

The background of the entire page is a blue-toned image of water molecules, showing spheres representing oxygen and hydrogen atoms connected by lines, with some molecules in sharp focus and others blurred in the background.

Naar een groene waterstofeconomie in Zuid-Holland

Een visie voor 2030

Advies aan en in opdracht van
de Provincie Zuid-Holland

Februari 2019

Ad van Wijk (TU Delft),
Gigi van Rhee (Stratelligence),
Jaco Reijerkerk (Ekinetix),
Chris Hellinga (TU Delft),
Hanna Lucas (Innovation Quarter)

SAMENVATTING

Zuid-Holland kent een dubbele urgentie voor de ontwikkeling van een groene waterstofeconomie: een nieuwe economie en verduurzaming. Op dit moment is de economie van Zuid-Holland, met het Haven Industrieel Complex (HIC), het sterke (petro)chemische cluster, de unieke logistieke hub, en ook de glastuinbouw vooral gebouwd op fossiele energie. De haven van Rotterdam vervult hiervoor een cruciale rol in de import, bewerking en export van olie, gas en kolen. Alleen met een duurzaam energiesysteem kunnen de Rotterdamse haven, de energie-intensieve sectoren en de glastuinbouw in Zuid-Holland in de toekomst hun economische positie en rol behouden. Tegelijkertijd ondersteunt een duurzaam energiesysteem realisatie van de Zuid-Hollandse doelen op het terrein van luchtkwaliteit en leefbaarheid, en de afspraken uit het Klimaatakkoord.

Sleutelrol waterstof

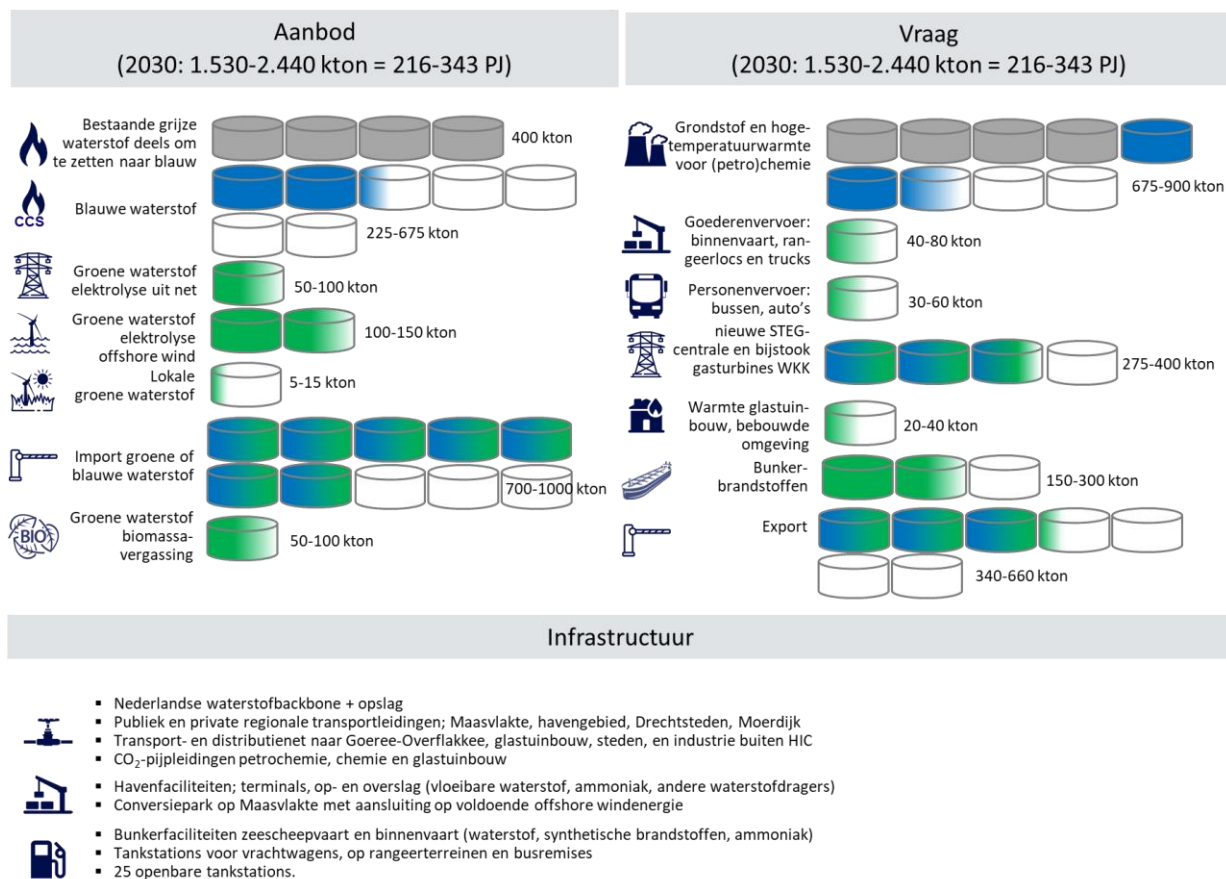
De rol en ontwikkeling van waterstof zijn de laatste jaren internationaal in een stroomversnelling gekomen o.a. door de sterke prijsdaling van elektriciteit uit zon en wind. Waterstof lijkt dé energiedrager te zijn, die wereldwijd transport en grootschalige opslag van duurzame en koolstofvrije energie mogelijk maakt. Een rol in de waterstofeconomie is cruciaal om de Rotterdamse positie als energiehaven met een sterk chemisch cluster in een duurzaam energiesysteem te behouden. De ontwikkeling van een groene waterstofeconomie in Zuid-Holland is een systeemtransitie, waarbij aanbod, vraag en infrastructuur in samenhang ontwikkeld moeten worden.

Vraag

Waterstof wordt al gebruikt als grondstof in de chemie en raffinaderijen, maar kan ook als grondstof dienen voor nieuwe producten, zoals synthetische brandstoffen en chemicaliën. Waterstof is een energiedrager geschikt voor de productie van hogetemperatuurwarmte voor de industrie en de productie van elektriciteit om onbalansproblematiek op te vangen. Gebruik van waterstof in het goederenvervoer vanuit de Rotterdamse haven draagt samen met ander zero-emissie transport bij aan de economie en verduurzaming. Een duurzame, betrouwbare en betaalbare warmtevoorziening is mogelijk door combinatie van elektriciteit, warmte en waterstof. In combinatie met efficiënte opwekking, opslag en gebruik van duurzame energie, warmte, CO₂ en afval, kan waterstof aardgas in allerlei mogelijke toepassingen vervangen en gebruik maken van de bestaande aardgasinfrastructuur.

Aanbod

Grootschalige groene waterstofproductie via elektrolyse van water met groene stroom en uit andere bronnen zoals vergassing van biomassa en biogas is nodig in Zuid-Holland om tot lage kosten van groene waterstof te komen. Totdat er voldoende aanbod van groene waterstof beschikbaar komt, is de productie van blauwe waterstof, geproduceerd uit aardgas, in aanvulling en ter vervanging van bestaande waterstofproductie noodzakelijk om voldoende waterstofvolume in het systeem te krijgen, vooral voor de zeer grote volumes die nodig zijn om de hogetemperatuurbehoefte van de industrie te decarboniseren. Bij blauwe waterstof wordt in tegenstelling tot grijze waterstof de CO₂ afgevangen en opgeslagen. Voor Zuid-Holland, is het realiseren van grootschalige import van waterstof van groot economisch belang. Niet alleen voor gebruik in Zuid-Holland, maar vooral ook voor export.



Figuur 1: Waterstof in 2030: aanbod, vraag en infrastructuur in Zuid-Holland

Infrastructuur en flankerend beleid

Voor de realisatie van een groene waterstofeconomie is een publieke infrastructuur noodzakelijk, vergelijkbaar met die van aardgas nu. Naast waterstof is koolstof onder andere in de vorm van CO₂ een onmisbare grondstof voor een duurzame chemie en voor de glastuinbouw waarvoor een CO₂-infrastructuur noodzakelijk is. Via het realiseren van dergelijke infrastructuren, kan de provincie zowel vraag als aanbod stimuleren. Inzet van specifieke scholings- en trainingsprogramma's, beleid met betrekking tot ruimtelijke ordening, adequate vergunningverlening en toezicht en handhaving, kunnen de verdere implementatie versnellen en beheersbaar maken.

Actieplan en programmatische aanpak

Het Ontwerp van het Klimaatakkoord bevestigt de rol van waterstof in een duurzame energievoorziening en stelt voor om via een programmatische aanpak, te komen tot een geïntegreerd waterstofbeleid. Zo'n programma zou moeten bestaan uit een landelijke component als het gaat om de realisatie van de noodzakelijke randvoorwaarden, maar ook uit regionale deelprogramma's met een maatwerk aanpak per industriecluster en omliggend verzorgingsgebied. Dit vraagt samenwerking tussen sleutelpartijen (overheden, marktpartijen, kennisinstellingen, netwerkbedrijven en maatschappelijke organisaties), zodat de ontwikkeling van een waterstofsysteem gecoördineerd vorm kan krijgen.

De provincie Zuid-Holland hoeft niet te wachten op dit waterstofbeleid. Ze kan binnen haar eigen mogelijkheden en beleidskaders (o.a. ruimtelijke ordening, infrastructuur, gebruik financiële instrumenten en emissienormen, inkoop, OV-concessies, vergunningverlening) partijen bij elkaar brengen en een actieplan waterstof opstellen.

Focus op witte vlekken

Op diverse terreinen zijn al belangrijke waterstofplannen en -initiatieven, zoals de Gasunie-backbone, de waterstoftankinfrastructuur van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en het consortium van Rotterdamse bedrijven dat de productie van blauwe waterstof onderzoekt. Op al deze lopende initiatieven kan de provincie Zuid-Holland stimulerend en ondersteunend zijn. Op terreinen waar nog geen of weinig initiatieven zijn, zou de provincie Zuid-Holland meer proactief en initiërend moeten opereren. Hiervoor wordt het volgende 14-punten-actieplan voorgesteld. Naast dit actieplan is het aan te bevelen een programmatische team aan te stellen dat de samenhang en voortgang van de diverse acties kan monitoren en indien nodig bijsturen.

Tabel 1: Waterstofactieplan provincie Zuid-Holland

Onderwerp	Actieplan provincie Zuid-Holland
Waterstofinfrastructuur	<ol style="list-style-type: none"> 1. Taskforce publieke H₂-transportinfrastructuur door havengebied. 2. Ontwikkeling en stimuleringsbeleid H₂-tank- en bunkerinfrastructuur voor de binnenvaart, busremises en rangeerterreinen. 3. Taskforce publieke H₂-infrastructuur, deels ombouw bestaande aardgasleidingen (Goeree-Overflakkee en glastuinbouw + steden + industrie buiten havengebied). 4. Taskforce ontwikkeling import- en conversiepark waterstof op de Maasvlakte.
Waterstofaanbod	<ol style="list-style-type: none"> 5. Taskforce groene waterstofproductie; o.a. grootschalige elektrolyse (waarbij beschikbaarheid offshore wind met aanlanding op Maasvlakte essentieel is). 6. Ruimtelijke-ordeningbeleid lokale groene waterstofproductie. 7. Werkgroep import en export van vloeibare waterstof en CO₂, ammoniak en andere waterstofdragers.
Waterstofvraag	<ol style="list-style-type: none"> 8. Taskforce waterstoftoepassingen en gebruik in de industrie (raffinaderijen, chemie, etc.). 9. Taskforce regionaal ombouwprogramma van aardgas naar waterstof ter ondersteuning en in samenwerking met regionale energiestrategieën (RES). 10. Ontwikkeling integraal plan warmtewaterstofronde met waterstof voor piekvraag. 11. Stimuleringsbeleid waterstof (emissienormen, kortingen, etc.) voor binnenvaart en trucks opnemen in zero-emissiebeleid mobiliteit. 12. Werkgroep ontwikkeling synthetische brandstoffen (scheepvaart, luchtvaart) en synthetische chemie op waterstof en CO₂.
Flankerend beleid	<ol style="list-style-type: none"> 13. Werkgroep implementatie waterstof in ruimtelijke ordening, vergunningen, toezicht en handhaving. 14. Ontwikkeling scholing en trainingsprogramma's waterstof voor hulpverleners, politie, brandweer, veiligheidsregio's, etc.

De term taskforce verwijst naar een team samengesteld uit diverse organisaties dat de opdracht meekrijgt om een bepaalde taak uit te voeren. De term werkgroep wordt gebruikt voor een team dat de verschillende mogelijkheden breed verkent en uitwerkt. In beide gevallen bevat het team vertegenwoordigers vanuit verschillende achtergronden en organisaties. Als er geen aparte organisatievorm wordt genoemd dan zou de actie door de bestaande lijnorganisatie kunnen worden aangepakt.

INHOUD

Samenvatting	3
Een dubbele urgentie voor een groene waterstofeconomie	8
Noodzaak nieuwe en duurzame economie	8
Sleutelrol waterstof.....	9
Prijsontwikkeling.....	10
Aanbod van waterstof in Zuid-Holland 2030.....	13
Waterstof uit aardgas	14
Waterstof uit elektriciteit en water	15
Waterstof uit biomassa.....	15
Waterstof lokaal geproduceerd uit zon en wind	16
Waterstofimport.....	16
Waterstof en andere producten	20
Vraag naar waterstof in Zuid-Holland 2030	21
Raffinaderijen en chemie	22
Bunkerbrandstoffen.....	23
Logistieke hub voor goederenvervoer	24
Overig vervoer	26
Elektriciteitsproductie	27
Warmte voor glastuinbouw en gebouwde omgeving.	28
Export	32
Infrastructuur voor waterstof en CO ₂ in Zuid-Holland	33
Waterstoftransport door pijpleidingen	33
CO ₂ -pijpleidinginfrastructuur	42
Waterstofopslag en balancerings.....	44
Waterstof tank- en bunkerinfrastructuur	46
Waterstofhavenfaciliteiten.....	49
Waterstofactie-agenda Zuid-Holland.....	52
Afkortingen.....	61
Literatuurlijst	62

EEN DUBBELE URGENTIE VOOR EEN GROENE WATERSTOFECONOMIE

Noodzaak nieuwe en duurzame economie

Zuid-Holland kent een dubbele urgentie, vanuit economie én milieu, om een groene waterstofeconomie te ontwikkelen. De economie van Zuid-Holland, met het Haven Industrieel Complex (HIC), een unieke logistieke hub en ook de glastuinbouw, zijn gebouwd op fossiele energie ofwel fossiele koolwaterstoffen. De haven van Rotterdam vervult nu een cruciale rol in de import, bewerking en export van olie, gas en kolen. Een fossiele economie heeft echter geen toekomst (TNO, 2016). In 2050 moet de regio daarom getransformeerd zijn naar een fossielvrije en circulaire nieuwe economie (*Roadmap Next Economy* (MRDH, 2016)).

De economie van Zuid-Holland kan door de ligging aan zee, goede (inter)nationale infrastructuur en excellente glastuinbouwsector, haar economische structuur en functies behouden, als krachtig wordt omgeschakeld naar duurzame en CO₂-neutrale energiestromen voor cruciale functies in het Haven Industrieel Complex en de eigen, Zuid-Hollandse energievoorziening. Dat geeft in de komende decennia een enorme transitieopgave voor de transport- en opslagsector, de (petro)chemische industrie, de glastuinbouwsector en de gebouwde omgeving. Nieuwe, duurzame vormen van aangevoerde en lokaal geproduceerde energiedragers vragen om andere technieken voor aanlanding, overslag, opslag, transport en omzetting.

Waterstof zal een belangrijke rol gaan spelen in deze transitie. Maar naast waterstof is groene en circulaire koolstof van groot belang voor de toekomstige economie van Zuid-Holland. De productie van chemicaliën en synthetische brandstoffen vraagt de inzet van zowel waterstof als koolstof(dioxide) om de fossiele koolwaterstoffen te vervangen. Ook de glastuinbouw vraagt koolstofdioxide voor snellere gewasgroei. Import en doorvoer van biomassa zullen daarom belangrijk worden, net als de winning van groene CO₂ uit biomassa en uit de decompositie van afval (de circulaire economie). Met waterstof en koolstof als bulkgrondstoffen, kunnen vloeibare brandstoffen en chemische stoffen in nieuwe processen geproduceerd worden. Schepen moeten CO₂-neutrale brandstoffen gaan bunkeren, zware trucks moeten rijden op duurzame brandstoffen, de glastuinbouwsector moet overschakelen op een duurzame energievoorziening en groene CO₂-aanvoer, en de gebouwde omgeving moet van het fossiele aardgas af.

Een waterstofeconomie komt niet zomaar tot ontwikkeling, er is immers geen openbare waterstofinfrastructuur waar diverse aanbieders en afnemers van waterstof op zijn aangesloten. Waterstof is niet opgenomen in enige energiewet, er zijn geen standaarden, reguleringen en veiligheidsrichtlijnen voor het publieke domein. Kortom, er is geen energiemarkt voor waterstof, zoals die er voor elektriciteit en aardgas wel is. Daarom kan geen enkel bedrijf of organisatie de waterstofproductie, -vraag of -infrastructuur zelfstandig ontwikkelen. Dit zal gecoördineerd moeten gaan gebeuren, waarbij overheden een regisserende taak hebben en zullen moeten zorgen voor een marktordening met een goede infrastructuur en randvoorwaarden, zoals dat destijds bij de introductie van elektriciteit en aardgas door de overheid is gedaan.

De ombouw van de Zuid-Hollandse energie- en grondstoffenfuncties ondersteunt bovendien de Nederlandse (en internationale) transitieopgave om de broeikasgasemissies in 2050 vrijwel tot nul

gereduceerd te hebben. Tegelijkertijd brengt een duurzaam energiesysteem realisatie van de Zuid-Hollandse doelen op het terrein van luchtkwaliteit en leefbaarheid dichterbij.

De overgang naar een 'groene waterstofeconomie' biedt naast uitdagingen volop kansen. Het geeft de mogelijkheid om te bouwen aan een innovatieve en duurzame haven, met (petro)chemisch cluster, logistieke hub en een duurzame glastuinbouw en genereert een kenniscluster voor de ontwikkeling van CO₂-neutrale technologie en producten. Daarmee creëert Zuid-Holland een sterke regio die wereldwijd de concurrentie aankan.

Sleutelrol waterstof

De rol en ontwikkeling van waterstof zijn de laatste jaren internationaal in een stroomversnelling gekomen. Waterstof lijkt dé energiedrager te zijn, die wereldwijd transport en grootschalige opslag van duurzame en koolstofvrije energie mogelijk maakt. Vele landen en regio's, met Japan als koploper, maar ook grote bedrijven, verenigd in de Hydrogen Council (Hydrogen Council, 2017), en recent ook de Europese Unie (Austria, 2018), zien waterstof naast elektriciteit als de koolstofvrije energiedrager voor een schone, betrouwbare en betaalbare energie- en grondstofvoorziening. Tegelijkertijd worden daarbij vele nieuwe banen gecreëerd.

How Northwest Europe can shape a clean hydrogen market' (Hulst, 2018); Noé van Hulst; chairman of the IEA Governing Board and Hydrogen Envoy for the Ministry of Economic Affairs & Climate Policy, the Netherlands.

Citaat 1: "There is a growing awareness that the global energy transition will not succeed unless it finds ways to decarbonise the "hard-to-abate" sectors like industry and heavy transport, while providing sufficient flexibility to balance electricity grids all year round."

Citaat 2: "Clean hydrogen is one of the few options available. This explains why you hear so much about it lately. Witness the recent reports of the Energy Transition Commission, the EU's 2050 climate strategy, as well as The Economist. Austria launched a Hydrogen Initiative during their EU presidency this year. Japan holds the presidency of the G20 in 2019 and has already announced that hydrogen will be one of their priorities."

Citaat 3: "Northwest Europe can and should position itself as a front-runner in developing and deploying clean hydrogen to help the decarbonisation of the energy system, while improving energy security at the same time. Many new jobs would be created in the process".

Diverse toepassingen

Waterstof kan belangrijke systeemfuncties gaan vervullen voor een duurzame elektriciteits- en warmtevoorziening, inclusief vraag- aanbodafstemming. Voor alle sectoren in de samenleving gaat waterstof daarmee betekenis krijgen: de elektriciteits-, gas- en oliesectoren, de industrie, de ICT-sector, de woningbouw, de dienstensector, en de land- en tuinbouw. Waterstof ontwikkelt zich tot een mondiale energiedrager, waarmee wereldwijd transport en grootschalige opslag van duurzame en koolstofvrije energie mogelijk wordt (Wijk&Roest&Boere, November 2017).

Waterstof wordt al gebruikt als grondstof in de chemie en raffinaderijen. Waterstof kan ook als grondstof dienen voor nieuwe producten, zoals synthetische brandstoffen en chemicaliën. Waterstof is een energiedrager geschikt voor de productie van hogetemperatuurwarmte voor de industrie en lagetemperatuurwarmte voor de gebouwde omgeving, voor de productie van elektriciteit en als brandstof voor transport en mobiliteit. In combinatie met efficiënte opwekking, opslag en gebruik van

duurzame energie, warmte, CO₂ en afval, kan waterstof aardgas in allerlei mogelijke toepassingen vervangen en gebruik maken van de bestaande aardgasinfrastructuur.

Diverse bronnen

Waterstof kan gemaakt worden uit fossiele energie, zoals kolen, olie en gas. Als daarbij de CO₂ de lucht ingaat wordt dat 'grijze waterstof' genoemd. Maar als de CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen gaat het om zogenaamde 'blauwe waterstof'. In een eerste periode kunnen zo al grote volumes waterstof beschikbaar komen. Diverse landen zoals Australië (Arena, 2018), Zuid-Amerika, het Midden-Oosten en Noord-Afrika (de MENA-landen), maar ook Noorwegen en Rusland (Bloomberg, 2018), zien in blauwe waterstof de mogelijkheid voor export van hun fossiele brandstoffen, maar dan zonder koolstof. Daarnaast zijn er diverse initiatieven om 'groene' waterstof te gaan produceren op basis van duurzame energiebronnen als wind- en zonne-energie.

Met de ondertekening van 'The Hydrogen Initiative' (Austria, 2018) in september 2018 onderschrijven alle EU-landen de sleutelrol van waterstof voor een duurzaam energiesysteem. De vraag naar (groene) waterstof zal zich naar verwachting in de komende decennia dan ook sterk gaan ontwikkelen, zeker in Duitsland -onze belangrijkste handelspartner- en andere Noordwest-Europese landen, waaronder Nederland.

Voor de Rotterdamse haven betekent dit een unieke kans en uitdaging om waterstof te gaan importeren en doorvoeren en waterstof te gaan inzetten als grondstof voor conversie naar chemische producten en (bunker)brandstoffen. Zuid-Holland kan de bestaande kennis, infrastructuur en marktpositie gebruiken om een voorsprong te creëren in deze nieuwe markt. Naast deze economische functie zal waterstof als energiedrager in combinatie met elektriciteit en warmte een belangrijke rol gaan vervullen in de verduurzaming van de Nederlandse en Zuid-Hollandse energievoorziening.

Prijzontwikkeling

Een belangrijke driver voor deze ontwikkeling is de verwachte kostendaling van waterstof. De prijs van waterstof zal in een markt van vraag en aanbod tot stand moeten gaan komen. Dit wordt uiteindelijk een wereldmarkt. Het is voorstelbaar dat rond 2050 deze markt eenzelfde volume en prijsvorming kent als de huidige oliemarkt. Er zal internationale concurrentie ontstaan en waterstof zal daar worden geproduceerd, waar dat het goedkoopste kan.

Waterstof is een energiedrager, net zoals elektriciteit. Waterstof moet dus geproduceerd worden uit een andere energiebron. De prijs daarvan is dus in hoge mate bepalend voor de waterstofprijs, of dat nu aardgas, offshore wind, zon-PV of biomassa is.

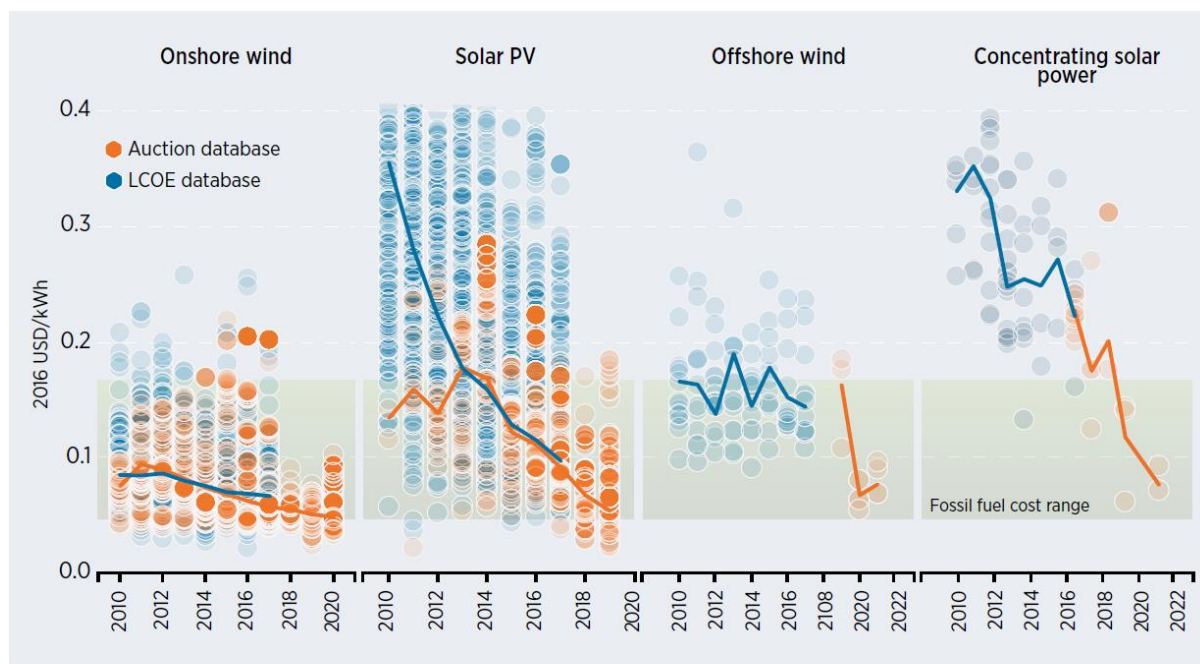
Blauwe waterstofproductie

Blauwe waterstof wordt in Nederland geproduceerd uit aardgas, waarbij de CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen. Per energie-eenheid zal blauwe waterstof duurder zijn dan aardgas. Immers, er is energieverlies bij de omzetting van aardgas naar waterstof, en er moeten extra kosten worden doorberekend: de investerings- en onderhoudskosten van de reformer, de kosten van het afvangen van CO₂ en de kosten van transport en opslag van de CO₂ naar een leeg aardgasveld.

Groene waterstofproductie

Groene waterstof, verkregen met elektrolyse, kan in Nederland op grote schaal geproduceerd gaan worden uit offshore wind. Voor 2030 gebeurt dit bij het aanlandpunt aan de kust en daarna ook bij offshore windparken of op een (kunstmatig) eiland. De elektriciteitsprijs vormt daarbij ruwweg 75% van de waterstofprijs. Ook hier is er verlies bij de omzetting van water naar waterstof en moeten de investerings- en onderhoudskosten van een elektrolyser worden meegeteld. Grootschalige alkaline elektrolyse is al tientallen jaren een bewezen en uitontwikkelde technologie. De prijs van de gebruikte elektrolyzers is de afgelopen 10 jaar per kW meer dan gehalveerd, en deze daling zet zich nog voort. Elektrolyzers op basis van nieuwere PEM-technologie hebben nu nog een hogere prijs maar zullen zich verder ontwikkelen en een snelle leercurve doorlopen. Bij de huidige elektrolyserprijzen is de elektriciteitsprijs dominant. Bij verdere prijsdaling van de technologie zal dat zo blijven, ook als de elektriciteitsprijs daalt.

Voor de productie van blauwe waterstof tegen 2 euro per kg is een aardgasprijs nodig van 7 euro per GJ ofwel een laagcalorische aardgasprijs van 25 eurocent per kubieke meter. Groene waterstof heeft dezelfde prijs van 2 euro per kg bij een elektriciteitsprijs van 10,6 euro per GJ ofwel 3 eurocent per kWh. Beide waarden voor aardgas en elektriciteit zijn niet onrealistisch. Omgerekend op energie-inhoud naar aardgas is 2 euro per kg waterstof equivalent met 50 eurocent per kubieke meter aardgas. Voor offshore wind zal een dergelijke prijs tussen 2025 en 2030 worden gerealiseerd. Groene waterstof kan in die periode dus concurrerend worden met blauwe waterstof. Om de offshore productie goed op gang te krijgen, is het voor nu vooral van belang dat er voldoende offshore windcapaciteit beschikbaar komt.



Source: IRENA Renewable Cost Database and Auctions Database.

Figuur 2: Prijsdaling duurzame energiebronnen

Import waterstof

In de gebieden met een hoge gemiddelde zoninstraling of met hoge windsnelheden, kan nu elektriciteit geproduceerd worden voor minder dan 2 dollarcent per kWh (IRENA, 2018), zie Figuur 2. Naar verwachting is dit binnen 10 jaar, minder dan 1 dollarcent per kWh. De productiekosten voor groene waterstof moeten daardoor kunnen zakken tot onder de 1 dollar per kg. In gebieden waar goedkoop aardgas beschikbaar is, en de afvang en opslag van CO₂ goed mogelijk is, zou deze prijs ook haalbaar moeten zijn voor de productie van blauwe waterstof. De geproduceerde waterstof kan per pijpleiding binnen regio's of per schip over de hele wereld worden getransporteerd.

Deze productie van blauwe en groene waterstof voor exportdoeleinden moet evenwel nog op gang komen. Veelbelovende ontwikkelingen zijn er op dit moment in het verre Oosten, door stimulerend beleid vanuit Japan, Zuid-Korea en ook China. De verwachting is dat de bijkomende conversie- en transportkosten bij gebruik van vloeibare waterstof, ammoniak of waterstof gebonden aan een drager voor het internationale zeetransport, ook onder de 1 dollar per kg moeten kunnen uitkomen. Uiteindelijk bepalen productie- én transportkosten samen de concurrentiepositie ten opzichte van lokaal geproduceerde waterstof. Een integrale kostprijs onder de 2 dollar (1,75 euro) per kg maakt geïmporteerde waterstof dan concurrerend met groene en blauwe waterstof, geproduceerd in Nederland.

Na 2030 is de verwachting dat de in Nederland geproduceerde waterstof als ook de geïmporteerde waterstof in prijs nog verder zullen zakken, naar 1 tot 1,5 euro per kg, gelijk aan de huidige grijze waterstof prijs. Daarbij zal groene waterstof in de toekomst naar verwachting de laagste prijs gaan opleveren.

Het aanjagen van eigen Nederlandse groene en blauwe waterstofproductie staat niet op gespannen voet met toekomstige waterstofimport. Juist in Rotterdam zal een deel van de grootschalige windenergie uit de Noordzee aanlanden en de import van waterstof gaan plaatsvinden. De uitdaging is om voldoende duurzame energie op te wekken, hier en elders in de wereld en om een positie in de waterstofeconomie te veroveren. Een waterstofvraag in de orde van grootte van de huidige olievraag zal om een enorme opschaling van nationale en internationale duurzame energieproductie vragen. Een vergelijkbare rol voor Nederland in de import en export is alleen mogelijk wanneer naast de vraag naar waterstof, de infrastructuur en kennis aanwezig zijn. Die kan Nederland alleen verkrijgen door zelf ervaring op te doen met eigen productie.

AANBOD VAN WATERSTOF IN ZUID-HOLLAND 2030

Net als elektriciteit is waterstof een energiedrager en geen energiebron. Waterstof moet dus gemaakt worden uit fossiele of duurzame energiebronnen. Waterstof wordt in Nederland nu voornamelijk geproduceerd uit aardgas en water via stoommethaanomvorming (SMR-steam methane reforming). Alternatieven hiervoor zijn:

- Een alternatieve techniek op basis van aardgas, autothermal reforming (ATR);
- Elektrolyse van water, dus uit elektriciteit;
- Vergassing van biomassa of SMR en ATR van biogas in plaats van aardgas.

Naast eigen productie zal import op termijn een belangrijk rol gaan spelen. Bij de productie van waterstof ontstaan afhankelijk van het proces ook andere (bij)producten (zie Figuur 3)¹.

Bron	Conversie	Waterstof H ₂ 1.530-2.440 kton = 216-343 PJ	CO ₂	Ander
Aardgas Import Hoogcalorisch via pijpleiding 2 miljard m ³	Steam reforming Bestaande grijze waterstof, deels van grijs naar blauw	400 kton = 56 PJ Grijs en Blauw	Fossiele CO ₂ - afvang 0-1,8 Mton CO ₂ -emissies	CO als grondstof + Warmte
Aardgas Import Hoogcalorisch via pijpleiding 1-3 miljard m ³	Autothermal reforming Raffinagegas reforming Blauwe waterstof	225-675 kton = 32-96 PJ Blauw	Fossiele CO ₂ - afvang 2-6 Mton	Warmte
Elektriciteit offshore wind 5-7,5 miljard kWh	Elektrolyse gekoppeld aan offshore wind bij aanlanding 1-1,5 GW	100-150 kton = 14-21 PJ Groen		O ₂ 800-1.200 kton + Warmte
Elektriciteit uit net met groencertificaat 2,5-5 miljard kWh	Elektrolyse gekoppeld aan E-net 300-600 MW	50-100 kton = 7-14 PJ Groen		O ₂ 400-800 kton + Warmte
Biomassa-import 1,5-3,5 miljoen ton	Vergassing 0,5-1GW	50-100 kton 7-14 PJ Groen	Groene CO ₂ -afvang 0,7-1,3 Mton	Char (85% koolstof) 150-300 kton
Elektriciteit uit lokaal wind/zon + net 250-750 miljoen kWh	Elektrolyse Gekoppeld aan lokaal wind/zon ter voorkoming netverzwaring 50-150 MW	5-15 kton = 0,7-2,1 PJ Groen lokaal		O ₂ 40-120 kton + Warmte
Waterstof Import: Vloeibaar, ammoniak, MCH (H ₂ +Tolueen) 0,5-1 miljoen ton	Conversie → waterstofgas Vloeibaar H ₂ naar H ₂ -gas Kraken Ammoniak Dehydrogenatie MCH	700-1.000 kton = 99-140 PJ Groen en Blauw		Stikstof N ₂

Figuur 3: Waterstofaanbod Zuid-Holland 2030

¹ Omrekening van kton naar PJ is gedaan op basis van de calorische bovenwaarde van waterstof (higher heating value) van 141 MJ/kg.

Waterstof uit aardgas

In het Rotterdamse havencomplex wordt nu (grijze) waterstof uit aardgas gemaakt hoofdzakelijk door SMR. Bij de productie is koolmonoxide (CO) het bijproduct, dat als grondstof in de chemie wordt gebruikt. Daarnaast komt CO₂ vrij, die nu in de atmosfeer terecht komt. Het volume in Rotterdam bedraagt zo'n 400 kton (56 PJ)² waterstof, hoofdzakelijk voor de raffinaderijen. Deze waterstofproductie zal in 2030 nog aanwezig zijn, maar mogelijk wordt een deel van de CO₂-uitstoot afgevangen en opgeslagen.

Naast de bestaande waterstofproductie, onderzoekt een consortium van bedrijven (H-vision project (H-vision, 2018)) momenteel of er in de haven nieuwe blauwe waterstof kan worden geproduceerd uit aardgas, via ATR. Deze techniek maakt het mogelijk de vrijkomende CO₂ bijna volledig af te vangen. Er is wel zuurstoftoevoer nodig.

Deze waterstof zou aardgas kunnen vervangen dat nodig is voor de productie van hogetemperatuurwarmte in de industrie. Door aardgas eerst om te zetten in waterstof ontstaat een geconcentreerde stroom CO₂, die eenvoudiger en goedkoper is af te vangen (*pre-combustion* CO₂-afvang) dan wanneer je bij verbranding van aardgas de CO₂ uit de afvalgassen moet halen en zuiveren (*post-combustion* CO₂-afvang, ofwel de eerste optie voor decarbonisatie).

Dit consortium bestudeert als derde optie voor reductie van de CO₂-uitstoot hoe het raffinagegas uit de raffinaderijen slimmer kan worden gebruikt. Momenteel wordt dit raffinagegas verstoekt in de ovens voor hogetemperatuurwarmte. Het raffinagegas zou ook opgewerkt kunnen worden naar waterstof en CO₂, waarbij de CO₂ dan kan worden afgevangen en de waterstof worden gebruikt in de ovens.

In totaal beoogt het H-vision project een afvang van zo'n 2 Mton CO₂, oplopend tot 6 Mton CO₂ in 2030. De hoeveelheid waterstof waarmee dit correspondeert is 225-675 kton (32-96 PJ). Dit is als range voor 2030 genomen.

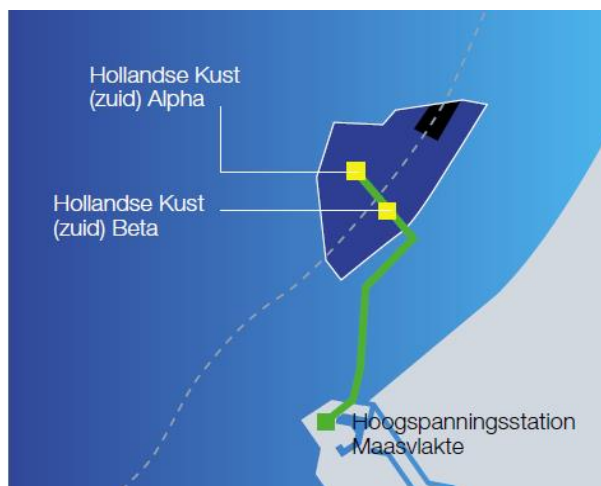
De vraag is of grootschalige productie van blauwe waterstof op basis van aardgas niet eenvoudiger en goedkoper is dichterbij de winning van aardgas, mogelijk door de gaswinningsbedrijven zelf. Dit zou onderzocht moeten worden. Geschikte locaties hiervoor lijken plekken waar het aardgas van de productielocaties op de Noordzee aan land komt. De afgevangen CO₂ kan dan direct weer via een pijpleiding terug naar zee, zonder dat de CO₂-pijpleiding over land loopt. De conversie van aardgas naar waterstof zou in de toekomst ook kunnen plaatsvinden bij de winningsbron. Indien technisch mogelijk wordt de CO₂ direct in het veld teruggepompt. Dit maakt het mogelijk in een beperkte tijd de ombouw van de Nederlandse aardgasinfrastructuur naar waterstof te realiseren.

² Omrekening van kton naar PJ is gedaan op basis van de calorische bovenwaarde van waterstof (higher heating value) van 141 MJ/kg.

Waterstof uit elektriciteit en water

Eén van de aantrekkelijke en goedkope vormen van duurzame energieproductie die op enige schaal in Nederland kan worden ontwikkeld is offshore windenergie. Tot 2023 zal in Nederland zo'n 4,5 GW aan windvermogen worden geplaatst, en daarna wordt tot 2030 elk jaar 1 GW bijgebouwd. Uitbreiding met extra offshore windturbines is mogelijk, als dat nodig is om de klimaatdoelstellingen van 2030 te halen.

Voor Zuid-Holland is de aanlanding van 1,4 GW offshore wind van het windpark 'Hollandse Kust Zuid', op de Maasvlakte voorzien in 2022-2023 (TenneT, 2017), zie Figuur 4. Voor 2030 komt hier vermoedelijk 2,0 GW van 'IJmuiden Ver' bij (in onderhandeling). Naast invoeding in het elektriciteitsnet, zou 1-1,5 GW op de Maasvlakte omgezet kunnen worden in groene waterstof en worden getransporteerd via de waterstofinfrastructuur. Die hoeveelheid elektriciteit is goed voor 100-150 kton (14-21 PJ) waterstof per jaar.



Figuur 4: Aanlanding Hollandse Kust Zuid op Maasvlakte

Diverse bedrijven hebben aangegeven dat ze onderzoeken of realisatie van elektrolysecapaciteit mogelijk is voor de productie van groene waterstof als grondstof voor hun productieproces. Het gaat om een capaciteit van 100-200 MW per bedrijf. De benodigde elektriciteit hiervoor is, met groencertificaten, afkomstig van het elektriciteitsnet of gekoppeld aan het aanlandpunt voor offshore wind. Naar verwachting willen drie bedrijven deze stap voor 2030 maken. Dit betekent een elektrolysecapaciteit van 300-600 MW – goed voor 50-100 kton (7-14 PJ) groene waterstof per jaar.

Waterstof uit biomassa

Groene waterstof kan ook worden geproduceerd uit vaste biomassa, zoals hout, via vergassing. Naast waterstof ontstaat hierbij groene CO₂ en char (bestaat voor 85% uit koolstof). CO₂ is een grondstof voor de chemische industrie en de glastuinbouw. Char kan dienen als grondstof in de chemische industrie of als grondverbeteraar in de landbouw. Vergassing in combinatie met elektrolyse biedt synergievoordeel, omdat vergassing zuivere zuurstof vraagt, die vrijkomt bij elektrolyse als tweede product. In 2030 zou een biomassavergasser van zo'n 0,5-1 GW in de nabijheid van een 1 GW-elektrolyser gerealiseerd kunnen zijn. De biomassavergasser produceert zo'n 50-100 kton (7-14 PJ) groene waterstof, 0,7-1,3 Mton groene CO₂ en 150 -300 kton groene char.

Overigens moet biomassa niet zomaar worden ingezet voor de energievoorziening. Inzet van duurzaam geteelde biomassa, als grondstof voor waterstof, CO₂ en char voor de chemie en/of de landbouw lijkt echter verantwoord. Voor de productie van chemische materialen en producten is immers naast waterstof ook koolstof nodig. Biomassa is één van de weinige duurzame bronnen naast de voorziene winning van koolstof en waterstof uit (chemische) materialen in afval (de circulaire economie).

Waterstof lokaal geproduceerd uit zon en wind

Bovenstaande richt zich vooral op de grootschalige waterstofproductie, waarbij waterstofprijzen aanzienlijk lager komen te liggen dan bij kleinschalige productie. Desalniettemin zijn er kansen voor kleinschalige productie op plaatsen waar een aanzienlijk grotere capaciteit aan zon of wind is opgesteld waardoor aansluiting op het elektriciteitsnet grote investeringen vereist. Voorwaarde is dat er een lokale waterstofvraag is of de waterstof kan worden afgevoerd via een leidingnet.

Onder andere op Goeree-Overflakkee waar een groot vermogen aan duurzame energie is en wordt gerealiseerd, bestaande uit windparken, zonneparken en mogelijk een getijdencentrale, is dat aanleiding om lokale waterstofproductie te onderzoeken. In 2030 zal in de provincie Zuid-Holland naar verwachting decentraal een elektrolysevermogen van 50-150 MW zijn opgesteld, dat groene en lokale waterstof produceert, zo'n 5-15 kton (0,7-2,1 PJ) per jaar.

Daarnaast zijn nieuwe technieken en producten voor kleinschalige projecten in ontwikkeling, voor productie, compressie en opslag van waterstof. Dergelijke initiatieven passen goed in de regionale energiestrategieën (RES).

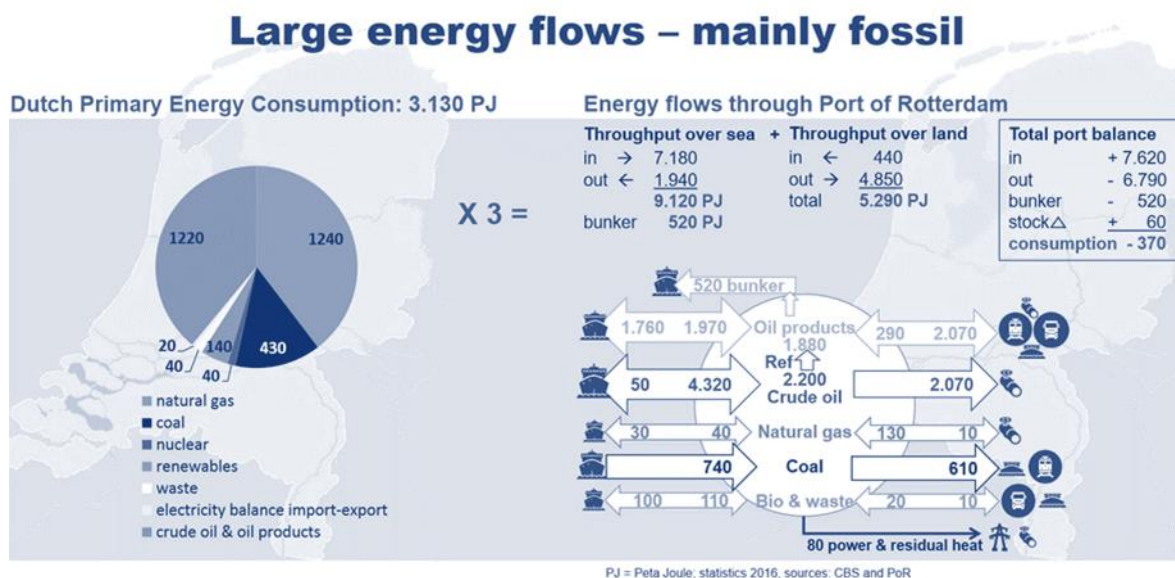
Zo ontwikkelt een startup een geïntegreerde windturbine met elektrolyser. Het conversierendement ligt hoger dan bij stapsgewijze opwek van elektriciteit en aparte conversie naar waterstof en er is geen elektriciteitsaansluiting nodig. Dit bespaart kosten en geeft minder verliezen. Het bedrijf claimt op deze manier kostencompetitief waterstof te kunnen produceren. Er bestaan concrete plannen om een dergelijke windmolen te plaatsen bij Stad aan 't Haringvliet en hiermee ervaring op te doen.

Ook kan uit biogas waterstof en CO₂ worden geproduceerd via SMR. Kleinschalige reformers worden o.a. geleverd door een Nederlands bedrijf. Zo zou er bij afvalwaterzuiveringsinstallaties niet alleen biogas, maar ook groene waterstof en groene CO₂ kunnen worden geproduceerd.

Waterstofimport

Nederland importeert meer dan de helft van de energie die het gebruikt. Zuid-Holland is verantwoordelijk voor een groot deel van deze import. Ook in een duurzaam energiesysteem zal Nederland veel duurzame energie moeten importeren. Een deel daarvan zal bestaan uit waterstof.

Nederland importeert energie op dit moment niet alleen voor eigen gebruik, maar ook voor de export. In 2017 ging het om een importvolume van zo'n 10.500 PJ, waarvan zo'n 8.500 PJ werd doorgevoerd. De Rotterdamse haven neemt een aanzienlijk deel hiervan voor zijn rekening, voornamelijk olie en olieproducten, kolen en vloeibaar gas (LNG-liquid natural gas). Zo'n 7.700 PJ wordt geïmporteerd en 6.800 PJ doorgevoerd en geëxporteerd via de Rotterdamse haven (Figuur 5). Bunkerbrandstoffen maken 520 PJ van het importvolume uit en het eigen gebruik in de haven is 370 PJ. Het merendeel van de energie (80-90%) bestaat uit olie en olieproducten. Een groot deel van de import wordt direct of na bewerking doorgevoerd naar Duitsland en België.



Figuur 5: Import en export van energie door de Rotterdamse haven in 2016 (Melieste, 2017)

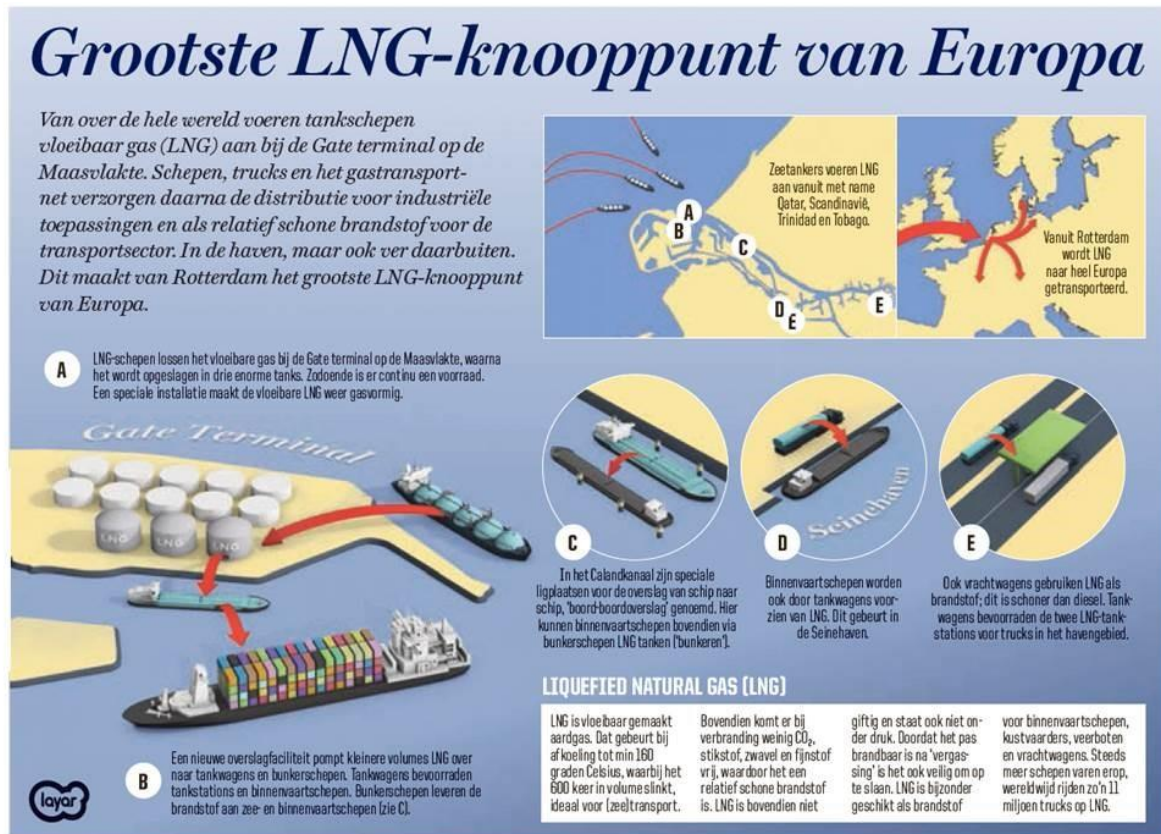
Wil de Rotterdamse haven een import- en exportfunctie voor duurzame energie blijven vervullen en zijn unieke positie als energiehaven behouden, dan zal de haven in de toekomst vergelijkbare hoeveelheden duurzame energie moeten importeren, waaronder ook veel groene waterstof (tientallen miljoenen ton) in de vorm van vloeibare waterstof, ammoniak en/of waterstof gebonden aan een drager.

Overigens kan import van waterstof ook via waterstofpijpleidingen onder druk plaatsvinden. Allereerst zal dat gaan om waterstof uit andere delen van Nederland, en in een later stadium om waterstof geproduceerd op de Noordzee die via pijpleidingen naar de kust wordt gebracht. Transport van waterstof via pijpleidingen is op termijn mogelijk van elders uit Europa en uit landen in Noord-Afrika of het Midden-Oosten.

Vloeibare waterstof

Waterstof wordt vloeibaar bij -253 graden Celsius, 20 graden boven het absolute nulpunt. Vloeibare waterstof (LH₂) wordt wereldwijd al geproduceerd, vervoerd per tankwagen en o.a. gebruikt als brandstof in raketten. Het proces voor het maken van vloeibare waterstof is vergelijkbaar met het vloeibaar maken van aardgas (LNG bij -162 graden Celsius). Dit geldt eveneens voor het transport per schip, over- en opslag.

Rotterdam heeft sinds 2011 een LNG-terminal in operatie (de Gate terminal van Gasunie en Vopak (zie Figuur 6) met een capaciteit van 12 miljard m³ gas per jaar (LNG-terminal, sd). Dit komt overeen met zo'n 500 PJ. De import, op- en overlag van vloeibare waterstof vraagt vergelijkbare kennis en infrastructuur.



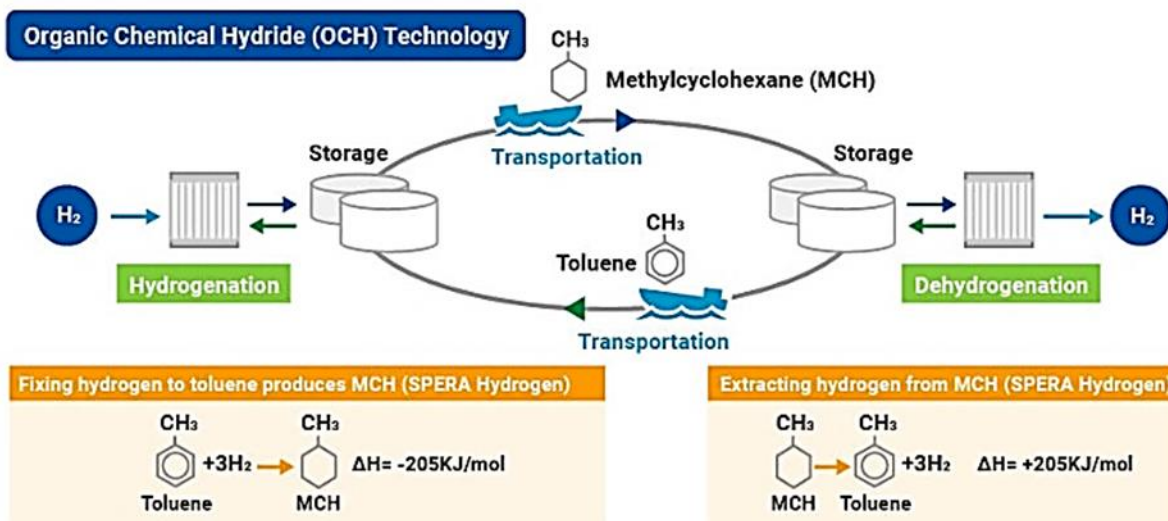
Figuur 6: LNG-terminal en vloeibaar gas op- en overslag in Rotterdam

Japan kijkt structureel naar waterstofimport voor zijn energievoorziening en heeft onder andere een langjarige overeenkomst met Australië voor waterstoflevering afgesloten. In Japan moet een eerste vloeibare waterstoftanker vanuit Australië gaan aanmeren in 2020 voor de Olympische Spelen. Het bedrijf Kawasaki werkt daarvoor aan de bouw van een eerste vloeibarewaterstoftanker.

Er wordt ook gekeken naar andere mogelijkheden om waterstof te transporteren.

Waterstof gebonden aan een drager

Een van de mogelijke dragers voor waterstof is methylcyclohexaan (MCH). De waterstof is hier gebonden aan toluen. Het Japanse bedrijf Chiyoda (Chiyoda, 2017) werkt aan waterstoftransport op basis van deze stof. MCH is een vloeistof die per olietanker kan worden vervoerd en in normale olietanks kan worden opgeslagen. Na het transport maakt men de waterstof weer los van het toluen. Het toluen wordt daarbij gerecycled -en per schip teruggebracht naar de waterstofproductielocatie (zie Figuur 7). Chiyoda wil op deze manier waterstof uit Brunei gaan vervoeren naar Japan.



Figuur 7: Waterstofketen met MCH als drager

Een andere mogelijke waterstofdrager is ammoniak. Ammoniak (NH_3) is een chemische basisgrondstof, die in grote hoeveelheden gebruikt wordt om kunstmest van te maken. Daarnaast wordt ammoniak gebruikt bij de productie van plastic, kleurstoffen en pesticiden. Ook is het een drijfgas in airconditioners en grote warmtepompen. Ammoniak wordt gemaakt door stikstof, afkomstig uit de lucht te binden aan waterstof. Ammoniak is bij -33 graden Celsius vloeibaar en wordt al decennialang per schip vervoerd over zee, onder andere in lpg-tankers (MaritiemNederland, 2017). De ammoniak kan direct dienen als grondstof of als brandstof, of weer worden omgezet in waterstof en stikstof.

Samenwerking

Als de haven voor de toekomstige energievoorziening zijn concurrentiepositie wil behouden, dan is de bulkimport en -opslag van waterstof een belangrijk element. Een doelstelling om in 2030 een eerste ontvangsterminal voor waterstof operationeel te hebben, met opslag- en overslaginfrastructuur kan hier vorm aan geven. In de komende jaren zal duidelijker worden in welke vorm aanlanding het meest voor de hand ligt – vloeibare waterstof, ammoniak en/of MCH. Gezien de geschatte potentie voor de waterstofafzet lijkt een importvolume in de grootteorde van 1.000 kton (140 PJ) per jaar in 2030 redelijk.

Analoog aan Japan zou voor Nederland, bijvoorbeeld via het Havenbedrijf Rotterdam, de import van waterstof uit andere regio's georganiseerd kunnen gaan worden. Havens uit het netwerk van Rotterdam, zoals Sohar in Oman - met de Sohar industrial port en free zone - zouden een rol kunnen spelen in de import van goedkope groene en blauwe waterstof geproduceerd in het Midden-Oosten.

Waterstof en andere producten

In 2030 kunnen eigen productie (60%) en import (40%) samen in totaal 1.530 tot 2.440 kton (215-345 PJ) waterstof per jaar opleveren. Voor deze Nederlandse grijze, blauwe en groene waterstofproductie is import van aardgas, biomassa en een aanzienlijke hoeveelheid groene elektriciteit nodig. Bij de productie van blauwe waterstof moet 2-8 Mton fossiele CO₂ worden afgevangen en opgeslagen in een gasveld onder de Noordzee.

Naast waterstof levert productie ook waardevolle bijproducten op. Bij de productie van waterstof uit biomassa ontstaat 0,7-1,3 Mton groene ofwel biogene CO₂ en 150-300 kton char. Sectoren zoals de tuinbouw en voedingsindustrie hechten waarde aan het gebruik van niet-fossiele bronnen hiervoor. Elektrolyse van water levert zo'n 1,2-2,3 Mton zuurstof op. Elektrolyse en reforming van aardgas produceren warmte die kan worden gebruikt.

VRAAG NAAR WATERSTOF IN ZUID-HOLLAND 2030

Waterstof is een flexibele energiedrager die inzetbaar is voor de opwekking van elektriciteit, de levering van warmte, als brandstof en als grondstof voor de industrie.

In een toekomstig energiesysteem dat grotendeels gebaseerd zal zijn op groene stroom uit wind en zon, zijn moleculen nodig als grondstof en als energiedrager voor toepassingen waarin met elektriciteit onvoldoende vermogen of niet de juiste temperatuur bereikt kan worden. Alleen moleculen kunnen goed opgeslagen worden en een flexibele integrale energie- en grondstoffenvoorziening met voldoende leveringszekerheid bieden, die met alleen elektronen niet te realiseren is. Windenergie kan worden omgezet in waterstof en in periodes van een elektriciteitstekort wordt uit de opgeslagen waterstof weer elektriciteit (en warmte) gemaakt. Deze omzetting naar elektriciteit en warmte kan plaatsvinden door verbranding bijvoorbeeld in een stoom- en gascentrale en via een brandstofcel die elektriciteit en warmte produceert (omgekeerde elektrolyse).

Vraag/Markt	Marktsegmenten	Waterstof H ₂ 1.530-2.440 kton = 216-343 PJ
Raffinaderijen en Chemie	Bestaand grondstof 400 kton Nieuw grondstof 50-150 kton Hogetemperatuurwarmte 225-350 kton	675-900 kton = 95-127 PJ
Bunker- brandstoffen	Scheepvaart: synthetische brandstoffen, ammoniak, vloeibare H ₂ 75-150 kton Luchtvaart: synthetische kerosine 75-150 kton	150-300 kton = 21-42 PJ
Logistieke hub Goederenvervoer	Binnenvaart 25-60 kton Rangeerloc's 3 kton 2.000-3.000 trucks 11-17 kton	40-80 kton = 6-11 PJ
Overig Vervoer	60.000-120.000 auto's 14-28 kton 13.000-26.000 bestelbussen 9-18 kton 340-680 bussen 2-4 kton Vuilniswagens, visserij, etc. 5-10 kton	30-60 kton = 4-8 PJ
Elektriciteit	1.000-1.500 MW nieuwe STEG-centrale 210-315 kton Bijstook in gasturbine-WKK (elektriciteit en stoom) 65-85 kton	275-400 kton = 39-56 PJ
Warmte Glastuinbouw Gebouwde Omgeving	Goeree-Overflakkee 10.000-20.000 woningen + gebouwen 5-10 kton Oude binnensteden 12.500-25.000 woningen + gebouwen 5-10 kton 20% piekvraag warmerotonde (glastuinbouw + geb. omgeving) 6-11 kton Glastuinbouw brandstofcel-warmtepomp 4-9 kton	20-40 kton 3-6 PJ
Waterstof Export	LH ₂ , vloeibare waterstof Ammoniak MCH (H ₂ +tolueen)	340-660 kton = 48-93 PJ

Figuur 8: Waterstofvraag Zuid-Holland 2030

Door deze inzetbaarheid kan waterstof in alle energiemarkten een rol spelen en de kosten van de elektriciteitsinfrastructuur beperken. De totale geraamde marktpotentie is aanzienlijk (Figuur 8)³.

Raffinaderijen en chemie

Zuid-Holland biedt ruimte aan het grootste cluster fossiele industrie van Nederland. Het cluster is in hoge mate geïntegreerd en dat biedt voordelen, maar ook bedreigingen als het evenwicht verloren gaat. Grote hoeveelheden fossiele energieproducten worden ingevoerd (olie, kolen en LNG) en in het havengebied zijn 5 olieraffinaderijen, 45 chemische bedrijven, alsmede 5 biobrandstoffabrieken gevestigd. Dit (petro)chemische cluster staat niet op zichzelf, maar vormt samen met raffinaderijen in Vlissingen, Antwerpen, Gelsenkirchen en Keulen één van de drie grootste brandstofhubs in de wereld.

De komende jaren is de grote uitdaging voor deze industrie de decarbonisatie. Klimaatneutrale waterstof speelt hierin een onmisbare rol. Niet alleen de huidige toepassing van waterstof moet CO₂-arm worden, maar ook de warmtevraag van chemische processen kan met behulp van waterstof klimaatneutraal worden gemaakt.

Gebruik als grondstof

De helft van de totale Nederlandse waterstof wordt in Rotterdam geconsumeerd en geproduceerd, vooral uit aardgas. De chloorproductie vormt ook een bron voor waterstof omdat hierbij waterstof als restproduct ontstaat. Raffinaderijen gebruiken waterstof als grondstof in hun raffinageproces en zijn verantwoordelijk voor het grootste deel van de bestaande waterstofvraag in Zuid-Holland. Van het verbruik is 10% voor de productie van biobrandstoffen. In totaal gaat het om zo'n 400 kton (56 PJ). Uitbreiding van de raffinageproductiecapaciteit en de benodigde waterstof hiervoor is voorzien.

Naast uitbreiding van het gebruik in raffinaderijen vormt een nieuwe methanolfabriek (Waste Management World, 2018) in het HIC onderdeel van die extra vraag (zie Figuur 9). Air Liquide, Nouryon (het vroegere AkzoNobel Specialty Chemicals), het Canadese Enerkem en het Havenbedrijf Rotterdam bereiden momenteel de bouw voor. In die fabriek zal 360.000 ton afval (plastic, rubber en afvalhout) met de inzet van waterstof en zuurstof worden omgezet in 220.000 ton methanol, een belangrijke chemische bouwsteen. Dit bespaart de uitstoot van 300.000 ton CO₂ per jaar.

In aanvulling op dit gebruik is toepassing van waterstof mogelijk bij de productie van nieuwe synthetische producten en chemicaliën die nu gebaseerd zijn op fossiele koolwaterstoffen zoals olie en aardgas (nieuwe chemie en groene ketens). De omvang van de toekomstige waterstofmarkt is door deze verschillende toepassingen sterk afhankelijk van de omvang van het industrieel complex en (petro)chemisch cluster. In totaal beslaat de verwachte additionele waterstofvraag voor gebruik als grondstof voor een breed spectrum aan producten in 2030 zo'n 50-150 kton (7-21 PJ).

Hogetemperatuurwarmte

Een andere nieuwe waterstofvraag komt voort uit de inzet van waterstof voor de warmtevraag in de industrie. Het H-vision project (H-vision, 2018) beoogt daarvoor blauwe waterstof te produceren. Deze blauwe waterstof moet in eerste instantie aardgas gaan vervangen dat wordt gebruikt voor het maken van hogetemperatuurwarmte in de ovens van raffinaderijen en in de chemische industrie in het Haven Industrieel Complex. Zowel aardgas als raffinagegas worden als grondstof bestudeerd voor de

³ Omrekening van kton naar PJ is gedaan op basis van de calorische bovenwaarde van waterstof (higher heating value) van 141 MJ/kg.

waterstofproductie. Het is moeilijk een goede inschatting te maken, maar in 2030 kan het gaan om zo'n 225-350 kton (32-50 PJ) waterstof.



Figuur 9: waste-to-chemistry proces (Akzo-Nobel, 2018)

Bunkerbrandstoffen

Bunkerbrandstoffen worden door zeeschepen en vliegtuigen in Nederland getankt, maar niet in Nederland verbruikt. Om deze reden worden de CO₂-emissies van deze bunkerbrandstoffen niet aan Nederland toegerekend, en ontbreekt deze markt veelal in overzichten van de Nederlandse energievraag. Het gaat om een substantiële hoeveelheid: zo'n 685 PJ per jaar – bijna anderhalf maal zoveel als het binnenlandse brandstofgebruik voor vervoer (ca. 495 PJ per jaar).

Rotterdam is de grootste bunkerbrandstofhaven voor zeeschepen in Europa en staat in de top 3 van de wereld. In 2017 werd in Nederland zo'n 14 miljoen m³ brandstof, ofwel 500 PJ per jaar, aan schepen geleverd. Rotterdam nam hiervan 400 PJ voor zijn rekening. Dit betreft voornamelijk HFO (Heavy Fuel Oil), al zijn LNG en biobrandstoffen in opkomst.

Zeevaart

In 2018 is er door de International Maritime Organization (IMO) een verdrag getekend, waarbij de zeescheepvaart in 2050 haar CO₂-emissies met de helft dient te reduceren ten opzichte van 2008. Waterstof in gasvorm is daarvoor niet geschikt, omdat het te weinig energie per volume-eenheid bezit. Vloeibare waterstof kan een optie zijn, maar ook ammoniak en synthetische brandstoffen geproduceerd uit klimaatneutrale waterstof. Ammoniak en synthetische brandstoffen kunnen direct in dieselmotoren worden gebruikt, en vloeibare waterstof in energiezuinige brandstofcellen die elektrische motoren aandrijven. De Rotterdamse haven zou net als bij de introductie van LNG als bunkerbrandstof, een voortrekkersrol kunnen innemen bij de introductie van waterstof voor de productie van

bunkerbrandstoffen. Een doelstelling om in 2030 2,5-5% van de bunkerbrandstoffen voor de scheepvaart te baseren op waterstof, 75-150 kton (10,5-21 PJ) past bij die voortrekkersrol.

Luchtvaart

In de haven produceren de raffinaderijen kerosine voor de luchtvaart. Een pijpleidingensysteem van Defensie vervoert die vanaf Rotterdam naar diverse luchthavens in Nederland en naar het buitenland. Het gaat om zo'n 4,5 miljard liter kerosine (163 PJ), waarvan zo'n 2 miljard liter (75 PJ) bestemd is voor Schiphol (Bode, 2016). Kerosine kan ook worden geproduceerd uit waterstof en CO₂. Een studie uit maart 2018 (Terwell, March 2018) laat zien dat synthetische kerosine met CO₂ van Tata Steel en waterstof geproduceerd uit offshore wind, onder bepaalde condities, zou kunnen concurreren met fossiele kerosine. Productie van synthetische kerosine met fossiele of zelfs groene CO₂ en groene waterstof in de Rotterdamse haven lijkt dan mogelijk. Als de ambitie is om bij te dragen aan een duurzame luchtvaart, zou een doelstelling voor 2030 kunnen zijn om 5%-10% volledig groene kerosine te produceren. Hiervoor is 75-150 kton (17,5-35 PJ) groene waterstof nodig.

Logistieke hub voor goederenvervoer

De logistieke hub voor het goederenvervoer met verbindingen over water, spoor en weg in en vanaf het havengebied naar het achterland is belangrijk voor het functioneren van de haven en het vervoer van goederen naar het achterland. Het havengebied is goed ontsloten via vaarwegen, een goederenrailverbinding en goederencorridors over de snelweg en in het havengebied kunnen containers en bulkmateriaal worden overgeladen van zee naar binnenlands transport. In 2017 werd vanuit het Rotterdamse havengebied 208 miljoen ton goederen vervoerd per binnenvaartschip, trein of vrachtauto. Dit is ruim een kwart van de totale goederenstroom in Nederland. Vanuit het havengebied wordt zo'n 55% van de goederenstroom vervoerd per binnenvaartschip, 37% per vrachtauto en 8% per trein (TransportOnline, 2018).

Op- en overslag

Op de containerterminals, op- en overslagterminals en in distributiecentra rijden vele voertuigen en vorkheftrucks rond. Deze voertuigen en vorkheftrucks zijn goed te elektrificeren via gebruik van een brandstofcel op waterstof (zie Figuur 10).



Figuur 10: Toyota H₂-Vorkheftruck, AGV van VDL bij ECT

Binnenvaart

De binnenvaart bunkert een groot deel van haar brandstoffen in het havengebied van Zuid-Holland. Naar schatting gaat het om zo'n 34 PJ (BureauVoorlichtingBinnenvaart, 2018) aan brandstof, voornamelijk diesel. In de Nederlandse energiestatistiek is voor 2017 maar 12,7 PJ (CBS) opgenomen voor het gebruik van de binnenvaart. Dit betreft alleen het verbruik in Nederland. Ook voor de binnenvaart is het havengebied dus leverancier van bunkerbrandstoffen voor vervoer in het buitenland.

De sector onderzoekt of waterstof en brandstofcellen een optie zijn voor een schone binnenvaart. Inmiddels zijn er diverse initiatieven om binnenvaartschepen om te bouwen naar voortstuwing via waterstof en een brandstofcel. Als een proactief beleid wordt gevoerd, in afstemming met de centrale commissie voor de Rijnvaart, zou in 2030 zo'n 10-25% van het volume dat gebunkerd wordt, kunnen zijn vervangen door waterstof. Dit gaat om zo'n 25-60 kton (3,4-8,5 PJ).

Binnenvaart

Future Proof Shipping (FutureProofShipping, 2018) gaat in 2019 een binnenvaartschip ombouwen naar waterstof-brandstofcel-elektrisch varen. Waterstof wordt gebunkerd, door containerracks met waterstof-tubes op het schip te hijsen. Het schip gaat 3 keer per week varen tussen Rotterdam en Antwerpen en gebruikt voor een retourtje zo'n 1.000 kg waterstof. Drijvende kracht achter deze ontwikkeling zijn bedrijven die hun producten op een schone manier vervoerd willen hebben en bereid zijn daarvoor iets meer te betalen.

Spoor

Het goederenvervoer per spoor is in Nederland voor het overgrote deel geëlektrificeerd, maar niet in het buitenland. Daarnaast zijn de rangeerlocomotieven op de grote overslagrangeerterreinen, zoals in Kijfhoek, allemaal dieselelektrische treinen (zie Figuur 11). Vervanging voor 2030 van al deze rangeerlocomotieven op diesel door locomotieven met een brandstofcelaandrijving op waterstof is mogelijk. Deze locomotieven gebruiken dan naar schatting 3 kton waterstof (0,4 PJ).



Figuur 11: Rangeeremplacement Kijfhoek, Zwijndrecht

Een brandstofcelelektrische trein kan waarschijnlijk ook de dieselelektrische treinen in het personenvervoer vervangen. In Noord-Duitsland vindt er nu een test plaats met een trein voor personenvervoer. In Noord-Nederland zal naar verwachting volgend jaar zo'n test gaan plaatsvinden.

Wegvervoer

Per vrachtwagen wordt vanuit het havengebied zo'n 77 miljoen ton aan goederen vervoerd. Een groot deel, 40% van de goederen die de haven per vrachtwagen verlaten, blijft in de regio Rotterdam. De helft is bestemd voor de Nederlandse markt en slechts 10% van het wegtransport vanuit Rotterdam gaat de grens over. Ook de glastuinbouw transporteert veel producten per vrachtwagen.

Recent zijn er in de Verenigde Staten en in Zwitserland ieder 1.000 waterstofbrandstofcelvrachtwagens besteld. In Zwitserland is de business rationale voor deze bestelling het significante financiële voordeel als gevolg van de heffingsvrijstelling ten opzichte van vrachtwagens die op diesel rijden. Met een vergelijkbaar beleid zou in Zuid-Holland een impuls aan elektrisch vrachtvervoer kunnen worden gegeven. Stimulering van het gebruik van zero-emissie vrachtwagens, op brandstofcel of batterij, kan de uitstoot van CO₂, NO_x en fijnstof beperken.

Gebruik van een brandstofcel zal voor langereafstandtransport dan de voorkeur hebben. Verondersteld is dat in 2030 zo'n 2.000-3.000 vrachtwagens op waterstof zullen rijden, die zo'n 11-17 kton (1,5-2,3 PJ) waterstof verbruiken.

Overig vervoer

Naast de logistieke hub met het goederenvervoer is er ook ander vervoer dat op waterstof kan rijden, zoals personenauto's, bestelbusjes, vrachtwagens, bussen, vuilniswagens, tractoren, vissersboten, rondvaartboten, watertaxi's, pleziervaart, etc. In de toekomst zullen mogelijk drones op waterstof vliegen. In Zuid-Holland rijdt ongeveer 20% van alle auto's, bussen, en taxi's van Nederland rond.

Rijkswaterstaat en het Ministerie van I&W hebben waterstofbrandstofcelelektrische auto's aangeschaft. En in het openbaar vervoer in Zuid-Holland zijn diverse initiatieven om bussen en taxi's op waterstof te laten rijden. Zo zijn er in Rotterdam sinds 2017 2 bussen op waterstof. Hier zullen in 2019 20 bussen aan worden toegevoegd. Gemeenten en gemeentelijke diensten onderzoeken bovendien of waterstof een optie is voor hun wagenpark van vuilniswagens, veegwagens, wagens voor groen-, wegen- en infrastructuuronderhoud. De Roteb is één van deze partijen.

In Zuidholland zijn op Goeree-Overflakkee en in Katwijk visserijvloten aanwezig. Op Goeree-Overflakkee wordt onderzocht of de visserijvloot op waterstof kan varen.

Het H₂-platform heeft een drietal scenario's ontwikkeld voor het aantal auto's, bestelauto's, bussen en vrachtwagens dat in 2030 op waterstof in Nederland rijdt. Als we aannemen dat Zuid-Holland niet afwijkt van het beeld in deze scenario's, dan zullen er in 2030 tussen de 60.000 en 120.000 auto's, 13.000-26.000 bestelbussen en 340-680 bussen rondrijden. Dit leidt tot een verbruik van 25-50 kton (3,5-7 PJ) waterstof. Samen met het waterstofverbruik voor visserijboten, vuilniswagens, etc. komt de vraag naar waterstof voor vervoer in totaal op zo'n 30-60 kton (4-8 PJ).

Elektriciteitsproductie

In het Rotterdamse havengebied (Maasvlakte, Europoort, Botlek, Pernis) staat in totaal zo'n 6.500 MW elektriciteitsproductievermogen opgesteld (Rotterdam, February 2016). Het vermogen van de kolencentrales op de Maasvlakte bedraagt zo'n 3.000 MW. Verspreid door het havengebied staat zo'n 3.000 MW vermogen aan gascentrales. Ruim 600 MW hiervan betreft industriële warmtekrachtcentrales, die bovenop elektriciteit ook hogetemperatuurstoom produceren. De AVR heeft een afvalverbrander (105 MWe) en biomassacentrale (20 MW) staan, die beide warmte leveren aan het warmtenet. Daarnaast is en wordt in het havengebied een groeiend aantal windturbines geplaatst. In 2020 zal hier zo'n 300 MW aan windvermogen zijn opgesteld.

Het streven voor de provincie Zuid-Holland in zijn geheel is een opgesteld windvermogen van 735,5 MW in 2030, waarbij in aanvulling op het havengebied, vooral op het eiland Goeree-Overflakkee in 2030 minimaal 225 MW aan windvermogen staat.

Naast de elektriciteitsproductie in het havengebied staat in Dordrecht een afvalverbrandingsinstallatie van 32 MWe (Platform Industriële Warmte, 2014), die ook warmte levert aan het warmtenet in Dordrecht. In Rotterdam, Den Haag en Leiden leveren warmtekrachtcentrales (WKC) gestookt op gas in totaal 470 MWe aan elektrisch vermogen en zo'n 6 PJ warmte aan de lokale warmtenetten. In het glastuinbouwgebied van Zuid-Holland staat bij tuinders naar schatting 1.300 MW (BlueTerra, 2018) aan warmtekrachtvermogen opgesteld, gestookt op gas.

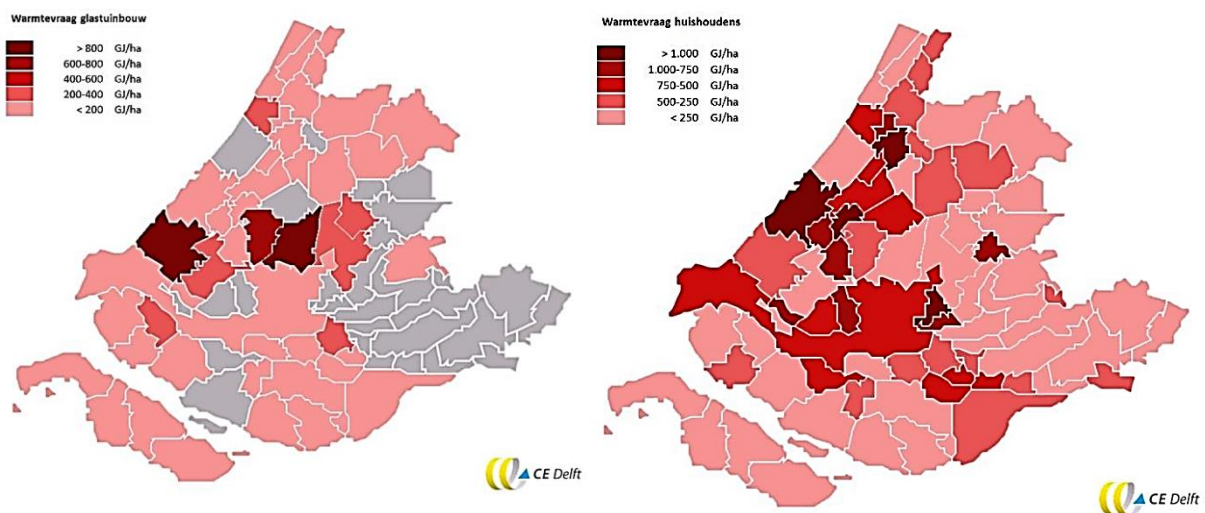
Het beleid is om de kolencentrales uiterlijk in 2030 te sluiten. De elektriciteit van met name offshore wind, zal deze kolenstroom moeten gaan vervangen. De grote gasgestookte centrales zullen ook een deel van de basislast moeten gaan produceren. De flexibiliteit zal vanuit het opgestelde warmtekrachtvermogen moeten worden geleverd. Dit kan onvoldoende zijn door de toename van het aandeel van wind- en zon in de elektriciteitsopwekking en de toenemende elektrificering. Het vraagt nader onderzoek, maar het lijkt verstandig om een nieuwe stoom- en gasturbinecentrale (STEG), volledig gestookt op waterstof, te bouwen. Deze kan ingezet worden als een flexibele centrale die de fluctuaties in vraag en aanbod opvangt om zo altijd aan de elektriciteitsvraag te kunnen voldoen. In 2030 kan er ruimte zijn voor een STEG-centrale, met als eerste inschatting 1.000-1.500 MWe en een bedrijfstijd van 5.000 uur. Dit betekent 210-315 kton (30-45 PJ) waterstof.

Aardgascentrales, gasturbines en STEG-centrales, zijn in principe om te bouwen voor het gebruik van waterstof in plaats van aardgas. In de Eemshaven zijn er plannen om daar een van de eenheden van de Magnum STEG-centrale hiervoor volledig om te bouwen. Dit betreft een relatief nieuwe centrale, waarbij de gasturbines al geschikt zijn voor het gebruik van 100% waterstof. Niet bij alle gasturbines is een dergelijke omschakeling eenvoudig te realiseren. Tegen geringe kosten is het tot zo'n 30% bijmengen van waterstof in het aardgas bij diverse typen gasturbines wel eenvoudig mogelijk. Daarvoor moeten enkel een andere brander en brandermanagementsysteem worden geïnstalleerd. Een aantal gasturbineleveranciers leveren deze al (Ansaldo Energia, 2018) (Goldmeer, 2018).

De gasgestookte centrales die hiervoor in aanmerking komen, zijn de industriële gasturbines in het havengebied, die zowel elektriciteit als hogetemperatuurstoom leveren. In 2030 zou zo'n 300-400 MWe aangepast kunnen worden voor tot 30% bijmenging van waterstof. Deze centrales draaien zoveel mogelijk op vollast, en verbruiken dan 65-85 kton (9,2-12 PJ).

Warmte voor glastuinbouw en gebouwde omgeving.

In Zuid-Holland bevinden zich 3 van de 6 nationale greenports: West-Holland, Duin- en Bollenstreek en Boskoop. Daarnaast ligt er nog één greenport gedeeltelijk in Zuid-Holland, de greenport Aalsmeer. Deze greenports hebben een toegevoegde waarde en werkgelegenheid vergelijkbaar met de haven van Rotterdam. Het totale oppervlak glas in Zuid-Holland was in 2017 4.535 hectare, de helft van alle glastuinbouw in Nederland (Statline, 2019). De glastuinbouw in de provincie is grootverbruiker van aardgas en gebruikt zo'n 50 PJ voor elektriciteit en warmteproductie, 12% van de totale energievraag in Zuid-Holland en zorgt voor een uitstoot van 2,8 Mton CO₂ (Smit, 2017). Door de nabijheid van de haven gebruikt een aanzienlijk deel van de kassen ter bevordering van de groei CO₂ uit het havengebied die via de OCAP-pijpleiding wordt aangeleverd. Het kassengebied concentreert zich in het Westland en Oostland, tussen Rotterdam, Den Haag en Zoetermeer. Daar is dan ook een grote warmtevraagdichtheid (zie Figuur 12).



Figuur 12: Warmtevraagdichtheid glastuinbouw en gebouwde omgeving (CE Delft, 2014)

De provincie is dichtbevolkt, met 3,65 miljoen mensen op een totaal oppervlak van 3.400 km², waarvan 600 km² water. De bevolkingsdichtheid is 1.780 mensen per vierkante kilometer op land (OOZO, n.d.). Deze bevolkingsdichtheid is een factor 2-3 hoger dan het Nederlandse gemiddelde.

In totaal zijn er in Zuid-Holland rond de 1,7 miljoen woningen, 21% van de Nederlandse woningvoorraad (Staat van Zuid-Holland, n.d.). Het totale oppervlak van de dienstensector (kantoren, scholen, winkels, etc.) wordt ingeschat op 20% van het Nederlandse volume, en bedraagt zo'n 114 miljoen vierkante meter. Een concentratie van woningen en gebouwen ligt in een gebied tussen de Drechtsteden, Rotterdam, Delft, Den Haag en Leiden. In deze gebieden is er dan ook een grote warmtevraagdichtheid (zie Figuur 12). De totale warmtevraag voor de gebouwde omgeving in Zuid-Holland bedroeg 82 PJ in 2016 (Klimaatmonitor).

Alternatieven

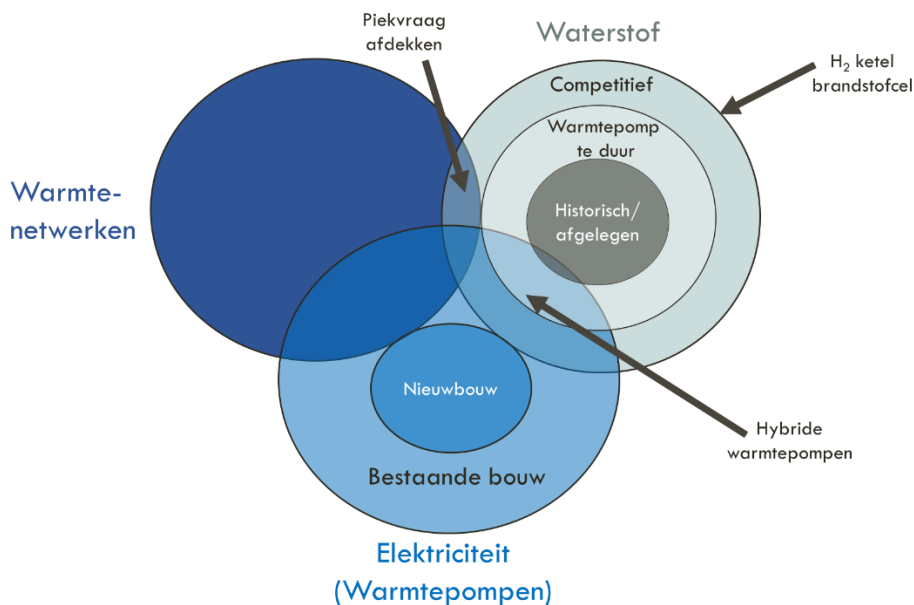
Om de warmtevraag in de gebouwde omgeving te verduurzamen, zijn nu vooral *all-electric* warmtepompen en aansluiting op warmtenetten in beeld. Het is de vraag of deze oplossingen voor alle gebieden aantrekkelijk en bruikbaar zijn. Voor de buitengebieden, voor dorpen met veel oude woningen en voor de binnensteden lijkt een overgang van aardgas naar waterstof een snellere en meer betaalbare oplossing. Dit komt, doordat netbeheerders het bestaande aardgasnet na enkele kleine aanpassingen kunnen hergebruiken en er geen verzwaring van het elektriciteitsnet nodig is, en geen warmtenet moet worden aangelegd. In de woning of het gebouw moeten alleen de bestaande cv-ketel en de gasmeter worden vervangen.

Primeur met verwarming van woningen op 100% waterstof (Rozenburg, 11-10-2018)

In de Rotterdamse deelgemeente Rozenburg start een proef om woningen te verwarmen met 100% waterstof. Dat hebben de bedrijven Bekaert Heating, Remeha, DNV GL, gemeente Rotterdam, woningstichting Ressorst Wonen en netbeheerder Stedin afgesproken. De proef is een primeur, want nog niet eerder zijn in Nederland huizen verwarmd met HR-ketels op pure waterstof. De betrokken partijen willen dit daarom samen met de bewoners in de praktijk gaan ervaren. Volgens de partners kan de technologie in dit project een bijdrage leveren aan de klimaatdoelstellingen. Bij de verbranding van waterstofgas komt, in tegenstelling tot aardgas, geen CO₂ vrij. De proef gaat begin 2019 van start en is in het najaar van 2018 voorbereid.

De proef met waterstof is een voortzetting op het bestaande Power2Gas project in Rozenburg. Tot nu toe werd hier synthetisch aardgas geproduceerd voor de verwarming van een appartementencomplex van Ressorst Wonen. Vanaf begin 2019 wordt lokaal waterstof geproduceerd met groene stroom en via een separaat gasnet van Stedin getransporteerd naar het ketelhuis van het appartementencomplex. Zowel een ketel van Bekaert Heating als van Remeha verwarmen vervolgens een deel van de woningen.

Naast cv-ketels op 100% waterstof zijn daarvoor ook hybride oplossingen interessant. Een combinatie van een warmtepomp en cv-ketel op waterstof vervangt dan de huidige cv-ketel. De cv-ketel zorgt vooral voor de warmtepiekvraag in de winter, de warmtepomp voor de basisvraag. De warmtepomp kan dan veel kleiner zijn, waardoor ook de verzwaring van het elektriciteitsnet wordt beperkt. Door de cv-ketel zijn de eisen aan woningisolatie minder streng en zijn er ook geen lagetemperatuurverwarmingssystemen nodig. Dit maakt de aanpassingen aan de woningen minder kostbaar. Hybride systemen, waarbij de cv-ketel nu nog aardgasgestookt is, kunnen voor veel gebouwen een aantrekkelijk kortetermijnperspectief bieden, zeker als dat in combinatie kan met een 'waterstof-ready' cv-ketel (zie Figuur 13).



Figuur 13: Elektriciteit, warmte en waterstof kunnen ieder op zich, maar vooral ook in combinaties, de meest economische optie zijn voor de warmtevoorziening

Goeree-Overflakkee: Energy Island

Op 8 december 2017 heeft de feestelijke ondertekening plaatsgevonden van het Convenant Groene Waterstofeconomie Zuid-Holland: proeftuin Energy Island Goeree-Overflakkee (Convenant H2G-O). Goeree-Overflakkee zal in 2020 energieneutraal zijn, en daarna meer duurzame energie uit wind, zon en mogelijk getijde-energie produceren als wat het eiland zelf gebruikt. Die overproductie kan voor waterstof worden gebruikt, en additionele verzwaaring van het elektriciteitsnet voorkomen. Het convenant voorziet in een structuur en cofinanciering voor -inmiddels 7- projecten om waterstofproductie en gebruik te verbinden met duurzame elektriciteitsopwekking en verbindt daarvoor tientallen partijen. Het is de bedoeling de hele groene waterstofketen te dekken van productie/conversie via regionale distributie ('waterstofronde') tot toepassingen in het wegverkeer, de scheepvaart (visserij), grondstofproductie (ammoniak) en lage-temperatuurverwarming van de gebouwde omgeving, met Stad aan 't Haringvliet als eerste pilot- en demonstratiegebied. Goeree Overflakkee heeft de intentie zich daarmee te ontwikkelen tot een belangrijke Nederlandse proeftuin en demonstratiegebied voor de inzet van waterstof in de energietransitie.

Waterstofvraag cv-ketels

Het dunbevolkte Goeree-Overflakkee met ruim 21.000 woningen en ruim 4.300 bedrijfsvestigingen (Alle cijfers - gemeente-overzicht , n.d.) is zo'n gebied waar warmtenetten en *all-electric* warmtepompen geen aantrekkelijke oplossing vormen. Voor de bijna 600 woningen in Stad aan 't Haringvliet wordt nu onderzocht hoe een overstap naar waterstof te maken is. Dit moet een eerste fase vormen om de gasleidingen van Goeree-Overflakkee volledig over te gaan zetten op waterstof. Hiermee kunnen alle woningen en gebouwen overstappen op hybride systemen of cv-ketels op waterstof. Daarnaast kan

worden gekozen voor een volledig elektrische oplossing. Als in 2030 50-100% van de gebouwde omgeving waterstof voor de verwarming gebruikt, gaat het om een vraag van 5-10 kton (0,7-1,4 PJ). In de oude binnensteden van Den Haag, Leiden, Delft, Dordrecht en Gouda staan een kleine 40.000 woningen en een aantal historische gebouwen met een totale warmtevraag van circa 2,6 PJ. Er is onderzoek nodig hoe en met welke fasering deze oude binnensteden een overstap naar waterstof kunnen maken. Een doelstelling zou kunnen zijn, om in 2030 een kwart tot de helft van deze woningen en gebouwen op waterstof te hebben overgezet. Als verondersteld wordt dat driekwart met een waterstof cv-ketel en één kwart met een hybride warmtepomp-cv-ketel wordt uitgerust, betekent dat een waterstofvraag van 5-10 kton (0,7-1,4 PJ).

Waterstofvraag warmtenetten

Op diverse plaatsen in Zuid-Holland worden warmtenetten gebruikt: in Rotterdam, Den Haag, Ypenburg, Dordrecht, Leiden en Zoetermeer. Het idee is om deze warmtenetten te koppelen, uit te breiden en meer woningen en glastuinbouw aan te sluiten. Dit integrale warmtenet zou gevoed moeten worden met restwarmte uit de industrie in het havengebied, van de afvalcentrales en met aardwarmte. De Zuid-Hollandse 'warmtealliantie' werkt dit concept momenteel uit. Restwarmte wordt continu geleverd, dit is de zogenaamde basislast. Ook aardwarmte is het meest rendabel als het continu eenzelfde hoeveelheid warmte kan leveren. De warmtepiekvraag in de winter - naar schatting 20% van de totale warmtevraag - zou dan op een duurzame manier geleverd kunnen worden door waterstof, bijvoorbeeld via een brandstofcel-warmtepomp-combinatie. De brandstofcel levert elektriciteit en warmte, waarbij de elektriciteit ook gebruikt wordt om via een warmtepomp warmte te leveren. Een hoeveelheid waterstof van 1 PJ kan dan typisch 1,9 PJ warmte leveren, als we aannemen dat het elektrisch en thermisch rendement van de brandstofcel respectievelijk 50% en 40% zijn, en de warmtepomp een COP van 3 heeft.⁴

De warmtelevering met de warmterotonde zou in de richting kunnen gaan van 30 PJ per jaar in 2030, bestaande uit 18 PJ voor de glastuinbouw en 12 PJ aan woningen en gebouwen (350.000 aansluitingen) (CE Delft, 2016). Brandstofcelwarmtepompcombinaties zouden 10%-20% van deze warmte als piekvraag kunnen leveren via waterstof. Daarvoor is dan 6-11 kton (0,8-1,6 PJ) waterstof nodig.

Waterstofvraag glastuinbouw

In de glastuinbouw wordt op dit moment veel warmte geproduceerd door warmtekrachtinstallaties met gasmotoren in combinatie met gasgestookte ketels. Daar waar deze kassen niet worden aangesloten op een warmtenet, is overschakeling op waterstof een optie, mits er een waterstofnet aanwezig is. De gasmotor kan vervangen worden door een combinatie van een brandstofcel en warmtepomp. De brandstofcel produceert warmte en elektriciteit, waarbij de elektriciteit naar de warmtepomp gaat. Overigens moet de CO₂-levering aan kassen die overstappen op een duurzame warmtevoorziening wel zeker gesteld worden. De bestaande OCAP-leiding kan dit verzorgen, al is het huidige aanbod van CO₂ nog te gering (OCAP-website, n.d.). Als we aannemen dat in 2030 5-10% van de kassen zelf warmte produceert met waterstof, geeft dat na energiebesparingsmaatregelen een warmtevraag van ongeveer 1,5-3 PJ, waarvoor bij gebruik van een brandstofcel/warmtepomp combinatie (met een COP van 4) 4-9 kton (0,6-1,3 PJ) waterstof nodig is (Dijkshoorn, 2019).

⁴ 1 kW elektriciteit geeft 3 kW warmte

In totaal wordt met bovenstaande aannames in 2030 20-40 kton (2,8-5,6 PJ) waterstof ingezet om 4-9 PJ warmte te leveren. De piekwarmtevraag van de warmtenetten is 1,5-3 PJ, en de warmtevraag van de glastuinbouw en de gebouwde omgeving, waar direct met waterstof in wordt voorzien is respectievelijk 1,5-3 PJ en 1,3-2,6 PJ.

Export

Import van waterstof per schip is mogelijk in vloeibare vorm, in de vorm van ammoniak of gebonden aan een drager zoals MCH. Net als nu voor fossiele brandstoffen is het redelijk te veronderstellen dat Rotterdam z'n transitfunctie behoudt en dat veel van deze waterstof doorgevoerd en geëxporteerd gaat worden.

Vloeibare waterstof is geschikt om via tankwagens te vervoeren. Een deel van de Duitse tankstations zou vanuit Rotterdam bevoorrad kunnen worden. Veronderstel dat zo'n 5% van alle Duitse auto's op waterstof rijdt in 2030, 2,5 miljoen auto's, en vanuit Rotterdam 20% van de waterstof wordt geleverd, dan gaat dit om 100 kton waterstof. Met een aanvullende vraag voor andere vervoersmodaliteiten of vanuit andere landen, kan deze hoeveelheid eenvoudig verdubbelen.

Ammoniak kan via binnenvaartschip, trein en truck vervoerd worden naar het achterland en is bruikbaar voor vele toepassingen. Ammoniak kan weer gekraakt worden in waterstof en stikstof. Als ammoniak gedeeltelijk gekraakt wordt met de hitte van uitlaatgassen, kan een 30% waterstof - 70% ammoniakmengsel dienen als brandstof in verbrandingsmotoren van bijvoorbeeld schepen (Maritiemnederland, 2017). Verder kan ammoniak in de toekomst direct gebruikt worden in hogetemperatuurbrandstofcellen, zoals solid oxide brandstofcellen (SOFC) en alkaline brandstofcellen (AFC), die nog in ontwikkeling zijn. Een exportmarkt naar het achterland voor gebruik in de chemie, van zo'n 100-200 kton waterstof in de vorm van ammoniak is in 2030 voorstelbaar.

Waterstof gebonden aan toluen, MCH, kan als waterstofdrager worden gebruikt in de productie van chemische producten en synthetische brandstoffen, onder andere bij staalfabrieken en raffinaderijen. Export per olietanker van zo'n 100-200 kton waterstof in de vorm van MCH lijkt in 2030 mogelijk.

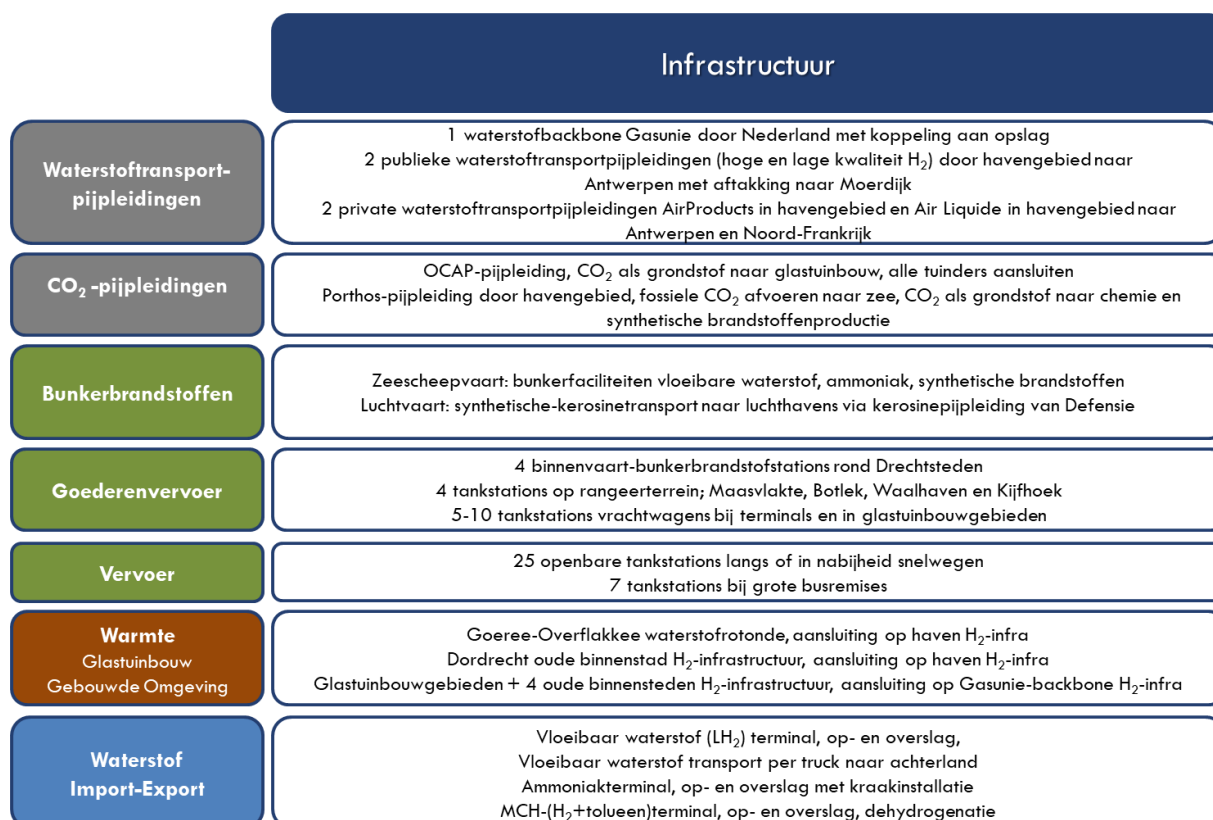
Import en export van waterstof is voor de economische ontwikkeling van de haven in de toekomst belangrijk. In welke vorm het bijbehorende transport, de ontvangst en de opslag gaat plaatsvinden is nog niet goed te voorspellen. Misschien dat één van de genoemde 3 opties dominant gaat worden. Dit vraagt nader onderzoek.

Het lijkt redelijk te veronderstellen dat een substantieel deel van de geïmporteerde waterstof ook weer wordt geëxporteerd. We veronderstellen de helft tot tweederde van het geïmporteerde volume. Met de aangenomen waterstofimport van 700-1.000 kton per jaar, komen we dan op een exportvolume van 340-660 kton (48-93 PJ) in de vorm van vloeibare waterstof, ammoniak en/of MCH.

INFRASTRUCTUUR VOOR WATERSTOF EN CO₂ IN ZUID-HOLLAND

Essentieel voor de ontwikkeling van een waterstofeconomie, is de ontwikkeling van een fysieke waterstofinfrastructuur. Zo'n infrastructuur omvat niet alleen pijpleidingen, maar ook opslag, tankstations en havenfaciliteiten (zie Figuur 14). Een belangrijke vraag is in hoeverre bestaande faciliteiten, zoals die voor aardgas, hiervoor zijn in te zetten.

Voor een nieuwe en duurzame waterstofeconomie is ook een CO₂-infrastructuur noodzakelijk om CO₂ als 'afval' te transporteren naar opslaglocaties onder de zeebodem en als 'grondstof' naar chemische bedrijven en naar de kassen ter bevordering van de gewasgroei.



Figuur 14: Waterstofinfrastructuur Zuid-Holland 2030

Waterstoftransport door pijpleidingen

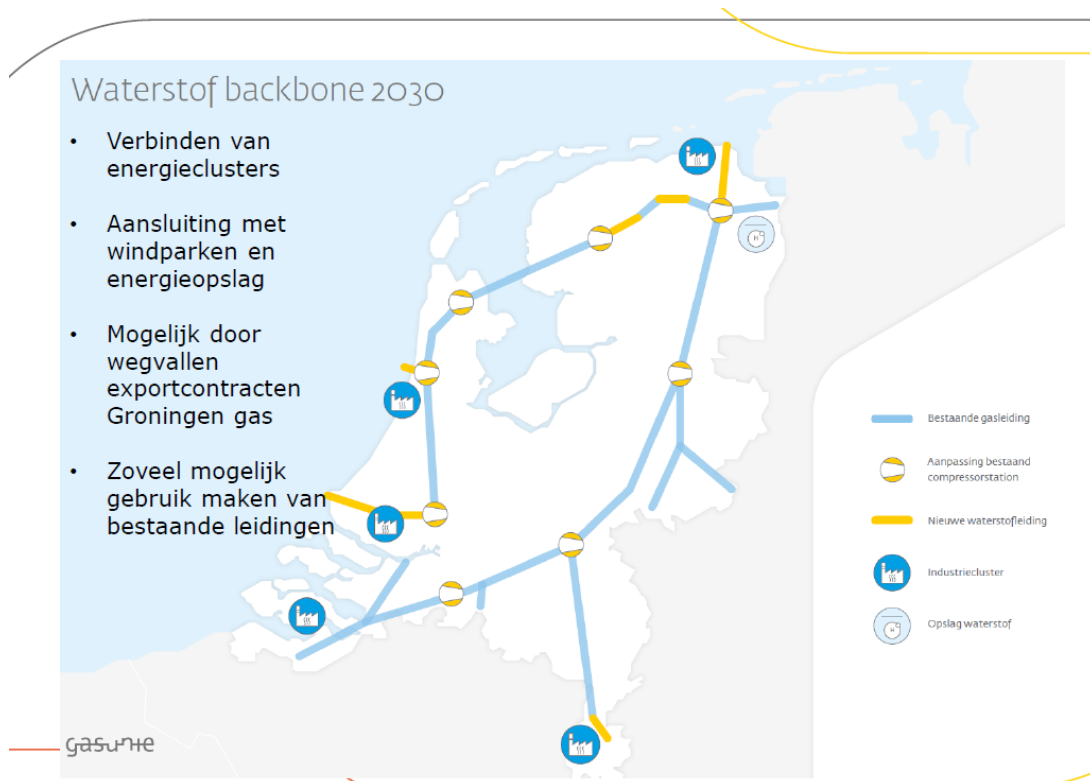
Pijpleidingen zijn uitermate geschikt om grote hoeveelheden energie in de vorm van moleculen over een vaste route te vervoeren. Waterstoftransport per pijplijn kan op verschillende schaalniveaus plaatsvinden: nationaal transport, tussen de Rotterdamse haven en het achterland, binnen de regio, en internationaal.

Nationale transportinfrastructuur

De Nederlandse aardgastransportinfrastructuur, -de hogedrukleidingen voor transport over grotere afstanden-, is goed toegerust om grote hoeveelheden gas te transporteren, ook wanneer de vraag in de winter piekt. Een deel van deze transportcapaciteit komt de komende jaren vrij doordat de gasproductie in Groningen in 2030 verdwenen zal zijn en de vraag naar gas vermindert vanwege besparingen en vervanging van gas door elektriciteit, met name voor laagtemperatuurverwarming. Het moet daarom mogelijk zijn een deel van deze aardgastransportleidingen geschikt te maken voor waterstoftransport en een ‘backbone’ voor waterstoftransport van Groningen naar IJmuiden, Rotterdam, Emmen, Geleen en Terneuzen, te bouwen met verbindingen naar het Ruhrgebied en Antwerpen. Gasunie heeft aangegeven deze backbone met een capaciteit van 10-15 GW voor nationaal waterstoftransport al voor 2030 te willen realiseren (Figuur 15). De kosten voor de ombouw schat Gasunie op 1,5 miljard euro (Gasunie Transportservices, 2018).

DNV-GL acht deze ombouw goed mogelijk en stelt in een recente studie (DNV-GL, 2017):

“Met betrekking tot de bestendigheid en veiligheid van het gebruik van het bestaande hogedruk gasnet van Gasunie wordt geconcludeerd dat dit gasnet goede mogelijkheden biedt voor transport van 100% waterstof.”



Figuur 15: Landelijke waterstofbackbone Gasunie

Voor het gebruik van waterstof in de glastuinbouw, bij industriële clusters en bij gebouwen en woningen voor verwarming, moet naast de gastransportinfrastructuur ook de gasdistributie-infrastructuur worden aangepast voor waterstof. De energiedistributiebedrijven hebben door KIWA (KIWA, 2018), onderzoek laten doen naar de technische geschiktheid van het huidige aardgasdistributienetwerk voor het vervoer van 100% waterstof. Ook hier is de conclusie dat ombouw zonder noemenswaardige problemen mogelijk is.

Een bijkomend voordeel is dat de capaciteit van het Nederlandse aardgasnetwerk ruim een factor 10 groter is dan die van het elektriciteitsnetwerk. Elektrificering van de huidige gasvraag zal tot een zeer forse uitbreiding van het elektriciteitsnet leiden, terwijl het bestaande gasnet onderbenut wordt. Het gebruik van waterstof kan zo grote investeringen in de elektriciteitsinfrastructuur beperken.

Transport en distributie vanuit havenindustriële complex

Transport van energie- en grondstofstromen via buisleidingen is economisch aantrekkelijker en veiliger dan transport over de weg of over het water, wanneer het om grote hoeveelheden gaat, die voor langere tijd over een vast traject vervoerd moeten worden. In Zuid-Holland is daarom een in de wereld unieke pijpleidingeninfrastructuur aanwezig, die transport binnen het HIC mogelijk maakt en het havengebied verbindt met afnemerslocaties in binnen- en buitenland. In een duurzame toekomst biedt deze infrastructuur competitieve voordelen voor Rotterdam als energie- en grondstoffenhub voor Noordwest-Europa.

Uniek is het Central Europe Pipeline System (CEPS) van de NAVO, voor brandstoftransport. Dit pijpleidingensysteem heeft een lengte van 5.300 km en loopt door Nederland, Duitsland, België, Luxemburg en Frankrijk. Het begint in het havengebied van Rotterdam en wordt beheerd door de Defensie Pijpleidingen Organisatie (DPO) (Bode, 2016), met het controlecentrum in Poortugaal, onder Rotterdam. Een gedeelte van het netwerk (550 km) is in gebruik voor commercieel kerosinetransport van Rotterdam naar diverse luchthavens in Nederland en in het buitenland (zie Figuur 16). Zo'n 500 km van het netwerk wordt niet meer actief gebruikt.

In 2018 is door AT Osborne en andere partijen verkend (AT Osborne, September 2018) of dit systeem andere energie- en grondstoffenstromen zou kunnen gaan vervoeren (zie Figuur 17). De conclusie is dat er misschien mogelijkheden zijn, maar dat verder onderzoek nodig is. Eventuele transportmogelijkheden van gasvormige waterstof, ammoniak, MCH en toluen, naar het achterland zouden hier onderdeel van kunnen zijn.

DPO Pijpleidingnetwerk



Figuur 16: Nederlandse defensiepijpleidingnetwerk



Figuur 17: Pijpleidingen vanaf Rotterdam voor transport van olie, olieproducten en gassen (AT Osborne, September 2018)

Van het havengebied lopen nu oliepijpleidingen naar Duitsland, België en Frankrijk en bevoorraden de raffinaderijen aldaar. Ethyleen- en propyleenpijpleidingen verzorgen de aanvoer voor de chemische industrie in Duitsland en België vanuit Rotterdam. En industriële gassen, waterstof, stikstof en zuurstof stromen van de haven door België naar Noord-Frankrijk. Daarnaast bestaan er lokale pijpleidingen, zoals de OCAP CO₂-pijpleiding naar het kassengebied, en een multicore pijpleidingensysteem in het havengebied in beheer bij het Havenbedrijf van Rotterdam dat diverse producten vervoert.

Deze leidingen zijn nu grotendeels in private handen. Dit geldt voor de twee bestaande waterstofpijpleidingen: één van Air Products in het Botlekgebied bij Rotterdam en één van Air Liquide die van het Botlekgebied via Antwerpen, met een aftakking naar Terneuzen, tot aan Duinkerken in Frankrijk loopt. Deze leidingen vervoeren waterstof die gebruikt wordt als grondstof naar een beperkt aantal bedrijven, voornamelijk raffinaderijen. Ze hebben een beperkte capaciteit, onvoldoende om de ontwikkeling van het gebruik van waterstof als energiedrager te accommoderen. Bovendien is het voor een waterstofeconomie gewenst dat alle partijen gelijkwaardige toegang krijgen tot waterstof, net zoals nu tot aardgas en elektriciteit. Een voor iedereen toegankelijke publieke waterstoftransportinfrastructuur is daarom voor de ontwikkeling van een waterstofeconomie noodzakelijk. Deze waterstofinfrastructuur loopt dan door de leidingenstraat van de Maasvlakte naar de Drechtsteden en Moerdijk en zou kunnen worden doorgetrokken naar Antwerpen. Dit leidingentracé van Rotterdam naar Antwerpen, met verbindingen naar Moerdijk en de havens van Zeeland is in beheer van Leidingstraat Nederland (LSNED). Uiteraard moet er een aansluiting op de landelijke backbone komen. Deze openbare pijpleiding voor

gasvormige waterstof zou dan ook door een publieke organisatie (Gasunie, Havenbedrijf, Provincie, Stedin) gerealiseerd moeten worden voor 2030.

Regionaal transport en distributie glastuinbouw en gebouwde omgeving

Naast de raffinaderijen en de chemische bedrijven die zijn geconcentreerd in het havengebied, is er ook een waterstofvraag in de glastuinbouw, de gebouwde omgeving en bij bedrijven die niet in het havengebied zijn gevestigd. Zonder waterstofaanvoer via een ringleiding, die deels kan bestaan uit omgebouwde aardgasleidingen, kan deze markt zich niet ontwikkelen.

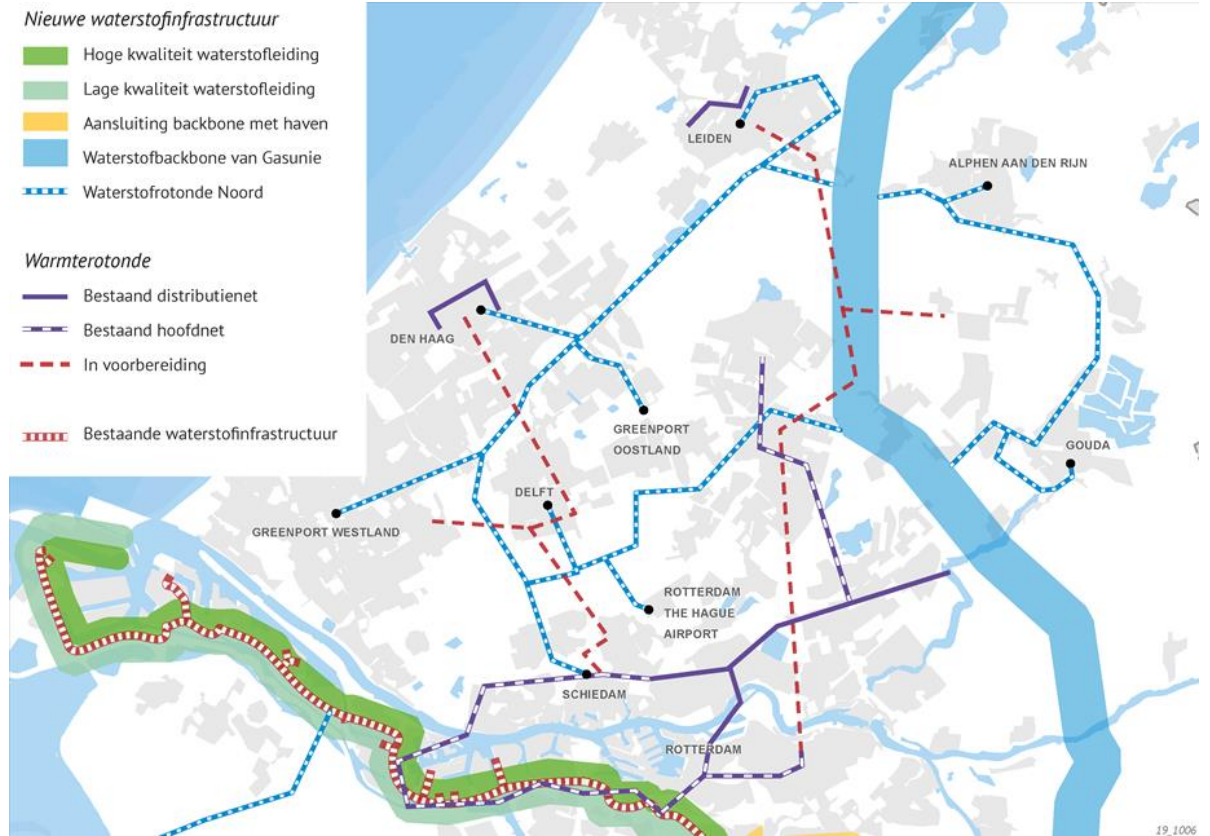
Voor Zuid-Holland zijn daarom een tweetal waterstofringnetten nodig: een ten zuiden van de Rotterdamse haven o.a. naar het eiland Goeree-Overflakkee en een ten noorden van de haven naar de glastuinbouwgebieden en omliggende steden en industrie. Vermoedelijk zijn er twee aparte leidingen met verschillende waterstofkwaliteiten gewenst per netwerk: een zeer zuivere kwaliteit, die door elektrolyzers geleverd wordt, en die gebruikt kan worden voor brandstofcellen, en een minder zuivere kwaliteit, afkomstig van aardgasreformers en biomassavergassing, die voldoende is voor verbrandingsprocessen (cv-ketels, ovens, gasturbines).

De 'zuidelijke waterstofinfrastructuur' krijgt verbindingen met Dordrecht, Moerdijk, Goeree-Overflakkee, Zeeland en sluit aan op de genoemde nationale waterstoftransportbackbone (zie Figuur 18 en Figuur 20). In het waterstofconvenant Goeree-Overflakkee, getekend in december 2017 (H2G-O, 2017), is afgesproken de haalbaarheid te onderzoeken van een waterstofpijpleiding aangesloten op de waterstofinfrastructuur in het havengebied, de zogenaamde waterstofrotonde. Deze 100% waterstofhoofdader loopt van Middelharnis naar het westen en oosten en wordt daar verbonden met de genoemde zuidelijke waterstofinfrastructuur. Deze waterstofrotonde verbindt woningen, gebouwen, bunkerpunten voor vissersboten en het 'vasteland' met de productielocaties. Eerste delen hiervan zouden rond 2025 gerealiseerd moeten zijn om Stad aan 't Haringvliet tijdig als eerste demonstratiegemeente van waterstof te kunnen voorzien. Voor 2030 kan een groot deel van de resterende aardgasaansluitingen op het eiland omgezet zijn naar waterstof.

Een tweede publieke waterstofringleiding de 'noordelijke waterstofinfrastructuur' zou de glastuinbouwgebieden Westland en Oostland, de industrie buiten het HIC, het vliegveld Rotterdam-Den Haag en de steden van Den Haag, Delft, Leiden en Gouda moeten aansluiten voor 2030 (zie Figuur 19 en Figuur 20). Deze ringleiding kan worden gekoppeld aan de landelijke waterstofbackbone en waar mogelijk, gebruik maken van de bestaande gasinfrastructuur van netbeheerders als Stedin en Alliander. De provincie zou hier samen met de netbeheerders het voortouw in kunnen nemen.



Figuur 18: Waterstofleidingnetwerk op Goeree-Overflakkee



Figuur 19: Waterstofringleiding en warmteronde



Legenda

Nieuwe waterstofinfrastructuur

- Hoge kwaliteit waterstofleiding
- Lage kwaliteit waterstofleiding
- Aansluiting backbone met haven
- Waterstofbackbone van Gasunie
- Waterstofrotonde Noord
- Waterstofrotonde
- Goeree-Overflakkee
- Bestaande waterstofinfrastructuur

Figuur 20: Bestaande en nieuwe waterstofleidingeninfrastructuur: noordelijke en zuidelijke waterstofnetwerk

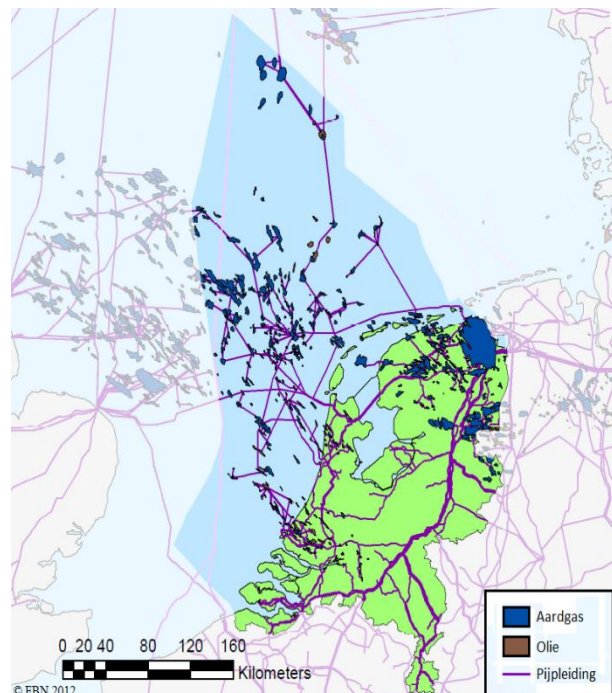
Waterstofpijpleidingeninfrastructuur buiten Nederland

Nieuwe offshore windparken bevinden zich op steeds grotere afstand van de kust. Vanwege deze afstand lijkt het financieel aantrekkelijk om een groot deel van de daar geproduceerde elektriciteit met elektrolyzers op een platform of een eiland om te zetten in waterstof, en die vervolgens via een waterstofpijpleidingennetwerk naar land te vervoeren. Immers, transport van waterstof door pijpleidingen is 10 tot 20 maal goedkoper dan elektriciteitstransport met elektriciteitskabels. Bestaande aardgaspijpleidingen kunnen een deel van de benodigde transportcapaciteit leveren, omdat veel gasproductievelden op de Noordzee bijna uitgeput zijn. Ombouw van deze bestaande leidingen met bijbehorende compressorinstallaties voor waterstoftransport is veel goedkoper, dan de aanleg van nieuwe leidingsystemen.

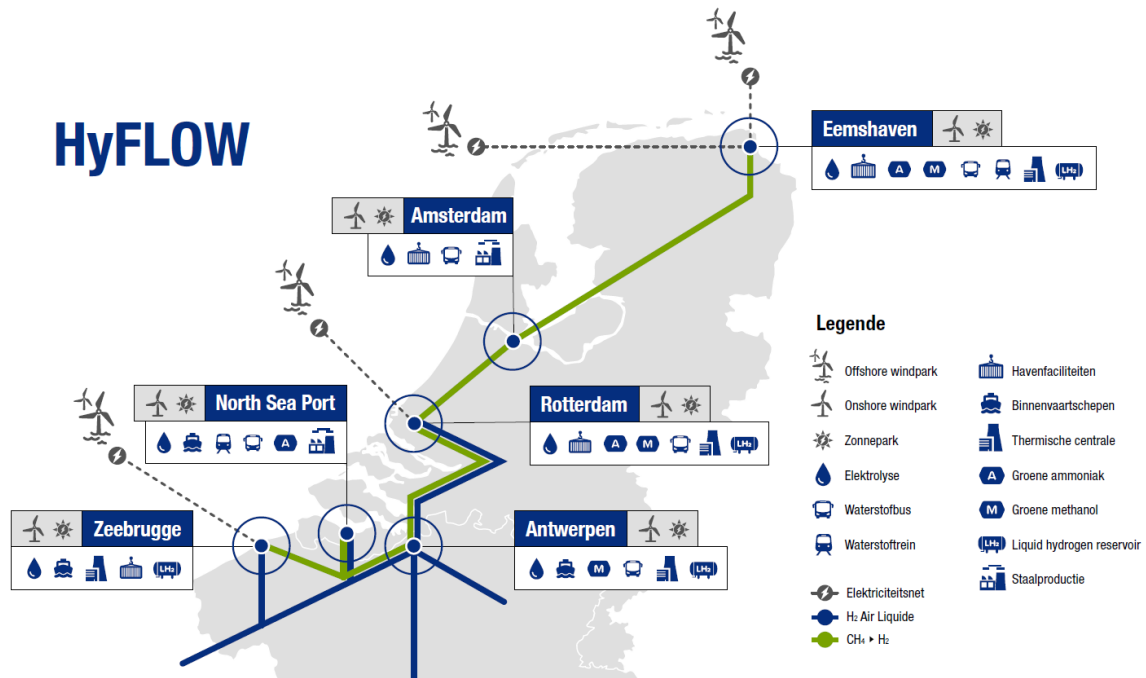
Bij de locatieselectie voor nieuwe offshore windparken, lijkt het verstandig te kijken naar de locatie van bestaande gaspijpleidingen en de mogelijkheden voor waterstoftransport. Analoog aan de organisatie van het gasnetwerk op de Noordzee, kan een grote verzamelleiding de waterstof van meerdere offshore windparken combineren en naar de kust vervoeren. In eerste instantie lijken de Noordgastransportleiding (NGT), die aanlandt in de Eemshaven, en de NOGAT-transportpijpleiding, die onder Den Helder aan land komt, hiervoor het meest geschikt (zie Figuur 21).

Op dezelfde wijze kan een deel van de elektriciteit op het voorgestelde verzameleiland van windenergie op de Doggersbank in de Noordzee worden omgezet in waterstof en via de bestaande NOGAT of NGT-pijpleidingstructuur naar land worden vervoerd. Waterstof die aanlandt in de Eemshaven of onder Den Helder kan via de waterstofbackbone van de Gasunie Zuid-Holland en het HIC bereiken.

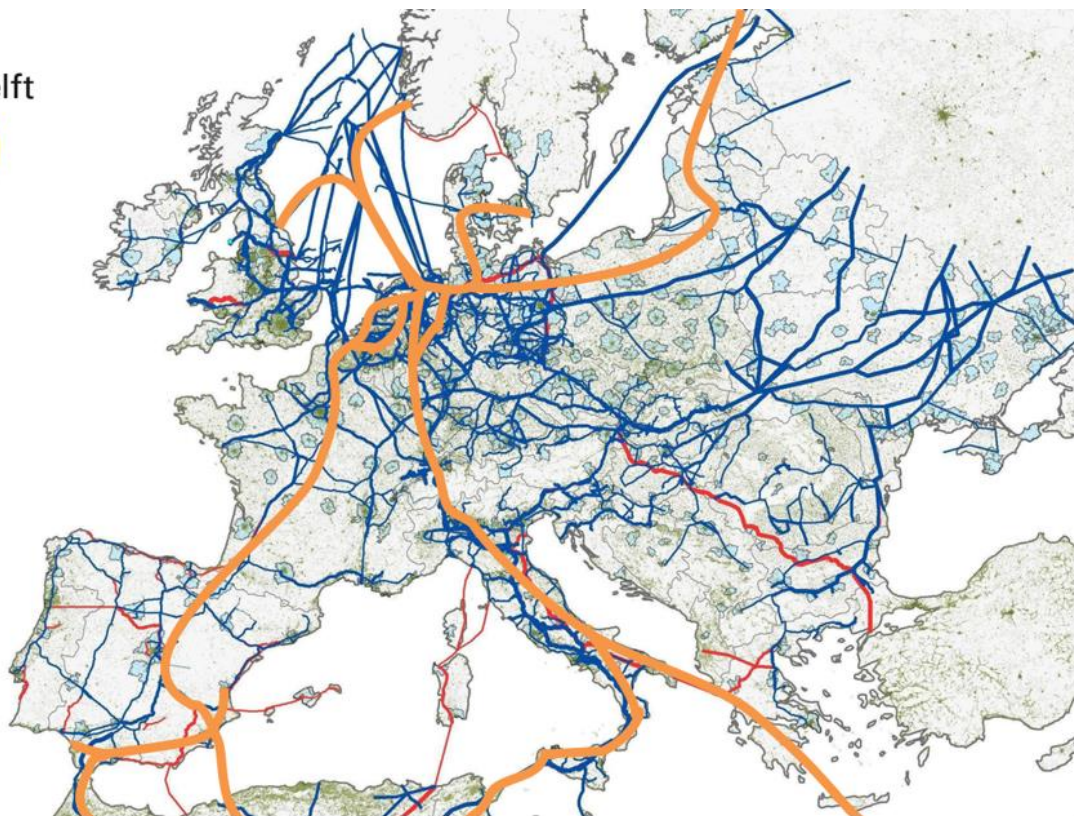
In het Hyflow-project, onderzoeken Vlaanderen, Noord-Nederland en Zuid-Holland gezamenlijk hoe een grensoverschrijdende waterstofbackbone vanaf de Eemshaven naar Zeebrugge gerealiseerd kan worden (zie Figuur 22). Dit kan een eerste fase zijn in de vorming van een grootschalige waterstofinfrastructuur langs de Noordzeekust, van Denemarken over Duitsland, Nederland, België naar Frankrijk. Offshore windparken kunnen zo in internationaal verband de waterstof toeleveren aan met name de chemische clusters, raffinaderijen en staalfabrieken in Noordwest-Europa.



Figuur 21: NOGAT-pijpleidingenstructuur



Figuur 22: Pijplijninfrastructuur Hyflow



Figuur 23: Europese waterstofbackbone

Een Europese waterstofbackbone-infrastructuur is onderwerp van onderzoek van de TU-Delft (zie Figuur 23). Om groene waterstof tegen minimale kosten te produceren zijn de windcondities en waterkracht in Noord-Europa interessant en de zon- (en ook wind-) condities in het zuiden. Bovendien is verbinding mogelijk met toekomstige waterstofproductiegebieden in de Sahara en in het Midden-Oosten.

CO₂-pijpleidinginfrastructuur

Bij de verbranding van fossiele energie komen nu grote hoeveelheden CO₂ vrij, die het versterkte broeikaseffect veroorzaken. Koolstof is echter in de vorm van CO₂ ook een onmisbare grondstof voor een duurzame chemie voor tal van producten en voor de glastuinbouw. In een duurzaam energiesysteem wordt deze grondstof op termijn schaars. De chemische industrie en de glastuinbouwsector blijven echter het C-atoom en CO₂ nodig hebben. Voor deze vraag moet dus een oplossing worden gevonden. Idealiter zou in de toekomst de CO₂ hiervoor uit duurzame bronnen afkomstig moeten zijn, dat wil zeggen uit biomassa of uit hergebruik van materialen, als de laatste fase in een circulair gebruik van producten. Zolang er echter onvoldoende aanbod van 'groene' CO₂ is, bespaart het gebruik van afgevangen fossiele CO₂ op de totale CO₂-uitstoot.

Om aanbod van CO₂ te verbinden met afnemers in de glastuinbouw en voor het gebruik in de chemie, en de afgevangen CO₂ te vervoeren naar ondergrondse opslag is een CO₂-pijpleidinginfrastructuur nodig. Deze CO₂-infrastructuur heeft zo een tweeledig doel: enerzijds als (biogene en nu nog fossiele) CO₂-grondstofleverancier voor de chemie en de glastuinbouw, en anderzijds als afvoer naar permanente en tijdelijke opslaglocaties van fossiele CO₂.



Sinds 2005 is in Zuid-Holland de OCAP CO₂-pijpleiding operationeel, die CO₂ van Shell Pernis en van de bio-ethanol fabriek van Alcoa-Energy naar de kassengebieden Westland, Oostland en Zuidplaspolder transporteert (OCAP, 2018). Zo'n 600 tuinders nemen ongeveer 600 kton CO₂ af. De vraag naar CO₂ is echter veel groter, van zo'n 1.200 op de korte termijn tot zo'n 2.000 kton in 2030. De OCAP-leiding is eigendom van Linde Gas en is een omgebouwde oliepijpleiding, die in de jaren '60 is aangelegd door de overheid om olie van Rotterdam naar Amsterdam te vervoeren. De leiding is echter maar enkele jaren gebruikt als oliepijpleiding.

In de toekomst zouden eigenlijk alle tuinders op deze CO₂-infrastructuur moeten worden aangesloten, om duurzame warmtevoorziening, dus zonder eigen CO₂-productie, mogelijk te maken met (combinaties van) warmtenetten, waterstof, aardwarmte, en warmtepompen. Daarvoor is voldoende aanbod van CO₂ via de OCAP-leiding noodzakelijk. In 2030 zou minimaal de helft van de vraag uit de glastuinbouw (naar schatting 2.000 kton/jaar) van biogene oorsprong dienen te zijn. Nader onderzoek moet uitwijzen, hoe en in welke eigendomsstructuur dit gerealiseerd zou kunnen worden.

Voor de opslag van CO₂ hebben het Havenbedrijf van Rotterdam, EBN en Gasunie de krachten gebundeld in het Porthos-project (Porthos, 2018). Het project bestaat uit de aanleg van een verzamelleiding door het havengebied in Rotterdam waar verschillende bedrijven op kunnen aansluiten voor de levering van afgevangen CO₂. Via de bestaande OCAP-leiding kan deze CO₂ getransporteerd worden naar de kassengebieden, maar het overgrote deel gaat per pijpleiding naar een leeg gasveld onder de Noordzee, ongeveer 25 kilometer uit de kust. De verwachting is dat hiermee jaarlijks zo'n 2-5 miljoen ton CO₂ kan worden opgeslagen. Uitgezocht wordt of de OCAP-leiding verbonden kan worden met een CO₂-pijpleiding in het Amsterdamse havengebied.



Legenda

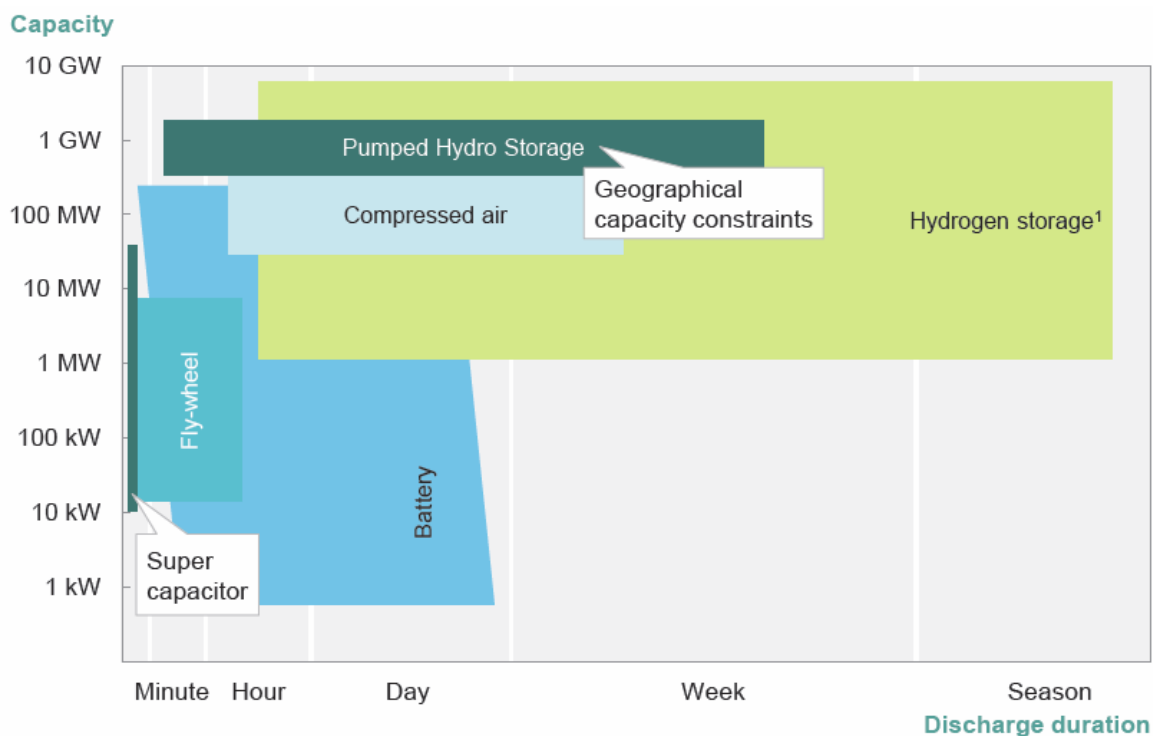
- | | | | |
|---|--|---|--------------------------------------|
|  | Bestaande CO ₂ leidingen / OCAP |  | Gasveld voor CO ₂ -opslag |
|  | Nieuwe CO ₂ leidingen / Porthos-project |  | Gasleidingen van Gasunie |

Figuur 24: CO₂-leidingeninfrastructuur

De OCAP-pijpleiding en het Porthos-project zijn beide belangrijk voor een goede CO₂-infrastructuur (zie Figuur 24). Het is van belang dat het Porthos-project ruim voor 2030 gerealiseerd is, om de afgevangen CO₂ op te kunnen slaan. Het doortrekken van de Porthos-pijpleiding naar Moerdijk zou onderwerp van studie moeten zijn.

Waterstofopslag en balancering

Opslag van energie is noodzakelijk om het totale energiesysteem in balans te houden en vraag en aanbod op elk moment op elkaar af te stemmen. 'Elk moment' betekent dat evenwicht vereist is op niveau van seconden, dag-nacht en seizoenniveau. Waterstof gaat daarbij vooral een grote rol spelen in de grootschalige seizoensopslag (Wijk&Hellinga, 2018), waarvoor batterijen niet geschikt en geen andere alternatieven in beeld zijn (zie ook Figuur 25).

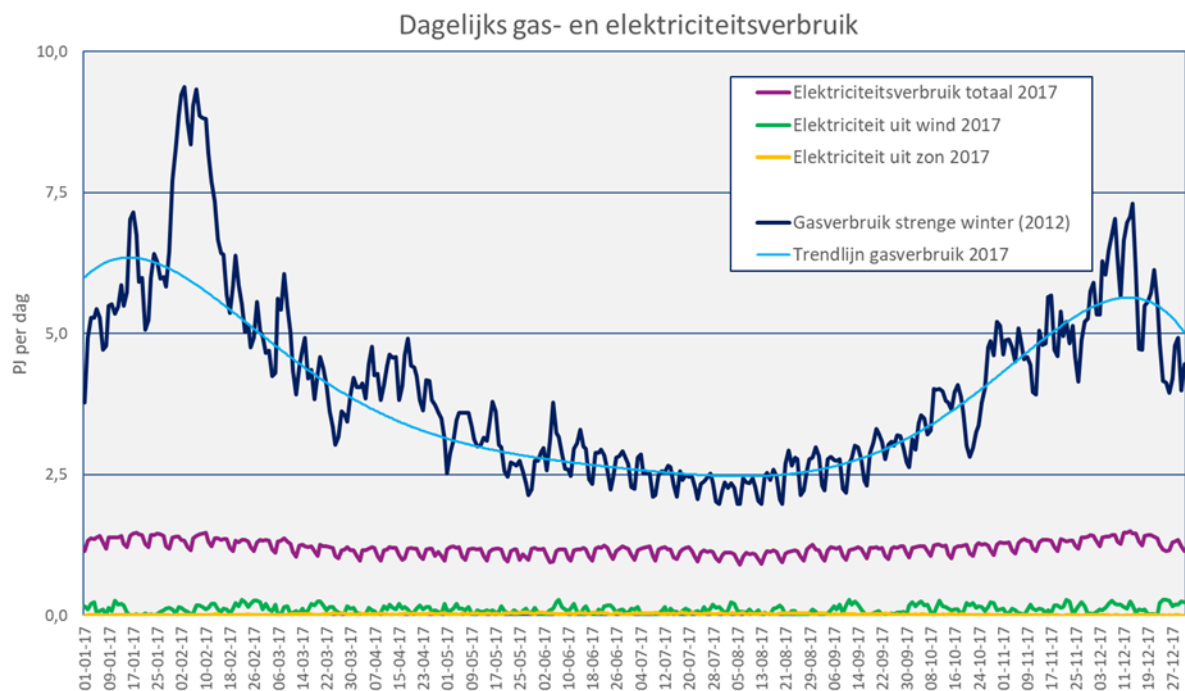


Figuur 25: Opslagtechnieken elektriciteit

De flexibiliteit wordt in het huidige energiesysteem geleverd door voorraden (fossiele) brand- en grondstoffen aan te leggen die een continue levering garanderen en kunnen worden aangesproken als de vraag het reguliere aanbod overstijgt.

1. Voor vervoer betreft dat nu vooral vloeibare olieproducten die goed zijn op te slaan in tanks.
2. In de industrie gaat het om olie, kolen en gas waarvoor de industrie eigen voorraden kan aanleggen voor het gebruik als grondstof en vertrouwt op de gegarandeerde continue levering

- uit het gasnet voor met name hogetemperatuurverwarming. Deze continue aanvoer, belangrijk voor een sector die doorgaans volcontinu werkt, is lastiger met veel wind- en zonne-energie.
3. De elektriciteitsvoorziening rekent nu op de flexibele gascentrales, gasturbines en gasmotoren voor de balancering van vraag en aanbod, aangezien er geen buffercapaciteit in het netwerk zit. Met de toename van zonne- en windenergie voor de elektriciteitsvoorziening zal de benodigde capaciteit hiervan alleen maar groter worden (zie Figuur 26).
 4. Ook voor de verwarming in de gebouwde omgeving en de glastuinbouw is gas in staat het verschil op te vangen tussen de beperkte vraag in de zomer en de grote vraag in de winter als het nu eenmaal kouder is. Dit gaat via de verbranding van gas in cv-ketels of indirect via warmtepompen. De elektriciteit hiervoor is afkomstig van flexibele gascentrales. Met gas kan bovendien extra warmte worden geleverd aan een warmtenet, als de warmtebron de piekvraag niet kan produceren.



Figuur 26: Verloop jaarlijks gas- en elektriciteitsgebruik (bron <http://energiein nederland.nl>)

De flexibiliteit die aardgas nu verleent aan het energiesysteem is alleen mogelijk door buffers aan te leggen en niet door het tempo van de gaswinning snel aan te passen. Om de grote winterse vraag te kunnen dekken, worden jaarrond lege zoutkoepels en lege gasvelden gevuld (de seizoensopslag), die in de winter extra gas leveren. De operationele opslagcapaciteit is ca. 500 PJ bij een aardgasverbruik van 40 miljard m³ per jaar (40%) (Gessel, Larré, Huijskes, & G. Remmelts, november 2018). Voor kortetermijnvraagfluctuaties is ook het pijpleidingensysteem belangrijk, omdat de hoeveelheid gas die erin is opgeslagen flexibel is (line-packing). Anders dan bij elektriciteit geeft het transportsysteem dus ook een (kortetermijn)-balanceerfunctie.

Waterstof en een bijbehorende infrastructuur bieden dezelfde mogelijkheden en kunnen net als aardgas zowel de elektriciteitsvraag als de brandstoffen- en grondstoffenvraag in de verschillende sectoren voorzien. De opslag van waterstof is relatief goedkoop en de energie-inhoud gaat niet verloren tijdens opslag. De wintervoorraad kan worden aangelegd tijdens overaanbod van elektriciteit en via import gedurende het hele jaar.

Waterstofopslag kan in ieder geval plaatsvinden in lege zoutkoepels, wat al op meerdere plaatsen in de wereld gebeurt, zoals in Texas en Teeside (UK). Lege zoutkoepels worden op dit moment in Nederland nog gebruikt voor de opslag van aardgas, en hebben omgerekend een capaciteit voor een kleine 4 PJ aan waterstof. Het opslagpotentieel in zoutkoepels die nog ontwikkeld kunnen worden in de Noordelijke provincies ligt in de buurt van 150 PJ, wat ruim voldoende is voor een door Gasunie en TenneT geprognoseerde waterstofvraag van 350-570 PJ in 2050 (Gasunie-TenneT, 2019). Lege gasvelden hebben in potentie een grote waterstofopslagcapaciteit. Het totaal kan oplopen tot ca. 1000 PJ onshore en 600 PJ offshore, maar het vraagt nog onderzoek of deze gasvelden werkelijk in te zetten zijn voor waterstof.

Zuid-Holland beschikt niet over zoutformaties, en dus ook niet over zoutkoepels. De provincie is daarom aangewezen op opslag in Noord- en Oost-Nederland en het buitenland. Gasunie/Energystock ontwikkelt momenteel een eerste waterstofopslagsysteem in de Zuidwending zoutkoepel nabij Veendam (agbzw, n.d.). Op deze locatie zijn meerdere cavernes beschikbaar, die momenteel in totaal een opslagcapaciteit van zo'n 3,4 PJ (24 kton) hebben (Gessel, Larré, Huijskes, & G. Remmelts, november 2018). De landelijke waterstofbackbone die Zuid-Holland verbindt met de opslag in het noorden, is daarom een noodzakelijke randvoorwaarde voor seizoensopslag. Een nieuwe elektriciteitscentrale op waterstof in Rotterdam zou kunnen voorzien in voldoende regelbaar elektriciteitsaanbod (zie elektriciteitsproductie pagina 27).

Om bij lokale initiatieven voor waterstoftoepassing alvast opslagmogelijkheden te hebben – nog voordat een grootschalige infrastructuur met buffering bestaat – is het verstandig te kijken of ongebruikte pijpleidingen beschikbaar gesteld kunnen worden. Kleinschalige opslag van gasvormige of vloeibare waterstof in tanks is namelijk duur en bemoeilijkt de eerste business cases.

Opslag in de havengebieden zal op termijn om grootschalige tankopslag vragen, als de waterstof bij ontvangst niet direct in een grootschalig waterstofnetwerk kan worden ingevoerd. Hoe dit precies vorm moet krijgen, hangt af van de wijze waarop de waterstof arriveert -in vloeibare vorm, als ammoniak, in de vorm van MCH of anderszins. Hoe groot de opslagcapaciteit in de havens moet worden, ligt evenmin vast en hangt af van de toekomstige (inter)nationale opslaginfrastuctuur en de andere vormen van grootschalige waterstofopslag.

Waterstof tank- en bunkerinfrastructuur

Voor de distributie naar gebruikers in de transport en mobiliteit is aangepaste infrastructuur in Zuid-Holland nodig (zie Figuur 27).

Scheepvaart

Bunkereren (tanken) van brandstoffen voor zeeschepen kan in Rotterdam plaatsvinden op de plek waar de zeeschepen zijn aangemeerd aan de terminals. Tijdens het lossen en laden komt een bunkerschip langs dat de zeeschepen voorziet van brandstof. Ook bij speciale openbare overslagfaciliteiten (de boeien en palen) kan brandstof gebunkerd worden. Synthetische brandstoffen en mogelijk ook ammoniak kunnen op termijn op eenzelfde manier gebunkerd worden als nu HFO en biobrandstoffen. Bunkereren van vloeibare waterstof, kan op eenzelfde manier georganiseerd en geregeld worden als bunkereren van LNG. Mogelijk kan ook eenzelfde pakket stimuleringsmaatregelen voor vloeibare waterstof ontwikkeld worden, zoals dat nu voor LNG is gedaan, voorrang bij bepaalde terminals, vrijstelling van havengeld, etc.

De binnenvaartschepen bunkereren vooral diesel op diverse plaatsen in het hele havengebied, met een concentratie van bunkerlocaties in en rond de Drechtsteden. Een aantal van deze locaties zou voor 2030 ingericht kunnen worden voor het bunkereren van waterstof door de binnenvaart.

Spoor

De rangeer locomotieven tanken diesel op de rangeerterreinen. Speciaal ingerichte waterstofvulpunten zijn nodig om de diesel te vervangen. Het rangeeremplacement Kijfhoek in Zwijndrecht is als eerste locatie interessant.

Vervoer over weg

Vrachtwagens verzorgen in Zuid-Holland veel goederenvervoer, vanuit het havengebied en vanuit de kassengebieden. Om de komende jaren duizenden vrachtwagens op waterstof te laten rijden moeten er voldoende waterstofvulpunten zijn, onder meer bij de containerterminals en in de kassengebieden.

Bussen zullen doorgaans tanken op speciaal daarvoor ingerichte vulpunten bij remises. De verwachting is dat de 7 grote remises (50-200 bussen) bij Rotterdam, Den Haag, Leiden, Delft, Dordrecht, Zoetermeer en Gouda, in 2030 allen tenminste een waterstofvulpunt zullen hebben.

Om het rijden op waterstof voor het grote publiek mogelijk te maken, zullen er voldoende waterstofvulpunten in het land moeten zijn. Duitsland geeft het voorbeeld, door in het hele land 400 waterstoftankstations aan te leggen (100 tot 2023). Een consortium van grote energiebedrijven (Shell, Total, Linde, Air Liquide, e.a.) en autofabrikanten bouwt deze tankstations samen met de overheid. In Nederland zouden we tot 2025 zo'n 50-60 waterstoftankstations nodig hebben voor een vergelijkbare dekking. Als we het middenscenario van het Waterstofplatform (H₂-platform) volgen met 300.000 waterstofauto's op de weg in 2030, dan zou een redelijk omzetvolume van 1.000 kg waterstof per station per dag, 125 waterstoftankstations vragen voor Nederland.

Momenteel is in Zuid-Holland alleen in Rhoon een waterstoftankstation aanwezig, dat zijn waterstof betreft vanuit de waterstofpijpleiding van Air Liquide. In 2019 wordt een waterstoftankstation in Den Haag geopend. Daarnaast zijn op Goeree-Overflakkee, Rotterdam en Dordrecht een aantal waterstoftankstations in de planning. In eerste instantie zullen langs snelwegen en op strategische plaatsen tot 2030 een redelijk aantal waterstofvulpunten beschikbaar moeten komen, willen bedrijven, overheidsdiensten en particulieren kunnen besluiten over te stappen op waterstofvoertuigen. Waterstofvulpunten bij bestaande tankstations zijn kostentechnisch en qua vergunningsverleningstrajecten het eenvoudigst te realiseren. In 2030 zouden in Zuid-Holland, met 20% van de Nederlandse bevolking, zo'n 25 openbare waterstoftankstations operationeel moeten zijn.



Legenda

Nieuwe waterstofinfrastructuur

- █ Hoge kwaliteit waterstofleiding
- █ Lage kwaliteit waterstofleiding
- █ Aansluiting backbone met haven
- █ Waterstofbackbone van Gasunie

Waterstoftankstations

- Bestaand
- In Ontwikkeling

Potentiële locatie waterstoftankstations

- Trucks en logistiek
- Automobilisten

Potentiële loc. waterstofbunkerstations

- █ Binnenvaart
- █ Zeevaart
- Bestaande bunkerstations

Overig

- ⊕ Rangeerterrein

Figuur 27: Waterstofinfrastructuur voor transport en mobiliteit

Waterstofhavenfaciliteiten

De Rotterdamse haven kent een uitgebreide infrastructuur en faciliteiten voor de import, op- en overslag en verwerking van olie en olieproducten, kolen en LNG. In de komende decennia is een geleidelijke overgang nodig naar duurzame alternatieven voor energiedragers en grondstoffen, waaronder waterstof (en/of daarvan afgeleiden chemicaliën), biomassa en CO₂. Vanzelfsprekend vraagt dat om nadere verkenningen en het uitwerken van business cases. Op hoofdlijnen voorzien we in 2030 de volgende infrastructuur- en faciliteitenclusters in het havengebied in Zuid-Holland (Figuur 28), maar ook op andere locaties kunnen clusters ontstaan:

1. Import- en conversiepark op de Maasvlakte;
2. Opslag en overslag bij bestaande faciliteiten in Europoort en Botlek, bij of gebruikmakend van bestaande (opslag)faciliteiten;
3. Waterstofchemie en brandstofproductie in Botlek en Pernis;
4. Bunkeren binnenvaart, overslag, circulaire materialenkringloop in Drechtsteden.

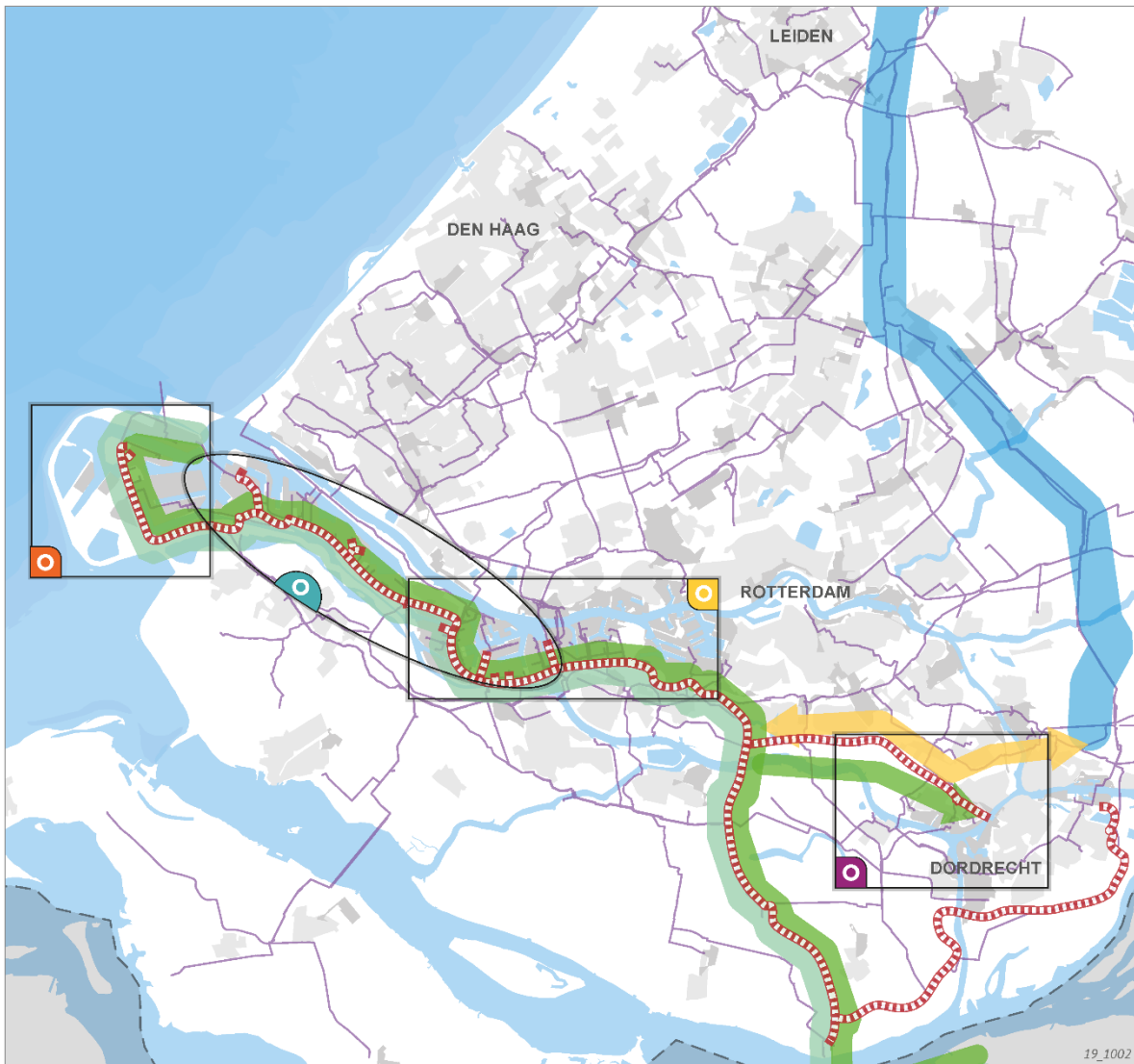
Aanwijzing van een import- en conversiepark op de Maasvlakte (punt 1) waar nieuwe grootschalige conversie- en overslagfaciliteiten kunnen profiteren van de aanlanding van wind op zee, kan de Zuid-Hollandse waterstofeconomie een goede impuls geven.

Tabel 2 benoemt de verschillende faciliteiten per locatie. Deze gebieden zijn onder andere verbonden via een openbaar waterstofnetwerk en een CO₂-pijpleiding.

Het waterstofnetwerk zal bestaan uit minimaal twee leidingen, die verschillende kwaliteiten waterstof vervoeren, een zeer zuivere kwaliteit geschikt voor gebruik in brandstofcellen (wegtransport en binnenvaart) en een iets mindere zuivere vorm die geschikt is voor verbranding in industrie, elektriciteitscentrales en de gebouwde omgeving. Voor gebruik als grondstof in chemie kunnen kwaliteitseisen verschillen per toepassing (hoge en lage kwaliteit mogelijk).

Elektrolyse levert zuivere waterstof op, die in het hoge-kwaliteit-net terechtkomt. De geproduceerde waterstof uit reformingprocessen of biomassavergassing is van lagere kwaliteit dan die uit de elektrolyse, en wordt op de openbare waterstofinfrastructuur met een lagere kwaliteit ingevoerd. Waste-to-chemicals-installaties zouden zowel hoge als lage kwaliteit waterstof kunnen afnemen.

De Porthos/OCAP-pijpleiding speelt een centrale rol in de vraag- en aanbodafstemming van CO₂ tussen de vier gebieden in het HIC, en de glastuinbouw. De biomassavergassingsinstallatie en blauwe waterstofproductie leveren CO₂ aan. De chemie is zowel afnemer (synthetische brandstoffen) als producent van CO₂ (waste-to-chemicals). De pijpleiding vervoert een CO₂-overschot naar lege gasvelden onder de Noordzee. In het conversiepark op de Maasvlakte zal daarnaast een installatie nodig zijn om CO₂ vloeibaar te maken, zodat die ook per schip geëxporteerd kan worden.



Legenda

<ul style="list-style-type: none"> — Gasleidingen van Gasunie - - - Bestaande waterstofinfrastructuur <p><i>Nieuwe waterstofinfrastructuur</i></p> <ul style="list-style-type: none"> — Hoge kwaliteit waterstofleiding — Lage kwaliteit waterstofleiding — Aansluiting backbone met haven — Waterstofbackbone van Gasunie 	<p><i>Bunkeren en circulair</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Bunkeren H₂ binnenvaart Vulstation tube trailers Circulaire materialenkringloop 	<p><i>Waterstofchemie en brandstofproductie</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Blauwe waterstofproductie Afvang, transport CO₂ Elektrolyse Productie elektriciteit + stoom Productie synthetische brandstoffen Productie synthetische kerosine Productie synthetische chemicaliën
<p><i>Import, op- en overslagfaciliteiten</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Ammoniak MCH Biomassa 	<p><i>Import en conversiepark</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Aanlanding offshore wind Grootschalige elektrolyse Waterstofelektriciteitscentrale Import vloeibare waterstof (LH₂) Biomassavergassing Export CO₂ Demiwaterproductie 	

Figuur 28: De Rotterdamse haven met het HIC en mogelijke waterstoffaciliteiten

Tabel 2: Faciliteiten per gebied

Import- en conversiepark op de Maasvlakte	Waterstofchemie en brandstofproductie in Botlek en Pernis
<ul style="list-style-type: none"> • Aanlanding van elektriciteit uit offshore wind, met aansluiting op het landelijke 380 kV-net, conversie naar waterstof via elektrolyse met aansluiting op de hoge-kwaliteit-waterstof-infrastructuur. • Import van biomassa die naar waterstof, CO₂, char en pellets worden omgezet via torrefactie, gevolgd door biomassavergassing. De benodigde zuurstof voor dit proces komt beschikbaar uit de elektrolyse-installaties. • Import van vloeibare waterstof via een vergelijkbare terminal als de Gate terminal voor LNG, op- en overslag van vloeibare waterstof in tankwagens, faciliteiten voor het verdampen en zuiveren van vloeibare waterstof. Vloeibare waterstof komt ter plaatse beschikbaar voor de bunkering door zeeschepen. • Installatie om CO₂ vloeibaar te maken, waarna die CO₂ per schip geëxporteerd kan worden. • Een op waterstof gestookte elektriciteitscentrale als back-up faciliteit voor het 380 kV-elektriciteitsnet. De restwarmte kan via de warmterotonde worden gebruikt. • Demiwaterproductie voor gebruik als grondstof in de elektrolyzers en als ketelwater in de waterstof-elektriciteitscentrale met aansluiting op een lokaal demiwaternetwerk. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nieuwe blauwe waterstofproductie met reformerinstallatie met aansluiting op het hoogcalorische aardgasnetwerk. • Nieuwe blauwe waterstofproductie uit raffinagegas, waterstofgebruik on site bij raffinaderijen, gebruik in fornuizen aldaar of invoeden op waterstofinfrastructuur. • Omzetting waar mogelijk van de bestaande grijze waterstofproductie naar blauwe waterstofproductie. • Groene waterstofproductie via elektrolyse, aansluiting op elektriciteitsnet en aansluiting op demiwaternet, gebruik waterstof on site of invoeden in waterstofinfrastructuur. • Productie van elektriciteit en hogetemperatuurstoom in Gasturbine-WKK-installaties op basis van waterstof, aansluiting op elektriciteitsnet, stoomnet en waar mogelijk ook warmtenet. • Productie van synthetische brandstoffen voor de (zee)scheepvaart, op- en overslag van synthetische brandstoffen. • Productie van synthetische kerosine voor de luchtvaart, afvoer van synthetische kerosine via de DPO kerosinepijpleiding • Productie van andere synthetische en hoogwaardige chemicaliën o.b.v. waterstof en CO₂.⁵
Opslag- en overslagfaciliteiten in Europoort en Botlek gebied	Bunkering binnenvaart, overslag en circulaire materialenkringloop in Drechtsteden
<ul style="list-style-type: none"> • Import van ammoniak per schip, opslag in bestaande ammoniaktanks, overslag naar binnenvaartschepen, treinen en/of vrachtwagens. Kraken van ammoniak, stikstof invoeden in stikstofpijpleiding. • Import van MCH per schip, opslag in normale olietanks, overslag naar binnenvaartschepen, indien mogelijk transporteren via bestaande oliepijpleiding, losmaken van de waterstof en toluen, zuiveren van de waterstof, opslag en export van toluen per schip. • Tijdelijke opslagfaciliteiten CO₂ als grondstof voor chemie. • Import van biomassa, opslag en overslag van biomassa, vervoer van biomassa per binnenvaartschip naar achterland. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bunkering van waterstof voor binnenvaartschepen. • Vulstation voor tube trailers voor transport per vrachtwagen naar tankstations en per binnenvaartschip naar het achterland. • Circulaire materialenkringloop, waste-to-feedstock, chemicals, fuels and energy, aansluiting op warmtenet.

⁵ Locatie van Fieldlab Electrificatie Industrie zal hierbij een belangrijke rol spelen. Dit is in onderhandeling.

WATERSTOFACTIE-AGENDA ZUID-HOLLAND

Noodzaak systeemtransitie

In Nederland wordt de inzet van waterstof cruciaal geacht in de transitie naar een duurzame energie- en grondstoffenvoorziening. Een eerste verkenning naar de rol van waterstof in een duurzame energievoorziening in Nederland is uitgevoerd door TKI Nieuw gas in hun rapport ‘Contouren van een routekaart waterstof’ (Gigler&Weeda, Maart 2018).

Op 21 december 2018 is het Ontwerp van het Klimaatakkoord gepubliceerd (Klimaatakkoord, 2018), waarin wordt aangegeven hoe in Nederland in 2030 49% CO₂-emissiereductie kan worden gerealiseerd. Duidelijk is dat het energievoorzieningssysteem fundamenteel zal moeten wijzigen. De noodzakelijk fundamentele wijziging van energiedragers en energie-infrastructuur vraagt om een systeembenadering voor nieuwe vormen van flexibiliteit, energieopslag, betrouwbaarheid/leveringszekerheid en de integratie van de nieuwe deelsystemen. Ook raakt de noodzakelijke transitie de marktordening en organisatie van het energiesysteem. Dat is niet verwonderlijk, omdat het niet volstaat om maatregelen van bescheiden omvang voor onze energievoorziening in te passen in een overwegend fossiel energiesysteem. In het Klimaatakkoord zijn daarom de onderstaande systeemstudies gedefinieerd (zie Tabel 3).

Tabel 3: Systeemstudies Klimaatakkoord

2019-2020	Regionale Energiestrategieën
Begin 2019	Infrastructuur outlook 2050 Gasunie/TenneT
Medio 2019	Rijkvisie marktordening CCS en financiering van CO ₂ -infrastructuur. De wettelijke kaders moeten uiterlijk 2021 zijn aangepast.
Medio 2019	Rijkvisie marktordening collectieve warmtenetten. De wettelijke kaders moeten uiterlijk 2021 zijn aangepast.
2019	Gasunie en TenneT starten, samen met de regionale netbeheerders, tot een integrale infrastructuurverkenning 2030-2050. Oplevering is voorzien in 2021.
2019	De Rijksoverheid start een programma (onder de NOVI) gericht op ruimtelijke planning van en het maken van ruimtelijke reserveringen voor het hoofdenergiesysteem op nationale schaal.
2019-2020	CO ₂ -reductieplannen industrie
2020	Brede Rijkvisie Marktordening & Energietransitie, incl. beleidsagenda richting 2030, waarin vanuit een systeemperspectief zal worden ingegaan op de ordening, regulering, bekostiging van nieuwe infrastructuur voor met name warmte, waterstof en CO ₂ , rekening houdend met de implicaties voor gas en elektriciteitsnetwerken en vertrekkend vanuit scenario's voor 2030 en 2050.
(Vanaf) 2020	Verbrede monitor leveringszekerheid
Eind 2021	Transitieviesies warmte

Het Ontwerp van het Klimaatakkoord bevestigt dat waterstof een belangrijke rol zal gaan spelen in een duurzame energievoorziening. Echter hoe, wanneer, in welke omvang en rol is nog niet helder. Bovendien zal de impact per sector verschillen. Daarom is voorgesteld om via een programmatische aanpak, te komen tot een geïntegreerd waterstofbeleid. Zo'n programma zou moeten bestaan uit een landelijke

component als het gaat om de realisatie van de noodzakelijke randvoorwaarden, maar ook uit regionale deelprogramma's met een maatwerkaanpak per industriecluster en omliggend verzorgingsgebied. Dit vraagt samenwerking tussen sleutelpartijen (overheden, marktpartijen, kennisinstellingen, netwerkbedrijven en maatschappelijke organisaties), zodat de ontwikkeling van een waterstofsysteem gecoördineerd vorm kan krijgen.

Economische impact

Het Ontwerp van het Klimaatakkoord houdt rekening met de belangen van vele partijen om het draagvlak voor deze transitie te borgen. De economische impact is echter nog niet helder. De geagendeerde systeemstudies en de doorrekening van het PBL moeten daarom meer inzicht verschaffen in de financiële gevolgen en of de plannen een duurzame energie- en grondstoffenvoorziening tegen de laagst mogelijke maatschappelijke kosten kunnen realiseren.

Om de economische impact te bepalen zal er ook meer aandacht moeten komen voor de rol van Nederland in de internationale context. Het Klimaatakkoord gaat nauwelijks in op de internationale ontwikkelingen ten aanzien van de energietransitie. Een belangrijk aspect is echter de spreiding van energieproductiekosten binnen en buiten Europa in samenhang met de noodzaak van energie-importen. In het geval van Nederland gaat dat om de omzetting van energie- en grondstoffendragers in het Rotterdamse Haven Industrieel Complex en de doorvoer naar het achterland en export.

Deze economische activiteiten vormen een belangrijke pijler van de Nederlandse economie. De sterk veranderende vraag naar energie(producten) in Duitsland, met consequenties voor de Duitse energie-infrastructuur, en soortgelijke ontwikkelingen bij andere Noordwest-Europese handelspartners, dienen daarbij aandacht te krijgen. Dit krachtenveld is immers medebepalend voor de integrale kosten van de nieuwe energieketens – productie, conversie, opslag en transport, en bijvoorbeeld ook voor de vorm waarin het internationale bulktransport van energie zal gaan plaatsvinden.

Het belang voor de economie komt terug in de regionale plannen en visies die in Nederland zijn ontwikkeld. Zo heeft de Noordelijke Innovation Board (Wijk, April 2017) een eerste regionale waterstofvisie in Nederland opgesteld. In deze roadmap voor de ontwikkeling van een groene waterstofeconomie in Noord-Nederland staan zowel de ontwikkeling van een nieuwe duurzame economie als opvolging van de aardgaswinning als de vermindering van CO₂-emissies centraal. De waterstofvisie voor het gebied rond het Noordzee Kanaal stoelt eveneens op zowel economie als klimaat (Cor Leguijt, Oktober 2018).

Marktordening

Een waterstofeconomie komt alleen van de grond als er een open, vrije markt voor waterstof gaat ontstaan samen met een openbare voor eenieder toegankelijke infrastructuur. Op dit moment is daar geen sprake van, waterstof kent een 'captive' markt. Waterstof wordt geproduceerd on site of door bedrijven die de waterstof leveren via een eigen private infrastructuur. Dit is een logische structuur nu de markt voor waterstof uitsluitend een grondstofmarkt met een beperkt aantal aanbieders en afnemers is. Maar de markt voor waterstof zal zich moeten verbreden naar een vrije energiemarkt, met een vergelijkbare structuur als die van aardgas nu.

Er is dus een waterstofmarktordening nodig, met wet- en regelgeving en instituties en toezichhouders. Deze marktordening kan geen enkel bedrijf of sector zelf ontwikkelen. Dit moet onder regie van de

nationale overheid, samen met de ons omringende landen en de EU, worden ontwikkeld en geïmplementeerd.

Een belangrijk onderdeel voor een vrije waterstofmarkt, is een openbare en publieke waterstofinfrastructuur. De netwerkbedrijven, die in handen zijn van gemeenten, provincies en de Nederlandse staat, beheren een grootschalig en fijnmazig aardgas- en elektriciteitsnetwerk. Daarnaast beheren netwerkbedrijven lokale en regionale warmtenetten. Net als bij elektriciteit en bij aardgas moeten de netwerkbedrijven de plicht krijgen om aanbieders en klanten aan te sluiten. De kosten van de infrastructuur moeten daarvoor gesocialiseerd worden. Doordat de waterstofinfrastructuur vooral een ombouw van de aardgasinfrastructuur betreft, zouden de kosten van de aardgas- en waterstofinfrastructuur samen gesocialiseerd kunnen worden over de totale aardgasafname én waterstofafname.

Netwerkbedrijven moeten zorgen voor een betrouwbare energievoorziening tegen de laagst mogelijke maatschappelijke kosten. Nu zijn de elektriciteit- en aardgassystemen nog gescheiden systemen, maar met waterstof als energiedrager ontstaat eigenlijk een geïntegreerd energiesysteem. De vraag kan gesteld worden of conversie van elektriciteit in waterstof, en de conversie van aardgas naar waterstof met CO₂-afvang en -opslag niet gezien zou moeten worden als een taak van de gezamenlijke netwerkbedrijven. Netwerkbedrijven realiseren dan de conversiecapaciteit tussen energiedragers en optimaliseren de verdeling van elektriciteit, aardgas, waterstof, en warmte. Commerciële bedrijven kunnen hier tegen vergoeding gebruik van maken. Hierdoor kan een betrouwbare én schone energievoorziening worden gerealiseerd tegen de laagst mogelijk maatschappelijke kosten. Opwekking en winning van energie blijft het terrein van de commerciële partijen.

Om de klant (industrie, tuinder, vervoerder, automobilist, gebouweigenaar, bewoner, etc.) te laten bepalen welke soort waterstof hij of zij koopt, zou een certificeringssysteem met Garanties van Oorsprong (GvO's) kunnen worden geïmplementeerd. Een dergelijk certificeringssysteem moet onderscheid maken tussen grijze, blauwe en groene waterstof en specifieker uit welke bron en waar de waterstof is geproduceerd. Nederland kan hiermee starten, net zoals het certificeringssysteem voor groen gas. Een dergelijk certificeringssysteem is vergelijkbaar aan dat voor elektriciteit. Overigens zijn de eerste waterstof GvO's in Nederland inmiddels uitgegeven aan Nouryon en Air Products (FCHJU, 2019).

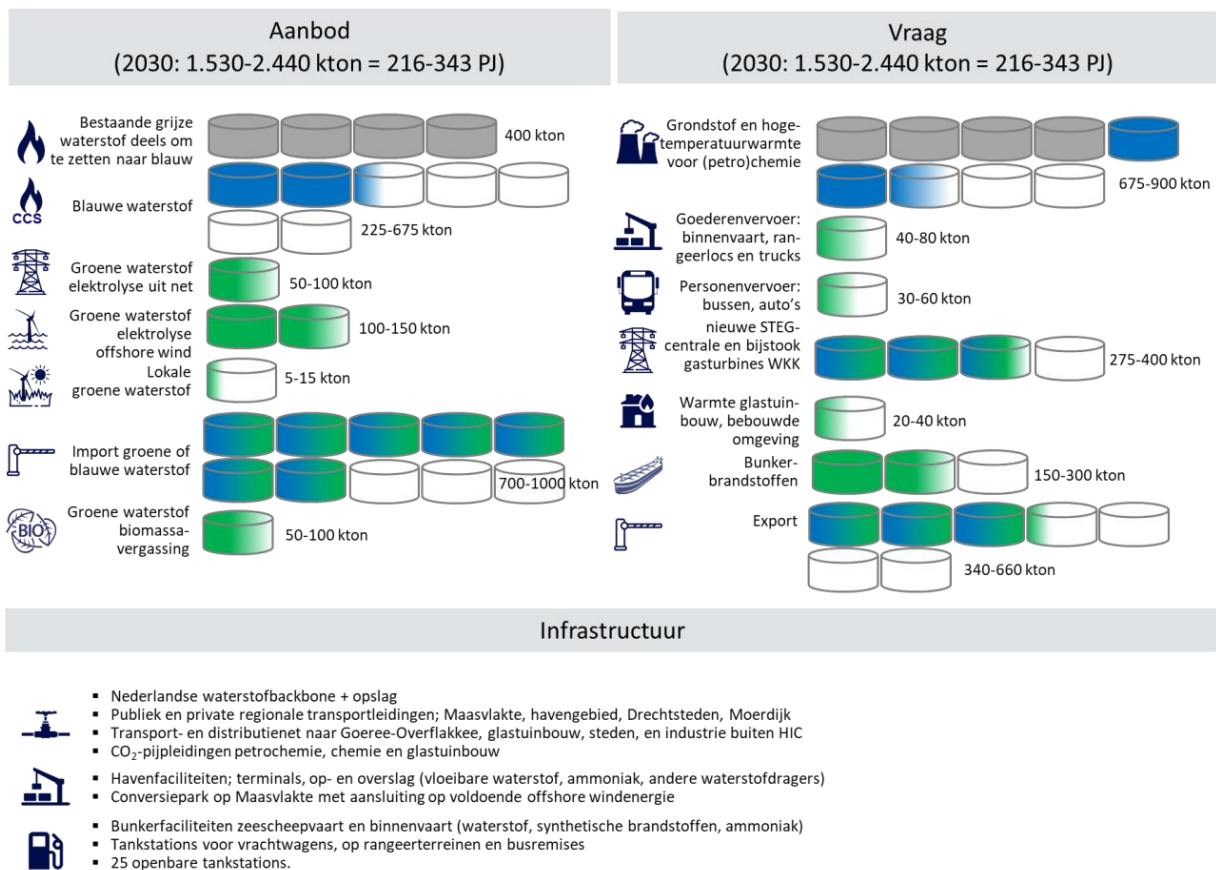
Integrale ambitieuze visie Zuid-Holland

In deze waterstofvisie voor Zuid-Holland is getracht het integrale systeemperspectief een belangrijke plaats te geven vanwege de aansluiting bij de economische belangen van de provincie en de energiehubfunctie van de Rotterdamse haven voor Noordwest-Europa. Naast het milieu- en klimaatperspectief van de transitie van de industrie, de gebouwde omgeving, de glastuinbouwsector en de vervoerssector, spelen in Zuid-Holland nadrukkelijk de import en export van nieuwe, duurzame energiedragers en opslag- en conversievraagstukken.

Keuzes die in Zuid-Holland worden gemaakt, dienen zowel rekening te houden met het bredere Nederlandse belang van een snelle transitie tegen minimale kosten en behoud van leveringszekerheid, als met ontwikkelingen in landen waar de productie van nieuwe energiedragers gaat plaatsvinden en de veranderende energie- en grondstoffenvragen vanuit het ons omringende buitenland om de economische positie van Zuid-Holland en het havencomplex niet in gevaar te brengen.

Dat perspectief van aanbod, infrastructuur, vraag en marktordening is concreet vertaald in een kwantitatieve raming van de waterstofvraag in 2030. Deze raming omvat alle energiestromen, en niet alleen die uit het Klimaatakkoord, zoals voor elektriciteitsopwekking, industrie, transport en gebouwde omgeving.

Bunkerbrandstoffen voor de lucht- en scheepvaart vormen een grote energievraag in Nederland, maar ze hebben geen plaats in het Klimaatakkoord, omdat de bijbehorende CO₂-emissies buiten onze grenzen plaatsvinden, en niet aan Nederland worden toegerekend. De levering van deze brandstoffen in een duurzame vorm is evenwel bij uitstek een belangrijke en nog uitdagende rol voor de Rotterdamse haven. Daarnaast gaan import en export van waterstof in een toekomstig energiesysteem een belangrijke rol spelen. Hier zullen de Rotterdamse haven en Zuid-Holland proactief moeten handelen om de leidende positie niet te verliezen. De geprognostiseerde ontwikkelingen in 2030 zijn bedoeld als de aanloopfase naar een volwaardige waterstofeconomie op de langere termijn. Overheden zullen de regie moeten nemen om deze overgangsfase vorm te geven.



Figuur 29: Waterstof in 2030: aanbod, vraag en infrastructuur in Zuid-Holland

Het geschetste waterstofperspectief voor 2030 (zie Figuur 29) gaat verder dan de waterstofontwikkelingen die in het Klimaatakkoord zijn voorzien. Recente informatie en inzichten in de internationale prijsvorming van wind- en zonne-energie en de scherpe prijsdalingen van conversieapparatuur (elektrolyzers en brandstofcellen), leggen hiervoor de grondslag. Groene waterstof wordt prijscompetitief al voor 2030. En ook import en export van waterstof zullen al voor 2030 een rol gaan spelen. Dit is niet alleen van belang voor het behalen van de klimaatdoelen, maar vooral voor de economische ontwikkeling van het havencomplex. Of de hier benoemde kwantitatieve inzet van waterstof in 2030 gehaald wordt, zal moeten blijken. De inzet lijkt ambitieus, maar dat is de overheidsdoelstelling (49% CO₂-emissiereductie in 2030 t.o.v. 1995) ook. Er zijn grote stappen nodig, en zonder ambitieuze doelen vanuit het integrale perspectief is het lastig in 2030 de waterstofeconomie tot ontwikkeling te hebben gebracht.

Gedurende de transitie zal bovendien de ontwikkeling van de beschikbare waterstof en verschillende markten niet altijd gelijk opgaan of het aanbod exact zijn afgestemd op de vraag. Bij onbalans is wellicht (overheids)sturing nodig om de waterstof daar in te zetten waar de maatschappelijke waarde optimaal is.

Rol provincie Zuid-Holland

De provincie Zuid-Holland kan niet alleen een groene waterstofeconomie ontwikkelen, maar deze wel stimuleren. Ze heeft andere stakeholders nodig om de waterstofeconomie te realiseren. Het nationale en Europese beleid is zeer bepalend voor de ontwikkeling van een goede marktordening, wet- en regelgeving, fiscaal en subsidiebeleid, en onderzoek en innovatiebeleid. Netbeheerders zijn verantwoordelijk voor de realisatie van energie-infrastructuur. En bedrijven zullen uiteindelijk investeringsbeslissingen moeten nemen en besluiten om waterstof te gaan toepassen. De provincie Zuid-Holland kan echter op basis van deze visie input leveren aan de vormgeving daarvan.

Voor de provincie Zuid-Holland kan gedacht worden aan de volgende vier terreinen. Inzet van specifieke scholings- en trainingsprogramma's, beleid met betrekking tot ruimtelijke ordening, adequate vergunningverlening en toezicht en handhaving, kunnen de verdere implementatie versnellen en beheersbaar maken.

1. Realisatie van de benodigde waterstof- en CO₂-infrastructuur.

Vanuit het vertrouwen in de toegevoegde waarde van waterstof voor de energietransitie, is versnelde aandacht voor waterstoftransportinfrastructuur aan te raden. Zonder de zekerheid van de beschikbaarheid daarvan, is het lastig voor aanbiedende en afnemende partijen hun plannen te ontwikkelen alsmede voor het Havenbedrijf Rotterdam om nieuwe partijen aan te trekken. Eén van de belangrijke taken van overheden, is te zorgen voor een goede infrastructuur. Dat geldt voor wegen, vaarwegen, internet, havens, luchthavens, drinkwater, maar ook voor energie. De energienetwerken - elektriciteit en aardgas- zijn in handen van overheidsbedrijven. Ook voor waterstof zouden overheidsbedrijven het voortouw moeten nemen om de benodigde, voor alle aanbieders en afnemers toegankelijke waterstoftransport- en distributie-infrastructuur aan te leggen. Voor de ontwikkeling van de Zuid-Hollandse waterstofinfrastructuur kan daarbij ook gedacht worden aan de Gasunie en het Havenbedrijf Rotterdam, die samen met de provincie, gemeenten en in overleg met de netbeheerders een traject zouden kunnen uitwerken. Naast pijpleidingen (deels hergebruikte aardgasleidingen) gaat het ook om een waterstoftank- en opslaginfrastructuur en havenfaciliteiten. Ook voor de integrale CO₂-infrastructuur zijn nog vervolgvactiteiten nodig om tot realisatie te komen.

2. Vraag naar waterstof ontwikkelen via regionale ombouwprogramma's.

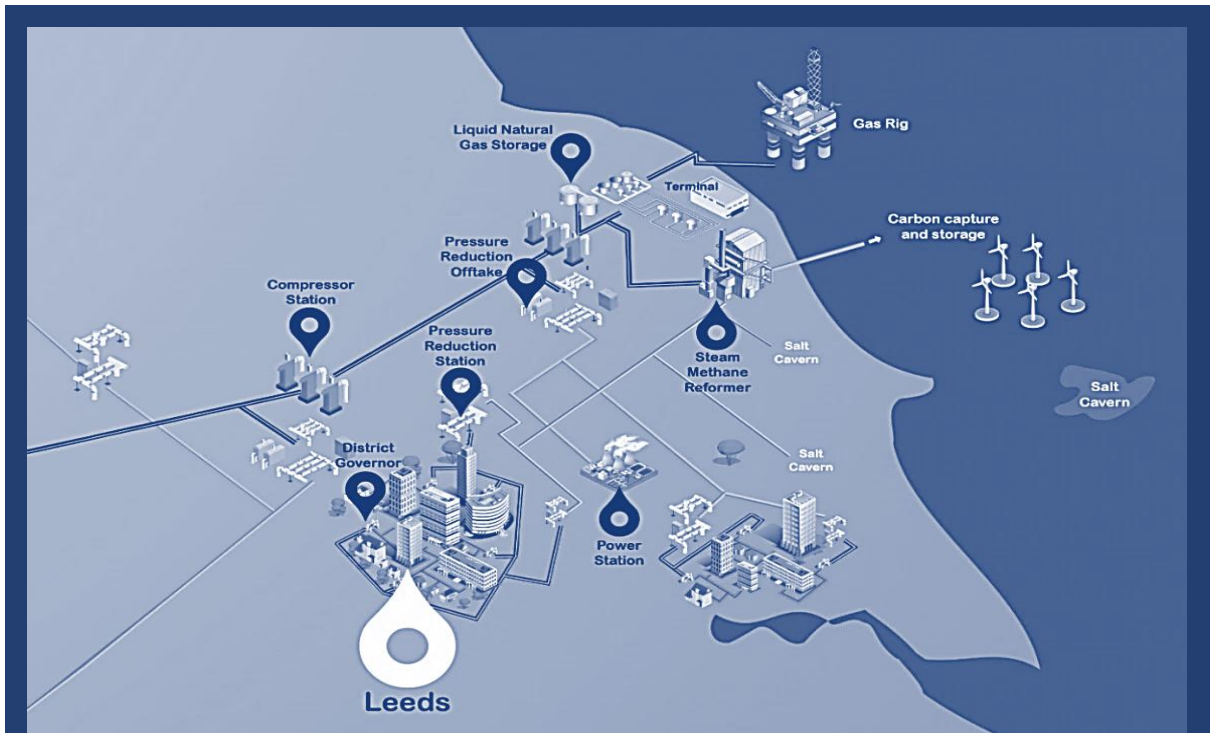
Vanuit de hoofdtransportleidingen zal vervolgens waterstof naar gebieden, wijken en bedrijven gebracht moeten worden (via een distributienet), waarbij een vergelijkbare situatie ontstaat als toen het Groningse aardgas werd gevonden en bewoners en andere gebruikers binnen 10 jaar wijk voor wijk omschakelden van stadsgas (met meer dan 50% waterstof!), naar aardgas. Bedrijven en bewoners zijn daarbij geholpen om de apparatuur, zoals kooktoestellen en verwarmingstoestellen, te vervangen of aan te passen voor aardgasgebruik. Op dit moment is er evenwel nog te weinig aandacht voor de optie om voor de verduurzaming van de gebouwde omgeving (ook) via de omschakeling van aardgas naar waterstof te laten verlopen. In beleidsondersteunende simulatiestudies waarin kostenevaluaties op ketenniveau worden gemaakt (zoals met Vesta MAIS van het PBL of Segovia van CE Delft), heeft deze optie nog niet eenzelfde plaats (goede kostentoerekening van de diverse keteneffecten) als de uitwerking voor *all-electric*/warmtepompen, hybride warmtepompen en warmtenetten. Goed gebalanceerde studies zullen moeten bijdragen aan het draagvlak voor de maatschappelijke vraag naar waterstof, waar de provincie initiatief voor kan nemen. Bovendien is de verantwoordelijkheid voor de regionale energiestrategieën nu belegd bij zeven regio's in Zuid-Holland. Het zou goed zijn als de provincie hierbij de benodigde ondersteuning biedt en coördinatie verzorgt.

Een voorbeeld van een aardgas naar waterstof ombouwplan kan overigens gevonden worden bij het H21-project in het Verenigd Koninkrijk, dat uitwerkt hoe de stad Leeds en de gebieden rondom Leeds kunnen worden omgezet van aardgas naar waterstof. De provincie Zuid-Holland zou samen met de netwerkbedrijven en de 7 regio's een dergelijk plan kunnen uitwerken, waarbij de hele provincie, regio voor regio, wordt omgezet van aardgas op waterstofgas. Daarbij kunnen gebouwen, woningen en bedrijven in die specifieke regio kiezen of ze overstappen op waterstof, aansluiten op een eventueel beschikbaar warmtenet, dan wel kiezen voor de *all-electric* optie. En in bepaalde gebieden zijn dan wellicht geen gasleidingen nodig, zoals in nieuwbouwwijken.

3. Aanbod van groene en blauwe waterstof organiseren en (laten) realiseren

Als stappen gemaakt zijn in de planning van de uitrol van een waterstofinfrastructuur (leidingen, opslag), en de vraagzijde beter in beeld is gebracht, wordt het voor bedrijven eenvoudiger om investeringsbeslissingen te nemen voor de productie van waterstof, waarmee aanbod en afname gelijke tred kunnen gaan houden. Binnen het H-vision project wordt samengewerkt om de productiecapaciteit van blauwe waterstof uit te bouwen.

Voor groene waterstof zou ook op een vergelijkbare manier de opbouw van productiecapaciteit kunnen worden vormgegeven. Naast productiecapaciteit gaat het bij groene waterstof ook om de organisatie van de aanvoer van voldoende groene elektriciteit en/of biomassa tegen acceptabele kosten. Om de eerste grootschalige productie van groene waterstof aan te jagen, zou de provincie Zuid-Holland een taskforce kunnen instellen, die samen met de bedrijven aan de slag gaat om projecten te realiseren, een waterstofketen op te bouwen en kenniscluster te ontwikkelen, ook in afstemming met de twee hiervoor genoemde sporen.



The H21 Leeds City Gate project (Northern Gas Networks, 2016) is a study with the aim of determining the feasibility, from both a technical and economic viewpoint, of converting the existing natural gas network in Leeds, one of the largest UK cities, to 100% hydrogen. The project has been designed to minimize disruption for existing customers, and to deliver heat at the same cost as current natural gas to customers. The project has shown that:

- The gas network has the correct capacity for such a conversion;
- It can be converted incrementally with minimal disruption to customers;
- Minimal new energy infrastructure will be required compared to alternatives;
- The existing heat demand for Leeds can be met via steam methane reforming and salt cavern storage using technology in use around the world today.

The project has provided costs for the scheme and has modelled these costs in a regulatory finance model. In addition, the availability of low-cost bulk hydrogen in a gas network could revolutionize the potential for hydrogen vehicles and, via fuel cells, support a decentralized model of combined heat and power and localized power generation.

4. Sterkere aandacht voor de provinciale economische kansen als gevolg van de energietransitie

Door de nationale overheid zullen in het kader van het Klimaatakkoord maatregelen genomen worden om 49% CO₂-emissiereductie in 2030 te kunnen bereiken. Fiscale maatregelen, (SDE++)-subsidies, heffingen en boetes zijn daarbij de instrumenten die ingezet kunnen worden. Al deze maatregelen zijn gericht op de vermindering van de binnenlandse CO₂-emissies als gevolg van energiegebruik. De voor de Rotterdamse haven belangrijke bunkerbrandstoffen voor scheep- en luchtvaart vallen hierbuiten. Ook stimuleren de maatregelen niet een economische structuurverandering. Denk hierbij aan de import en

export van waterstof en de grootschalige conversie in de Rotterdamse haven ten behoeve van energie- en grondstoffengebruik in het buitenland (vergelijk de olieraffinage), waar Nederland geen CO₂-credits mee verdient, maar waarmee wel werkgelegenheid en economische activiteit worden veiliggesteld. De provincie en gemeenten kunnen het landelijke beleid 'optoppen' om de lokale economische kansen maximaal uit te nutten in de slipstream van de Europese energietransitie. In samenspraak met het Havenbedrijf Rotterdam, kan gekeken worden hoe het gebruik van waterstof als bunkerbrandstof voor schepen gestimuleerd kan worden bijvoorbeeld door vrijstelling van havengelden. Waterstofgebruik door het landinwaartse goederenvervoer over de weg kan wellicht gestimuleerd worden, door naar Zwitsers model een kilometerheffing voor dieselvrachtwagens in te voeren (in havengebied en kassengebieden), en daar elektrisch vervoer, batterijen en waterstof, van vrij te stellen. Denk verder aan provinciale/gemeentelijke instrumenten als vergunningenbeleid, concessieverlening, aanbestedingen, gemeentelijke heffingen en belastingen, parkeertarieven en luchtkwaliteitsnormering om de waterstofvraag in Zuid-Holland versneld te vergroten. Dit is ook aantrekkelijk voor het aanjagen van de groene productie in het havengebied en kan behulpzaam zijn om een nog bestaande prijsprikkel ten gunste van fossiele brandstoffen te verminderen of zelfs te elimineren.

Focus witte vlekken

De visie levert ook een context om provinciale acties te ondernemen of te initiëren. De provincie hoeft niet te wachten op Europees en nationaal waterstofbeleid. Ze kan binnen haar eigen mogelijkheden en beleidskaders (o.a. ruimtelijke ordening, infrastructuur, gebruik financiële instrumenten en emissienormen, inkoop, OV-concessies, vergunningverlening) partijen bij elkaar brengen en een actieplan waterstof opstellen. Hiervoor doen we een aantal voorstellen. Belangrijk is dat er structuur en continuïteit bestaat in de aanpak, waarbij de provincie samenwerkt met vele betrokken partijen. Daarbij zal het hier geschetste beeld zich uiteraard gaan wijzigen met nieuwe ontwikkelingen en inzichten.

Op diverse terreinen zijn al belangrijke waterstofplannen en -initiatieven. Zo werkt de Gasunie aan een landelijke waterstofinfrastructuur. Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat voert beleid om een waterstoftankinfrastructuur te realiseren. Bedrijven in de Rotterdamse haven onderzoeken in het H-vision project de productie van blauwe waterstof. Op al deze lopende initiatieven kan de provincie Zuid-Holland stimulerend en ondersteunend zijn. Op terreinen waar nog geen of weinig initiatieven zijn, zou de provincie Zuid-Holland meer proactief en initiërend moeten opereren.

Hiervoor wordt het volgende 14-punten-actieplan voorgesteld (Tabel 4). Naast dit actieplan is het aan te bevelen een programmateam aan te stellen dat de samenhang en voortgang van de diverse acties kan monitoren en indien nodig bijsturen.

Tabel 4: Actieplan provincie Zuid-Holland

Onderwerp	Actieplan provincie Zuid-Holland
Waterstofinfrastructuur	<ol style="list-style-type: none"> 1. Taskforce publieke H₂-transportinfrastructuur door havengebied. 2. Ontwikkeling en stimuleringsbeleid H₂-tank- en bunkerinfrastructuur voor de binnenvaart, busremises en rangeerterreinen. 3. Taskforce publieke H₂-infrastructuur, deels ombouw bestaande aardgasleidingen (Goeree-Overflakkee en glastuinbouw + steden + industrie buiten havengebied). 4. Taskforce ontwikkeling import- en conversiepark waterstof op de Maasvlakte.
Waterstofaanbod	<ol style="list-style-type: none"> 5. Taskforce groene waterstofproductie; o.a. grootschalige elektrolyse (waarbij beschikbaarheid offshore wind met aanlanding op Maasvlakte essentieel is). 6. Ruimtelijke-ordeningbeleid lokale groene waterstofproductie. 7. Werkgroep import en export van vloeibare waterstof en CO₂, ammoniak en andere waterstofdragers.
Waterstofvraag	<ol style="list-style-type: none"> 8. Taskforce waterstoftoepassingen en gebruik in de industrie (raffinaderijen, chemie, etc.). 9. Taskforce regionaal ombouwprogramma van aardgas naar waterstof ter ondersteuning en in samenwerking met regionale energiestrategieën (RES). 10. Ontwikkeling integraal plan warmtewaterstofronde met waterstof voor piekvraag. 11. Stimuleringsbeleid waterstof (emissienormen, kortingen, etc.) voor binnenvaart en trucks opnemen in zero-emissiebeleid mobiliteit. 12. Werkgroep ontwikkeling synthetische brandstoffen (scheepvaart, luchtvaart) en synthetische chemie op waterstof en CO₂.
Flankerend beleid	<ol style="list-style-type: none"> 13. Werkgroep implementatie waterstof in ruimtelijke ordening, vergunningen, toezicht en handhaving. 14. Ontwikkeling scholing en trainingsprogramma's waterstof voor hulpverleners, politie, brandweer, veiligheidsregio's, etc.

De term taskforce verwijst naar een team samengesteld uit diverse organisaties dat de opdracht meekrijgt om een bepaalde taak uit te voeren. De term werkgroep wordt gebruikt voor een team dat de verschillende mogelijkheden breed verkent en uitwerkt. In beide gevallen bevat het team vertegenwoordigers vanuit verschillende achtergronden en organisaties. Als er geen aparte organisatievorm wordt genoemd dan zou de actie door de bestaande lijnorganisatie kunnen worden opgepakt.

AFKORTINGEN

AFC	Alkaline brandstofcellen/Fuel Cell
ATR	Autothermal Reforming
CEPS	Central Europe Pipeline System
COP	Coefficient of Performance. Dit getal geeft de verhouding weer tussen het energieverbruik en de nuttige hoeveelheid warmte bij een warmtepomp.
DPO	Defensie Pijpleidingen Organisatie
GvO	Garantie van Oorsprong
HFO	Heavy Fuel Oil
HIC	Haven Industrieel Complex
IMO	International Maritime Organization
LNG	Liquid Natural Gas
LSNED	Leidingstraat Nederland
MCH	Methylcyclohexaan, waterstof gebonden aan toluen
MENA	Middle East en North Africa
NGT	Noordgastransport
NOGAT	Northern offshore gas transport
OCAP	Organic CO ₂ for assimilation by plants, naam van bestaande CO ₂ -leiding
RES	Regionale Energiestrategieën
SMR	Steam Methane Reforming
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
STEG	Stoom en Gasturbine
WKC	Warmtekrachtcentrale
WKK	Warmtekrachtkoppeling

LITERATUURLIJST

- (sd). Opgehaald van Staat van Zuid-Holland: https://staatvan.zuid-holland.nl/portfolio_page/woningvoorraad/
- (sd). Opgehaald van agbzw: <https://www.agbzw.nl/projecten/waterstofproject>
- (2018, februari 16). Opgehaald van Akzo-Nobel: <https://www.akzonobel.com/en/for-media/media-releases-and-features/partners-agree-initial-funding-kick-waste-chemistry-project>
- Alle cijfers - gemeente-overzicht*. (sd). Opgehaald van <https://allecijfers.nl/gemeente-overzicht/>
- Ansaldo Energia. (2018). *Integrated Business Model for Power*. Opgehaald van http://www.aimsea.it/images/notizie/2018/giornate_di_studio/firenze_061118/presentazioni/Industria/2018-Giornata-della-Combustione-Firenze---Ansaldo-Energia.pdf
- Arena. (2018, August). *Opportunities for Australia from hydrogen exports*. Opgehaald van <https://arena.gov.au/assets/2018/08/opportunities-for-australia-from-hydrogen-exports.pdf>
- AT Osborne, W. P. (September 2018). *Buisleidingen in Nederland, een marktverkenning*. Baarn.
- Austria. (2018, September). *The Hydrogen Initiative*. Opgehaald van <https://www.eu2018.at/latest-news/news/09-18-Informal-meeting-of-energy-ministers.html>
- Bloomberg. (2018, November 8). *Russia Looks to Hydrogen as Way to Make Gas Greener for Europe*. Opgehaald van <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-11-08/russia-looks-to-hydrogen-as-way-to-make-gas-greener-for-europe>
- BlueTerra. (2018, Maart). *WKK Barometer; Marktpositie WKK voorjaar 2018*. Opgehaald van https://www.kasalsenergiebron.nl/content/docs/Algemeen/WKK_Barometer_rapport_mrt_2018.pdf
- Bode, J. (2016, december 19). *Defensie Pijpleidingen organisatie moderniseert*. Opgehaald van Defensie Materieelgezien09: <https://magazines.defensie.nl/materieelgezien/2016/09/mg201609dpo>
- BureauVoorlichtingBinnenvaart. (2018). *Binnenvaartcijfers*. Opgehaald van <https://binnenvaartcijfers.nl/>
- CBS. (sd). *CBS Energiebalans Nederland 2017*. Opgehaald van statline.cbs.nl: <https://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?DM=SLNL&PA=83140NED>
- CE Delft. (2014). *MKBA Warmte Zuid-Holland*.
- CE Delft. (2016). *Gastransitie en warmtenetten*. CE Delft.
- Chiyoda. (2017). *Hydrogen transport via MCH*. Opgehaald van <https://www.chiyodacorp.com/en/service/spera-hydrogen/innovations/>
- Cor Leguijt, e. a. (Oktober 2018). *Ontwikkelstrategie Energietransitie NZKG, Kansen en acties nu en later*. Delft: CE Delft.
- Dijkshoorn, A. (2019). *Fossielvrije, duurzame en rendabele glastuinbouw. Kas als Energiebron*.
- DNV-GL. (2017, November). *Verkenning Waterstofinfrastructuur*. Opgehaald van https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/TKI%20Gas/publicaties/DNVGL%20rapport%20verkenning%20waterstofinfrastructuur_rev2.pdf

- FCHJU. (2019, January). *CertifHy Succeeds in Establishing the first EU-wide Guarantee of Origin for Green Hydrogen*. Opgehaald van <https://www.fch.europa.eu/news/certifhy-project-establishing-first-eu-wide-guarantee-origin-green-hydrogen>
- FutureProofShipping. (2018). Opgehaald van <https://futureproofshipping.com/>
- Gasunie. (2018, 18 november). *Waterstof vraag en aanbod nu -2030 - 2050, Rapportage sub-werkgroep 1 van de werkgroep waterstof*. Den Haag.
- Gasunie Transportservices. (2018). *Waterstof Infrastructuur. Energielab Noord-Holland, 13 November 2018*. Amsterdam.
- Gessel, S. v., Larré, J. J., Huijskes, T., & G. Remmelts. (november 2018). *Ondergrondse Opslag in Nederland, Technische verkenning*. TNO Rapport 2018 R11372.
- Gigler&Weeda. (Maart 2018). *Contouren van een Routekaart Waterstof*. Den Haag: Topsector Energie, TKI nieuw gas.
- Goldmeer, J. (2018). *Fuel flexible gas turbines as enablers for a low or reduced carbon energy eco system, GE Power. Electrify Europe 2018*. Vienna, Austria.
- H2G-O. (2017, December 5). *Convenant Groene Waterstofeconomie Goeree Overflakkee*. Opgehaald van <https://www.zuid-holland.nl/@19376/convenant-groene/>
- Hulst, N. v. (2018, December 13). *How Northwest Europe can shape a clean hydrogen market*. Opgehaald van [www.iea.org: https://www.iea.org/newsroom/news/2018/december/how-northwest-europe-can-shape-a-clean-hydrogen-market.html](http://www.iea.org/newsroom/news/2018/december/how-northwest-europe-can-shape-a-clean-hydrogen-market.html)
- H-vision. (2018, November 3). *H-vision project; Deltalinqs*. Opgehaald van <https://www.deltalinqs.nl/nieuwsberichten/h-vision-brengt-energietransitie-in-hogere-versnelling>
- Hydrogen Council. (2017, January). *How Hydrogen empowers the energy transition*. Opgehaald van [www.hydrogencouncil.com: http://hydrogencouncil.com/study-how-hydrogen-empowers/](http://www.hydrogencouncil.com/http://hydrogencouncil.com/study-how-hydrogen-empowers/)
- IRENA. (2018). *Renewable power generation costs 2017*. Abu Dhabi: IRENA, International Renewable Energy Agency.
- KIWA. (2018, Juli). *Toekomstbestendige gasdistributienetten*. Opgehaald van https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Toekomstbestendige_gasdistributienetten_133.pdf
- Klimaatakkoord. (2018, December 21). *Ontwerp van het Klimaatakkoord*. Opgehaald van <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2018/12/21/ontwerp-klimaatakkoord>
- Klimaatmonitor. (sd). <https://klimaatmonitor.databank.nl/Jive>.
- LNG-terminal. (sd). Opgehaald van <https://gate.nl/>
- Maritiemnederland. (2017, Augustus 16). *Ammoniak als scheepsbrandstof*. Opgehaald van <http://www.maritiemnederland.com/nieuws/ammoniak-als-scheepsbrandstof/item2361>
- Melieste, R. (2017, November). *Deep decarbonization in the port of Rotterdam*. Opgehaald van https://www.voltachem.com/images/uploads/FINAL_VoltaChem_event_-_Presentatie_Port-of-Rotterdam.pdf
- MRDH. (2016, November). *Roadmap Next Economy*. Opgehaald van <https://mrdh.nl/system/files/projectbestanden/Roadmap%20Next%20Economy%20NL%20versie.pdf>

- Northern Gas Networks. (2016, July). *H21 Leeds City Gate*. Opgehaald van <https://www.northerngasnetworks.co.uk/wp-content/uploads/2017/04/H21-Report-Interactive-PDF-July-2016.compressed.pdf>
- OCAP. (2018). Opgehaald van <https://www.ocap.nl/nl/index.html>
- OCAP-website. (sd). Opgehaald van <https://www.ocap.nl/nl/onze-leveranciers/nieuwe-bronnen>
- OOZO. (sd). Opgehaald van <https://www.oozo.nl/provincie/cijfers/zuid-holland>: <https://www.oozo.nl/provincie/cijfers/zuid-holland>
- Platform Industriële Warmte. (2014, Maart). Opgehaald van <http://www.industriewarmte.nl/Portals/3/6.%20DuPont%20HVC%20-%20v%20Kessel%20v%20Waard%20-%20Final%20-%2017%20maart%202014.pdf>
- Porthos. (2018, April 9). *CO2 opslag onder noordzee technisch haalbaar en kosteneffectief*. Opgehaald van <https://www.portofrotterdam.com/nl/nieuws-en-persberichten/co2-opslag-onder-noordzee-technisch-haalbaar-en-kosteneffectief>
- Rotterdam, P. o. (February 2016). *Over 120 industrial companies. One Powerful cluster; Fact & Figures on the Rotterdam energy port and petrochemical cluster*. Rotterdam.
- Smit, N. v. (2017). *Energiemonitor van de Nederlandse glastuinbouw 2016*. Wageningen: WUR.
- Statline, C. (2019). Opgehaald van <https://statline.cbs.nl/Statweb>
- Tennet. (2017). *Kwaliteits- en capaciteitsdocument 2017, Deel III Investerings Net op Zee 2018-2027*. Opgehaald van https://www.tennet.eu/fileadmin/user_upload/Company/Publications/Technical_Publications/Dutch/TenneT_KCD2017_Deel_III.pdf
- Tennet, G. &. (2019). *Infrastructure Outlook 2050, A joint study by Gasunie and TenneT on integrated energy infrastructure in the Netherlands and Germany*.
- Terwell, R. J. (March 2018). *Climate Neutral Aviation with Current Engine Technology, the take-off of synthetic kerosene production in the Netherlands*. Quintel, Kalavasta.
- TNO. (2016). *Het fossiele dilemma van Rotterdam, TNO discussiepaper*. Delft: TNO Innovation for Life.
- TransportOnline. (2018, September 7). *Helpt goederen uit Rotterdamse haven gaat naar buitenland*. Opgehaald van www.transport-online.nl: <https://www.transport-online.nl/site/nl/94957/helpt-goederen-uit-rotterdamse-haven-gaat-naar-het-buitenland/>
- Waste Management World. (2018, Februari 16). *Enerkem to Lead Consortium to Develop Waste to Chemical Project in Rotterdam*. Opgehaald van <https://waste-management-world.com/a/enerkem-to-lead-consortium-to-develop-waste-to-chemical-project-in-rotterdam>
- Wijk&Hellinga. (2018). Waterstof de sleutel voor de energietransitie. In P. Luscure, *Circulariteit, op weg naar 2050?* (pp. 291-313). Delft: TU Delft.
- Wijk&Roest&Boere. (November 2017). *Solar Power to the People*. Nieuwegein: Allied Waters.
- Wijk, A. v. (April 2017). *The Green Hydrogen Economy in the Northern Netherlands*. Groningen: Northern Netherlands Innovation Board.

