eigen core business. Gezien de snelle ontwikkelingen in de markt en de kans tot versnelde opbouw van deze maakindustrie en werkgelegenheid is er duidelijk een plaats voor een coördinerende en regisserende partij.

Recente projecten wijzen uit dat het vinden van contrafinanciering zeer vertragend werkt en in een aantal gevallen het project voortijdig doet beëindigen. Ontwikkelingen zijn vaak nog niet ver genoeg om

interessant te zijn voor venture capital en er zijn maar weinig bedrijven die zich de launching costs kunnen veroorloven. Financieel en technisch gezien hebben de technologieën de ontwikkelfase nog niet verlaten, terwijl de huidige methoden van subsidiëring het in hun definitie al in de competitieve fase plaatsen. Om deze twee knelpunten op te lossen is er plaats voor een onafhankelijk fonds, dat deze financiering voor zijn rekening kan nemen.

1.4 Gewenste organisatorische en beleidsmatige middelen

Transitie in het ontwikkelgebied Arnhem gaat dus over de opbouw van de apparatenindustrie en de bijbehorende kennisinfrastructuur. Beide gaan hand in hand in technische ontwikkel- en testprojecten, waarbij ontwikkelde apparaten en systemen voor het eerst toegepast worden door geselecteerde eindgebruikers in situaties die de alledaagse praktijk zoveel mogelijk benaderen. Gezien het ontwikkelkarakter dienen deze projecten in de nabijheid van de ontwikkelende industrie uitgevoerd te worden. De positieve houding van politiek en bestuur in Arnhem geeft hiervoor ruime mogelijkheden. Ontwikkelde apparaten en systemen kunnen worden gedemonstreerd in de voor Nederland (en internationaal gezien) belangrijke regio Rijnmond en daarnaast in de regio Petten/Waddengebied waarin systeeminnovaties kunnen worden gedemonstreerd.

Om het projectenprogramma snel en in lijn met de marktmogelijkheden uit te kunnen voeren is er behoefte aan een projectbureau met een ketenarchitect om pro-actief niches op te sporen, partijen daarop bijeen te brengen en projecten zo vorm te geven dat optimaal wordt gewerkt aan toename van kennis en bedrijvigheid. Financiering moet gevonden kunnen worden op een termijn die aansluiting bij kansen in de markt mogelijk maakt. Dit geldt in alle fasen: vooronderzoek, ontwikkeling, testen in kleine serie inclusief verdere ontwikkeling, implementatie en invoering van verbeteringen. Fonds en bureau zouden een plaats kunnen krijgen in een stichting, gericht op deze industrieontwikkeling en transitie. Een bestuur van nader te bepalen leden met vertegenwoordiging van hoog bestuurlijk niveau in de streek zal de kwaliteit en de beleidsmatige voortgang rond de projecten verzekeren. Zij stuurt een uitvoerende directie aan, die het programma management en het opzetten van keteninnovatie tot haar taak heeft.

Het programma volgt de mogelijkheden in de markt, die ontstaan door ontwikkeldoorbraken en kostprijzdalingen. Het projectbureau heeft de taak deze niches op te sporen en een adequate leveringsketen op zo kort mogelijke termijn te realiseren door een nieuw transitieproject op te zetten. Dit start met een vooronderzoek om het project vorm te geven, te bemannen en goed te positioneren temidden van andere transitie-initiatieven. Naast de gebruikelijke projectkenmerken dienen dus ook de transitieleerdoelen (milieubijdragen, technologisch, economisch, sociaal en juridisch) en de aansluiting bij Europese en Internationale alternatieven gedefinieerd te worden.

6.3 *Systeeminnovaties en diversificatie bronnen: Petten en Waddengebied*

1. Beschrijving ontwikkelgebied

1.1 Doelstelling m.b.t. energietransitie

Naast de activiteiten zoals beschreven in de twee voorgaande ontwikkelgebieden bestaat er behoefte aan een locatie waar concepten getest kunnen worden alvorens deze in de praktijk te demonstreren. Dit vermindert het risico dat het publiek hinder ondervindt van technische onvolkomenheden van onrijpe systeemconcepten, hetgeen zou kunnen leiden tot vermindering van publieke acceptatie. Het gaat voornamelijk om systeeminnovaties die bestaan uit koppeling van transportapplicaties aan stationaire applicaties, en om de koppeling van diverse waterstofproductietechnologieën aan een gemeenschappelijke waterstofinfrastructuur. De infrastructuur moet zo zijn ingericht dat de gehele keten productie-opslag-distributie-eindgebruik getest en gemonitord kan worden op energiegebruik, dynamiek en beschikbaarheid. Daarnaast moet de infrastructuur zo zijn ingericht dat apparaten van externe partijen aangesloten kunnen worden als onderdeel van zo'n keten. Op die wijze wordt het voor marktpartijen mogelijk hun product te testen onder realistische condities als onderdeel van de gehele keten. De onderzoekslocatie te Petten is hiervoor goed geschikt.

Echter, als doorkijk naar een praktijksituatie wordt aanbevolen op termijn ook een gebied in te richten waar de nadruk komt te liggen op systeemontwikkelingen en transitieprocessen. De Waddeneilanden worden hierbij gezien als ideale locatie om deze optie in de praktijk te brengen vanwege de karakteristieken van het gebied en de ambities die er leven ten aanzien van een transitie naar duurzaamheid en duurzame energie. Doelstelling voor het ontwikkelgebied is om de regionale of lokale energievoorziening te realiseren die is gebaseerd op de inzet van regionaal of lokaal beschikbare bronnen (inclusief aangeleverd aardgas) en voornamelijk gebruik maakt van de energiedragers elektriciteit en waterstof om de energie uit de primaire bronnen naar de eindgebruiker te transporteren en distribueren. Deze gefaseerde aanpak voorkomt vroegtijdig falen als gevolg van op voorhand te hoog gestelde doelen.

Daarnaast is hernieuwbaar waterstof is nu nog te duur. Enerzijds komt dit doordat conventionele energiedragers nu relatief goedkoop zijn. Anderzijds is hernieuwbaar waterstof nog duur omdat het geen uitontwikkelde optie is. Het zal duur blijven zolang er niet in wordt geïnvesteerd en niet kan profiteren van de noodzakelijke economy of scale. Door combinatie van fossiel waterstof uit aardgas en hernieuwbaar waterstof in het ontwikkelgebied Petten/Waddengebied wordt beoogd hier verandering in te brengen. Centraal hierbij staat systeemintegratie. Alle losse onderdelen voor het systeem zijn wel beschikbaar: decentrale aardgasreformers, windmolens, vergisters, electrolyzers, compressors, opslagtanks etc. De onderdelen moeten alleen door slimme systeemintegratie effectief op elkaar worden afgestemd qua capaciteit, dynamiek en aansluitingen. Conversies moeten zoveel mogelijk worden vermeden.

1.2 Karakteristieken

Dit gebied bestaat uit twee delen: onderzoekslocatie Petten en het Waddengebied. Petten is een onderzoekslocatie waar veel technologische expertise beschikbaar is op het gebied van waterstofproductie, brandstofcellen, systemen en opslag. Het gebied beschikt al over een grote testcapaciteit op deze gebieden, die door gerichte uitbreiding ingezet kan worden voor ondersteuning van de waterstoftransitie. Het gebied is een onderzoekslocatie, waar ca. 2000 personen werken, die open staan voor nieuwe technologie. Daarnaast trekt de locatie zeer veel bezoekers uit binnen- en buitenland, vanuit de industrie, politiek en onderzoekswereld. Het gebied beschikt over een vergunning op hoofdlijnen, die het mogelijk maakt snel activiteiten op te starten. Er zijn bestaande afspraken met de gemeente over de wijze waarop nieuwe activiteiten opgestart kunnen worden en de documentatie die daarvoor benodigd is. De locatie is gevestigd te Petten, waar zowel ECN als JRC-IE gevestigd zijn, die beiden met ca. 80 personen aan waterstof werken.

Het Waddengebied vormt een natuurgebied van internationale allure. Het is een dunbevolkt gebied met in totaal ongeveer 24.000 inwoners waarvan meer dan 13.000 op Texel. Het kleinste eiland is Schiermonnikoog met ongeveer 1000 inwoners. Het gebied heeft een 'groen' imago. Er is weinig industrie. De landbouw en het toerisme zijn de voornaamste economische activiteiten. In de regio wordt relatief veel belang gehecht aan verduurzaming. Duurzame energie (duurzaam in de zin van schoon) speelt daar een belangrijke rol in. Enerzijds wordt dit ingegeven door het verder willen cultiveren en vermarkten van het "groene" imago. Anderzijds sluit het aan bij de kleinschaligheid van de regio waar de eigen gemeenschap veel centraler staat dan in de stedelijke gebieden en men door zoveel mogelijk gebruik te maken van de eigen middelen een gevoel van onafhankelijkheid in stand wil houden.

Door het karakter van de eilanden, een besloten en overzichtelijke structuur met elementen van zelfvoorziening, leent dit gebied zich bij uitstek als proefgebied. Kleinschalige projecten krijgen daardoor in dit gebied de gewenste grootschalige impact. Daarbij is de exposure van de activiteiten in het kader van publieksvoorlichting en maatschappelijke acceptatie door de grote toeristenstroom een belangrijk gegeven.

De beperkte omvang van de eilanden biedt ook extra mogelijkheden vanuit transitieperspectief:

- De mogelijkheid een overgang naar een schone energiehuishouding volledig vorm te geven.
- Er is eerder sprake van "excess" energie dat gebufferd moet worden, waarbij meerdere concepten kunnen worden getest, zoals
 - o conversie naar waterstof, opslag en benutting in een brandstofcelcentrale
 - o conversie naar waterstof en bijmengen in het gasnet
 - o opslag van elektriciteit in een redox-flow batterij
- De mogelijkheid de transitie naar een duurzame energiehuishouding in een samenleving volledig te monitoren. In grote stedelijke gebieden is dit veel lastiger omdat daar de impact veel kleiner is.

1.3 Knelpunten en mogelijkheden

De mogelijkheden die onderzoekslocatie Petten biedt bestaan uit het snel kunnen inrichten en beproeven van experimentele systemen die in een volgende fase geïmplementeerd kunnen worden in de praktijk. Het voornaamste knelpunt bestaat uit financiële middelen om deze experimentele faciliteiten en de exploitatie ervan te bekostigen. Conform de visie van de werkgroep zal het accent primair liggen op toepassing van waterstof in transport, maar van daaruit moet wel direct de systeemsynergie naar stationaire toepassingen worden meegenomen.

Wat betreft de doorkijk naar het Waddengebied wordt in de eerste fase de implementatie van waterstof in het openbaar vervoer op één van de eilanden gerealiseerd in combinatie met een aansprekende (mini)- warmte-kracht toepassing (voorstel Ecomare). Tevens zal een klein aantal waterstofvoertuigen voor verhuur aan toeristen zoals elektrische fietsen en scooters op waterstof, en eventueel zelfs karts ingezet worden. De waterstof wordt hierbij centraal geproduceerd uit aardgas. In de tweede fase wordt de koppeling gemaakt met waterstofproductie uit hernieuwbare bronnen. Dit is in het zogenaamde Wextex project verder uitgewerkt en vergt een investering van 5 mln euro voor de eerste twee fasen

Concrete leerdoelen voor het ontwikkelgebied zijn:

1. Inzicht krijgen in systeemaspecten van productie van waterstof uit diverse bronnen en gebruik in diverse sectoren en de optimalisatie mogelijkheden daarvan.
2. Inzicht krijgen in de mate van match of mismatch in vraag en aanbod en de benodigde buffering, dan wel de toepassing van "vraaggestuurde productie".
3. Inzicht krijgen in de ketenefficiency, de kosten in de praktijk en de ruimte voor ontwikkeling die in beide aspecten zit.
4. Ervaring opdoen en laten opdoen met waterstof in de vergunningverlening (welke vergunningen, welke veiligheidseisen) en zaken als verzekering (welke risico's worden gehanteerd).
5. Ontwikkelen van business modellen voor waterstof, met oog voor de mogelijkheden die waterstof biedt voor systeemintegratie en -innovatie, d.w.z. voor de mogelijkheid om te dienen als opslagmedium voor hernieuwbare energie uit met name discontinue bronnen en als energiedrager voor zowel mobiele als stationaire toepassingen.

Last but not least is een expliciet doel van het ontwikkelingsgebied om het "groene" karakter van waterstof te illustreren. Ook al wordt waterstof voorlopig grootschalig vooral uit fossiel geproduceerd, kan de optie waterstof met duurzaam (in de betekenis van schoon en toekomstgericht) worden geassocieerd en daarmee publiek draagvlak winnen. Dit ontwikkelgebied moet het perspectief bieden waarom en hoe we aan een transitie naar waterstof werken.

1.4 Gewenste organisatorische en beleidsmatige middelen

Voor onderzoekslocatie Petten zijn weinig organisatorische en beleidsmatige middelen nodig: deze zijn reeds aanwezig vanwege de aard van de locatie.

Voor het Waddengebied worden door de gedeputeerden van Noord-Holland en Friesland overleg voorbereid met de eilandenraad om tot een gemeenschappelijk plan van aanpak voor het Waddengebied te komen. Voorgesteld wordt om in het kader van Energy Valley tot concrete projectvoorstellen en een projectorganisatie te komen. Bestaande initiatieven zoals het Wextex-project voor Texel, het Altran-project voor Vlieland en het Gasunie-initiatief voor Ameland zullen in deze aanpak een plaats vinden. Onderdeel van dit traject zal de vaststelling van de financieringsbehoefte zijn. Daarbij zal enerzijds een adequate projectorganisatie moeten worden gerealiseerd en anderzijds het niet-economische deel van de projecten worden gesubsidieerd. Gezien het langetermijnkarakter, het publieke belang van systeeminnovaties en de ervaringen uit het verleden zal voorlopig moeten worden gerekend op 100% financiering door de overheid.

7. Budget en organisatie

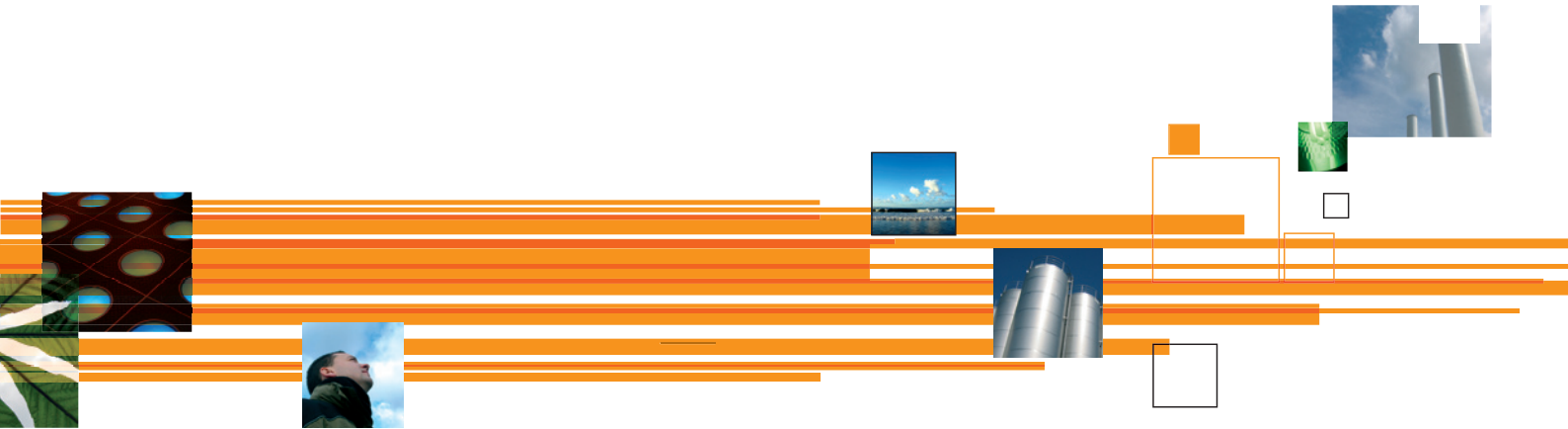
De financiële omvang van de voorgestelde activiteiten in de drie ontwikkelgebieden zal in de orde van 40 mln euro bedragen. Deze financiering kan voor een groot deel via de bestaande instrumenten aan de relevante projecten, c.q. programma's of projectclusters worden toegewezen, maar is voor de drie ontwikkelgebieden essentieel verschillend van karakter:

- voor Rijnmond is als aanvulling op de beschikbare private financiering publieke financiering noodzakelijk voor het afdekken van risico's en voor de financiering van het onrendabele deel bij markt introductie.
- In Arnhem moeten industriële ontwikkelingen op de zogenaamde "S-curve" vanuit de laboratoriumfase naar pilotproductie worden gebracht. Daartoe is financiering voor product- en productieontwikkeling nodig in combinatie met de financiering van onrendabele veldtesten. Gezien het karakter van het betrokken bedrijfsleven is de mogelijkheid van private financiering maar beperkt beschikbaar, zodat aanvullende subsidies voor deze activiteiten noodzakelijk zijn.
- Voor de activiteiten in Petten en Waddengebied zal weinig private financiering beschikbaar zijn en is de behoefte aan publieke financiering het grootst.

De financiering kan op basis van het bestaande instrumentarium op de behoefte en het karakter van de specifieke projecten worden toegesneden, maar om het Nederlandse waterstofprogramma structuur te geven is daarbij inhoudelijke samenhang en afstemming noodzakelijk. Daartoe wordt voorgesteld om per ontwikkelgebied een projectorganisatie als onafhankelijk orgaan in te stellen voor de organisatie, structurering en de realisatie van de voorgestelde activiteiten. Gezien het essentieel verschillende karakter van de drie ontwikkelgebieden zullen dat op de specifieke behoefte van de gebieden toegesneden organisaties moeten zijn.

- In Rijnmond ligt het accent op de realisatie van economisch interessante, korte termijn gerichte activiteiten, waarbij met name bestuurlijke en organisatorische problemen moeten worden opgelost.
- In Arnhem ligt het accent op het ontwikkelen en ondersteunen van de industriële ontwikkelingen en het organiseren van aansluiting bij initiatieven elders.
- Voor het Waddengebied is een programma-organisatie noodzakelijk die de gewenste systeemontwikkeling met de deelnemers kan organiseren.

Voor het werk van de drie projectorganisaties is een financiering van 5-6 mln in de aanloopfase noodzakelijk om de gewenste structurering van de activiteiten van de grond te krijgen.



Keuzes, structuur en coördinatie noodzakelijk

Geconstateerd wordt dat in Nederland veel losstaande initiatieven worden ontplooid (zie bijlage 3), die elkaar deels overlappen en deels niet passen in de boven uitgewerkte transitiefilosofie. Daarnaast constateert de werkgroep dat per initiatief de middelen dikwijls onvoldoende zijn om de ambities te realiseren. Voorgesteld wordt om initiatieven te bundelen in de drie voorgestelde ontwikkelgebieden om daarmee slaagkans, onderlinge synergie en financiële armslag te vergroten. De effectiviteit van de ingezette overheidsmiddelen en de follow-up van de activiteiten kan sterk worden verbeterd. Participatie van betrokkenen bij de invulling en uitwerking van de transitieroutes met een actieve operationele en financiële betrokkenheid van de overheid is de belangrijkste aanbeveling van de werkgroep. Alleen op die manier kan Nederland in de Europese programma's een volwaardige rol spelen.

Uitwerking transitieroutes en analyse van institutionele aspecten

Wergroepen van betrokken stakeholders dienen met ondersteuning van de overheid de voorgestelde transitieroutes uit te werken in concrete activiteiten. Daarbij is het van belang dat betrokkenen oog hebben voor de meerwaarde van een gezamenlijke aanpak boven sub- optimalisatie van eigen initiatieven. Gezamenlijke activiteiten in de Europese regio die Nederland is kunnen als eenheid in het Europese programma worden ingesluit. Lokale overheden kunnen een belangrijke rol vervullen bij het samenvoegen van lokale activiteiten tot een nationale aanpak en in de begeleiding daarvan. Onderdeel

van deze nationale programmering is de analyse van institutionele aspecten die de succesvolle uitwerking van de transitieroutes bepalen.

Industriële betrokkenheid en financiële ondersteuning

De transitieroute waterstof is een activiteit met een lange adem. Publiek-private financiering met een grote publieke rol in de eerste fase en een toenemende rol van private partijen daarna is essentieel. Met name de financiering van demonstratieprojecten die nog geen economisch rendabel perspectief hebben, maar wel onmisbaar zijn in het doorlopen van de leercurve, vergt de aandacht van de overheid. Natuurlijk zijn nichetoeepassingen het introductiekanaal voor waterstof en brandstofcellen bij uitstek, maar ook het ontwikkelen van die "early markets" vergt overheidsbetrokkenheid in de aanloopfase.

Overheid als afnemer

Een zogenaamde buyers pool vanuit de overheid zou voor het bedrijfsleven een interessante manier zijn om nichemarkten tot ontwikkeling te brengen.

Rol en activiteiten werkgroep Waterstof

De werkgroep Waterstof zal invulling even aan de 'regiefunctie' rond de implementatie van de transitieroutes en de financiële en organisatorische invulling van de ontwikkelgebieden.

Bijlage 1 Visies

Visie HyWays en de Nederlandse situatie

Nederlandse "waterstof-stakeholders" hebben binnen het Europese roadmap-project HyWays³ een visie op waterstof geschetst voor de periode 2010-2050. Deze visie houdt rekening met:

- de beschikbaarheid van industrieel waterstof in het Rijnmond gebied
- het uitgebreide aardgasnet in Nederland en het grote aandeel aardgas in de huidige energiemix
- de goede logistieke faciliteiten voor import van grondstoffen als steenkool en biomassa
- de politieke wil om de implementatie van offshore wind te ondersteunen
- de beschikbaarheid van aanzienlijke opslagmogelijkheden voor CO₂
- de grote bevolkingsdichtheid in Nederland

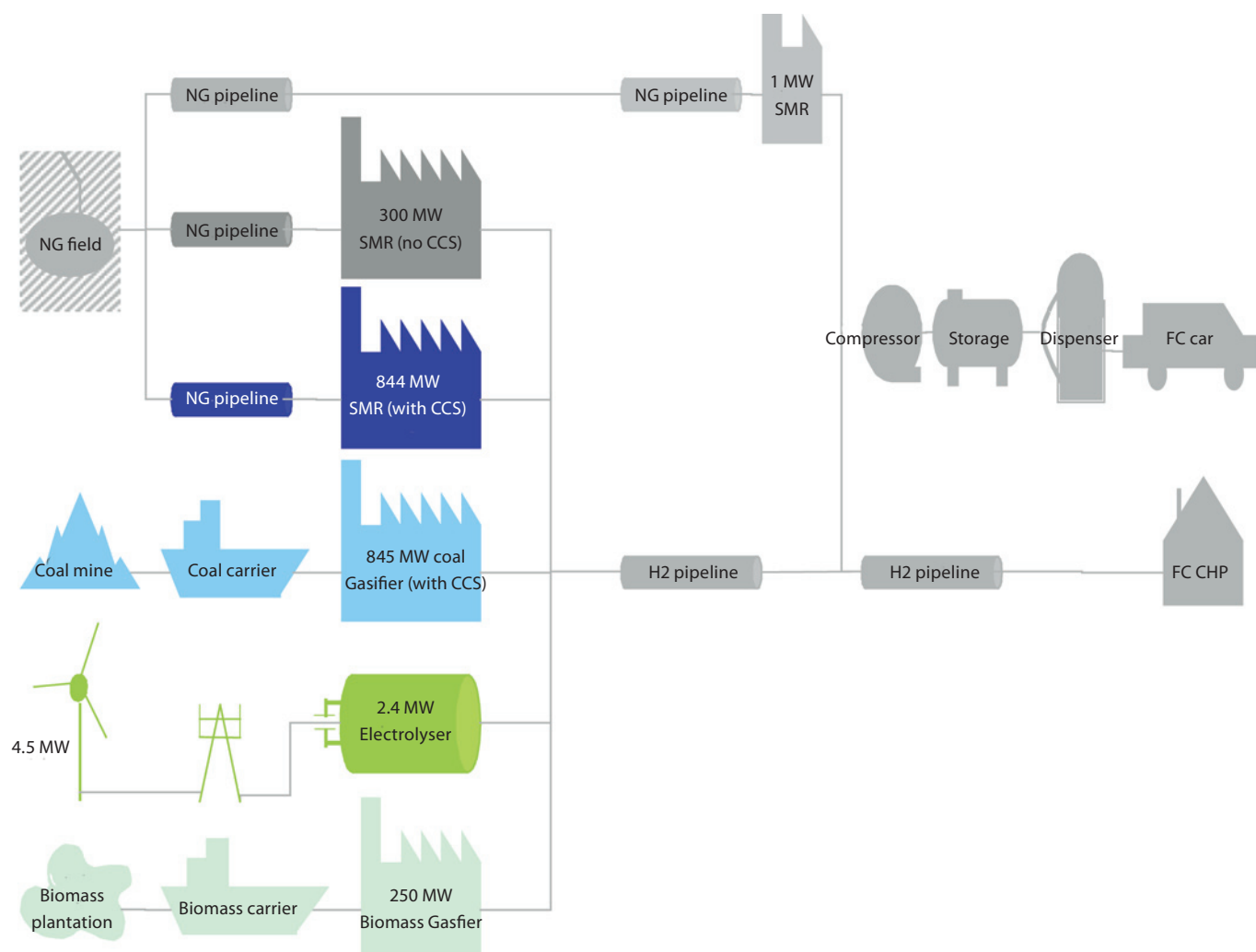
De visie gaat er van uit dat aardgas zeker tot 2030 een dominante rol zal spelen bij de productie van waterstof

³ Project in het EU 6^e Kaderprogramma met deelname van 30 industriële bedrijven, onderzoeksinstellingen en intermediaire organisaties

in Nederland, en naar verwachting ook tot 2050 nog een belangrijke rol zal spelen. De productie van waterstof zal gedurende deze tijd, en zeker in de beginfase, voor een belangrijk deel plaatsvinden via on-site reforming van aardgas. Uitzondering hierop vormt de Rijnmond waar reeds centrale faciliteiten voorhanden zijn. In de loop van de tijd, als de vraag naar waterstof toeneemt, zal een pijpleidinginfrastructuur ontstaan die uitgroeit vanuit de bestaande industriële infrastructuur in de Rijnmond. De pijpleidingen zullen in het begin worden gevoed met waterstof uit extra reformercapaciteit in het Rijnmondgebied. Een pijpleidinginfrastructuur wordt noodzakelijk geacht om door te kunnen groeien naar klimaatneutraal waterstof, dat wil zeggen waterstof uit fossiele bronnen in combinatie met afvangst en opslag van CO₂ en waterstof uit hernieuwbare bronnen.

Na 2030 zal de productie van waterstof uit vergassing van biomassa en steenkool op gang komen in combinatie met afvangst en opslag van CO₂. In de jaren 2030-2050 zal ook de productie van hernieuwbaar waterstof met behulp van de elektriciteit van offshore windparken een belangrijke bijdrage gaan leveren.

De vraag naar waterstof zal eerst op gang komen in



Figuur 1 Waterstofketens voor Nederland zoals ontwikkeld voor Nederland binnen HyWays

de meest dichtbevolkte gebieden en vooral worden gegeneerd door mobiele toepassingen. Naar verwachting zal er voor wat betreft de infrastructuur een verdeling ontstaan tussen de Randstad met de daaraan grenzende stedelijke gebieden, en de minder dichtbevolkte gebieden in het noorden en oosten van Nederland. De pijpleidinginfrastructuur zal zich vooral in de Randstad ontwikkelen terwijl lokale productie het beeld zal domineren in de andere regio's⁴. Waterstoftankstations zullen komen te liggen nabij stedelijke centra, langs de hoofdwegen, en op bedrijventerreinen.

De waterstof zal in eerste instantie op lokatie worden geproduceerd uit aardgas, of als vloeibaar waterstof worden aangevoerd per vrachtauto.

Binnen HyWays zijn voor diverse toepassingen introductiescenario's voor waterstof ontwikkeld. Voor elke toepassing is een scenario met een lage en een hoge penetratiegraad ontwikkeld⁵. Daar waar het hierboven geschetste beeld specifiek is voor Nederland zijn deze scenario's EU-generiek (overal dezelfde penetratiecijfers).

Tabel 1: Waterstofketens voor Nederland zoals ontwikkeld voor Nederland binnen HyWays

	2010	2020	2030	2040	2050
Low penetration	-%	0,7%	7,6%	22,6%	40,0%
High penetration	-%	3,3%	23,7%	54,4%	74,5%

* Alleen demonstratie voertuigen

Tabel 2 Mogelijke ontwikkeling van stationaire waterstoftoepassingen in de sector huishoudens als aandeel van het totaal aantal huishoudens

	2010	2020	2030	2040	2050
Low penetration	-%	0,1%	0,5%	2%	5%
High penetration	-%	1%	4%	8%	10%

Tabel 3 Mogelijke ontwikkeling van stationaire waterstoftoepassingen in de sector Handel, Diensten en Overheid als aandeel van de totale vraag in de sector

	2010	2020	2030	2040	2050
Low penetration	-%	>0%	0,2%	0,7%	1,7%
High penetration	-%	0,3%	0,1%	2,7%	3,3%

Visie Vergroening gas (VG2) en Naturalhy

Binnen het EET-project VG2 van de TU Delft en Gasunie Engineering&Technology (GET), en het EU-project Naturalhy dat wordt gecoördineerd door Gasunie Engineering&Technology, is er (nog) geen visie op eindbeelden voor waterstof en de wegen daar naartoe. Wel is er een visie hoe te beginnen met het ontwikkelen van de optie waterstof. Het idee is om waterstof bij te mengen in het bestaande aardgasnet en zodoende dit net te gebruiken als transport- en distributie-infrastructuur voor waterstof. Dit zou een doorbraak kunnen forceren voor oplossen van het 'kip-ei' probleem dat speelt rond waterstof. Als consumenten niet eenvoudig toegang hebben tot waterstof zal het publiek waterstof niet accepteren en zal de ontwikkeling van eindtoepassingen niet op gang komen, terwijl omgekeerd leveranciers van energie niet zullen investeren in infrastructuur om waterstof beschikbaar te maken zolang er onvoldoende uitzicht is op

een zich ontwikkelende waterstofmarkt.

Voor de bijmengoptie is er nog geen uitgekristalliseerd beeld van hoe die er in de praktijk uitziet. Welke percentages waterstof in de verschillende type netten kunnen worden bijgemengd (hoge en midden druk transportnetten en midden en lage druk distributienetten), waar het waterstof wordt bijgemengd, en of in de eindtoepassingen alleen gebruik gemaakt wordt van het mengsel of dat het mogelijk is om efficiënt waterstof uit het mengsel te scheiden voor toepassingen op pure waterstof, zijn vragen die worden geadresseerd. Resultaten van onderzoek wijzen er wel op dat technisch gezien waterstof tot aanzienlijke percentages kan worden bijgemengd en dat ook veel van de thans commercieel verkrijgbare apparatuur voor eindgebruik een aanzienlijk percentage waterstof aankan.

⁴ Of en wanneer (bij welke vraag naar waterstof) pijpleidingen ook in de rest van het land rendabel zullen zijn moet nog nader worden onderzocht. Het aanleggen van een landelijk net kan ook een nationale ambitie zijn. In feite is ook nog niet duidelijk of en wanneer on-site productie rendabel is.

⁵ http://www.hyways.de/docs/Brochures_and_Flyers/HyWays_External_Document_26JAN2006.pdf

Visie Hydrogen and Fuel Cell Platform (HFP) en de EU
Het lange termijn uitzicht van waterstof en brandstofcellen (voorzieningszekerheid, efficiënte en schone conversie, klimaatneutraal en inzet hernieuwbare bronnen) is de voornaamste motivatie voor de R&D inzet van de EU.

Voor de middenlange en lange termijn (2030-2050) wordt verwacht dat:

- Waterstof één van de drie energievectors zal zijn, naast elektriciteit en vloeibare biobrandstoffen.
- Brandstofcellen voor zowel transport, stationaire en draagbare toepassingen een volwassen technologie zullen zijn die tegen concurrerende kosten kunnen worden geproduceerd, zoniet in 2030 dan toch zeker in 2050. Waterstofturbines en verbrandingsmotoren zullen ook zijn geoptimaliseerd en bepaalde markten bedienen.
- Een waterstofpijpleidinginfrastructuur zal tegen die tijd zijn opgezet. Deze infrastructuur wordt als voorwaarde gezien voor ontwikkeling van de "mass-market" toepassingen.

Voor de kortere termijn (2020) wordt voorzien dat penetratie zal plaatsvinden via "early and niche markets". Een overzicht van de doelstellingen voor ingroei van waterstof en brandstofceltoepassingen in 2020 is gegeven in onderstaande tabel. De vraag is hoe de doelen in de onderstaande tabel te bereiken.

Tabel 4 Voornaamste aannamen voor waterstof en brandstofceltoepassingen voor 2020

	Portable fuel cells for handheld electronic devices	Portable generators & early markets	Stationary fuel cells (CHP)	Road transportation
EU H ₂ /FC units sold per year in 2020	~ 250 million	~ 100 000 (~ 1 GW)	100 000 - 200 000 (2 - 4 GW)	0.4 - 1.8 million
EU cumulative sales projections until 2020	N/A	~ 600 000 (~ 6 GW)	400 000 - 800 000 (8 - 16 GW)	N/A
EU expected 2020 market status	Established	Established	Growth	Mass market roll-out
Average power of fuel cell system	15/kW _e	10/kW _e	3 kWe (micro CHP) 350 kWe (ind. CHP)	
Fuel cell system cost	€1-2/kW _e	€500/kW _e	2000/kWe (micro) €1000-1500/ kWe (industrial CHP)	< €100/ kWe (for 150 000 units per year)

Rekening houdend met doorlooptijden van onderzoek naar "mass-market roll out" zijn er voor 2015 strategische onderzoeksdoelen geformuleerd, waardoor een ruimte overblijft van 5 jaar voor opschaling van productie (serieproductie) en commercialisatie activiteiten. De strategische onderzoeksdoelen hebben betrekking op een zestal kerngebieden voor onderzoek ⁶:

- Waterstofproductie
- Waterstofopslag en -distributie
- Stationaire toepassingen
- Transporttoepassingen
- Toepassingen in elektronische apparaten
- Socio-economisch onderzoek

⁶ Voor een meer gedetailleerde beschrijving van doelen wordt verwezen naar de *European Hydrogen & Fuel Cell Platform Strategic Research Agenda* (zie onder "key documents" op www.hfpeurope.org)

Naast een onderzoeksstrategie is een introductie- en implementatiestrategie ontwikkeld, de zogenoemde Deployment Strategy (DS)⁷. De DS stelt dat nauwe publiek-private samenwerking noodzakelijk is om het gat te dichten tussen de huidige fase van onderzoek en demonstratie van prototypes en de grootschalige commerciële introductie van waterstof en brandstofcellen.

In de DS worden de volgende fases in de ontwikkeling van de verschillende markten voor waterstof- en brandstofcellen onderscheiden:

- Prototype ontwikkeling: Deze eerste fase heeft betrekking op het leveren van een "proof-of-concept" en vereist slechts een beperkt aantal eenheden/voertuigen.

⁷ Het volledige document *European Hydrogen & Fuel Cell Platform Deployment Strategy* is beschikbaar onder "key documents" op www.hfpeurope.org

(zoals het CUTE-project)

- Demonstratieprojecten: Deze fase vereist enige honderden eenheden/voertuigen. Het doel van deze en voorgaande fase is het opdoen van eerste ervaringen om allerlei richtlijnen te kunnen ontwikkelen, opties voor verbetering te kunnen identificeren en ontwikkeling te stimuleren.
- Pre-commerciële fase: Het aantal eenheden/voertuigen wordt uitgebreid naar enige duizenden. De invloed van ervaringen uit demonstraties begint af te nemen en maakt langzaam maar zeker plaats voor gevalideerde industriële standaarden.
- Productiefase: Producten zijn gereed voor marktintroductie en worden geproduceerd en geleverd in grote aantallen. In deze fase zal ondersteuning bij marktintroductie in de beginjaren echter nog wel nodig zijn.

In de DS worden aanbevelingen gedaan voor een aantal stappen die nu tegelijkertijd zouden moeten worden gezet om een kader te creëren waarbinnen deze fases op termijn kunnen worden doorlopen. Deze stappen zijn:

- Het bevorderen van veelomvattende grootschalige demonstratieprojecten zoals voorgesteld onder het "European Initiative for Growth" (HYCOM and HYPOGEN). Dit omvat de zogenoemde "Lighthouse projects" die zijn bedoeld om de productie op kleine schaal op gang te brengen. Vanwege de geïntegreerde aard van deze projecten kunnen sommige elementen in deze projecten nog in de R&D fase zitten, terwijl andere elementen reeds commercieel verkrijgbaar zijn. Overheden en industrie zouden hierbij gezamenlijk moeten optrekken om een duidelijk signaal af te geven aan de samenleving dat de ontwikkelingen op het gebied van waterstof en brandstofcellen zowel serieus als realistisch zijn.
- Het ontwikkelen van een programma voor marktintroductie en kostenreductie in nauwe samenwerking met de "Initiative Group on Financing & Business Development" van de HFP.
- Het ontwikkelen en vastleggen van regelgeving en "codes and standards" in nauwe samenwerking met de "Initiative Group on Regulations, Codes & Standards" van de HFP, om duidelijkheid te verschaffen over de eisen aan inzet van componenten en systemen in veldtesten en "early markets".
- Het ontwikkelen van een beleidskader dat (1) de introductie en implementatie van waterstof en brandstofceltechnologie aanmoedigt, (2) privaat-publieke investeringen stimuleert en (3) een richting biedt voor verdere ontwikkeling van nationale en regionale agenda's.
- Het ontwikkelen van "early and niche markets" waarmee het gat kan worden overbrugd tussen demonstratie activiteiten en volledige commercialisatie. De ontwikkeling van commerciële producten voor "early premium niche markets" moet helpen om de kosten voor essentiële componenten aanzienlijk omlaag te brengen.

Op het ogenblik gaan er een drietal projecten in het 6e Kaderprogramma van de EU van start die een opmaat vormen voor HYPOGEN en HYCOM-projecten in FP7. Het betreft de projecten DYNAMIS, Roads2HyCom en HyLights. "DYNAMIS is preparing the ground for HYPOGEN", de ontwikkeling van een centrale voor de gecombineerde en flexibele productie van elektriciteit en waterstof, met afvangst van CO₂. "Roads2HyCom and HyLights are preparing the ground for HYCOM's", de ontwikkeling van gebieden voor praktijkonderzoek naar waterstofketens en waterstoftoepassingen. Binnen de projecten worden inventarisaties uitgevoerd naar beschikbare technologie, infrastructuur en bronnen en worden haalbaarheidsverkenningen uitgevoerd. De projecten moeten resulteren in aanbevelingen aan de Commissie en het HFP over te ontwikkelen HYCOM en HYPOGEN activiteiten.

Visie/beleidskader Europese Commissie

Tot slot misschien niet zozeer een visie als wel een stukje beleidskader dat in dit overzicht niet mag ontbreken. Het betreft de communicatie over alternatieve motorbrandstoffen en de transportbiobrandstoffenrichtlijn van de Europese Commissie. Hierin staan een aantal indicatieve doelen genoemd voor waterstof, te weten een marktaandeel van 2% in 2015 en 5% in 2020.

Bijlage 2 Ketenbenadering en prestaties van waterstofketens voor een tweetal toepassingen

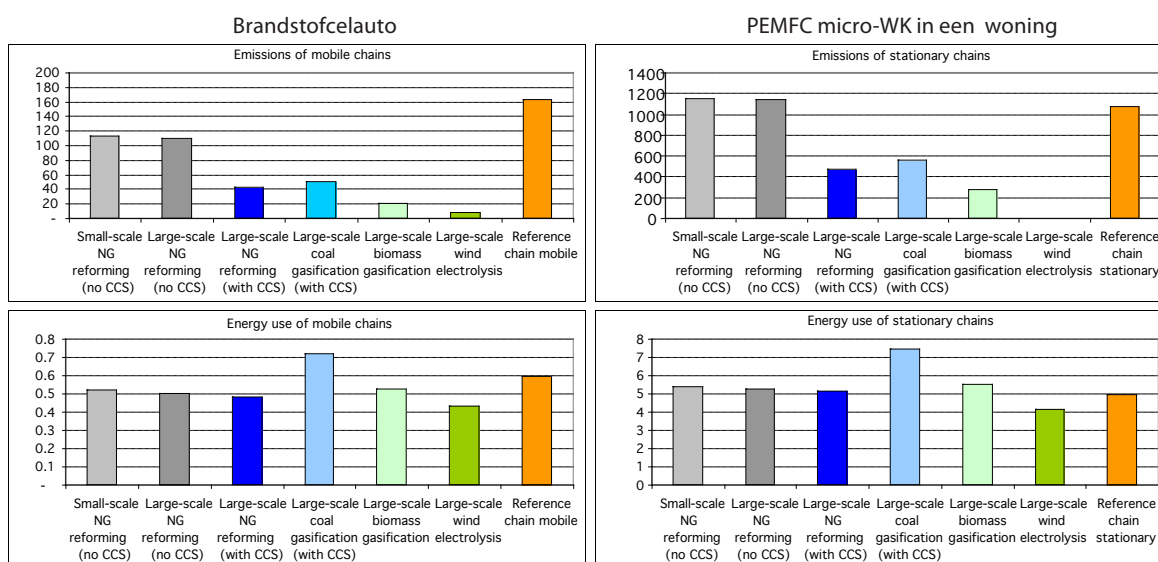
Een overgang naar waterstof als energiedrager vergt veranderingen in de gehele energieketen, van productie tot eindgebruik. Waterstof is schoon en emissieloos in het eindgebruik, maar moet wel worden geproduceerd. Bij productie uit fossiele bronnen vinden de emissies elders in de keten plaats. Voor bepaling van effecten op primair energieverbruik en CO₂-emissie dient daarom de hele keten te worden meegenomen.

Waterstof en brandstofcellen worden meestal in een adem genoemd. Brandstofcellen worden gezien als de ideale conversietechnologie voor waterstof. Wanneer de koppeling tussen waterstof en brandstofcellen wordt gemaakt wordt in het algemeen impliciet de Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC) bedoeld, een type dat werkt bij lage temperatuur (thans 70-80 °C met ontwikkelingen naar > 100 °C). Bij gebruik van puur waterstof hebben deze brandstofcellen een hoog elektrisch rendement, in de orde van 50 - 60%. Belangrijk verschil met andere technologieën die elektriciteit met een dergelijk rendement kunnen genereren is dat dit met de brandstofcel al op kleine schaal kan daar waar dit bijvoorbeeld in een gecombineerde gasturbine-stoomturbine cyclus met generator pas op heel grote schaal kan (> 100 MW). Van groot belang is daarbij het feit dat het hoge rendement ook in deellast wordt gerealiseerd, hetgeen met name de toepassing in de mobiele sector interessant maakt.

Een hoog elektrisch rendement op kleine schaal is vooral van belang voor kleinschalige toepassingen waar geen behoefte is aan warmte, zoals een elektrische auto.

Ook kan worden gedacht aan warmtekracht-(wkk)-toepassing in de nieuwbouw waar de vraag naar warmte relatief laag is terwijl de elektriciteitsvraag in huishoudens stijgt. De overall wkk-verhouding in de vraag is daar over het jaar genomen redelijk in overeenstemming met de wkk-verhouding van de aanbodtechnologie. Echter door de continu variërende wkk-verhouding in de vraag door het jaar heen (dag/nacht, zomer/winter), en de continue mismatch tussen vraag en aanbod die daarvan het gevolg is zal het voor deze optie veel lastiger zijn om meerwaarde te genereren ten opzichte van mogelijke referentiesituaties.

In onderstaande figuur zijn resultaten weergegeven met betrekking tot primair energieverbruik en CO₂-emissie voor verschillende Nederlandse waterstofketens voor de hierboven geschetste toepassingen. De ketens worden vergeleken met de referentiesituatie (rechts). Wat van belang is in de figuren is de trend die zichtbaar is. Toepassing van waterstof in een brandstofcelauto levert in de meeste gevallen voordeel voor primair energieverbruik en CO₂-emissie. Dit is niet het geval bij een kleinschalig brandstofcel-warmtekrachtsysteem in een woning.



Bijlage 3 Waterstofinitiatieven in Nederland

Tabel 5 Initiatieven in Nederland voor mobiele waterstoftoepassingen

Initiatief	Partijen	Korte omschrijving
CUTE-Amsterdam	GVB, Dienst Milieu en Bouwtoezicht, Shell, Nuon, Hoek Loos (Linde Gas), EvoBus (Daimler Chrysler), Novem SSZ-programma	Testen van 3 brandstofcellussen in de dagelijkse praktijk.
Waterstofkart	Formula Zero, ECN, Springtime, TNO Automotive	Haalbaarheidsstudie naar de mogelijkheid en praktijkrealisatie van een door waterstof aangedreven racekart (met brandstofcellen) om een wereldrecord acceleratie te vestigen.
De Waterstof Shuttle	ECN, Spijkstaal, TU Delft IO	Het vervangen van batterijpakketten in elektrische shuttles voor personenvervoer door PEM brandstofcellen op waterstof.
HyCycle	Van Hoeven Consult, Sparta, HyGear, Hoek Loos (Linde Gas), ID Bike, VHC, ECN	Ontwikkeling van een fiets met elektromotor die wordt gevoed door PEM brandstofcellen op waterstof.
Rondvaartboot op waterstof	ECN, Rondvaart Delft	Ontwikkeling van een PEM brandstofcel-systeem voor een elektrische rondvaartboot.
Veerpont op waterstof	TNO, Imtech Marine Offshore, Nedstack, TU Delft	Ontwikkeling van een elektrische veerpont voor het GVB met een brandstofcelsysteem op waterstof.
Waterstofbussen in Rijnmond	Shell Hydrogen, Connexion, MAN Truck & Bus	Opdoen van ervaring met het rijden op waterstof in Rijnmond door de inzet van ca. 25 waterstofbussen (met verbrandingsmotor) en de realisatie van een vulstation.
Naturalhy Den Haag	Gemeente Den Haag, Altran, zero-e	Onderzoek naar bijmenging van duurzaam waterstof in aardgas op het vulstation voor gebruik in aardgasvoertuigen in Den Haag.

Tabel 6 Initiatieven in Nederland voor mobiele waterstoftoepassingen

Initiatief	Partijen	Korte omschrijving
Wabest	CEA, GasTec, KCM, Almere en Utrecht, leveranciers van waterstof, mengtoestellen en leidingen en enkele kennis-instellingen	'Waterstof benutting in Steden' is een initiatief gericht op realisatie van substantiële proef-projecten met stationaire waterstoftoepassing in de stedelijke omgeving. Voor de korte termijn wordt gedacht aan bijmengen van waterstof in het bestaande aardgasnet. Voor de lange termijn (10-20 jaar) wordt gedacht aan realisatie van een nieuwe woonwijk met infrastructuur die geschikt is voor zowel aardgas als waterstof.
Bijmengen van waterstof in aardgasnet	Almere, Milieufederatie Flevoland, Continuon	Onderzoek naar de productie en inzetmogelijkheden van waterstof binnen de gemeente Almere, met aandacht voor aanleg en onderhoud van de benodigde infrastructuur, mogelijke partijen en proefprojecten.
Gas- en waterstofinjectie	Gasunie, Energy Valley, ECN, Air Products, HyGear, Hoek Loos, TNO Industrie, TU Delft	Onderzoek naar mogelijkheden voor een proefproject met het injecteren van duurzaam geproduceerde waterstof in het aardgasnet.
Waterstof transport en gebruik	Apeldoorn, Continuon	Ontwikkeling van een systeem dat in bestaande wijken de warmtevoorziening op basis van (klimaatneutraal geproduceerd) waterstof kan laten plaatsvinden. Het project voorziet in eerste instantie de vervanging van aardgas door waterstof. Op termijn zal de waterstof ook klimaatneutraal zijn.
Duurzame optimale energie-toepassing & energiegebruik in Arnhems Presikhaaf	De Straat Milieu-adviseurs BV, Susebeek Technical Consultants, Europe's Energy Point, Hoek Loos (Linde Gas)	Uitwerking en toetsing van verschillende oplossingsrichtingen voor een innovatieve energievoorziening voor de wijk Presikhaaf op basis van duurzame energiebronnen en waterstof als energiedrager.
Onbalans door Duurzame Energie op Neeltje Jans	Prov. Zeeland Directie RMW	Onderzoek naar mogelijkheden voor reductie van door grote windmolens veroorzaakte onbalans in het elektriciteitsnet door middel van duurzame opslag en gebruik hiervan voor de productie van elektriciteit ten behoeve van het vergroten van de leveringszekerheid.
Waterstof voor Limburg	Provincie Limburg, Nuon Power Buggenum	Inventarisatie door de Provincie van waterstof-projecten in de provincie, die eventueel in aanmerking komen voor uitvoering. Het beste project of de beste projecten zullen voor realisatie in aanmerking komen.
WexTex	ECN, Air Products, Tebodin, gemeente Texel	Verkenning van de mogelijkheden voor een waterstoftransitiekern op weg naar een energievoorziening voor Texel die zelfvoorzienend en duurzaam is en waarin waterstof de voornaamste energiedrager is naast elektriciteit
Schoon gas in de wijk	Air Products, Tebodin, ECN Air Products, Tebodin, ECN	Verkenning en techno-economische uitwerking van mogelijkheden voor realisatie van een warmtekrachtsysteem op waterstof in een woonwijk, met waterstof uit de bestaande waterstofinfrastructuur in de Rijnmond.
Lokaal waterstof	HyGear, ECN, Hoek Loos, NUON	Marktverkenning naar mogelijkheden om, ter vervanging van per vrachtauto aangeleverd waterstof, kleinschalige waterstofproductie-eenheden op basis van aardgasreforming te plaatsen bij industriële kleinverbruikers, voor levering van industrieel waterstof in combinatie met een energetische toepassing van waterstof.

Waterstof transitie-site	ECN, JRC / Institute for Energy	Ontwikkelen van een infrastructuur voor het testen en demonstrenen van (delen van) waterstofketens vanaf productie tot en met eindgebruik.
McDonald's autonoom duurzaam restaurant	McDonalds Nederland BV Altran Technologies BV	Uitwerking van een drietal concepten voor een duurzame energievoorziening voor een bepaald type McDonald's restaurant op basis van windenergie in combinatie met opslag van waterstof en brandstofcelconversie.
Duurzaam Vlieland	Lokale overheid, Electricité de France, NUON	Ideeën voor een geheel duurzame energie-infrastructuur voor stationaire en tractie toepassingen op basis van 4 duurzame bronnen en waterstof als energiedrager voor buffering.
Vergroening gas, VG2	TU Delft, RUG, TU/e, Gasunie Engineering&Technology, Hoek Loos, Gem. Havenbedrijf Rotterdam, Ecoceramics, Electrabel Nederland, Schouten Research, Energy+i.d.	In dit EET-project worden de mogelijkheden onderzocht van het bijmengen van waterstof en/of biogas in het bestaande aardgasnet. Het project is verdeeld in twee hoofdlijnen: <ol style="list-style-type: none"> 1. Ontwerp van transitietrajecten naar een waterstofeconomie: het systeemontwerp van een nationale waterstofinfrastructuur en de geleidelijke ontwikkeling daarvan, uitgaande van de bestaande aardgasinfrastructuur. 2. Onderzoek van de veiligheid, betrouwbaarheid en doelmatigheid van de aardgas/waterstofvoorziening en aangesloten gasapparatuur, tijdens dit transitietraject van aardgas naar waterstof. Hierbij worden fundamentele verbrandingseigenschappen en materiaaleigenschappen onderzocht (zoals verbrossing van gasleidingen door inwerking van waterstof). <p>De onderzoeksresultaten worden toegepast in een specifiek infrastructuurontwerp voor het Rotterdamse haven- en industriegebied. Het project leidt tot het ontwerp van infrastructuren - inclusief de bijbehorende transitietrajecten - voor de levering van schone en duurzame energiedragers en grondstoffen.</p>
Brandstofcelcentrale	Nedstack, AKZO Nobel	Ontwerp, ontwikkeling en realisatie van een 5 MW PEM brandstofcelcentrale bij de chloorfabriek van AKZO in de Botlek. De centrale wordt gevoed met waterstof dat als bijproduct vrijkomt bij de productie van chloor. NB. Op dit moment worden pilot proeven voortgezet in Delfzijl.
Organische CO ₂ voor Assimilatie van Planten (OCAP)	OCAP CO ₂ vof, Koninklijke VolkerWessels, Hoekloos, Gemeente Westland	Vrijkomende CO ₂ bij de productie van waterstof van Shell wordt ingezet in kassen van tuinders. Besparing aan aardgas voor tuinders bedraagt ca. 95 miljoen m ³ per jaar. De CO ₂ -emissiereductie bedraagt ca. 170.000 ton per jaar.
Micro warmtekrachtkoppeling (geen waterstofproject, maar wel relevant als stap naar micro-wwk met brandstofcellen)	Nederlandse Gasunie, Cogas Facilitair, Essent Retail Services, Gasbedrijf Noord-Oost Friesland, Nuon Energy Trade & Wholesale, Nutsbedrijf Regio Eindhoven, Nutsbedrijven Maastricht, Obragas, RENDO Energieservice, Stichting Energy Valley, Westland Energie Services	Het project voorziet in de plaatsing van 50 micro-wwk systemen op basis van de Whispergen Stirling motoren bij huishoudens verspreid over Nederland. De opstellingen zullen gedurende 2 jaar gemonitord worden. Achtergrond is de facilitering van de overgang van stand alone (centrale) energieopwekking naar (actieve) decentrale gecombineerde opwekking. Daarbinnen is dit de eerste stap in de startfase: het installeren van (stand alone) micro-wwk eenheden voor decentrale productie van warmte en kracht. Een volgende stap betreft het integreren van een aantal decentrale eenheden in een netwerk.

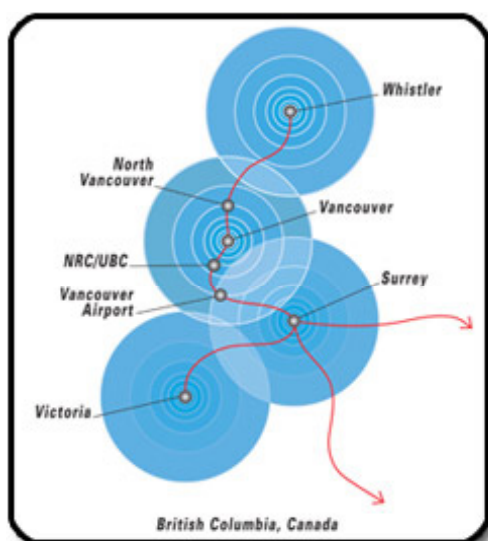
Bijlage 4 Enkele demonstraties en ontwikkelingen in het buitenland

Van demonstratieprojecten naar introductie van een vloot brandstofcelbussen

In de afgelopen 20 jaar zijn in diverse projecten veldtesten uitgevoerd met door brandstofcellen gevoede elektrische aandrijfsystemen in stadsbussen. Tot nu toe zijn er wereldwijd ongeveer 100 brandstofcelbussen geproduceerd. De brandstofcelsystemen van ongeveer 60 van deze bussen zijn van Canadese afkomst, de meeste van Ballard, en een aantal van Hydrogenics. Deze bussen zijn of worden steeds gedurende een beperkte tijd in projecten van 1 tot 3 bussen per locatie, waarbij het aantonen van de technische haalbaarheid centraal staat. De meeste testen zijn zeer succesvol geweest in de zin dat er veel is geleerd. De tijd wordt nu rijp geacht voor een volgende stap waarbij hybridisering en opschaling centraal staan. Systeembouwers als Hydrogenics, UTC, ISE en Toyota bieden reeds brandstofcel hybride systemen voor bussen, terwijl ook DaimlerChrysler, Ballard en NUCellSys hebben aangegeven dat hun activiteiten vanaf nu gericht zijn op hybride systemen.

Eind 2005 heeft British Columbia Transit, een busmaatschappij uit Vancouver, een plan gepresenteerd⁸ voor de aankoop van 20 brandstofcel hybride bussen die een gewone levenscyclus in de dienstregeling zouden moeten gaan meedraaien. De bussen zouden in 2010 operationeel moeten zijn. De motivatie voor tijdstip en omvang van het project is drieledig:

- Leveren van een bijdrage aan de Kyoto-afspraken voor CO₂-emissiereductie
- Versnellen van commercialisering van brandstofcellen en brandstofcelbussen op een zodanige manier dat de leidende positie van de eigen brandstofcelindustrie in de wereld kan worden behouden en verder kan worden uitgebreid.
- Genereren van exposure op de Olympische en Paralympische Winterspelen van 2010 in Vancouver



Figuur 1 Hydrogen Highway™ British Columbia, Canada

De investeringskosten en operationele kosten voor de vloot worden geschat op ruim 62 miljoen euro. Dit is het drie maal zoveel als voor een vloot van 20 bussen uitgerust met de huidige technologie. BC Transit heeft zich gecommitteerd aan een investering van M€ 22, het equivalent van de kosten voor aankoop en bedrijfsvoering van 20 elektrische diesel hybride bussen. Het verschil van ruim M€ 40 zou moeten worden bijgepast vanuit de overheid. Om uitzicht te hebben op tijdige productie, aflevering en ingebruikname zou de financiering in maart 2006 rond moeten zijn en de aankooporder in juni 2006 moeten worden geplaatst.

⁸ BC Transit, Path to purchase: Moving to Fuel Cell Bus Fleets, 2005 (www.bctransit.com/corporate/resources/pdf/res-fleet-46.pdf)

Ontwikkelingen op het gebied van waterstofauto's



Vrijwel alle automobiel­fabrikanten werken op het ogenblik aan prototypes op waterstof. Dit betreft zowel personen­auto's als bussen. De gebruikte technologie verschilt echter van geval tot geval. In de bijgaande foto's worden een drietal voorbeelden gegeven. Een overzicht van allerhande prototypen tot nu toe is te vinden op de website van Fuel Cell Today en HyWeb (www.h2cars.de)

De bovenste foto betreft een BMW met verbrandingsmotor die zowel op benzine als op waterstof kan lopen. Waterstof wordt aan boord meegenomen als vloeibaar waterstof. De visie van BMW is dat zowel de verbrandingsmotor als de vloeibare brandstof nauw aansluiten bij de huidige belevingswereld van de consument en daardoor relatief eenvoudig zullen worden geaccepteerd. De bi-fuel optie maakt dat reeds met de introductie kan worden begonnen zonder dat waterstof overal beschikbaar is.

De middelste foto toont een Ford Focus C-Max met een interne verbrandingsmotor die alleen op waterstof loopt. Waterstof wordt meegenomen als gasvormig waterstof onder druk. Ford werkt overigens ook aan brandstofcellen.

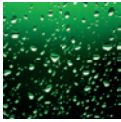
De onderste foto toont een Mercedes B-Klasse (Daimler Chrysler) met brandstofcellen. De versie is uitgerust met een 100 kW systeem en heeft een actieradius van 400 km. Ook hier wordt waterstof aan boord opgeslagen in gecomprimeerde vorm.

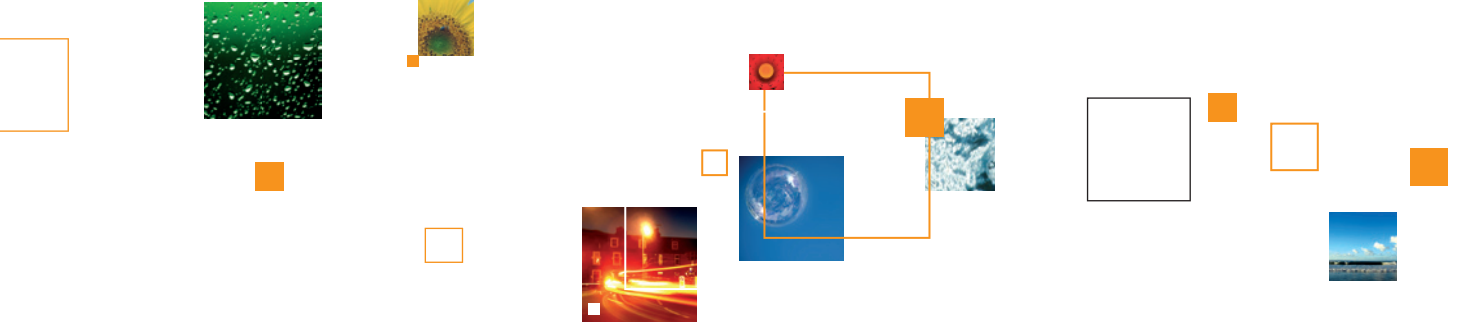
Bijlage 5 Overzicht van waterstoftechnologieën

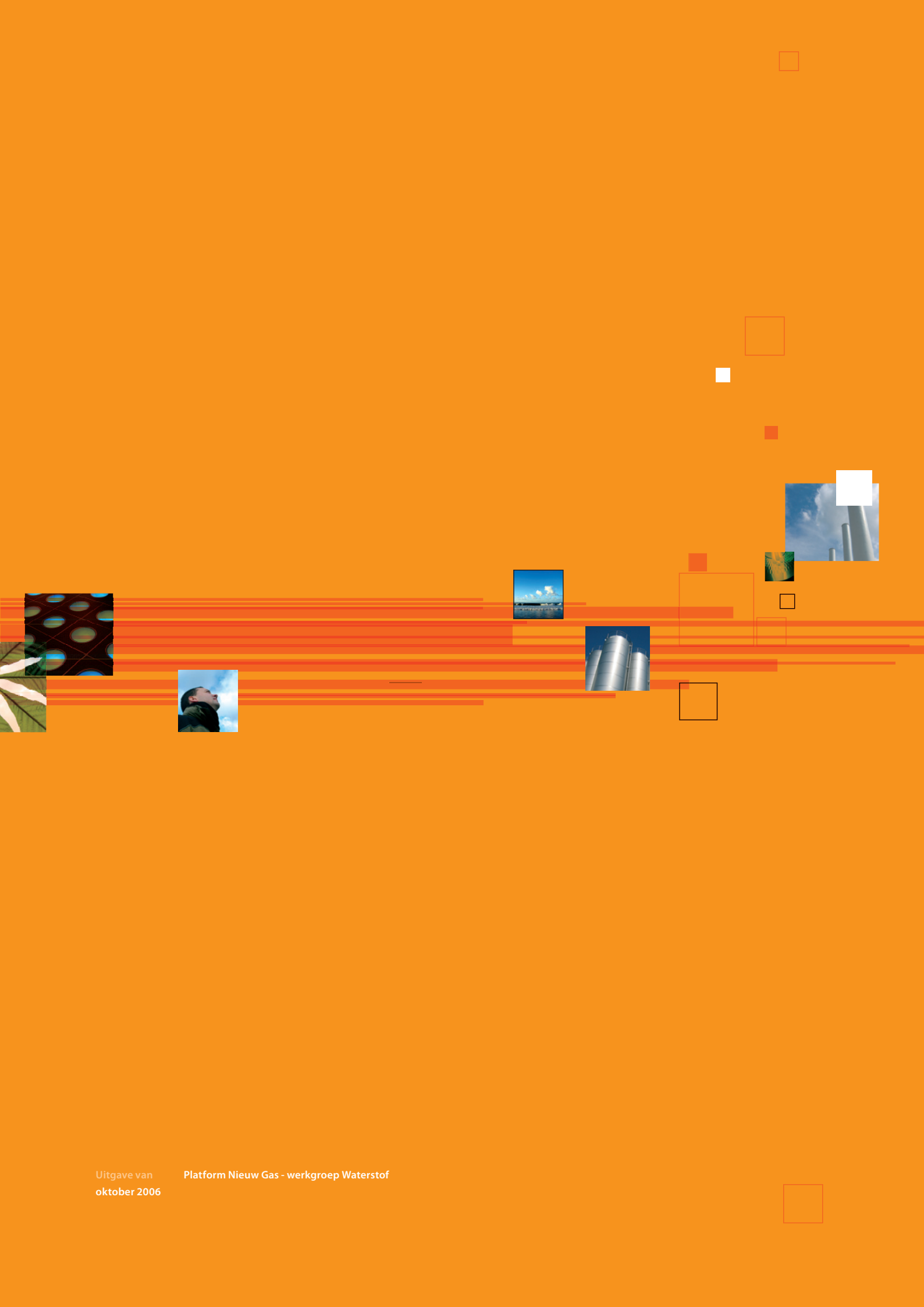
Een overgang naar waterstof als energiedrager vergt veranderingen in de gehele energieketen, van productie tot eindgebruik. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de technologieën en eindtoepassingen die een rol kunnen spelen in een ontwikkeld waterstofsysteem en de transitie daar naartoe. Vrijwel alle elementen zijn nieuw en zullen dus de strijd aan moeten gaan met bestaande technologieën die thans op tal van manieren verankerd zitten aan bestaande economische, sociaal-culturele en institutionele kaders.

Tabel 7 Overzicht van waterstoftechnologieën

Productie	Levering	Opslag	Omzetting	Toepassing
<ul style="list-style-type: none"> • Reforming <ul style="list-style-type: none"> – Centraal – Decentraal – Met of zonder afvangst en opslag van CO₂ • Vergassing <ul style="list-style-type: none"> – Met of zonder afvangst en opslag van CO₂ • Electrolyse • Photo-electrochemisch • Thermische splitsing water • Biochemisch 	<ul style="list-style-type: none"> • Gasvormig via: <ul style="list-style-type: none"> – Truck – Trein – Boot – Pijpleiding • Vloeibaar via: <ul style="list-style-type: none"> – Truck – Trein – Boot • In tanks (accu) met vaste stof waar waterstof aan gebonden zit. • Als chemische hydride (vloeistof, of gas) via: <ul style="list-style-type: none"> – Truck – Trein – Boot – Pijpleiding 	<ul style="list-style-type: none"> • Als gas in een hoge druk tank • Als vloeistof in een cryogene tank • In een tank met vaste stof waar H₂ chemisch aan bindt: <ul style="list-style-type: none"> – Metaalhydrides – Alanaten – C-nano tubes – gashydraten 	<ul style="list-style-type: none"> • Gasturbine • Verbrandingsmotor • Brandstofcel: <ul style="list-style-type: none"> – PEMFC – AFC – PAFC – MCFC – SOFC 	<ul style="list-style-type: none"> • Elektr. centrale <ul style="list-style-type: none"> – Centraal – Decentraal • Warmtekracht: <ul style="list-style-type: none"> – Grootschalig – Kleinschalig • Generator <ul style="list-style-type: none"> – Noodstroom – Hulpvermogen – Batterij-functie consumenten-elektronica • Voertuigen: <ul style="list-style-type: none"> – Auto's – Bestelbusjes – Bussen – Tweewielers – Etc. • Gasketels, fornuizen e.d <ul style="list-style-type: none"> – waterstof bijgemengd bij aardgas in lage doses







Gebouwde omgeving



Nieuw gas

Duurzame Mobiliteit



In de Task Force Energietransitie werken overheid, bedrijfsleven, wetenschap en maatschappelijke organisaties samen. De betrokken ministeries zijn de ministeries van Economische Zaken, Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Financiën, Buitenlandse Zaken en Verkeer en Waterstaat.