

WATERSTOF

DE ONTBREKENDE SCHAKEL

JANUARI 2021



Raad voor de leefomgeving en infrastructuur

De Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (Rli) is het strategische adviescollege voor regering en parlement op het brede domein van duurzame ontwikkeling van de leefomgeving en infrastructuur. De raad is onafhankelijk en adviseert gevraagd en ongevraagd over langetermijnvraagstukken. Met een integrale benadering en advisering op strategisch niveau wil de raad bijdragen aan de verdieping en verbreding van het politiek en maatschappelijk debat en aan de kwaliteit van de besluitvorming.

Samenstelling Rli

Ir. J.J. (Jan Jaap) de Graeff (voorzitter)
Drs. P. (Pallas) Agterberg
Drs. J.A. (Jeanet) van Antwerpen
Prof. mr. N.S.J. (Niels) Koeman
Drs. J. (Jantine) Kriens
Drs. E.M.J. (Emmy) Meijers
Drs. K.J. (Krijn) Poppe
Ir. C.M. (Karin) Sluis
Prof. dr. E.T. (Erik) Verhoef
Em. prof. dr. A.N. (André) van der Zande

Junior-raadsleden

E. (Eva) Gaaff MSc
J.L. (Ludo) Groen MSc
Y. (Yourai) Mol BPhil

Algemeen secretaris

Dr. R. (Ron) Hillebrand

Raad voor de leefomgeving en infrastructuur

Bezuidenhoutseweg 30
Postbus 20906
2500 EX Den Haag
info@rli.nl
www.rli.nl



INHOUD

SAMENVATTING

6

DEEL 1: ADVIES

14

1 INLEIDING

14

1.1 Waterstof en de klimaatopgave

14

1.2 Aandacht voor waterstof bij beleidsmakers, energiesector en industrie

17

1.3 Vraagstelling van dit advies

18

1.4 Opbouw van dit advies

18

2 ROL EN TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN VAN WATERSTOF

19

2.1 Waterstof als energie-alternatief

20

2.2 Waterstof als grondstofalternatief

22

2.3 Potentiële toepassingen in de Nederlandse economie op sectorniveau

23

2.4 Slotsom

25

3 NAAR EEN VOLWAARDIGE WATERSTOFMARKT

26

3.1 Knelpunten bij het opbouwen van een waterstofmarkt

27

3.2 Kosten van waterstofproductie

27

3.3 Beprijzing van milieueffect niet-klimaatneutrale brand- en grondstoffen

28

3.4 Realisatie van een transport- en distributienetwerk

30

3.5 Slotsom

30

4 STRATEGISCH BELANG VAN WATERSTOF VOOR NEDERLAND EN EU

31

4.1 Internationale context

31

4.2 Uitgangspositie van Nederland

32

4.3 Keuze voor waterstof in geopolitiek onrustige tijden

34

4.4 Kansen voor verduurzaming Nederlandse industrie

35

4.5 Belang van bevordering innovatie rond waterstoftechnologie

36

4.6 Slotsom

37

5 ESSENTIËLE RANDVOORWAARDEN

38

5.1 Wettelijk kader voor productie en omgang met waterstof

38

5.2 Maatschappelijke acceptatie van waterstof

39

5.3 Veiligheid van waterstofgebruik in openbare ruimte

39

5.4 Slotsom

40

6 AANBEVELINGEN

41



DEEL 2: ANALYSE

1	ROL VAN WATERSTOF IN DE ENERGIE- EN GRONDSTOFFENTRANSITIE	47	2.2	Verwachte vraag naar waterstof per sector	70
1.1	Ons huidige energie- en grondstoffensysteem	47	2.3	Concurrentiepositie van waterstof per sector	73
1.2	Energie- en grondstoffensysteem van de toekomst	50	2.4	Inzichten per sector	74
1.3	Onmisbaarheid van moleculen in een klimaatneutraal systeem	52	2.4.1	Industriesector	74
1.4	Routes naar klimaatneutrale moleculen	56	2.4.2	Energiesector	77
1.5	Opslag van energie en de rol van waterstof	58	2.4.3	Mobiliteitssector	79
1.5.1	Toekomstige opslag van energie voor warmtevoorziening	58	2.4.4	Sector gebouwde omgeving	82
1.5.2	Toekomstige opslag van energie voor elektriciteitsvoorziening	60	2.4.5	Landbouwsector	84
1.5.3	Mogelijkheden voor seizoensopslag van elektriciteit	60	2.4.6	Internationale lucht- en scheepvaartsector	85
1.5.4	Mogelijkheden voor opslag van waterstof	62	2.4.7	Samenvattend beeld	86
1.6	Stijging energieprijns in klimaatneutraal systeem	63	2.5	Inschatting potentie van waterstof in onze buurlanden	87
1.7	Samenvattend beeld	65	2.5.1	Duitsland: Noordrijn-Westfalen	87
2	AANBOD, VRAAG EN CONCURRENTIEPOSITIE VAN WATERSTOF	66	2.5.2	Verenigd Koninkrijk	88
2.1	Aanbod van waterstof	66	2.5.3	Samenvattend beeld	89
2.1.1	Routes naar vergroten van het waterstofaanbod	67	3	UITGANGSPOSITIE VAN NEDERLAND	90
2.1.2	Voors en tegens van de verschillende routes	69	3.1	Potentiële markt voor waterstof op korte termijn	90
2.1.3	Eigen productie versus import	70	3.2	Mogelijkheden voor productie en opslag van waterstof	91
2.1.4	Samenvattend beeld	70	3.3	Beschikbare infrastructuur voor transport van waterstof	93
			3.4	Mogelijkheden voor import	95
			3.5	Kennis en economische infrastructuur	95
			3.6	Samenvattend beeld	97

4	ONTWIKKELING WATERSTOFECONOMIE IN INTERNATIONAAL PERSPECTIEF	99	6	ROL OVERHEID BIJ ONTWIKKELING WATERSTOFMARKT	119
4.1	Internationaal momentum	100	6.1	Marktfalen in de waterstofmarkt	119
4.2	Multinationals: voorzichtige stappen in afwachting van overheid	100	6.2	Benodigde prijsontwikkeling	121
4.3	Landen en regio's: van beleidsintenties tot concrete investeringen	101	6.3	Keuze van beleidsinstrumenten	122
4.4	EU: plannen voor vergroten productiecapaciteit en aanleg waterstofnetwerk	105	6.4	Samenvattend beeld	124
4.5	Nederland in het internationale speelveld	106			
4.6	Geopolitieke ontwikkelingen	107	LITERATUUR		125
4.7	Samenvattend beeld	112	BIJLAGEN		130
5	VEILIGHEID VAN WATERSTOF	113	KENGETALLEN		130
5.1	Verschillen tussen waterstof en aardgas	113	WAT IS NODIG VOOR PRODUCTIE EN OPSLAG VAN 1 PETAJOULE ENERGIE?		134
5.2	Toenemend gebruik van waterstof in publieke domein	114	TOTSTANDKOMING VAN HET ADVIES		135
5.3	Vragen rond veiligheid van waterstoftoepassingen	115	OVERZICHT PUBLICATIES		138
5.4	Initiatieven gericht op veiligheid van waterstoftoepassing	116			
5.5	Bestaande wet- en regelgeving	117			
5.6	Onderzoek naar veiligheidsaspecten	117			
5.7	Samenvattend beeld	118			





SAMENVATTING

De interesse voor de inzet van waterstof ten behoeve van een duurzame energievoorziening neemt toe, zowel in Nederland als in het buitenland. Op tal van plaatsen wordt hierover gediscussieerd en gepubliceerd. Daarbij lopen de meningen over de inzetbaarheid van waterstof en de condities waaronder die moet plaatsvinden uiteen. Een aantal vragen staat daarbij centraal:

- *Wat is de betekenis van klimaatneutrale waterstof als grondstof, brandstof en energiedrager in een duurzame Nederlandse economie?*
- *Hoe reëel zijn de verwachtingen ten aanzien van waterstof en passen daar al eindbeelden bij?*
- *Wat is het strategische belang van waterstof voor Nederland?*
- *Wat betekent het strategische belang van waterstof voor de inzet van de rijksoverheid en anderen?*

In dit advies gaat de Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (verder te noemen 'de raad') op deze vragen in.

Waterstof speelt ook nu al een substantiële rol als grondstof in de chemische industrie. De raad concludeert in dit advies dat waterstof een cruciale schakel vormt in de toekomstige klimaatneutrale energie- en grondstoffenvoorziening. Maar de waterstofmarkt die hiervoor nodig is ontstaat niet vanzelf, daar is een actieve inzet van de overheid voor nodig gericht op het

creëren van de vraag naar waterstof. De overheidsinzet bestaat uit het doen van investeringen in de infrastructuur maar ook bijvoorbeeld uit het werken aan het maatschappelijk draagvlak. Actieve inzet is niet alleen noodzakelijk voor de verduurzaming van de Nederlandse economie, maar ook omdat die bijdraagt aan het Nederlands verdienpotentieel. In dit advies wordt de hoofdboodschap aan de hand van de vraagstelling van dit advies verder uitgewerkt. De raad heeft met dit advies de ambitie het onderwerp integraal te benaderen, een overzicht te geven en een realistisch beeld te schetsen.

Wat is de betekenis van klimaatneutrale waterstof als grondstof, brandstof en energiedrager in een duurzame Nederlandse economie?

Waterstof wordt een essentieel onderdeel van het toekomstige klimaatneutrale energiesysteem van Nederland, zo laten toekomstscenario's en potentieelstudies zien. De bijdrage van aardolie, aardgas en kolen zal op de lange termijn sterk worden gereduceerd. Veel meer processen zullen elektrisch worden aangedreven. Vooral wind en zon zullen als duurzame energiebronnen worden gebruikt. Maar niet in alle energiebehoeften kan zonder meer met elektriciteit worden voorzien. Transportkosten zijn voor elektriciteit hoger dan voor gasvormige energiedragers en de transportcapaciteiten lager. Bovendien zijn er perioden waarin wind en zon in Noordwest-Europa simpelweg te weinig energie leveren. Schoon geproduceerde ('klimaatneutrale') waterstof – dat wil zeggen waterstof bij de productie waarvan geen CO₂ vrijkomt – biedt een oplossing voor deze problemen. Elektriciteit kan namelijk worden omgezet in waterstof, in die vorm worden opgeslagen en later weer worden omgezet in elektriciteit. Dit maakt het mogelijk om

periodieke overschotten en tekorten aan elektriciteit uit zon en wind kosteneffectief op te vangen en te verhandelen.

Waterstof zal daarnaast een belangrijk onderdeel worden van het Nederlandse grondstoffensysteem. Door zijn moleculaire structuur is waterstof namelijk óók bruikbaar als grondstof voor het vervaardigen van brandstoffen, materialen en producten die nu nog worden gemaakt uit aardolie, aardgas en kolen en bij chemische processen zoals het recyclen van kunststoffen.

Hoe groot de rol van waterstof zal worden in ons energie- en grondstoffensysteem is nog niet precies te zeggen. Waterstof krijgt een cruciale rol bij een aantal toepassingen (zie paragraaf 2.3) waardoor minimaal 15-25% van de energiedragers in de finale behoefte aan energetische en non-energetische toepassingen via waterstof zal verlopen. Voor andere toepassingen is waterstof een van de mogelijke routes. Als de kosten dalen en de beschikbaarheid toeneemt, kan waterstof dus een nog veel belangrijkere rol vervullen dan nu het geval is.

Doordat waterstof tegelijkertijd in verschillende industrietakken nodig zal zijn als klimaatneutrale grondstof voor de productie van basismaterialen (zoals plastics, kunstmest en staal), vormt het in een nieuw energie- en grondstoffensysteem een integrerend element, dat uitwisseling tussen onderdelen van dit systeem mogelijk maakt. Flexibiliteit en leveringszekerheid zijn daarmee gewaarborgd.



Er zijn verschillende potentiële toepassingen voor waterstof. Vooralsnog is waterstof het enige klimaatneutrale alternatief voor het genereren van hoge temperatuurwarmte in de industrie en voor het produceren van schone brandstof voor vliegtuigen en zeeschepen. Verder kan waterstof worden gebruikt voor het verwarmen van gebouwen, en als schoon alternatief voor aardgas. Dit kan met name uitkomst bieden in situaties waar andere vormen van duurzame energie moeilijk of alleen tegen hoge kosten kunnen worden ingezet.

Hoe reëel zijn de verwachtingen ten aanzien van waterstof en passen daar al eindbeelden bij?

Klimaatneutrale waterstof zal niet vanzelf een plek vinden in het Nederlandse energie- en grondstoffensysteem. Op dit moment zijn de vraag naar en het aanbod van klimaatneutrale waterstof nog ontoereikend. Ook is de infrastructuur voor het transport, de distributie en de opslag nog niet gereed. Om dit alles tot stand te brengen zal overheidsstimulering nodig zijn. Een waterstofbeurs, naar het voorbeeld van de stroom- en gasbeurzen, kan vervolgens dienen als economisch coördinatiemechanisme en als katalysator van een markt voor klimaatneutrale waterstof.

In het uiteindelijke systeem zal de rol van waterstof zoals gezegd cruciaal zijn. De raad verwacht dat in dit 'eindbeeld' voornamelijk gebruik zal worden gemaakt van 'groene' waterstof, dat is geproduceerd uit hernieuwbare energiebronnen. Om de gewenste eindsituatie te bereiken is echter een tussenperiode onontkoombaar. Daarin wordt gebruikgemaakt van

'blauwe' waterstof, dat wordt geproduceerd uit fossiele energiebronnen waarna de bij dit proces vrijkomende CO₂ wordt opgeslagen.

Wat is het strategische belang van waterstof voor Nederland?

De waterstofmarkt ontwikkelt zich op dit moment in een internationale context. Het is daarom de vraag of Nederland het voortouw moet nemen. Kunnen we niet beter wachten op stappen van de Europese Unie (EU) en andere landen? Zowel de Europese Commissie als landen om ons heen, met name Duitsland, hebben concrete plannen gepresenteerd voor het ontwikkelen van een waterstofmarkt en daar ook middelen voor vrijgemaakt. Ook mondiaal oriënteren verschillende regio's (onder meer het Midden-Oosten, Noord-Afrika, Japan, China en Zuid-Korea met Australië en Nieuw-Zeeland) zich op de mogelijkheden om waterstof te produceren en te exporteren. Vooral de ontwikkelingen in Duitsland en België zijn voor Nederland van belang en kunnen een positief effect hebben op de ontwikkeling van de Nederlandse markt.

Toch is het volgens de raad raadzaam dat Nederland ook zelf op korte termijn actief inzet op het aanzwengelen van een waterstofmarkt in Nederland. Niet alleen omdat dit noodzakelijk is voor de verduurzaming van de Nederlandse economie, maar ook omdat het belangrijk is geen achterstand op te lopen ten opzichte van de ons omringende landen. De Nederlandse overheid zal moeten investeren in infrastructuur, transport- en opslagcapaciteit. Door tegelijk ook de productie van waterstof in Nederland te stimuleren, kan op termijn de voorzieningszekerheid worden vergroot. Nederland wordt dan minder afhankelijk van andere landen, wat in de



huidige onrustige geopolitieke situatie verstandig is. Daar komt bij dat Nederland verhoudingsgewijs over een gunstige uitgangspositie beschikt om een waterstofmarkt op te bouwen. Verschillende productievormen van waterstof zijn in Nederland realiseerbaar, Nederland heeft goede mogelijkheden voor de CO₂-afvang en opslag en er is een bestaand netwerk voor gastransport en -distributie dat te gebruiken is voor waterstof. Nederland beschikt bovendien over relevante kennis en ervaring. Denkbaar is dat een vooraanstaande positie van Nederland in de internationale waterstofmarkt op termijn economisch voordeel zal opleveren.

Wat betekent het strategische belang van waterstof voor de inzet van de rijksoverheid en anderen?

Een markt voor klimaatneutrale waterstof in Nederland zal niet ontstaan zonder actieve inzet van de overheid. De belangrijkste belemmeringen die de overheid kan helpen verminderen zijn:

1. de hoge aanloopkosten voor onder meer infrastructuur en technologie;
2. het gebrek aan vraag naar klimaatneutrale waterstof als gevolg van het prijsvoordeel dat fossiele energiebronnen nu nog genieten ten opzichte van klimaatneutrale alternatieven;
3. het ontbreken van investeringsbereidheid bij marktpartijen in de productie van klimaatneutrale waterstof zolang de afname niet is gegarandeerd;
4. het ontbreken van voldoende gevoel van urgentie in de samenleving als het gaat om het belang van klimaatneutrale waterstof;
5. Het risico dat er maatschappelijke weerstand zou kunnen ontstaan vanwege vermeende onveiligheid en hoge kosten.

De raad vindt dat het kabinet de realisatie van een transport- en distributienetwerk van waterstof moet faciliteren. Nederland beschikt over een uitgebreid (en met de terugdringing van het aardgasgebruik zelfs sterk overgedimensioneerd) aardgastransportnetwerk. Dit netwerk kan geschikt worden gemaakt voor waterstof. Een infrastructuur bestaande uit een hoofdnetwerk dat transport van waterstof mogelijk maakt tussen industriële clusters, naar opslagfaciliteiten en naar import- en exportlocaties, is een voorwaarde voor ontwikkeling van de waterstofmarkt.

Daarnaast heeft de rijksoverheid een cruciale rol bij het stimuleren van vraag naar klimaatneutrale waterstof. Dat kan het beste door de CO₂-uitstoot van niet-klimaatneutrale alternatieven te beprijsen. Daarmee ontstaat een structureel eerlijke concurrentiepositie voor klimaatneutrale waterstof (en andere klimaatneutrale alternatieven). Voor het ontwikkelen van de Nederlandse productie van klimaatneutrale waterstof zijn tijdelijke subsidies overigens wel een goede oplossing.

Per sector verschilt de concurrentiepositie van klimaatneutrale waterstof ten opzichte van de alternatieven. Daarom zal een sectorgerichte aanpak nodig zijn. Daarbij maakt de raad het volgende onderscheid:

- Voor sectoren die niet vallen onder het CO₂-emissiehandelssysteem van de EU, zoals de transportsector en de sector gebouwde omgeving, zijn nationale maatregelen nodig die de vraag naar klimaatneutrale waterstof vergroten.
- Bij grote industriële ondernemingen en elektriciteitsproducenten zal het Europese CO₂-emissiehandelssysteem op termijn een effectief instrument



vormen om de vraag naar waterstof te stimuleren, zeker in combinatie met het aangescherpte Europese klimaatbeleid. Omdat verdergaand EU-beleid nog in de maak is, denkt de raad dat op de korte termijn ook voor deze sectoren de waterstofvraag moet worden gestimuleerd met specifieke nationale maatregelen.

Naarmate klimaatneutrale waterstof een belangrijker plaats krijgt in het Nederlandse energie- en grondstoffensysteem, zal het benodigde maatschappelijk draagvlak zwaarder gaan wegen. Het is daarom belangrijk dat de overheid goed communiceert over de reden waarom waterstof nodig is, en over de manier waarop zal worden omgegaan met de uiteenlopende consequenties van het gebruik van waterstof.

Eén van die consequenties betreft de veiligheid. De toepassing van waterstof is nu nog sterk geconcentreerd in industriële toepassingen. Maar de introductie van nieuwe waterstoftoepassingen en -technologieën in het publieke domein, inclusief grootschalig transport en opslag, brengt per definitie risico's met zich mee. Het kabinet dient budget vrij te maken om zorgvuldig en uitgebreid onderzoek te doen, zodat er meer zicht komt op die risico's en de benodigde maatregelen hoe deze risico's te beheersen. Voorkomen moet worden dat er grootschalige toepassingen op de markt komen die onvoldoende veilig zijn. Ook kleinschalige toepassingen waar waterstof bij betrokken is, kunnen onvoldoende veilig zijn. Zeker in de fase waar we nu zitten, zullen kleine incidenten onder een vergrootglas komen te liggen. Dit zou het draagvlak voor waterstof kunnen ondermijnen.

Een aandachtspunt betreft ook transparantie over de kosten van waterstof. De introductie van elke vorm van duurzame energie heeft, zeker in de aanvangsfase, kostprijsverhogende effecten voor de consument c.q. afnemer. Zo zullen de energiekosten van huishoudens en bedrijven stijgen wanneer waterstof wordt toegepast voor de verwarming van gebouwen. Dit kan met fiscale maatregelen weer gecompenseerd worden. Deze compensatie kan alleen tijdelijk van aard zijn. De overheid zal over de aan de energietransitie verbonden kosten en over vormen van compensatie helder moeten communiceren.

De raad heeft zes aanbevelingen opgesteld met maatregelen die de rijksoverheid de komende tijd concreet moet nemen. De aanbevelingen worden hieronder samengevat weergegeven.

1. Investeer op korte termijn in de totstandkoming van een hoofdtransportnet voor waterstof met import- en exportmogelijkheden

Een voorwaarde voor het ontstaan van een waterstofmarkt is de aanwezigheid van opslagfaciliteiten, import- en exportfaciliteiten en een transportnetwerk dat deze faciliteiten verbindt met de industriële clusters. Zo'n landelijk dekkend waterstoftransportnetwerk met import- en exportmogelijkheden komt niet tot stand zonder overheidsinzet. Gezien de aanwezigheid van een aardgasnetwerk dat kan worden benut voor waterstoftransport, zijn de kosten om een waterstoftransportnetwerk tot stand te brengen relatief laag en zullen de benodigde overheidsinvesteringen dus beperkt zijn.



2. Geef veiligheid en ook maatschappelijk draagvlak een explicietere rol in het beleid

De veiligheid van nieuwe waterstoftechnologie moet vooraf zorgvuldig en uitgebreid worden onderzocht. De overheid dient hiervoor budget vrij te maken. Veiligheid kan dan worden meegenomen voor toepassingen van waterstoftechnologie voordat die grootschalig op de markt komen. Dit is een cruciale randvoorwaarde voor de inzet van waterstof in diverse toepassingen in het publieke domein.

Daarnaast dient de overheid actief aandacht te besteden aan het maatschappelijk draagvlak voor waterstof. Het gaat dan in de eerste plaats om duidelijke communicatie over de noodzaak van het gebruik van waterstof en dialoog over de veiligheidsrisico's die daaraan verbonden zijn. Lokale initiatieven op het gebied van waterstof kunnen hieraan bijdragen.

Daarnaast verdient de betaalbaarheid van waterstof aandacht in het beleid. Compensatie voor burgers of bedrijven die na de transitie meer moeten gaan betalen voor hun energievoorziening kan worden overwogen.

3. Stimuleer het ontstaan van vraag naar klimaatneutrale waterstof

De overheid moet ervoor zorgen dat klimaatneutrale waterstof kan concurreren met niet-duurzame alternatieven. Alleen dan ontstaat een waterstofvraag die past in het eindbeeld voor de verschillende sectoren van de Nederlandse economie. Het creëren van de vraag kan in theorie het beste door CO₂-uitstoot te beprijken. De consequentie is dat het prijsniveau stijgt en de klimaatneutrale alternatieven concurrerder worden. In het advies Naar een duurzame economie bepleit de raad bovendien een omgekeerde

bewijslast als het gaat om het concurrentienadeel en CO₂-weglekeffecten als gevolg van dergelijke heffingen als zij alleen in Nederland zouden gelden.

Als het gaat om klimaatneutrale waterstof zou op dit moment een CO₂-prijs van ver boven de honderd euro per ton nodig zijn om de concurrentie aan te kunnen. De speelveldtoets geeft aan dat de marges in de industrie smal zijn, de opties tot verduurzamen nog beperkt, en de kans op CO₂-weglek aanzienlijk.¹ Daarom is het van belang dat beprijken van CO₂-uitstoot in EU-verband gebeurt.² Hierin voorziet het EU-plan voor een importtaks op producten van buiten de EU op basis van de CO₂-voetafdruk. Nederland moet zich in Brussel sterk maken voor dit *carbon border adjustment mechanism*. Ook moet Nederland aandringen op een verdere aanscherping van het Europese CO₂-emissiehandelssysteem, zodat de prijs die de industrie moet betalen voor haar CO₂-uitstoot verder omhoog gaat.

De internationale concurrentiepositie van de energie-intensieve industrie in Nederland laat op dit moment niet de nationale verhoging van de CO₂-prijs toe die nodig zou zijn om de klimaatneutrale waterstof concurrerend te maken. Besluitvorming op EU-niveau duurt lang en is niet zeker. Het creëren van vraag naar waterstof en een waterstofmarkt moet dus op korte termijn met andere instrumenten worden gerealiseerd.

¹ De 'speelveldtoets' is het onderzoek naar de impact van het aangekondigde klimaatbeleid op de concurrentiepositie van de Nederlandse industrie, uitgevoerd door PwC (2020).

² Er moet worden voorkomen dat producten zoals staal, aluminium en cement onbelast kunnen worden geïmporteerd uit landen waar industriële bedrijven zich niet aan de strenge klimaatregels hoeven te houden. Hierin voorziet het EU-plan voor een importtaks op producten van buiten de EU op basis van de CO₂-voetafdruk.



Op nationaal niveau kan de overheid waterstof concurrerend maken met een specifieke maatregelen per sector. In de luchtvaart, scheepvaart en de gebouwde omgeving zal een fysieke of administratieve bijmengverplichting voor leveranciers van fossiele brandstoffen het effectiefst zijn. In andere sectoren zal fiscale stimulering of een verplichting van het gebruik van klimaatneutrale waterstof beter werken.

Op langere termijn is de verwachting dat de stijgende ETS-prijs in combinatie met de dalende kostprijs van klimaatneutrale waterstof voldoende stimulans biedt om klimaatneutrale waterstof concurrerend te maken. Genoemde instrumenten hebben daarom een tijdelijk karakter. Het gaat hier om keuzes tot 2030. Na 2030 zal de inzet van instrumenten herijkt moeten worden.

4. Sluit bij de ontwikkeling van een waterstofmarkt geen vormen van waterstofproductie uit

De productie van 'blauwe' waterstof, gemaakt uit aardgas en industriële restgassen met afvang en opslag van CO₂, zal een belangrijke overgangstechnologie vormen voor de komende vijftien tot twintig jaar. Blauwe waterstofcapaciteit draagt daarnaast bij aan de voorzieningszekerheid, ook op langere termijn als er meer en goedkopere groene waterstof (geproduceerd door middel van elektrolyse) beschikbaar komt. Ook import van waterstof zal een rol gaan spelen, maar volledige afhankelijkheid van waterstof die buiten de EU wordt geproduceerd is onwenselijk, vanwege het belang van voorzieningszekerheid.

5. Bied financiële ondersteuning aan (productie)technologieën die het ontstaan van een Nederlandse markt voor klimaatneutrale waterstoftechnologie bevorderen

Diverse technologieën op het gebied van waterstof kunnen bijdragen aan het ontstaan van een Nederlandse klimaatneutrale waterstofmarkt: gecombineerde afvang en opslag van CO₂, gecombineerde energieopwekking en waterstofproductie uit wind-op-zee, waterstofopslag in zoutcavernes en de productie van brandstoffen op basis van waterstof. De overheid zou de (verdere) ontwikkeling van dit soort technologieën financieel moeten ondersteunen.³ Dit is mogelijk door middel van bijvoorbeeld *contracts-for-difference*, waarbij fabrikanten van producten die met deze relatief dure technologieën zijn gemaakt, het prijsverschil van de overheid terugkrijgen.

6. Zet actief in op samenwerking in EU-verband en met buurlanden en ontwikkel een sterkere internationale oriëntatie

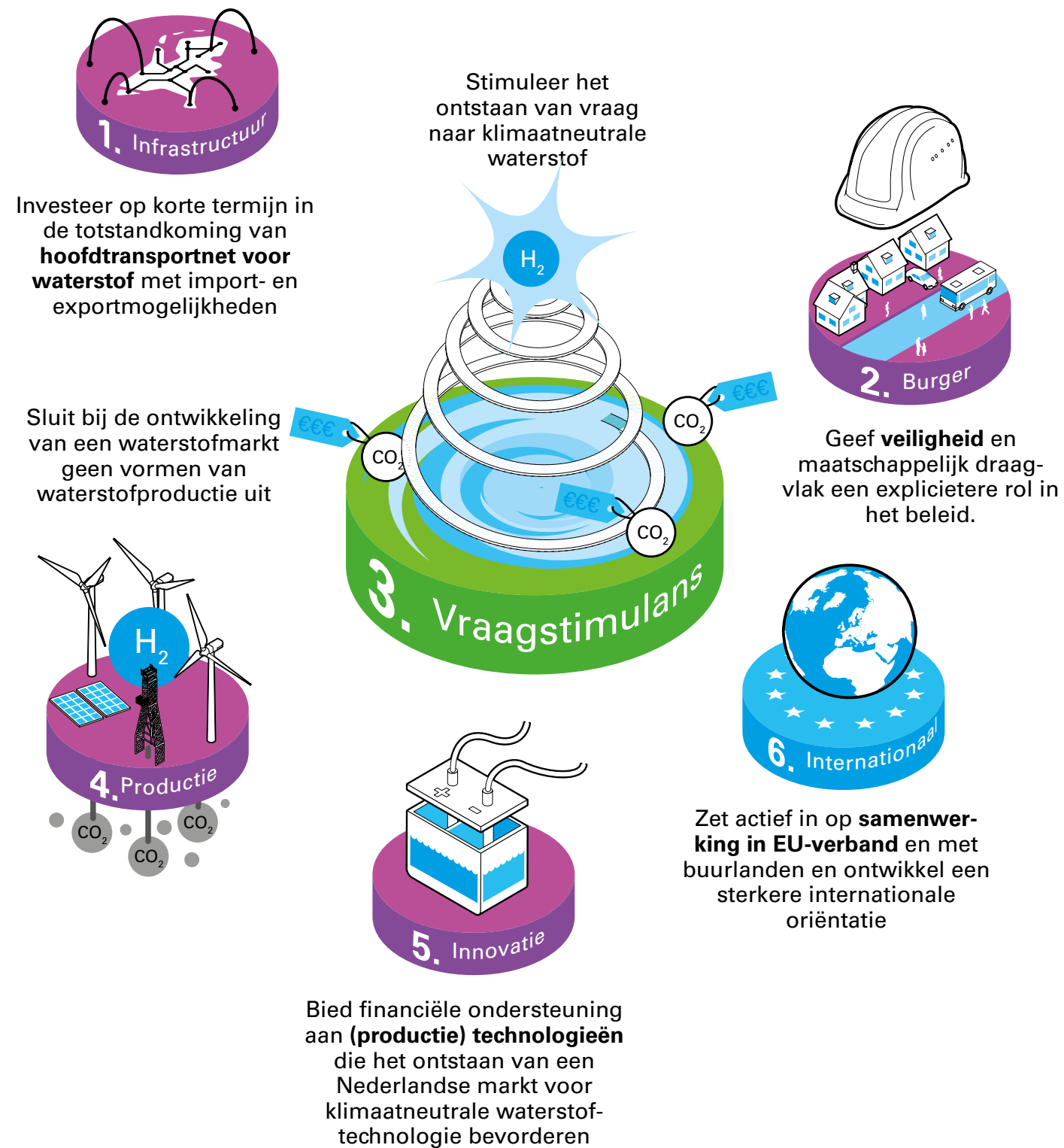
Als het gaat om het verwerven van een waardevolle positie op de waterstofmarkt heeft Nederland in vergelijking met andere landen het voordeel dat het op dit moment al een internationaal energieknooppunt is. Om dit voordeel optimaal te benutten en bij te dragen aan de verduurzaming van Europa, is actieve inzet nodig op Europese samenwerking. Vooral de samenwerking met Duitsland en België, met landen rond de Noordzee of in Pentalateraal verband⁴ zou verder moeten worden geïntensiveerd om te

³ Het rapport 'Waterstof: kansen voor de Nederlandse industrie' (Reijerkerk & Van Rhee, 2019) biedt een overzicht van kansen en mogelijkheden voor de Nederlandse industrie.

⁴ Het Pentalateraal overleg is het Energieoverleg overleg tussen de Benelux, Duitsland, Frankrijk, Oostenrijk en Zwitserland.



komen tot een gecoördineerde uitrol van de waterstofmarkt en een grote mate van voorzieningszekerheid.



1 INLEIDING

1.1 Waterstof en de klimaatopgave

In het klimaatakkoord van Parijs hebben 197 landen afgesproken dat de CO₂-uitstoot in 2050 zal zijn teruggebracht met 95% ten opzichte van 1990, met als tussenstap een reductie van 49% in 2030. De Europese Commissie heeft het CO₂-reductiedoel voor 2030 in september 2020 verder aangescherpt naar 55%. Om deze klimaatdoelen te halen is een transitie nodig naar een 'klimaatneutraal' energie- en grondstoffensysteem, dat volledig anders is ingericht dan we gewend zijn.

Het huidige Nederlandse energieverbruik bedraagt, inclusief de verliezen die optreden bij productie, transport en distributie,⁵ ruim 3.000 petajoule (PJ) per jaar. Deze energie wordt hoofdzakelijk (voor ruim 90%) verkregen uit fossiele bronnen (aardolie, aardgas en kolen). Een groot deel hiervan wordt gebruikt voor het opwekken van warmte en elektriciteit en voor de productie van brandstoffen voor voertuigen en vliegtuigen. Daarnaast wordt een equivalent van zo'n 380 PJ aan fossiele energie in de chemische industrie gebruikt als grondstof voor de fabricage van materialen. Ter vergelijking: alle 7,9 miljoen Nederlandse huishoudens bij elkaar verbruiken jaarlijks ongeveer 455 PJ aan energie, waarvan ongeveer 20% in de vorm van elektriciteit en 80% in de vorm van gas.

⁵ Energieverliezen treden op bij bijvoorbeeld de omzetting van gas naar elektriciteit in gascentrales en bij het transport van energie.

In het toekomstige klimaatneutrale energiesysteem zal elektriciteit een groter aandeel hebben dan nu. Bovendien zal die elektriciteit veel meer dan nu duurzaam worden opgewekt, door middel van onder meer zonnepanelen en windmolens. Op dit moment bestaat ongeveer 20% van de verbruikte energie in Nederland (zowel huishoudens als industrie) uit elektriciteit, met elektronen als energiedrager. Deze elektronen worden op dit moment nog voor het overgrote deel geproduceerd uit aardgas en kolen.⁶ De andere 80% van de verbruikte energie komt volledig voort uit directe aanwending van aardgas, aardolie of kolen, waar de moleculen de energiedragers zijn.

Energiedragers in de vorm van moleculen blijven ook in een klimaatneutraal systeem nodig. De reden hiervan is dat moleculen, in tegenstelling tot elektronen, goedkoper en in grotere hoeveelheden zijn op te slaan en te transporteren. Ook in vergelijking met alternatieve energievormen zoals restwarmte en aardwarmte zijn moleculaire energiedragers efficiënter hanteerbaar. Moleculen zullen daarnaast nodig blijven als grondstof voor de vervaardiging van allerhande basismaterialen, zoals plastics en staal. De benodigde hoeveelheid moleculen zal kleiner zijn dan nu het geval is, maar nog steeds aanzienlijk.

De opgave waar de landen die zich aan het klimaatakkoord hebben verbonden voor staan, bestaat zodoende voor een belangrijk deel uit een zoektocht naar *klimaatneutrale moleculen*. Hierbij valt te denken aan

⁶ In 2019 was bijna 90% van alle in ons land verbruikte elektriciteit opgewekt door verbranding van aardgas en kolen.

biomassa,⁷ groene gassen, biogassen⁸ en fossiele gassen waarvan de CO₂ is afgevangen. Ook waterstof maakt deel uit van dit spectrum van potentiële oplossingen.

Wat is waterstof, hoe kunnen we het maken en waarvoor kunnen we het gebruiken?

Waterstof is een kleurloos, reukloos, smaakloos en hoog ontvlambaar (maar niet giftig) gas, dat lichter is dan lucht. Bij een temperatuur van -253 graden Celsius wordt waterstof vloeibaar.

In de scheikunde draagt waterstof – aangeduid met het symbool H van hydrogenium – atoomnummer 1.

Als waterstof in zuivere vorm op aarde zou voorkomen, zou de transitie naar een schoon energiesysteem eenvoudig te realiseren zijn. Het chemische element H is echter niet in pure vorm in de natuur aanwezig; het komt alleen voor in gebonden toestand met zuurstof in de vorm van water (H₂O) en/of koolstof in de vorm van een koolwaterstof (C_xH_y).

Waterstof kan dus niet worden gewonnen; het moet worden geproduceerd. Dat kan op diverse manieren:

⁷ Biomassa bestaat uit allerlei organische materialen, waaronder hout, gft-afval, plantaardige olie, mest en speciaal hiervoor verbouwde gewassen.

⁸ Biogas wordt geproduceerd uit onder meer rioolslib, tuinafval, groente- en fruitresten en koeienmest. Als het daarna wordt gezuiverd zodat het dezelfde kwaliteit krijgt als aardgas, mag het 'groen gas' worden genoemd.



- Waterstof is eenvoudig te produceren uit fossiele brandstoffen (koolwaterstoffen) zoals aardgas of kolen. Deze stoffen worden dan chemisch ontleed in koolstof en waterstof. Maar dit omvormingsproces is niet duurzaam, omdat er CO₂ bij vrijkomt. Men spreekt bij deze productiewijze daarom van 'grijze' waterstof.
- Duurzamer is het om waterstof te produceren uit aardgas, industriële restgassen of kolen en de vrijgekomen CO₂ af te vangen en opnieuw te gebruiken of ondergronds op te slaan, bijvoorbeeld in lege aardgasvelden onder de Noordzee. Dit heet 'blauwe' waterstof.
- Een derde methode is om waterstof door middel van 'elektrolyse' te onttrekken aan water. Zuiver water wordt dan onder invloed van elektrische spanning gesplitst in waterstof en zuurstof. Bij dat proces komt geen CO₂ vrij. Als deze elektriciteit volledig duurzaam is opgewekt (bijvoorbeeld uit wind- of zonne-energie), is er sprake van 'groene' waterstof.
- Andere methoden om waterstof te produceren zijn momenteel binnen Nederland minder aan de orde, maar kunnen wel relevant zijn met het oog op eventuele mogelijke import. Zo kunnen kernreactoren met de opgewekte stroom, eventueel in combinatie met de opgewekte warmte, ook efficiënt water splitsen in waterstof en zuurstof. Dit wordt 'paarse' waterstof genoemd. Daarnaast is methaanpyrolyse een relatief nieuwe techniek om waterstof te produceren. Hierbij wordt waterstof uit aardgas gemaakt met koolstof – en niet CO₂ – als waardevol bijproduct. Deze variant wordt 'turquoise' waterstof genoemd.

'Gele' waterstof ten slotte, betreft geïmporteerde 'groene' waterstof uit landen uit het Midden-Oosten en de Sahara op basis van elektrolyse en elektriciteit verkregen uit zonne-energie.⁹

Enmaal geproduceerde waterstof kan op verschillende manieren worden gebruikt. In de eerste plaats als schone brandstof. Anders dan bij de verbranding van fossiele brandstoffen ontstaat bij de verbranding van waterstof slechts waterdamp en dus geen CO₂. Auto's kunnen op waterstof rijden wanneer ze zijn uitgerust met een waterstofbrandstofcel. Waterstof kan daarnaast dienen als grondstof voor chemische processen zoals het recyclen van kunststoffen of het maken van synthetische kerosine.

Om waterstof voor deze doeleinden te kunnen inzetten, moet zij worden opgeslagen en getransporteerd. Dat kan in de vorm van gas en in de vorm van vloeistof. Als vloeistof is de energiedichtheid van waterstof relatief groot: viermaal groter dan die van aardgas. Daar staat tegenover dat er zeer hoge druk nodig is om waterstof vloeibaar te maken. Bij opslag en transport van waterstof als gas speelt dit probleem niet. Maar de energiedichtheid van waterstof in de vorm van gas is driemaal geringer dan die van aardgas.¹⁰

⁹ Zie voor een ruimer overzicht van productiemethoden van waterstof: <https://www.wattisduurzaam.nl/17586/featured/duurzame-en-fossiele-waterstof-in-alle-kleuren-van-de-regenboog>

¹⁰ Zie ook de bijlage met kentallen achter in dit advies.



1.2 Aandacht voor waterstof bij beleidsmakers, energiesector en industrie

Bij beleidsmakers en ook in de energie- en industriese sector in binnen- en buitenland groeit de aandacht voor waterstof als alternatief voor fossiele brandstoffen. Dit valt op te maken uit de diverse akkoorden, plannen, adviezen en strategieën die de laatste jaren zijn opgesteld op het gebied van energie en klimaat.

Zo krijgt waterstof een belangrijke rol toegedicht in het nationale Klimaatakkoord van 2019 dat mede werd ondertekend door de industrie-sector, de energiesector en milieuorganisaties, in het afgelopen voorjaar verschenen klimaatplan van het kabinet voor de periode 2021-2030, en in verschillende regionale energiestrategieën en gemeentelijke warmtevisies. Ook TenneT en Gasunie hebben zich onlangs gezamenlijk uitgesproken voor een energie-infrastructuur waarin waterstof een sleutelrol vervult (TenneT & Gasunie, 2020). En de Sociaal-Economische Raad (SER) heeft in een recent advies over een industrieel koploperprogramma voor de vijf industriële regio's eveneens expliciet gewezen op de potentiële rol van waterstof en het belang van de aanleg van waterstofinfrastructuur (SER, 2019).

Aanvullend op het zojuist genoemde klimaatplan heeft het kabinet in april 2020 een visie op waterstof gepresenteerd, gevolgd door een visie op de verduurzaming van de Nederlandse basisindustrie. In beide stukken wordt de toekomstige rol van waterstof benadrukt. Het kabinet verwijst in dat verband naar de werkzaamheden van de Taskforce Infrastructuur Klimaattafel Industrie (TIKI). Deze taskforce publiceerde in mei 2020 zijn

rapport, met daarin de aanbeveling om te investeren in waterstofinfrastructuur op basis van het bestaande hoofdtransportgasnet.

Het kabinet wil door het bundelen en beter coördineren van krachten een versnelling in de besluitvorming over investeringen in de energie-infrastructuur mogelijk maken. Een in te stellen Programma Infrastructuur Duurzame Industrie (PIDI) moet dit proces ondersteunen. Het kabinet wil daarnaast zorgen dat er een integrale belangenafweging komt. Hiervoor wordt een afwegingskader opgesteld. Verder wordt in het Programma Energie Hoofdstructuur Toets gekeken naar de ruimtelijke inpassing. Specifiek voor het onderzoeken van de stappen die nodig zijn om een waterstofhoofdinfrastructuur te realiseren voert het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) samen met Gasunie en TenneT de zogenoemde Hyway 27-studie uit (Tweede Kamer, 2020a).

Internationaal bestaat er eveneens veel aandacht voor waterstof. Zo presenteerde de Europese Commissie in de zomer van 2020 een ambitieuze waterstofstrategie. Daarin wordt waterstof beschreven als een cruciaal onderdeel in een klimaatneutraal energiesysteem. Ook Duitsland heeft nadrukkelijk ambities op het vlak van waterstof; het land heeft in zijn nationale herstellfonds € 9 miljard gereserveerd voor de ontwikkeling van een waterstofmarkt. Vrijwel alle andere Europese landen hebben eveneens ambities uitgesproken op het vlak van waterstof. Mondiaal zijn Japan, Zuid-Korea en Australië de voorlopers. Maar ook landen uit het Midden-Oosten en Noord-Afrika tonen interesse; deze landen zien mogelijkheden om hun potentiële overschot aan duurzame zonne-energie in te zetten om zich te



ontwikkelen tot exporteur van waterstof. Verder toont het mondiale en Europese bedrijfsleven veel interesse in waterstof; er worden uiteenlopende activiteiten ondernomen.

1.3 Vraagstelling van dit advies

Tegen de achtergrond van de geschetste ontwikkelingen rond waterstof heeft de Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (hierna 'de raad') een advies opgesteld, met de volgende vragen als vertrekpunt:

- Wat is de betekenis van waterstof als grondstof, brandstof en energiedrager in een duurzame Nederlandse economie?
- Hoe reëel zijn de verwachtingen ten aanzien van waterstof en passen daar al eindbeelden bij?
- Wat is het strategische belang van waterstof voor Nederland?
- Wat betekent het strategische belang van waterstof voor de inzet van de rijksoverheid en anderen?

1.4 Opbouw van dit advies

Het vervolg van dit advies is als volgt opgebouwd:

- In hoofdstuk 2 schetst de raad de rol en toepassingsmogelijkheden van waterstof in een duurzame economie.
- In hoofdstuk 3 inventariseert de raad wat er nodig is voor de ontwikkeling van een volwaardige waterstofmarkt en welke knelpunten daarbij spelen.

- In hoofdstuk 4 schetst de raad het internationale speelveld rond waterstof, de uitgangspositie van Nederland en het strategische belang van Nederland om in de productie van waterstof te investeren.
- In hoofdstuk 5 bespreekt de raad een aantal essentiële randvoorwaarden waaronder een wettelijk kader voor waterstof en het belang van een maatschappelijk bewustzijn van de noodzaak van waterstof.
- In hoofdstuk 6 ten slotte, formuleert de raad zes concrete aanbevelingen aan de Nederlandse overheid.





2 ROL EN TOEPASSINGS- MOGELIJKHEDEN VAN WATERSTOF

Een deel van de transitie naar een klimaatneutrale economie kan worden gerealiseerd door het aandeel elektriciteit dat wordt geproduceerd met windturbines en zonneparken te vergroten. Maar omdat de inzet van wind- en zonne-energie niet voldoende zal zijn om ons energie- en grondstoffensysteem volledig klimaatneutraal te maken, is een aanvullend alternatief nodig. Waterstof is één van de opties die voorligt (paragraaf 2.1). Een ander deel van de transitie naar een klimaatneutrale economie kan worden gerealiseerd door moleculaire grondstoffen als kolen, aardolie en aardgas te vervangen door klimaatneutrale moleculen. Hier vormt waterstof eveneens een goede optie; waterstof kan namelijk óók worden gebruikt als grondstof voor de vervaardiging van (basis) producten (paragraaf 2.2). Waterstof is in potentie op veel plekken in de economie toepasbaar en vormt op termijn in de verschillende sectoren een concurrerend alternatief (paragraaf 2.3).

2.1 Waterstof als energie-alternatief

In het klimaatneutrale energiesysteem van de toekomst zal elektriciteit een groter aandeel hebben dan nu. Er zijn echter grenzen aan de mogelijkheden tot elektrificatie van het energiesysteem. De raad signaleert dat er ten minste drie factoren zijn die verregaande elektrificatie in de weg staan.

1. Elektrificatie niet bij alle processen technisch haalbaar

Niet bij alle processen waarvoor op dit moment fossiele grondstoffen worden gebruikt als energiebron, kan technisch gezien de overstap worden gemaakt naar elektrificatie. Dit geldt bijvoorbeeld voor industriële processen die een hogere temperatuur vereisen dan met elektrische boilers kan worden bereikt. Ook de productie van (basis)producten en materialen vraagt om andere grondstoffen dan elektriciteit. De aandrijving van scheepvaart en vliegverkeer is bij de huidige stand van de techniek evenmin realiseerbaar met elektrische energie.

2. Elektriciteitsopslag onvoldoende voor koude, donkere en windstille periodes van langere duur

Doordat de zon niet altijd schijnt, de wind soms hard en soms zacht waait, maar ook doordat vraag en aanbod van elektriciteit per seizoen variëren en niet altijd op elkaar aansluiten, zullen er momenten zijn waarop er te weinig of juist te veel stroom is. Dit betekent niet alleen dat er vraagsturing nodig is (bijvoorbeeld door het op- of afregelen van productie-eenheden), maar ook dat er buffers in het energiesysteem nodig zijn. Deze buffers vereisen flexibele transportcapaciteit en grootschalige opslag van energie.

De benodigde flexibiliteit in het netwerk en de opslag kan decentraal worden geregeld met behulp van kortetermijnbuffers, accu's en flexibiliteitsmechanismen. Maar om langere koude, donkere en windstille perioden door te komen, zogenaamde *dunkelflautes*, is seizoensopslag van energie noodzakelijk. Schattingen van Gasunie en TenneT (2019) geven aan dat er behoefte zal bestaan aan grootschalige opslag van 100 PJ tot 150 PJ om voorzieningszekerheid te kunnen garanderen.¹¹ Dergelijke grote hoeveelheden energie kunnen vooralsnog niet in de vorm van elektriciteit of accu's worden opgeslagen. Op dit moment is waterstof hiervoor de meest kansrijke, zo niet de enige technische optie.

3. Knelpunten bij opwekking, transport en distributie van elektriciteit

In 2050 zal Nederland volgens de huidige schattingen maximaal 60 GW elektrisch vermogen aan windparken op zee beschikbaar kunnen hebben en maximaal 80 GW aan zonnepanelen.¹² Tezamen zou dat jaarlijks gemiddeld 1350 PJ (375 TWh) aan energie opleveren.¹³ Met deze hoeveelheid energie kan worden voorzien in ongeveer de helft tot driekwart van de volledige jaarlijkse energievraag.¹⁴ Import van elektriciteit zou dit aandeel en de

¹¹ Ter vergelijking: in het huidige energiesysteem vervult aardgas de rol van seizoensopslag met een opslagcapaciteit van ruim 500 PJ. Zoveel centraal opgeslagen energie zal echter niet nodig zijn in een nieuw klimaatneutraal energiesysteem.

¹² Het nationale Klimaatakkoord gaat uit van een doorgroei van windenergieopwekking op zee tot maximaal 60 GW in 2050 (Klimaatakkoord, p. 158). Het Klimaatakkoord voorziet niet in een maximumvermogen aan zonne-energie; de hier genoemde 80 GW is een aanname die in verschillende scenario's wordt gehanteerd als praktisch maximum.

¹³ Zie voor de berekening van dit geschatte rendement hoofdstuk 1 van deel 2 van dit advies.

¹⁴ De raad baseert zich hierbij op de vier klimaatneutrale energiescenario's voor 2050 die recent zijn opgesteld in opdracht van Gasunie, TenneT en de regionale netbeheerders (Den Ouden *et al.*, 2020). Volgens deze scenario's zal Nederland in 2050 een primaire energiebehoefte hebben (exclusief synthetische brandstoffen voor de scheep- en luchtvaart) die ligt tussen de 1.775 PJ en 2.964 PJ.



leveringszekerheid nog kunnen verhogen. Hoe groot het aandeel elektriciteit in de toekomstige energievoorziening werkelijk kan zijn, is echter onzeker. Dit hangt namelijk mede af van de mate waarin er in de tussentijd energie wordt bespaard en wordt geïnvesteerd in de aanleg van onder meer wind- en zonneparken voor duurzame elektriciteitsopwekking.¹⁵

De transport- en distributiecapaciteit van het elektriciteitsnetwerk vormt nog een extra knelpunt. Het gehele Nederlandse elektriciteitsnetwerk transporteert op dit moment ongeveer 130 terawattuur (TWh) aan elektriciteit per jaar. Netbeheer Nederland heeft in 2019 aangegeven dat de verzwaring van het netwerk die nodig is om vanaf 2030 de in het Klimaatakkoord afgesproken extra 35 TWh aan duurzaam opgewekte elektriciteit op land te kunnen transporteren, zonder aanpassing van regels en randvoorwaarden niet goed realiseerbaar is (Netbeheer Nederland, 2019a). Het huidige vraaggestuurde en centraal gevoede elektriciteitsnet zal moeten worden omgebouwd naar een aanbodgestuurd en decentraal, weersafhankelijk gevoed elektriciteitsnet. De eerdergenoemde Taskforce Infrastructuur Klimaatakkoord Industrie heeft berekend dat hiermee alleen al tot 2030 circa € 40 miljard gemoeid zal zijn (TIKI, 2020).¹⁶ Een bijkomend probleem is dat de piekvraag naar elektriciteit ondertussen sneller toeneemt dan het

¹⁵ Fysiek, planologisch en financieel liggen er grote opgaven voor de ontwikkeling van productiecapaciteit van hernieuwbare energie, waaronder de plaatsing van duizenden windturbines op zee en zonneparken op land. Een belangrijk punt van zorg is dat een overaanbod van elektriciteit (op wind- en zonnrijke dagen) en de bijbehorende lage en soms zelfs negatieve elektriciteitsprijzen, investeerders afschrikt om nieuwe projecten te starten.

¹⁶ Ter vergelijking: de taskforce geeft in hetzelfde rapport aan dat de kosten voor het realiseren van een waterstofhoofdtransportnetwerk, op basis van vrijkomende leidingen in het bestaande gastransmissienetwerk, in de eerste fase uitkomen op ongeveer € 2 miljard (TIKI, 2020). Dit netwerk kan naar verwachting in basisvorm rond 2027 gereed zijn.

tempo waarin het systeem kan worden aangepast aan de nieuwe eisen.¹⁷ De grootste uitbreiding van het elektriciteitsnetwerk tot een capaciteit van zo'n 220 TWh per jaar moet daarna nog plaatsvinden, in de periode 2030-2050.¹⁸

Overkoepelend beeld

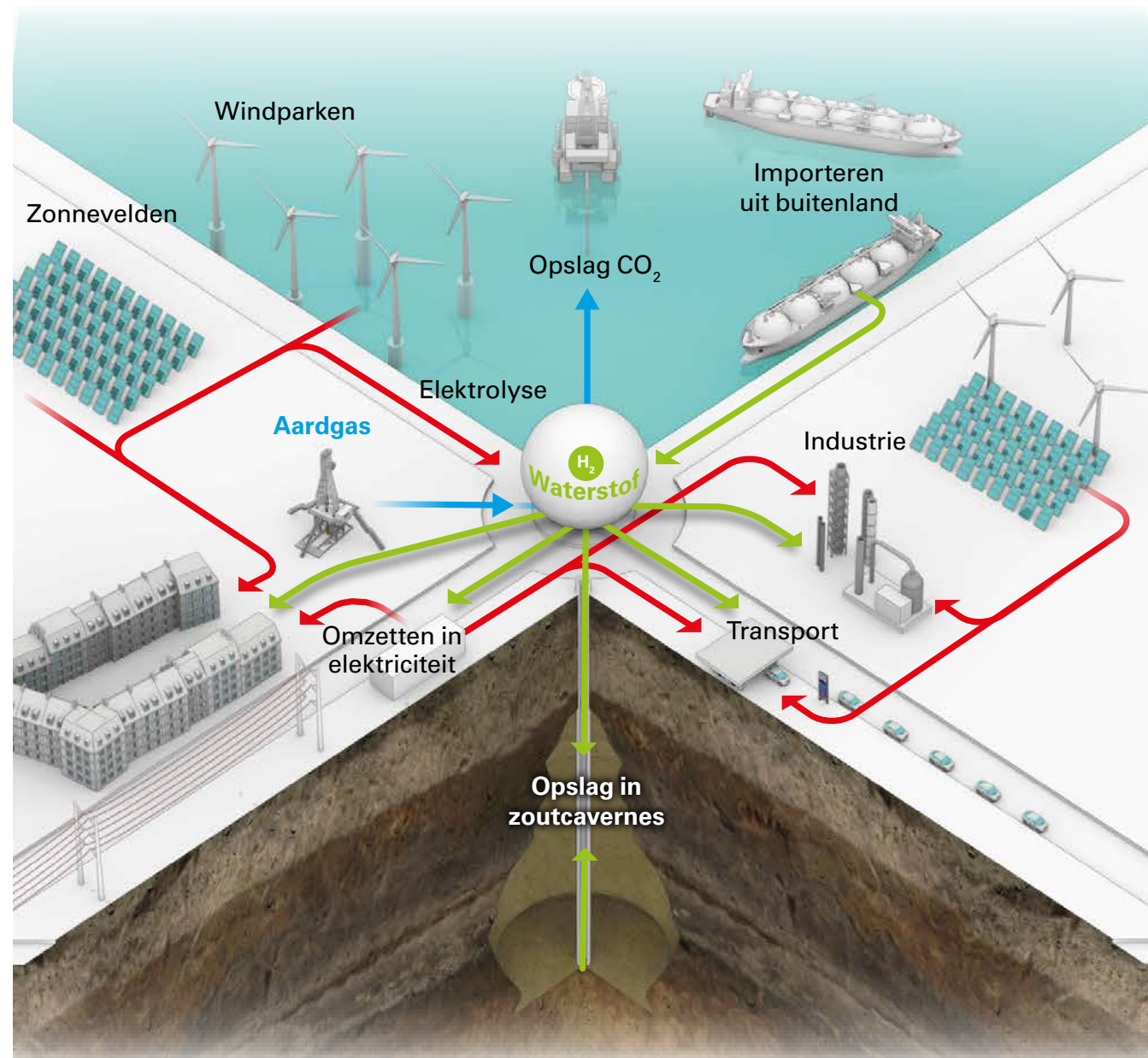
Hoewel het technisch mogelijk is om in Nederland een energievoorziening te realiseren die geheel is gebaseerd op elektriciteit, is de raad van oordeel dat een dergelijk systeem kwetsbaar is en daardoor te grote risico's met zich meebrengt voor de Nederlandse economie. Bovendien zijn er te hoge kosten mee gemoeid (hoofdstuk 1 van deel 2 gaat hier verder op in). Het is volgens de raad dan ook verstandig om gekoppeld aan elektrificatie een systeem te ontwikkelen op basis van moleculaire energiedragers en zorg te dragen voor mogelijke uitwisseling tussen deze systemen. Waterstof is binnen zo'n oplossing een voor de hand liggende moleculaire energiedrager, omdat waterstof klimaatneutraal kan worden geproduceerd én uitwisselbaar is met elektriciteit. Een bijkomend voordeel van dit laatste is dat een hoge mate van systeemintegratie en flexibiliteit kan worden bereikt, waarbij elektriciteit en waterstof gezamenlijk het hart van een energievoorziening vormen en deze in balans kunnen houden. Figuur 1 schetst hoe een dergelijk toekomstig systeem eruit kan zien.

¹⁷ Op dit moment is de piekvraag zo'n 16.000 MW in de winter, terwijl het maximale aanbod in het voorjaar zo'n 30.000 MW is. Scenario's geven echter aan dat deze piekvraag in de wintermaanden zal toenemen naar 40.000 tot 50.000 MW. Terwijl de capaciteit van het hoogspanningsnet maar 20.000 MW is.

¹⁸ De uitwerking en vereiste stappen zijn onderwerp van het project Hyway 27 dat het ministerie van EZK uitvoert in samenwerking met Gasunie en TenneT.



Figuur 1: Vereenvoudigde impressie energie- en grondstoffensysteem op basis van elektriciteit en waterstof



2.2 Waterstof als grondstofalternatief

Fossiele bronnen zoals kolen, aardolie en aardgas worden in de huidige economie niet alleen als energiebron gebruikt, maar ook als grondstof. Van aardgas wordt bijvoorbeeld ammoniak gemaakt (dat op zijn beurt weer een grondstof vormt voor kunstmest), aardolie wordt gebruikt als grondstof voor plastics en tal van andere kunststoffen, terwijl steenkool onder meer wordt ingezet bij de productie van ijzer.

Alleen moleculaire stoffen lenen zich voor dit soort chemische omzettingsprocessen. Dat betekent dat in een klimaatneutrale economie, waar kolen, aardolie en aardgas geen grote rol meer spelen, 'klimaatneutrale moleculen' nodig zijn waarmee de zojuist genoemde basismaterialen kunnen worden gemaakt.

Omdat waterstof uit moleculen bestaat vormt het niet alleen als energiebron maar óók als grondstof een goed en klimaatneutraal alternatief, mits het 'schoon' (zonder CO₂-uitstoot) is geproduceerd. Maar er zijn meer klimaatneutrale grondstofalternatieven. Zo kan ook aardgas worden gebruikt waarvan de CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen. Datzelfde proces kan worden toegepast op gas dat ontstaat bij vergassing of vergisting van biomassa. En ook gas dat wordt gewonnen uit natuurlijke restproducten zoals mest, rioolslib en gft-afval ('biogas') kan in een klimaatneutrale economie als grondstof worden ingezet. Daarnaast kunnen gerecyclede moleculen uit afvalstromen worden gebruikt als grondstof.

Er zijn dus tal van opties om te komen tot industriële productieprocessen op basis van schone grondstoffen. De toepassing van waterstof is één

van die opties. Den Ouden *et al.* (2020) voorzien dat in de industriesector het gebruik van waterstof als grondstof de komende drie decennia zal toenemen van 12% naar 37%. Deze toename correspondeert in de genoemde studie met de sturing op het Europese en internationale beleid, dat naar verwachting het gebruik van waterstof als energiebron én als grondstof zal bevorderen. Daardoor zullen de waterstofmarkten groter worden en zal de Nederlandse industrie meer kansen krijgen om waterstof in productieprocessen te integreren.

2.3 Potentiële toepassingen in de Nederlandse economie op sectorniveau

Hoe een toekomstig CO₂-neutraal energie- en grondstoffensysteem er in de praktijk uit kan zien en welke mogelijkheden er zijn om zo'n systeem te realiseren, is in diverse scenario's verkend.¹⁹ De raad heeft voor dit advies enkele scenario's bestudeerd. Vervolgens heeft de raad sessies met deskundigen georganiseerd om in kaart te brengen wat in de verschillende scenario's de potentiële toepassingen van waterstof zijn en wat de omvang daarvan kan zijn.

De raad signaleert dat er een brede consensus bestaat over het idee dat waterstof een rol zal gaan spelen in het toekomstige energie- en grondstoffensysteem, zowel in de eindsituatie van 2050 als op weg daarnaartoe. Ook gaan alle scenario's ervan uit dat de rol van waterstof aanzienlijk zal zijn.

¹⁹ Zie bijvoorbeeld Hydrogen Council (2020); Netbeheer Nederland (2017); Berenschot & Kalavasta (Den Ouden *et al.*, 2020).

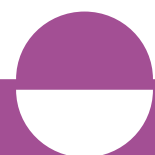
Gemiddeld wordt gesproken van een waterstofaandeel in de energiebehoefte²⁰ die minimaal tussen de 15% en 25% ligt, al is de bandbreedte daaromheen fors (hoofdstuk 2 van deel 2 gaat in op absolute hoeveelheden per sector).

De raad ziet een rol voor de industrie in de transitie naar een duurzame economie, zowel in de eindsituatie waarin waterstof een belangrijke functie heeft in de circulaire economie als in de transitie daar naar toe. Op dit moment wordt ten behoeve van de (petro-)chemische industrie grote hoeveelheden waterstof geproduceerd uit aardgas.²¹ Bij de productie van 'grijze' waterstof, veelal gemaakt uit aardgas en industriële restgassen, komt CO₂ vrij. Door de industriële schaal en het feit dat in clusters samengewerkt kan worden, is hier efficiënt en op kortere termijn een versnelling in de ontwikkeling van klimaatneutrale waterstof teweeg te brengen door de inzet van zowel CCS (blauwe waterstof) als groene waterstof. Deze waterstofontwikkelingen kunnen als aanjager fungeren voor de andere sectoren.

In de transitie naar een meer klimaatneutrale economie kan elke sector kiezen uit een aantal mogelijkheden voor de vervanging van de huidige

²⁰ Bedoeld is hier de 'finale' energiebehoefte, dus de hoeveelheid energie die door de afnemers feitelijk wordt verbruikt. Omdat waterstof altijd moet worden geproduceerd vanuit een andere energiebron (bijvoorbeeld elektriciteit, gas, restgassen, kolen) en er bij de productie van waterstof altijd sprake is van conversieverlies, is de 'primaire energiebehoefte' (de hoeveelheid energie die moet worden opgewekt om aan de vraag te voldoen) nog groter. Overigens is het verschijnsel van conversieverlies normaal in de energiewereld en niet alleen van toepassing op waterstof. Uiteraard is het wel van belang om de verliezen zoveel mogelijk te beperken.

²¹ Het gaat hier om jaarlijks zo'n 175 PJ, ter vergelijking: de gehele Nederlandse energiebehoefte is 3000 PJ. Bescheiden, maar groot genoeg om een goede start te maken. Uiteindelijk zal de gehele behoefte aan klimaatneutrale waterstof twee tot drie keer deze omvang krijgen.



fossiele oplossingen. Waterstof vormt een van die mogelijkheden. De belangrijkste vraag naar waterstof is te verwachten in de volgende sectoren en voor de volgende toepassingen:

Economische sectoren	Waterstoftoepassingsmogelijkheden
Industriese sector	Hogetemperatuurwarmte Grondstof voor materialen
Energie sector	Flexibele opslag en transport van energie
Transport- en mobiliteitssector	Brandstof voor vervoermiddelen
Sector gebouwde omgeving	Verwarming van huizen, tapwater

Een korte toelichting per toepassingsmogelijkheid:

- *Hogetemperatuurwarmte.* Waterstof kan in bijvoorbeeld de (petro)chemische industrie en de staalindustrie worden ingezet voor het CO₂-neutraal genereren van hogetemperatuurwarmte die nodig is voor tal van fabricageprocessen.
- *Grondstof voor materialen.* Waterstof is een flexibele chemische bouwsteen en kan zodoende dienen als grondstof, in combinatie met andere grondstoffen, voor de vervaardiging van uiteenlopende materialen. Zo kan waterstof worden ingezet voor zowel de productie van kunststoffen, staal en kunstmest, als voor de productie van synthetische brandstoffen

voor de scheep- of luchtvaart.²² De verwachting is dat grootschalig gebruik van klimaatneutrale waterstof niet alleen de bestaande industrie zal verduurzamen, maar bij inzet als grondstof ook zal leiden tot het ontstaan van nieuwe duurzame industrieën.

- *Flexibele opslag en transport van energie.* Waterstof kan in het elektriciteitssysteem worden gebruikt om (grote) overschotten van elektriciteit op te slaan, piekvraag en langdurige tekorten te accommoderen, vraag en aanbod te balanceren en energie op een efficiënte manier te transporteren.
- *Brandstof voor vervoermiddelen.* Waterstof is in de transport- en mobiliteitssector een mogelijk alternatief voor CO₂-uitstotende brandstoffen zoals benzine, diesel en kerosine. Zo kan waterstof in combinatie met brandstofcellen worden toegepast in vrachtauto's. Daarnaast kunnen op basis van waterstof synthetische brandstoffen worden geproduceerd. Vooral voor de aandrijving van zwaardere vervoermiddelen over langere afstanden (zware vrachtwagens, schepen, vliegtuigen) lijkt dit laatste een kansrijke optie.
- *Verwarming van huizen en gebouwen.* In de gebouwde omgeving is waterstof te gebruiken voor het verwarmen van huizen en het voorzien in tapwater. Nu gebeurt dat nog grotendeels met aardgas. Er zijn diverse alternatieven, maar die hebben elk hun eigen voor- en nadelen. Zo is overstappen naar geheel elektrische verwarming of naar verwarming door middel van een warmtenet in sommige woonwijken duur of

²² Waterstof wordt ook nu al grootschalig ingezet als grondstof in de ammoniakproductie en de petrochemie. Schattingen van TNO en CBS (2020) geven aan dat het jaarlijks om zo'n 175 PJ aan waterstof gaat. Het gaat hier om waterstof die niet klimaatneutraal wordt geproduceerd.



ingewikkeld. Bovendien stuiten deze oplossingen soms op weerstand. Groen gas kan dan een oplossing zijn, maar dit is vooralsnog beperkt leverbaar. Voor waterstof, aangeleverd via de bestaande aardgasleidingen, geldt dat de kosten ervan in 2030 lager zullen zijn dan die van *all electric*- of warmtenetopties (PBL 2020a en PBL 2020b). Verder zou waterstof vooral een rol kunnen spelen in hybride oplossingen, zoals hybride warmtepompen of het ‘bijvoeden’ van warmtenetten in situaties waar aardwarmte of restwarmte structureel of bij piekbelasting onvoldoende capaciteit levert.

Er moet dan wel voldoende goedkope klimaatneutrale waterstof beschikbaar zijn. Naarmate waterstof op meer manieren wordt ingezet, kan er systeemefficiëntie ontstaan. Zowel de schaalvoordelen als de beschikbaarheidsvoordelen nemen dan toe.

De mate waarin waterstof daadwerkelijk een rol zal gaan spelen in de hier geschetste toepassingen verschilt per sector en is mede afhankelijk van de beschikbare alternatieven. De balans tussen de voor- en nadelen vormt geen statisch gegeven, want zowel waterstof als de alternatieven zijn nog volop in ontwikkeling. Dit betekent dat doelgericht en op maat stimuleren van de vraag naar waterstof nodig is om, wanneer dit wenselijk wordt geacht, een grotere rol van waterstof in bepaalde sectoren van de Nederlandse economie te realiseren.

2.4 Slotsom

Concluderend stelt de raad vast dat voor de energievoorziening van ons land behalve energiedragers in de vorm van elektronen (i.e. elektriciteit) ook energiedragers in de vorm van moleculen belangrijk zullen blijven. Het zal dan wel moeten gaan om klimaatneutrale moleculen. Ook voor de grondstoffenvoorziening in de industrie zullen, als alternatief voor aardgas, aardolie en kolen, klimaatneutrale moleculen onontbeerlijk zijn.

Te midden van de verschillende opties komt waterstof in veel scenario's in beeld – soms als enige mogelijkheid. De veelzijdigheid van waterstof is daarbij een factor. Waterstof kan in verschillende economische sectoren worden gebruikt als schone, klimaatneutrale energiedrager, brandstof én grondstof. Doordat de energie- en grondstoffenvoorziening dan is gebaseerd op zowel elektronen als moleculen en er uitwisseling tussen beide mogelijk is, ontstaat de mogelijkheid van systeemintegratie. De uitwisselbaarheid verhoogt bovendien de voorzieningszekerheid in het energiesysteem.

Maar deze verwachtingen moeten nog wel worden ingelost en dat gaat niet vanzelf. De hier geschetste inzet van waterstof in de economie vergt immers een volwaardige waterstofmarkt, met bijbehorende productie- en transportketens. Zo'n markt zal niet ontstaan zonder actieve inzet van de overheid. Dit aspect van het waterstofvraagstuk wordt uitgewerkt in het hiernavolgende hoofdstuk.





3 NAAR EEN VOLWAARDIGE WATERSTOFMARKT

In dit hoofdstuk inventariseert de raad wat er nodig is voor de ontwikkeling van een volwaardige waterstofmarkt. Zo'n markt vormt een essentiële voorwaarde om waterstof de rol in de economie te laten vervullen die in het vorige hoofdstuk is geschetst. In dit hoofdstuk bespreekt de raad enkele knelpunten bij het opbouwen van een waterstofmarkt (paragraaf 3.1). Vervolgens komen randvoorwaarden voor de totstandkoming van een waterstofmarkt aan de orde. Cruciaal is om te beginnen de prijs van waterstof te verlagen, die uiteraard samenhangt met de productiekosten (paragraaf 3.2). Klimaatneutrale waterstof zal daarnaast een goede concurrentiepositie moeten hebben. De overheid zal daartoe de milieueffecten van de nu nog goedkopere fossiele alternatieven moeten gaan beprijzen (paragraaf 3.3). Tot slot zal een landelijk dekkende infrastructuur voor transport en distributie van waterstof moeten worden gerealiseerd (paragraaf 3.4).

3.1 Knelpunten bij het opbouwen van een waterstofmarkt

Nederland is gebaat bij een volwaardige markt voor klimaatneutrale waterstof met een combinatie van import, export en lokale productie, voldoende mogelijkheden voor transport en opslag, plus een stabiele vraag van voldoende omvang vanuit de verschillende economische sectoren. De raad voorziet dat een markt voor klimaatneutrale waterstof in Nederland niet zal ontstaan zonder actieve inzet van de overheid. De belangrijkste belemmeringen die de raad signaleert zijn:

1. de hoge aanloopkosten voor onder meer infrastructuur en technologie, die horen bij een markt aan het beginpunt van zijn ontwikkeling;
2. het gebrek aan vraag naar klimaatneutrale waterstof, als gevolg van het prijsvoordeel dat fossiele energiebronnen nu nog genieten ten opzichte van klimaatneutrale alternatieven (doordat de maatschappelijke kosten van externe effecten niet in de prijs worden doorberekend);
3. het ontbreken van investeringsbereidheid van marktpartijen in infrastructuur en in de productie van klimaatneutrale waterstof zolang de afname niet is gegarandeerd;
4. het ontbreken van voldoende gevoel van urgentie in de samenleving als het gaat om het belang van klimaatneutrale waterstof voor het halen van de klimaat- en duurzaamheidsdoelstellingen;
5. het risico dat er maatschappelijke weerstand ontstaat vanwege vermeende onveiligheid en betaalbaarheid.

Zonder gericht overheidsbeleid kan klimaatneutrale waterstof niet concurreren met de fossiele, niet klimaatneutrale alternatieven die op dit moment

goedkoper zijn. Het is dus van belang dat er condities worden gecreëerd waarin een stabiele vraag naar waterstof kan ontstaan.

3.2 Kosten van waterstofproductie

De productiekosten van waterstof vormen een essentieel gegeven in de ontwikkeling van de waterstofmarkt. Over de precieze productiekosten bestaat op dit moment echter nog geen duidelijkheid. De technieken voor de productie van groene waterstof, en in mindere mate voor de productie van blauwe waterstof, zijn namelijk op dit moment nog in ontwikkeling. Dit betekent dat er voortdurend kostenreducties worden gerealiseerd en dat kostenschattingen van onafhankelijke partijen al snel achterhaald zijn. Kostenreducties zijn het gevolg van innovaties maar zeker ook van leereffecten en schaalvoordelen, bij ondermeer de elektrolysetechniek en in de rest van de keten. Daarnaast zijn de kosten van waterstof afhankelijk van allerlei variabelen: de productietechniek (inclusief de prijs van groene stroom als het gaat om waterstofproductie door middel van elektrolyse), het aantal uren per jaar dat de elektrolyse-installatie kan produceren, de productielocatie en de transportwijze. Het is dan ook niet verwonderlijk dat gepubliceerde kostenschattingen voor waterstof onderling sterk verschillen.

Omdat de kosten van groene waterstof gebaseerd zijn op de kosten van de elektriciteit en het aantal bedrijfsuren van de elektrolyse, is een doorbraak in prijs te verwachten in de Sahara (met een huidige prijs van minder dan 2ct/kWh). Grootschalige import kan echter slechts een deel van de waterstofportfolie zijn om redenen die in paragraaf 4.3 verder uitgewerkt worden.



Het globale beeld van de kosten voor verschillende productietechnieken is op dit moment als volgt:²³

- Grijs waterstof is op dit moment het goedkoopst. De kosten worden geschat op zo'n € 1,50 per kilogram. Deze kosten zullen naar verwachting gaan stijgen als gevolg van stijgende prijzen voor CO₂ (en mogelijk stijgt ook de prijs voor aardgas, maar dat is allerm minst zeker).
- Blauw waterstof is iets duurder en kost tussen de € 1,50 en € 2,50 per kilogram. De meerprijs ten opzichte van grijs waterstof wordt voornamelijk bepaald door de kosten voor afvang, transport en opslag van CO₂. Wanneer deze kosten lager komen te liggen dan de prijs voor CO₂-uitstoot, wordt blauw waterstof goedkoper dan grijs. Hierbij is ook van belang dat het CO₂-afvangpercentage bij de productie van blauw waterstof per techniek varieert van 50% tot boven de 90%. Bij de recente projecten gaat het uitsluitend om technieken met een hoog percentage.
- Groen waterstof is op dit moment het duurst, maar heeft ook de meeste potentie voor kostenreductie. Kostenschattingen variëren van € 2,50 tot € 5,00 per kilogram in 2020 en van € 1,50 tot ruim boven de € 3,00 per kilogram in 2030. In de periode tot 2050 zal de prijs nog verder dalen, mogelijk zelfs tot rond de € 1,00 per kilogram. Het lijkt dus waarschijnlijk dat groen waterstof op den duur de goedkoopste optie wordt, maar wanneer dit het geval zal zijn is nog erg onzeker.

Ter referentie: een hoeveelheid aardgas met dezelfde energie-inhoud als 1 kilogram waterstof werd in 2019 in Nederland *verhandeld* tegen een prijs

²³ Het hier gegeven beeld baseert de raad op een groot aantal geraadpleegde bronnen en op diverse gesprekken met deskundigen. Zie bijlage kengetallen.

van rond de € 0,70 per kilogram. Sinds het uitbreken van de coronacrisis is de prijs echter gedaald naar zo'n € 0,50 per kilogram.²⁴ Wanneer de kosten van CO₂-uitstoot ook in deze prijs worden meegenomen, ligt deze zo'n € 0,15 per kilogram hoger.²⁵

De kosten van waterstofproductie en het volume waarin waterstof kan worden geproduceerd zijn twee afzonderlijke aspecten. Dus behalve de kosten van een bepaalde productiemethode vormen ook de te realiseren volumes een essentieel gegeven in de ontwikkeling van de waterstofmarkt. Het is hierbij onzeker of in een zich ontwikkelende markt de *handelsprijs* van klimaatneutrale waterstof in relatie zal staan tot de *kostprijs*.

3.3 Beprijzing van milieueffect niet-klimaatneutrale brand- en grondstoffen

In het eerder uitgebrachte advies *Naar een duurzame economie* (Rli, 2019) heeft de raad het brede palet van beleidsinstrumenten geschetst waarmee de overheid een transitieproces kan ondersteunen. De raad bepleitte in dat advies de inzet van beprijzen en reguleren als instrumenten om verduurzaming van de economie te bevorderen. Dit advies volgt die lijn.

Om te komen tot een volwaardige waterstofmarkt zal er vraag naar waterstof moeten komen. Die vraag ontstaat niet vanzelf; de overheid heeft daar een rol te vervullen. De vraag naar waterstof dient volgens de raad

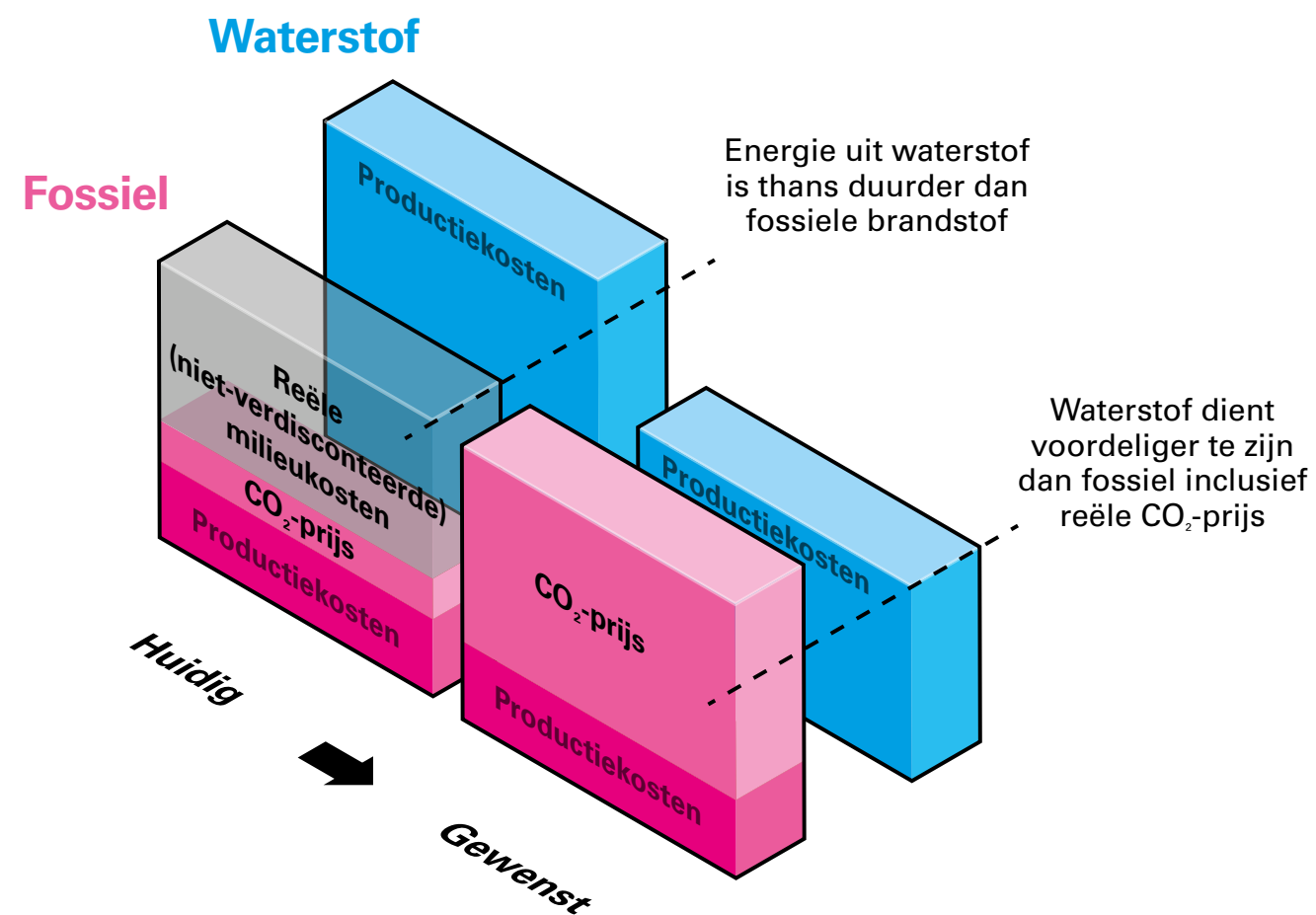
²⁴ Bron: www.theice.com

²⁵ Op basis van een CO₂-prijs van € 25/ton en een CO₂-uitstoot van 1,78 kg per m³ aardgas.



echter zo min mogelijk te worden gestimuleerd door middel van overheids-subsidies. Het is effectiever om van overheidswege het prijspeil van niet-klimaatneutrale alternatieven te verhogen. Alleen dan ontstaat namelijk een structurele concurrentiepositie voor klimaatneutrale waterstof (en andere klimaatneutrale alternatieven). Figuur 2 laat zien hoe beprijzen in combinatie met kostendaling als gevolg van opschaling kan leiden tot een gunstiger concurrentiepositie van klimaatneutrale waterstof.

Figuur 2: Beprijzing milieukosten leidt tot verbeterde concurrentiepositie klimaatneutrale energiedragers



Op dit moment is het gebruik van fossiele brand- en grondstoffen, waarbij CO₂ wordt uitgestoten, goedkoper dan de klimaatneutrale alternatieven. Dit komt vooral doordat de CO₂-effecten van fossiele productieketens maar beperkt zijn verdisconteerd in de prijs van fossiele brand- en grondstoffen. Dat is een vorm van marktfalen: een extern effect (in dit geval CO₂-uitstoot) is niet meegenomen in de prijs van een product. Daardoor komt de CO₂-uitstoot niet ten laste van de afnemer, maar van de maatschappij als geheel, die te maken krijgt met de klimaateffecten. Klimaatneutrale productiemethoden en producten zijn zo beschouwd 'te goedkoop' en hebben een concurrentievoordeel ten opzichte van duurzame producten zoals klimaatneutrale waterstof.

Per sector verschilt de concurrentiepositie van klimaatneutrale waterstof ten opzichte van de alternatieven. Daarom zal een sectorgerichte aanpak nodig zijn. Daarbij maakt de raad het volgende onderscheid:

- Voor sectoren die niet vallen onder het CO₂-emissiehandelssysteem (ETS) van de Europese Unie (EU),²⁶ zoals de transportsector en de sector gebouwde omgeving, zijn nationale maatregelen nodig die de vraag naar klimaatneutrale waterstof vergroten.
- Voor grote industriële ondernemingen en elektriciteitsproducenten die wel onder het ETS vallen vormt dit EU-handelssysteem een effectief instrument om de vraag naar waterstof te stimuleren, zeker in combinatie met de aangescherpte Europese klimaatdoelen én het EU-plan dat in de

²⁶ Het in 2005 binnen de EU in werking getreden Emissions Trading System (ETS) betreft een systeem voor het verhandelen van CO₂-uitstootrechten. Wanneer een bedrijf meer uitstoot dan het rechten heeft, moet het rechten bijkopen. Omgekeerd kan een bedrijf zijn rechten verkopen wanneer het minder uitstoot. Tezamen met het steeds lager wordende uitstootplafond zorgt dit ervoor dat de totale CO₂-uitstoot kosteneffectief wordt teruggedrongen.

maak is voor een importtaks op producten van buiten de EU met een grote CO₂-voetafdruk.²⁷ Wel denkt de raad dat zolang dit laatste plan – het zogenoemde *carbon border adjustment mechanism* – nog niet operationeel is, ook voor deze sectoren de waterstofvraag het beste kan worden gestimuleerd met specifieke nationale maatregelen, mits de concurrentiepositie niet op onaanvaardbare wijze geschaad wordt.²⁸

Een ander instrument dat de overheid zou kunnen inzetten om te voorkomen dat producten met negatieve externe effecten ‘te goedkoop’ op de markt worden gebracht is regulering: het verplicht stellen van het gebruik van duurzame alternatieven. De overheid kan bijvoorbeeld een bepaald bijmengpercentage wettelijk voorschrijven. Het voordeel van deze laatste methode is dat het gebruik van klimaatneutrale waterstof gestaag en gecontroleerd kan groeien door het bijmengpercentage geleidelijk te verhogen. Welk overheidsinstrument de voorkeur verdient, verschilt per sector. Tabel 1 in het hoofdstuk 5 met aanbevelingen gaat hier dieper op in.

3.4 Realisatie van een transport- en distributienetwerk

Het verhogen van het prijspeil van niet-klimaatneutrale brand- en grondstoffen, zoals in de voorgaande paragraaf is besproken, is alleen effectief als aan bepaalde randvoorwaarden wordt voldaan. De beschikbaarheid van infrastructuur voor het transport en de opslag van waterstof is zo’n randvoorwaarde. Als daaraan niet is voldaan, is een heffing op CO₂-uitstoot

²⁷ EU Green Deal en carbon border adjustment mechanism

²⁸ Zie ook de recente ‘speelveldtoets’ van PwC (2020).

immers vooral een belasting in plaats van een aanmoediging tot het doen van investeringen.

De overheid zal dus, om een volwaardige waterstofmarkt tot stand te brengen, ervoor moeten zorgen dat er een basisinfrastructuur beschikbaar komt die toegang biedt tot de markt. Het gaat daarbij om de aanleg van een landelijk dekkend hoofdtransportnet voor waterstof, met connecties voor distributie, import en export. Daarnaast zullen er waterstofopslagfaciliteiten moeten worden gerealiseerd. Het recent verschenen TIKI-rapport biedt een bruikbaar overzicht van de benodigde infrastructuur en de stappen die nodig zijn om te voorzien in de behoefte van de industrie.

Een waterstofbeurs, naar het voorbeeld van de stroom- en gasbeurzen, kan vervolgens dienen als economisch coördinatiemechanisme en als katalysator van een markt voor klimaatneutrale waterstof.

3.5 Slotsom

Een volwaardige waterstofmarkt ontstaat niet vanzelf. De overheid zal gericht beleid moeten inzetten om klimaatneutrale waterstof concurrerend te laten zijn met fossiele, milieubelastende brand- en grondstoffen. De raad meent dat *beprijzing* (met name in Europees verband) en *regulering* (bijvoorbeeld het verplicht stellen van het gebruik van duurzame alternatieven) moeten worden ingezet als instrumenten om de vraag naar klimaatneutrale waterstof te bevorderen. Daarnaast zal een landelijk dekkende infrastructuur voor transport en distributie van waterstof moeten worden gerealiseerd.





4 STRATEGISCH BELANG VAN WATERSTOF VOOR NEDERLAND EN EU

Dit hoofdstuk gaat over de internationale context van overheidsinvesteringen in waterstof en de strategische belangen die hiermee gediend kunnen zijn. Om te beginnen wordt geschetst hoe het overheidsbeleid voor waterstof zich ontwikkelt in diverse landen binnen en buiten Europa (paragraaf 4.1), en hoe de Nederlandse uitgangspositie voor de ontwikkeling van een waterstofmarkt zich verhoudt tot het internationale speelveld (paragraaf 4.2). Vervolgens komt het geopolitieke belang van waterstof aan de orde (paragraaf 4.3). Aansluitend wordt stilgestaan bij de mogelijke kansen die waterstof biedt voor verduurzaming van de industrie (paragraaf 4.4). Ten slotte wijst de raad op de noodzaak om innovatietrajecten rond waterstof te bevorderen (paragraaf 4.5).

4.1 Internationale context

Er is op dit moment wereldwijd toenemende aandacht voor waterstof. Landen rond de Noordzee onderzoeken de toepassingsmogelijkheden. Duitsland heeft de ambitie om wereldwijd koploper te worden in het

gebruik van waterstof als energiedrager. De Bondsregering heeft daartoe recent een nationale waterstofstrategie vastgesteld, inclusief een bijbehorende financiering van € 9 miljard. De strategie is erop gericht een industrie op te bouwen rond waterstof. Ook Denemarken, Noorwegen, Spanje, Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk hebben dergelijke plannen gelanceerd, waarbij de status en uitwerking varieert.

In de beleidsinitiatieven die deel uitmaken van de 'Green Deal' van de Europese Commissie,²⁹ speelt waterstof eveneens een belangrijke rol. Mondiaal oriënteren verschillende regio's met een surplus aan bronnen voor de opwekking van groene stroom (onder meer het Midden-Oosten, Noord-Afrika) zich op de mogelijkheden om waterstof te produceren. Australië is hierin het verst gevorderd; dit land werkt aan een waterstof-transportketen naar Japan, dat ervoor heeft gekozen zijn energie- en grondstoffensysteem grotendeels op waterstof te richten.

Er is duidelijk sprake van een groeiend mondiaal momentum; de hele wereld overweegt stappen te zetten. De bal ligt echter nog stil; er wordt gewacht op zekerheid over de vraagontwikkeling en een afzetmarkt. Ook geopolitieke overwegingen spelen hierbij een rol (zie ook hoofdstuk 4 in deel 2). Landen die als eerste in beweging komen en in staat zijn een stabiele marktvraag naar klimaatneutrale waterstof te ontwikkelen, zullen voordeel hebben bij het opbouwen van een concurrerende positie in de handel en bij het creëren van een vestigingsplaats voor nieuwe industrie.

²⁹ De Green Deal die op 11 december 2019 door de Europese Commissie werd gepresenteerd, bevat een reeks beleidsinitiatieven met als overkoepelende doelstelling om Europa tegen 2050 klimaatneutraal te maken.

4.2 Uitgangspositie van Nederland

De uitgangspositie van Nederland om in te zetten op klimaatneutrale waterstof als alternatief voor aardolie, aardgas en kolen, is in vergelijking met andere landen gunstig. Hieronder volgt een opsomming van de gunstige kenmerken van de Nederlandse economie die in dit opzicht bepalend zijn (zie verder hoofdstuk 3 in deel 2).

Nederlandse chemische industrie werkt al met waterstof

In de Nederlandse industrie wordt waterstof op dit moment al op grote schaal ingezet als grondstof en hulpstof in de chemie (met name voor de productie van kunstmest) en in raffinaderijen. Het gaat jaarlijks volgens recente schattingen (TNO & CBS, 2020) om zo'n 175 PJ aan (op dit moment nog 'grijze') waterstof.³⁰ In de chemische industrie is waterstof met name interessant omdat bij sommige productieprocessen hoge temperaturen nodig zijn die niet met elektrische boilers kunnen worden bereikt. Voor temperaturen van meer dan een paar honderd graden Celsius is waterstof een goed alternatief voor elektriciteit. Daarnaast is waterstof een chemisch veelzijdig molecuul dat kan dienen als bouwsteen voor veel producten.

De waterstofeconomie is niet alleen gasvormig. Er zijn verschillende andere dragers die, zeker in de transitiefase grote kostenvoordelen kunnen geven, vanwege het kunnen benutten van bestaande assets en supply chains. Hierbij valt te denken aan bijvoorbeeld ammoniak en LOHC. Een drager

³⁰ Tot voor kort werd aangenomen dat er jaarlijks 8 miljard m³, oftewel zo'n 100 tot 110 PJ, aan waterstof werd gebruikt in de chemische industrie. TNO & CBS (2020) hebben echter vastgesteld dat het waterstofverbruik, dat in energiestatistieken geen aparte categorie vormt, in werkelijkheid veel hoger ligt.



zoals ammoniak kan daarnaast ook in een eindspel een belangrijke rol blijven spelen voor specifieke markten.

Noordzee biedt potentieel voor opwekking van duurzame elektriciteit

Nederland beschikt op het Nederlandse deel van de Noordzee over ruimte voor het ontwikkelen van grote windparken op zee. Deze groene elektriciteit zal nodig zijn om grijze elektriciteit uit te faseren. Met een deel van dit potentieel aan windenergie kan Nederland een leidende rol spelen in de ontwikkelingen op het gebied van 'groene' waterstofproductie door middel van elektrolyse.

Verschillende productievormen van klimaatneutrale waterstof zijn in Nederland realiseerbaar

Nederland beschikt over de mogelijkheid om klimaatneutrale waterstof op verschillende manieren te produceren. In de eerste plaats zijn er de industriecomplexen waar CO₂ kan worden afgevangen uit waterstof houdende tussenproducten zoals raffinagegas, waarbij de vrijkomende CO₂ wordt afgevangen (zie hierna). In de tweede plaats kan uit aardgas de CO₂ worden onttrokken, waarna van de resterende waterstof bijvoorbeeld kunstmest wordt gemaakt. In de derde plaats kan waterstof met elektrolyzers worden geproduceerd dichtbij plekken waar duurzame energie wordt opgewekt, bijvoorbeeld bij aanlanding van stroom uit wind-op-zee-locaties, of direct bij de wind-op-zee-locatie zelf. In de huidige economische situatie genereert de industrie een grote toegevoegde waarde. Het op de juiste manier opbouwen van een waterstofeconomie kan garanderen dat deze toegevoegde waarde behouden blijft

Nederland heeft goede mogelijkheden voor CO₂-afvang en opslag

In de Nederlandse industrie bestaat al veel ervaring met technieken om de CO₂ die vrijkomt bij de productie van waterstof uit aardgas of kolen, af te vangen. Hiertoe worden bijvoorbeeld 'gaswassers' gebruikt die na de verbranding (post-combustion) de rookgassen reinigen. Er zijn ook technieken die voorafgaand aan de verbranding (pre-combustion) CO₂ afvangen.

Nederland beschikt ook over mogelijkheden om afgevangen CO₂ ondergronds op te slaan: bijvoorbeeld in de lege aardgasvelden onder het Nederlandse deel van de Noordzee. Deze afvang en opslag is overigens niet zonder nadelen; er zijn extra kosten en energieverbruik mee gemoeid en het langetermijnbeheer van de opslag vormt een additionele opgave.

Bestaand Nederlands netwerk voor gastransport en -distributie is te gebruiken voor waterstof

Nederland beschikt sinds de jaren zestig van de vorige eeuw over een kwalitatief hoogstaand, wijldvertakt netwerk voor het transport van aardgas. Het gaat dan niet alleen om een hoofdtransportnetwerk maar ook om een wijldvertakt distributienetwerk. Beide typen netwerken zijn technisch gezien geschikt en voorbereid voor vervoer van waterstof. Nu de rol van aardgas in onze energievoorziening wordt afgebouwd, ontstaat dan ook de mogelijkheid om het gasleidingennetwerk anders te gebruiken. De vrijkomende capaciteit in het gasnetwerk vormt een kostenefficiënte mogelijkheid voor de aanleg van een waterstoftransportnetwerk. De belangrijkste aanpassing die nodig is betreft de bouw van compressiestations.



Nederland beschikt voorts over zoutcavernes waarin waterstof kan worden opgeslagen. Of waterstof ook kan worden opgeslagen in lege aardgasvelden, is nog niet helemaal zeker. Maar duidelijk is dat Nederland beschikt over ruime mogelijkheden voor de opslag van waterstof tijdens piekuren. Hiervan is gemiddeld genomen sprake (niet alleen in Nederland, maar in heel Europa) gedurende 200 tot 600 uur per jaar.

Al met al zal zowel grootschalig transport als opslag van waterstof een belangrijk deel worden van de toekomstige waterstofmarkt.

Nederlandse havens maken ook import van waterstof mogelijk

Ook de geografische ligging van Nederland is gunstig als het gaat om onze uitgangspositie voor de ontwikkeling van een waterstofmarkt. De Nederlandse zeehavens in onder meer Rotterdam, IJmuiden, Delfzijl/Eemshaven en Vlissingen/Terneuzen bieden de mogelijkheid voor grootschalige aanlanding en doorvoer van geïmporteerde waterstof die in het buitenland met zonne-energie is opgewekt.

Nederland beschikt over relevante kennis en ervaring

In Nederlandse onderzoeksinstituten en bij tal van industriële bedrijven is in ruime mate kennis en ervaring aanwezig met aan waterstof gerelateerde technologieën. Zo wordt bijvoorbeeld bij TNO en Gasterra onderzoek gedaan naar de productie en transport van waterstof. En in het industriële bedrijfsleven worden door zowel de regionale industriële clusters als door individuele bedrijven toepassingsmogelijkheden ontwikkeld.

Nederland heeft een sterke positie in handel, industrie en het internationale energieveld

Ten slotte beschikt Nederland over gunstige aanvullende 'soft factors' in de vorm van bestaande handelsrelaties, grote bedrijven met kennis op het gebied van waterstof en goodwill in het internationale energieveld en de energiediplomatie. Dit zijn factoren die goed van pas komen bij het opbouwen van een concurrerende internationale positie op het gebied van waterstof en bij het creëren van een vestigingsplaats voor nieuwe, aan waterstof gerelateerde industrie.

4.3 Keuze voor waterstof in geopolitiek onrustige tijden

Er is op dit moment mondiaal sprake van een sterk veranderende geopolitieke setting, zowel binnen de EU als tussen de andere machtsblokken in de wereld: China, de Verenigde Staten en het Midden-Oosten. Er is minder EU-brede samenhang en minder wereldwijde samenhang. Dit maakt de lange internationale productie- en handelsketens kwetsbaar. De wereldwijde coronacrisis legt bovendien de intrinsieke kwetsbaarheden van het huidige systeem en geopolitieke evenwicht bloot. Overheden steunen grootschalig de eigen economie, teneinde de economische crisis in eigen land te verzachten. Dit verstoort de vrije concurrentie en maakt het economisch beleid nationalistischer. Tegelijkertijd heeft de Europese Commissie extra ambities geformuleerd om klimaatverandering tegen te gaan, wil de EU investeren in de Green Deal en in de waterstofeconomie, en worden landen aangespoord om hierin samen te werken.



Wat betekent in deze geopolitiek en economisch grillige tijden een eventuele keuze van Nederland voor waterstof in de energietransitie? Is inzetten op waterstof verstandig en zo ja, wat is de route die daarbij het beste kan worden gevolgd?

De raad is van mening dat Nederland zijn rol in het internationale krachtenveld rond waterstof zou kunnen verstevigen door de juiste balans te kiezen tussen (a) binnenlandse productie van waterstof, (b) EU-productie van waterstof en (c) import van waterstof uit niet-EU-landen. Nederland zal de rol die waterstof gaat vervullen expliciet en weloverwogen moeten afstemmen op de gewenste mate van afhankelijkheid van het buitenland en op de gewenste bijdrage aan de Europese en internationale ontwikkelingen als het gaat om energie en grondstoffen. Van welk type leveranties uit welke landen willen we wel en niet afhankelijk zijn en bij welke mate van afhankelijkheid ontstaat een voldoende *'level of comfort'*?

Het Clingendael International Energy Programme (CIEP) heeft in 2019 twee scenario's geschetst van de manier waarop de wereld zich geopolitiek zou kunnen ontwikkelen tussen nu en 2032 en wat dit zou betekenen voor de rol van waterstof in het Nederlandse langetermijnbeleid op het gebied van energie en klimaat (CIEP, 2019a):

- Scenario 1: Door een afname van internationale handel en samenwerking wordt nationale voorzieningszekerheid en bescherming van de eigen economie belangrijker. Klimaatbeleid schuift naar de achtergrond.
- Scenario 2: Door toegenomen internationale samenwerking wordt het mogelijk om bindende afspraken te maken over het beperken van de

CO₂-uitstoot. Hierdoor ontstaan de benodigde randvoorwaarden voor de ontwikkeling van duurzame energieproductie op eigen bodem en een verduurzaming van de industrie.

De raad meent dat inzetten op waterstof om de energie- en grondstoffentransitie mogelijk te maken in zowel een gunstige als minder gunstige ontwikkeling van de geopolitieke balans een solide en veilige keuze is, die kan bijdragen aan een voldoende *'level of comfort'* voor Nederland. De raad constateert bovendien dat er voor de overheid een afweging te maken valt: kiezen voor de goedkoopste waterstof (bijvoorbeeld geïmporteerd van buiten Europa) kan een grotere afhankelijkheid met zich meebrengen, terwijl kiezen voor eigen productie en opwekking van waterstof een hoger prijspeil kan betekenen.

4.4 Kansen voor verduurzaming Nederlandse industrie

Gegeven de wereldwijd voorliggende opgaven op het gebied van economie, energie en klimaat is het belangrijk om als nationale overheid na te denken over de eigen verdien- en productiecapaciteit om (a) de economie op gang te helpen én te houden, (b) in de nationale vraag naar energie en grondstoffen te kunnen voorzien en (c) de klimaatdoelen te halen en de afspraken in het klimaatakkoord na te komen.

Op dit moment heeft Nederland een sterke positie in de mondiale energie- en grondstofstromen. Het is echter niet vanzelfsprekend dat Nederland, wanneer de energietransitie verder vorm krijgt, deze positie behoudt.



Hiervoor zal Nederland zich moeten inspannen met gericht overheidsbeleid. Er is daarbij aandacht nodig voor innovatie en verduurzaming van sterke binnenlandse industrieën, zeker in de cruciale en strategische sectoren. Stimulering van het gebruik van waterstof biedt hiervoor kansen. Tal van industriële processen die op dit moment nog zorgen voor forse CO₂-uitstoot, kunnen bij een overstap naar waterstof klimaatneutraal verlopen.

Strategische sectoren zijn dan bijvoorbeeld de chemie (inclusief de productie van nieuwe brandstoffen, nieuwe plastics en recycling van bestaande plastic producten), kunstmestproductie (die ook bij duurzame vormen van landbouw noodzakelijk blijft) en de staalindustrie. Het proces van verduurzaming is relevant voor nieuwe (circulaire) én bestaande industrie: ze hoeven elkaar niet uit te sluiten.

4.5 Belang van bevordering innovatie rond waterstoftechnologie

Het grootschaliger gebruik van waterstof buiten de (petro)chemische industrie en het klimaatneutraal maken van alle waterstofproductie staat nog aan het begin van zijn ontwikkelpad, terwijl de fossiele routes en ketens al lang zijn uitontwikkeld en geoptimaliseerd. De kosten van waterstof zullen fors omlaag kunnen als ook op het gebied van waterstof de benodigde leercurve is doorlopen en de productie op veel grotere schaal kan plaatsvinden. Maar er zijn aanzienlijke drempels, want innovatie is duur, de resultaten zijn onzeker en successen kunnen snel worden gekopieerd door concurrenten.

Daarom ligt ook hier een taak voor de Nederlandse overheid: het bevorderen en versnellen van het innovatietraject voor waterstoftechnologie.

De overheid kan innovatie op het gebied van klimaatneutrale waterstoftechnologie op uiteenlopende manieren bevorderen. Het is volgens de raad van belang dat de Nederlandse overheid kiest voor een gerichte strategie die past bij de sterktes van Nederland en de kansen die er voor ons land liggen in de verschillende toepassingsgebieden van waterstof.³¹ Van belang is ook om goed te monitoren hoe de innovaties zich ontwikkelen en de stimuleringsstrategie daarop aan te passen en te richten op de meest kansrijke alternatieven. Daarbij valt te denken aan bijvoorbeeld:

- het beschikbaar stellen van budget voor research & development;
- het financieel faciliteren van proefprojecten.

Hoeveel geld de Nederlandse overheid beschikbaar zou moeten stellen voor dergelijke maatregelen, hangt af van het belang dat zij hecht aan industriepolitiek en geopolitiek. Het is aannemelijk dat innovaties in de waterstofketen hoe dan ook ergens ter wereld zullen gaan plaatsvinden; de vraag is welke rol Nederland daarin wil spelen, eventueel in samenwerking met andere Noordwest-Europese landen. Als Nederland een leidende rol wil vervullen, wat de raad in dit advies bepleit, moet er op korte termijn flink worden geïnvesteerd. Op langere termijn kan daarmee een sterke Nederlandse waterstofindustrie ontstaan.

³¹ Het rapport 'Waterstof: kansen voor de Nederlandse industrie' biedt een overzicht van kansen en mogelijkheden voor de Nederlandse industrie (Reijerkerk & Van Rhee, 2019).



4.6 Slotsom

Gegeven het internationale momentum is het volgens de raad zaak dat de Nederlandse overheid op korte termijn stappen zet om de gunstige uitgangspositie van ons land voor de ontwikkeling van een waterstofmarkt, te benutten. De raad meent dat inzetten op waterstof om de energie- en grondstoffentransitie mogelijk te maken een solide en veilige keuze is, zowel bij een gunstige als bij een minder gunstige ontwikkeling van de wereldwijde geopolitieke situatie. Door nú te investeren in innovatie rond waterstoftechnologie kan straks een sterke Nederlandse waterstofindustrie ontstaan. In de huidige economische situatie genereert de industrie een grote toegevoegde waarde. Het op de juiste manier opbouwen van een waterstofeconomie kan garanderen dat deze toegevoegde waarde behouden blijft. De raad meent dat daarmee niet alleen de economie en de toekomstige energie- en grondstoffenvoorziening gediend is, maar ook de realisatie van de nationale klimaatdoelen.





5 ESSENTIËLE RANDVOORWAARDEN

Voordat een waterstofmarkt tot ontwikkeling kan komen, moet de overheid ervoor zorgen dat voldaan is aan een aantal essentiële randvoorwaarden. Tot die randvoorwaarden behoort in ieder geval een wettelijk kader voor de productie, het transport, de opslag en het gebruik van waterstof. Daarnaast zal de samenleving moeten worden voorbereid op een grotere rol van waterstof in diverse toepassingen in onze huizen en het straatbeeld, de noodzaak daarvan en de bijkomende kosten. Expliciete aandacht voor en investeringen in veiligheid zijn eveneens cruciaal.

5.1 Wettelijk kader voor productie en omgang met waterstof

Op dit moment ontbreekt er nog regelgeving voor de vereiste kwaliteit en zuiverheid van geproduceerde waterstof en voor de verplichte toevoeging van geurstof ('odorisatie'). Ook is er nog geen juridische basis voor het transport van waterstof door de beheerders van regionale aardgasnetten. Daarnaast zal er nog een vergunningstelsel moeten komen voor zaken als de veilige levering van waterstof aan huishoudens, de certificering van meetinstallaties en de kwalificaties van onderhoudsmonteurs.

5.2 Maatschappelijke acceptatie van waterstof

Dat waterstof in toenemende mate een rol gaat spelen in het publieke domein, omdat dit noodzakelijk is voor een betaalbare, betrouwbare en klimaatneutrale energie- en grondstoffenvoorziening, zal onderdeel moeten worden van het collectieve Nederlandse bewustzijn. De overheid zal burgers erop moeten voorbereiden dat waterstof een integraal onderdeel wordt van onze maatschappij, of het nu is in onze huizen of meer op afstand bij productie, opslag en transport van waterstof. Daarbij zal op een toegankelijke manier moeten worden uitgelegd dat de transitie van fossiele energiebronnen naar klimaatneutrale energie- en grondstofbronnen verloopt via tijdelijke overgangstechnieken, zoals het gebruik van blauwe waterstof zolang er nog niet voldoende groene elektriciteit beschikbaar is voor het maken van groene waterstof.

Gedurende de overgangsfase zal er onvermijdelijk sprake zijn van extra kosten; ook dit aspect zal duidelijk moeten worden gecommuniceerd. Voor de maatschappelijke acceptatie van dit gegeven is het cruciaal dat de zichtbaar wordt gemaakt hoe de extra kosten worden verdeeld tussen burgers en (industriële) bedrijven en tussen bevolkingsgroepen onderling.

Als het gaat om de kosten van de transitie naar waterstof waarschuwt de raad tegen het geven van een te rooskleurige voorstelling van zaken. Zeker tijdens de transitie zal elke vorm van duurzame energie een prijsverhogend effect hebben. Dat geldt zowel voor de industriële afnemers als voor consumenten. Nu de rekenmodellen die worden gebruikt bij het opstellen van de regionale energiestrategieën gedetailleerder worden, ontstaat er beter zicht

op de kosten van bijvoorbeeld het gebruik van waterstof in de gebouwde omgeving.³² Deze informatie kan de overheid gebruiken voor een transparante communicatie met de samenleving over het kostenaspect van het gebruik van waterstof voor de verwarming van huizen.

5.3 Veiligheid van waterstofgebruik in openbare ruimte

Een derde randvoorwaarde die door de overheid zal moeten worden vervuld voordat een waterstofmarkt tot ontwikkeling kan komen, is de vastlegging van veiligheidsnormen voor het gebruik van waterstof in de openbare ruimte. Dergelijke normen moeten zijn gebaseerd op gedegen praktijkonderzoek. Waterstof is niet onveiliger dan andere energiedragers, maar het is wel van belang dat er meer kennis komt over de risico's van waterstof. Voorkomen moet worden dat er grootschalige toepassingen op de markt komen die onvoldoende veilig zijn doordat de overheid er geen eisen aan heeft gesteld. Dit kan immers leiden tot incidenten die schade veroorzaken. Het maatschappelijk draagvlak voor waterstof zou daardoor kunnen verminderen.

Maar alleen het vastleggen van veiligheidsnormen is niet voldoende. Er is ook aandacht nodig voor het voorbereiden van de maatschappij op de introductie van nieuwe aan waterstof gerelateerde technieken. Waterstof leidt meer dan andere technieken bij het bredere publiek wel eens tot onterechte negatieve associaties: de waterstofbom, de Hindenburg. Los van of deze

³² Zie bijvoorbeeld de [Startanalyse aardgasvrije buurten; Achtergrondstudie \(PBL, 2020a\)](#) en [Waterstof voor de gebouwde omgeving; Operationalisering in de startanalyse 2020 \(PBL, 2020b\)](#).



associaties terecht zijn of niet; wat ertoe doet is dat de risicoafweging die de introductie van waterstof met zich meebrengt wordt erkend, inclusief de risico's die huidige en alternatieve energiedragers met zich meebrengen.³³ Er moeten duidelijke voorschriften komen voor een veilige omgang met waterstof, zodat de risico's tot een minimum worden beperkt.³⁴

In het maatschappelijk debat moet onderscheid worden gemaakt tussen soorten risico's die bij het gebruik van waterstof en de alternatieven daarvan aan de orde kunnen zijn: risico's voor personen en veiligheid, risico's voor het milieu, risico's voor de economie en risico's voor de samenleving. In de verschillende fasen van de besluitvorming, van waterstofvisies tot de uitwerking van regionale energiestrategieën, moeten burgers betrokken en meegenomen worden bij de omgang met deze risico's.

5.4 Slotsom

Het is belangrijk dat de overheid zorgt voor een wettelijk kader voor productie, transport, opslag en gebruik van waterstof. Tegelijkertijd zullen burgers erop moeten worden voorbereid dat waterstof een integraal onderdeel wordt van de maatschappij. Daarbij is duidelijke communicatie van overheidswege nodig over de extra kosten in de overgangsfase. Een aandachtspunt voor de overheid is verder dat er veiligheidsnormen en

voorschriften moeten komen voor een veilige omgang met waterstof in de openbare ruimte, zodat de risico's tot een minimum worden beperkt.

³³ Ook de huidige energiedragers kennen risico's, denk daarbij bijvoorbeeld aan aardgasexplosies en koolmonoxidevergiftigingen.

³⁴ Zie ook het advies *Risico's gewaardeerd* (Rli, 2014), waarin de raad uitgebreider ingaat op deze punten.





6 AANBEVELINGEN

In het slothoofdstuk van deel 1 van dit advies bespreekt de raad welke concrete maatregelen de rijksoverheid de komende tijd concreet kan en moet nemen om het strategische belang van waterstof voor Nederland optimaal te behartigen. De raad heeft dit vastgelegd in zes aanbevelingen aan de overheid.

1. Investeer op korte termijn in de totstandkoming van een hoofdtransportnet voor waterstof met import- en exportmogelijkheden

Een voorwaarde voor het ontstaan van een waterstofmarkt is de aanwezigheid van een basisinfrastructuur voor waterstof, bestaande uit opslagfaciliteiten, import- en exportfaciliteiten en een transportnetwerk dat deze faciliteiten verbindt met de industriële clusters waar vraag en aanbod zich bevinden. Een landelijk dekkend waterstoftransportnetwerk met import- en exportmogelijkheden vormt een essentieel onderdeel van deze basisinfrastructuur. Zo'n netwerk komt niet tot stand zonder overheidsinzet. Maar gezien de aanwezigheid van een aardgasnetwerk dat kan worden benut voor waterstoftransport, zijn de kosten om een transportnetwerk voor waterstof tot stand te brengen relatief laag en zullen de benodigde overheidsinvesteringen dus beperkt zijn. Op termijn zal dit netwerk

maatschappelijk gezien een essentiële rol spelen door bij te dragen aan de voorzieningszekerheid van energie en grondstoffen.

2. Geef veiligheid en maatschappelijk draagvlak een explicietere rol in het beleid

Het is belangrijk dat de veiligheid van nieuwe technologie vooraf zorgvuldig en uitgebreid wordt onderzocht, zodat veiligheidsnormen worden meegenomen in het ontwerp van producten voordat deze grootschalig op de markt komen. De overheid dient hiervoor budget vrij te maken. Dit is een cruciale randvoorwaarde voor de inzet van waterstof in diverse toepassingen in het publieke domein en dient daarom de hoogste prioriteit te krijgen.

Daarnaast zou de overheid actief aandacht moeten besteden aan het maatschappelijk draagvlak voor de ontwikkeling van een Nederlandse waterstofmarkt. Het gaat dan in de eerste plaats om duidelijke communicatie over de noodzaak van waterstof en een dialoog over de veiligheidsrisico's die aan het gebruik van waterstof én aan die van alternatieven verbonden zijn. Lokale initiatieven op het gebied van waterstof kunnen hieraan bijdragen. Daarnaast verdient de betaalbaarheid van waterstof aandacht in het beleid. Instrumenten om in te grijpen op de verdeling van kosten tussen burgers of bedrijven, kunnen worden overwogen.

3. Stimuleer het ontstaan van vraag naar klimaatneutrale waterstof

De overheid moet ervoor zorgen dat klimaatneutrale waterstof kan concurreren met niet-duurzame alternatieven. Alleen dan ontstaat een waterstofvraag die past in het eindbeeld voor de verschillende sectoren van de Nederlandse economie. Het creëren van de vraag kan in theorie het beste door CO₂-uitstoot te beprijsen. De consequentie is dat het prijsniveau stijgt en de klimaatneutrale alternatieven concurrerder worden. In het advies Naar een duurzame economie bepleit de raad bovendien een omgekeerde bewijslast als het gaat om het concurrentienadeel en CO₂-weglekeffecten als gevolg van dergelijke heffingen als zij alleen in Nederland zouden gelden.

In de casus van de klimaatneutrale waterstof zou op dit moment een CO₂-prijs van ver boven de honderd euro per ton nodig zijn om de concurrentie aan te kunnen. De speelveldtoets geeft aan dat de marges in de industrie smal zijn, de opties tot verduurzamen nog beperkt, en de kans op CO₂-weglek aanzienlijk.³⁵ Daarom is het van belang dat beprijzen van CO₂-uitstoot in EU-verband gebeurt.³⁶ Hierin voorziet het EU-plan voor een importtaks op producten van buiten de EU op basis van de CO₂-voetafdruk. Nederland zou zich in Brussel sterk moeten maken voor dit *carbon border adjustment mechanism*. Ook zou Nederland moeten aandringen op een

³⁵ De 'speelveldtoets' is het onderzoek naar de impact van het aangekondigde klimaatbeleid op de concurrentiepositie van de Nederlandse industrie, uitgevoerd door PwC (2020).

³⁶ Er moet worden voorkomen dat producten zoals staal, aluminium en cement onbelast kunnen worden geïmporteerd uit landen waar industriële bedrijven zich niet aan de strenge klimaatregels hoeven te houden. Hierin voorziet het EU-plan voor een importtaks op producten van buiten de EU op basis van de CO₂-voetafdruk.



verdere aanscherping van het Europese CO₂-emissiehandelssysteem, zodat de prijs die de industrie moet betalen voor haar CO₂-uitstoot verder omhoog gaat.

De internationale concurrentiepositie van de energie-intensieve industrie in Nederland laat op dit moment niet de nationale verhoging van de CO₂-prijs toe die nodig zou zijn om de klimaatneutrale waterstof concurrerend te maken. Besluitvorming op EU-niveau duurt lang en is niet zeker. Het creëren van vraag naar waterstof en een waterstofmarkt moet dus nu met andere instrumenten worden gerealiseerd.

Op nationaal niveau kan de overheid waterstof concurrerend maken met specifieke maatregelen per sector. In de luchtvaart, scheepvaart en de gebouwde omgeving zal een fysieke of administratieve bijmengverplichting voor leveranciers van fossiele brandstoffen het effectiefst zijn. In andere sectoren zal fiscale stimulering of een verplichting van het gebruik van klimaatneutrale waterstof beter werken. Tabel 1 en Figuur 3 bieden een overzicht van maatregelen waar aan kan worden gedacht.

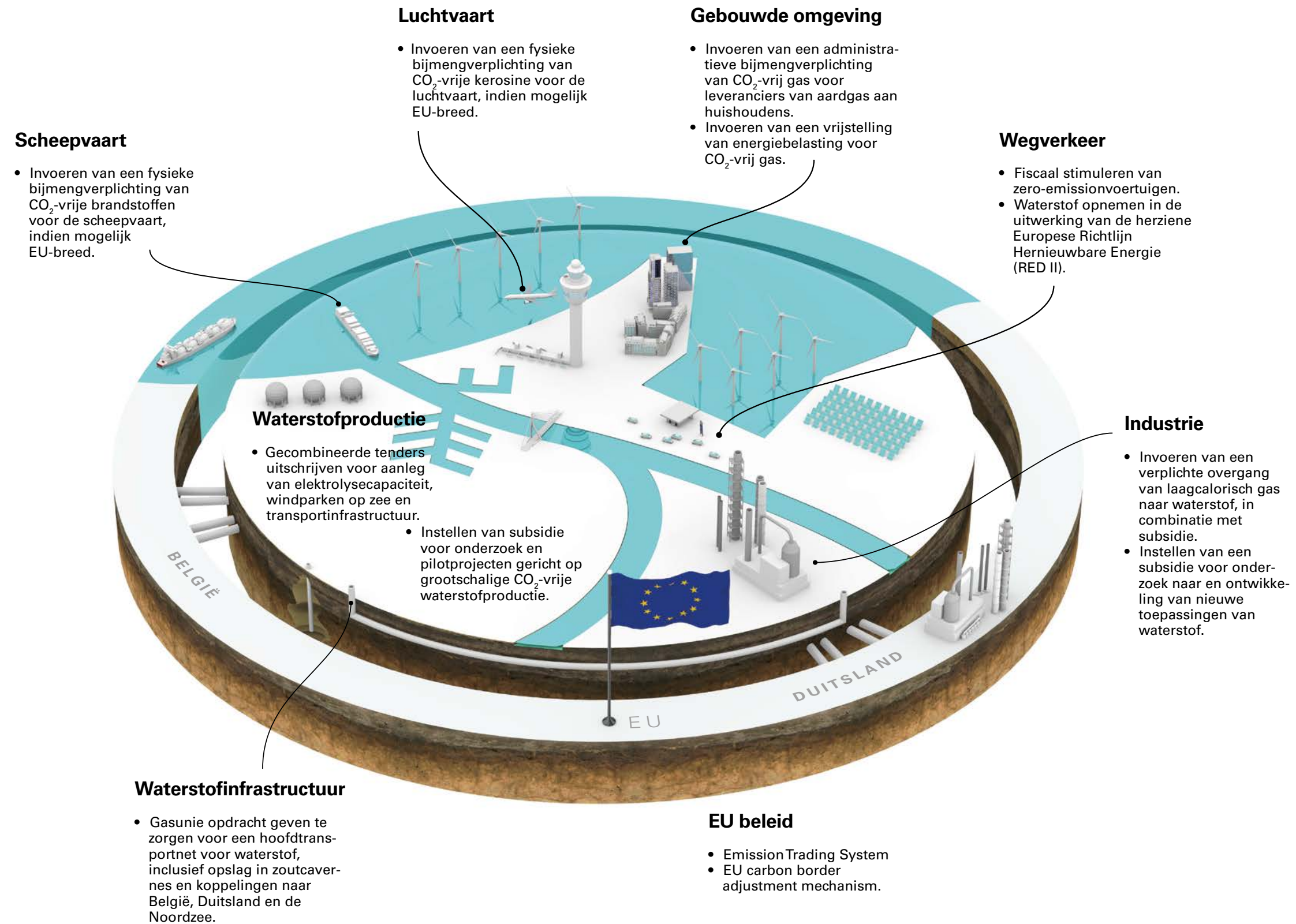
Op langere termijn, is de verwachting dat de stijgende ETS-prijs in combinatie met de dalende kostprijs van klimaatneutrale waterstof voldoende stimulans biedt om klimaatneutrale waterstof concurrerend te maken. Genoemde instrumenten hebben daarom een tijdelijk karakter. Het gaat hier om keuzes tot 2030 voor het Noordwest Europese speelveld, na 2030 zal de inzet van instrumenten herijkt moeten worden.

4. Sluit bij de ontwikkeling van een waterstofmarkt geen vormen van waterstofproductie uit

De productie van blauwe waterstof, op basis van aardgas of industriële restgassen met afvang en opslag van CO₂, zal een belangrijke overgangstechnologie vormen voor de komende vijftien tot twintig jaar. De blauwe waterstofvariant is weliswaar niet 100% klimaatneutraal, maar kan het aanzwengelen van een waterstofmarkt ondersteunen. In de huidige economische situatie genereert de industrie een grote toegevoegde waarde. Het op de juiste manier opbouwen van een waterstofeconomie kan garanderen dat deze toegevoegde waarde behouden blijft. Blauwe waterstofcapaciteit draagt daarnaast bij aan de voorzieningszekerheid, ook op langere termijn als er meer en goedkopere groene waterstof (geproduceerd door middel van elektrolyse) beschikbaar komt. Ook import van waterstof is mogelijk, maar *volledige* afhankelijkheid van waterstof die buiten de EU wordt geproduceerd is onwenselijk, vanwege het belang van voorzieningszekerheid. Nederland zal daarvoor wellicht een hogere kostprijs voor waterstof moeten accepteren, zoals het dat nu ook doet waar het gaat om aardolie en aardgas.



Figuur 3: Maatregelen per sector gericht op het stimuleren van vraag naar klimaatneutrale waterstof



5. Bied financiële ondersteuning aan (productie)technologieën die het ontstaan van een Nederlandse markt voor klimaatneutrale waterstoftechnologie bevorderen

Diverse technologieën op het gebied van waterstof kunnen bijdragen aan het ontstaan van een Nederlandse klimaatneutrale waterstofmarkt: gecombineerde afvang en opslag van CO₂, gecombineerde energieopwekking en waterstofproductie uit wind-op-zee, waterstofopslag in zoutcavernes en de productie van brandstoffen op basis van waterstof.

De overheid zou de (verdere) ontwikkeling van dit soort technologieën financieel moeten ondersteunen.³⁷ Dit is mogelijk door middel van bijvoorbeeld *contracts-for-difference*, waarbij fabrikanten van producten die met deze relatief dure technologieën zijn gemaakt, het prijsverschil van de overheid terugkrijgen. Zulke regelingen maken het mogelijk om grotere delen van de waardeketen rond waterstof binnen Nederland tot stand te brengen en dat heeft strategische voordelen. Op termijn kan het ook bijdragen aan het verdienvermogen van de Nederlandse economie.

6. Zet actief in op samenwerking in EU-verband en met buurlanden en ontwikkel een sterkere internationale oriëntatie

Als het gaat om het verwerven van een waardevolle positie op de waterstofmarkt heeft Nederland in vergelijking met andere landen het voordeel dat het op dit moment al een internationaal energieknooppunt is. Om dit

³⁷ Het rapport 'Waterstof: kansen voor de Nederlandse industrie' biedt een overzicht van kansen en mogelijkheden voor de Nederlandse industrie (Reijkerk & Van Rhee, 2019).

voordeel optimaal te benutten en bij te dragen aan de verduurzaming van Europa, is actieve inzet nodig op Europese samenwerking. Vooral de samenwerking met Duitsland en België of in ieder geval in Pentalateraal verband³⁸ zou verder moeten worden geïntensiveerd om te komen tot een gecoördineerde uitrol van de waterstofmarkt en een grote mate van voorzieningszekerheid.

³⁸ Benelux, Duitsland, Frankrijk, Oostenrijk en Zwitserland.



Tabel 1: Instrumenten om vraag naar waterstof te vergroten, onderverdeeld naar sector

Sector	Instrumenten	Flankerend beleid
Sector gebouwde omgeving	<ul style="list-style-type: none"> • Invoeren van een administratieve bijmengverplichting van CO₂-vrij gas voor leveranciers van aardgas aan huishoudens. • Invoeren van een vrijstelling van energiebelasting voor CO₂-vrij gas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Regels en veiligheidsvoorschriften opstellen voor gebruik van waterstof in de gebouwde omgeving.
Mobiliteitssector – wegverkeer	<ul style="list-style-type: none"> • Fiscaal stimuleren van zero-emissionvoertuigen. • Waterstof opnemen in de uitwerking van de herziene Europese Richtlijn Hernieuwbare Energie (RED II). 	<ul style="list-style-type: none"> • Landelijk dekkende tankinfrastructuur voor waterstofvoertuigen opzetten door middel van verplichtingen in de concessies en subsidies. • Regels en veiligheidsvoorschriften opstellen voor gebruik van waterstof in de openbare ruimte. • Duurzame mobiliteit stimuleren door middel van milieuzones. • Zero-emissionvoertuigen gebruiken in publieke dienstverlening (vuilniswagens, bussen enzovoort).
Mobiliteitssector – luchtvaart	<ul style="list-style-type: none"> • Invoeren van een oplopende fysieke bijmengverplichting van CO₂-vrije kerosine voor de luchtvaart, indien mogelijk EU-breed. 	
Mobiliteitssector – scheepvaart	<ul style="list-style-type: none"> • Invoeren van een oplopende fysieke bijmengverplichting van CO₂-vrije brandstoffen voor de scheepvaart, indien mogelijk EU-breed. 	
Industriese sector	<ul style="list-style-type: none"> • Invoeren van een verplichte vervanging van grijze waterstof door klimaatneutrale waterstof, in combinatie met subsidie. • Invoeren van een verplichte overgang van laagcalorisch gas naar waterstof, in combinatie met subsidie. • Instellen van een subsidie voor onderzoek naar en ontwikkeling en uitrol van nieuwe toepassingen van waterstof (staalproductie, groene chemie, synthetische brandstoffen) 	
Energiesector – waterstofinfrastructuur	<ul style="list-style-type: none"> • Gasunie opdracht te geven te zorgen voor een hoofdtransportnet voor waterstof, inclusief opslagen in zoutcavernes en koppelingen naar België, Duitsland en de Noordzee. 	<ul style="list-style-type: none"> • Initiatieven voor aanleg van CO₂-infrastructuur wettelijk en financieel ondersteunen. • Denk na over de inrichting van de markt en de inpassing van private infrastructuur. • Instellen van subsidie voor onderzoek naar mogelijkheden voor opslag van waterstof in lege gasvelden en op andere locaties zich hiervoor lenen.
Energiesector – waterstofproductie	<ul style="list-style-type: none"> • Gecombineerde tenders uitschrijven voor aanleg van elektrolysecapaciteit, windparken op zee en transportinfrastructuur. • Instellen van subsidie voor onderzoek en pilotprojecten gericht op grootschalige CO₂-vrije waterstofproductie. 	



1 ROL VAN WATERSTOF IN DE ENERGIE- EN GRONDSTOFFENTRANSITIE

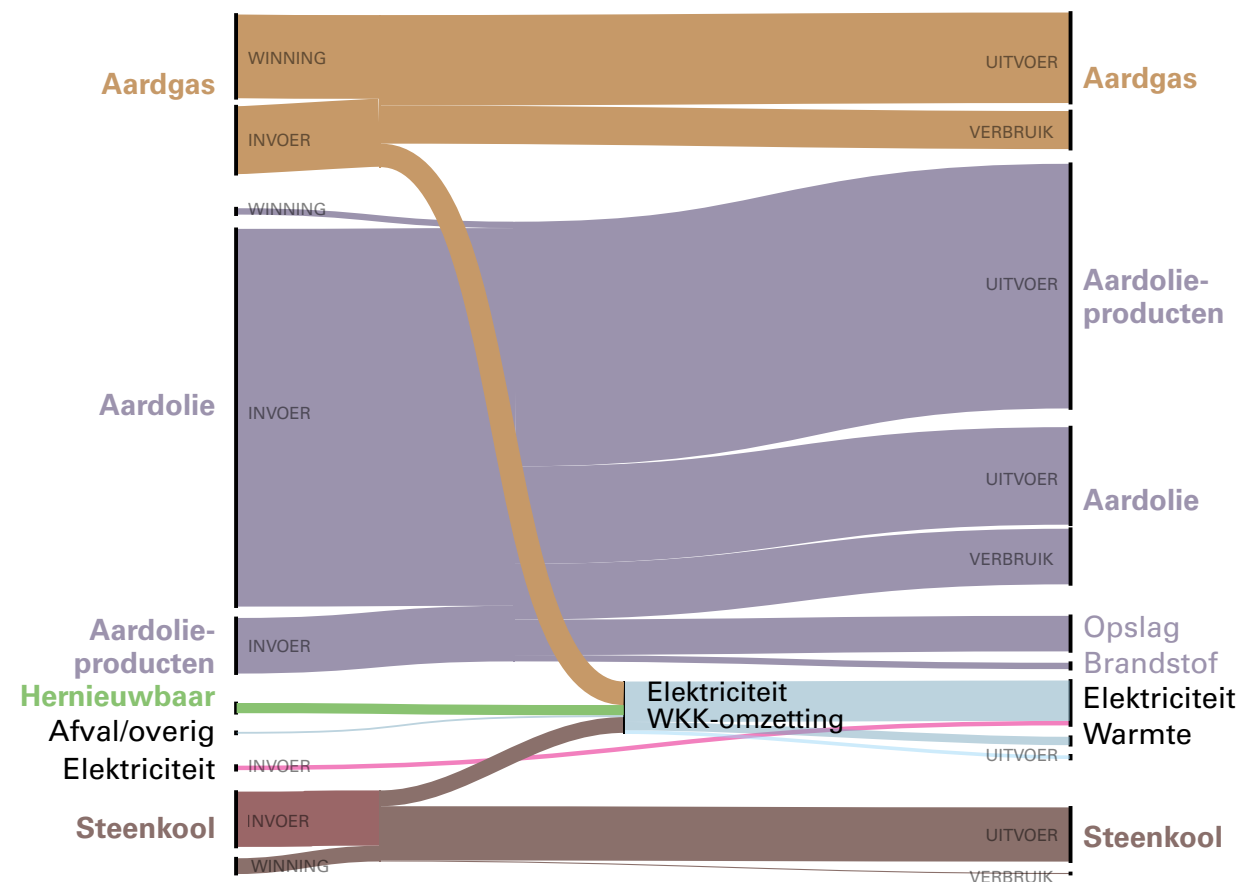
Welke rol zou waterstof kunnen vervullen in de transitie naar een klimaatneutrale energie- en grondstoffenvoorziening? Die vraag bespreekt de raad in dit eerste hoofdstuk van deel 2. Daarbij worden de energietransitie en de grondstoffentransitie steeds afzonderlijk belicht, want beide transities hebben hun eigen keten van waardetoevoegende activiteiten en ook een eigen palet van alternatieven voor het gebruik van aardgas, aardolie en kolen. Een ander belangrijk onderscheid in dit hoofdstuk is dat tussen ‘elektronen’ (oftewel elektriciteit) enerzijds en ‘moleculen’ (zoals aardolie, aardgas, waterstof en biomassa) anderzijds.

1.1 Ons huidige energie- en grondstoffensysteem

Het klimaatneutraal maken van het Nederlandse energiesysteem en grondstoffengebruik vraagt om grote aanpassingen. Om helder te krijgen hoe groot de opgave is en in welke richting de transitie zich moet bewegen, schetst de raad in deze paragraaf om te beginnen hoe ons huidige

energie- en grondstoffensysteem is opgebouwd. Figuur 4 geeft de energiestromen in Nederland grafisch weer.

Figuur 4: Energie- en grondstoffenstromen in Nederland in 2016



Bron: eigen productie op basis: CBS³⁹

³⁹ Bij gebrek aan recentere weergaves van de energiestromen binnen Nederland, is hier gebruikgemaakt van een figuur van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) die de situatie in 2016 toont. In dat jaar bedroeg het energieverbruik 3.155 petajoule (PJ). Inmiddels is het energieverbruik gedaald naar 3.084 PJ in 2019. De afkorting WKK in de figuur staat voor warmte-krachtkoppeling, een proces waarbij gelijktijdig warmte en kracht (elektriciteit) worden opgewekt.

Figuur 4 laat drie dingen zien. Ten eerste dat dat Nederland als transport- en handelsland een centrale positie heeft in de mondiale energiestromen;⁴⁰ in totaal wordt jaarlijks voor ruim 10.000 petajoule (PJ) energie ingevoerd (bestaande uit circa 80% olie en 20% gas) en voor ruim 8.000 PJ uitgevoerd.⁴¹ Ten tweede dat de energie- en grondstofstromen met elkaar zijn verbonden: beide worden gemaakt uit aardolie en aardgas. Ten derde dat zowel de energie- als de grondstoffenvoorziening, hoewel de transitie al in volle gang is, op dit moment nog grotendeels zijn gebaseerd op olie, gas en kolen.

Het laatste punt onderstreept dat er nog veel moet gebeuren. De internationale klimaatafspraken vereisen een verdere transitie naar klimaatneutrale energiedragers en grondstoffen. Het gaat voor Nederland om een transitie waarbij jaarlijks in totaal een energetische waarde van ruim 3.000 PJ (of 833 terawattuur – TWh)⁴² zal moeten worden vervangen door een systeem dat vrijwel geen CO₂ uitstoot.

Deze ruim 3.000 PJ is op dit moment opgebouwd uit (a) een heel klein deel rechtstreeks als elektronen opgewekte duurzame energie (afkomstig van windturbines en zonnepanelen) en (b) een groot deel niet-duurzame energie

⁴⁰ De transport- en distributiefunctie van Nederland is te danken aan de ligging van onder meer de haven van Rotterdam, waar diepliggende olietankers kunnen aanmeren, en aan de aanwezigheid van de Groninger gasveld, waarmee ook delen van Duitsland, België en Frankrijk van aardgas worden voorzien.

⁴¹ Het transport van deze gigantische hoeveelheden moleculaire energiedragers verloopt via pijpleidingen richting Ruhrgebied en andere delen van Duitsland, en richting België en Frankrijk.

⁴² In 2019 bedroeg het totale Nederlandse energieverbruik (van zowel huishoudens als industrie) 3.084 PJ (bron: CBS-statline). Het verbruik was daarmee 50 PJ lager dan in 2018 en 71 PJ lager dan in 2016.

afkomstig van moleculaire bronnen zoals aardgas, olie en kolen – en sinds kort ook biomassa, waarvan de inzet en duurzaamheid in discussie is.⁴³ Verder speelt nucleaire energie momenteel een kleine rol in de huidige Nederlandse energievoorziening: 4% in de elektriciteitsproductie en 0,3%⁴⁴ in het totale primaire energieaanbod.⁴⁵

Tezamen voorzien deze energiebronnen en -dragers niet alleen in het energieverbruik van Nederland, maar ook in het grondstoffenverbruik van de Nederlandse industrie;⁴⁶ circa 12% van het totaal is daarvoor bestemd.

Het energieverbruik in ons land wordt aangewend voor vier fundamentele maatschappelijke behoeften, in de vakwereld ook wel energiefunctionaliteiten genoemd (Rli, 2015):

⁴³ Vanuit een perspectief van schaarste, mogelijke alternatieven en het voorkomen van grootschalige import uit andere werelddelen, wordt de inzet van biomassa in verschillende onderdelen van de energie- en grondstoffenvoorziening heroverwogen. De Sociaal-Economische Raad (SER) is van mening dat Nederland een morele plicht heeft om zuinig om te gaan met duurzame grondstoffen als biomassa en daarmee niet het recht heeft biomassa uit de gehele wereld te importeren, maar zich moet beperken tot regionaal gewonnen biomassa. Daarnaast adviseert de SER biomassa bij voorkeur in te zetten voor hoogwaardige doeleinden, bijvoorbeeld als grondstof voor industrie en voor toepassingen waarvoor (op dit moment en tijdens de transitie) nog weinig of geen rendabele alternatieven bestaan. Basis elektriciteitsproductie en lage temperatuurwarmte worden door de SER als laagwaardige toepassingen beschouwd. Met toenemende fluctuaties op het elektriciteitsnet en warmtevoorziening wordt de inzet van biomassa voor flexibiliteit op het net en piekbelasting bij gebrek aan rendabele alternatieven wel gezien als zinvol, mits sprake is van voldoende milieuprestatie en verbranding efficiëntie (SER, 2020).

⁴⁴ In 2018 produceerde de kerncentrale in Borssele 3,325 TWh (11,97 PJ), op basis van 79% van het jaar in gebruik. In een van de topjaren draaide de centrale 95% van het jaar en produceerde 4,019 TWh (14,47 PJ). Bron: https://nl.wikipedia.org/wiki/Kerncentrale_Borssele

⁴⁵ Met 'primaire' energieaanbod wordt de hoeveelheid energie bedoeld die moet worden opgewekt om aan de vraag te voldoen. Doordat er bij productie, transport en opslag verliezen optreden, is het 'finale' energieaanbod geringer dan het primaire energieaanbod.

⁴⁶ Aardgas en olie vormen een grondstof voor het maken van producten als plastics, kunststoffen, medicijnen, coatings, verf, cosmetica, bestrijdingsmiddelen, kunstmest enzovoort.

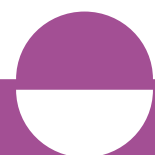
1. hogetemperatuurwarmte voor de industrie;
2. lagetemperatuurwarmte voor de gebouwde omgeving;
3. brandstof voor transport en mobiliteit;
4. licht en kracht voor apparaten.

Grofweg kan worden gesteld dat in de eerste drie behoeften vrijwel geheel wordt voorzien door middel van (fossiele) moleculen: aardgas voor warmte en olie voor brandstoffen. In de vierde behoefte, licht en kracht ('power') voor apparaten, wordt voorzien door middel van elektronen die via het elektriciteitsnetwerk worden gedistribueerd.

Opvallend in figuur 4 zijn de grote stromen aardolie en aardolieproducten die door Nederland stromen. Moleculaire energiebronnen en -dragers spelen met een aandeel van bijna 90% dan ook een dominante rol in de huidige energie- en grondstoffenvoorziening. Daarnaast is Nederland een knooppunt voor de in- en uitvoer van veel aardgas en aardolie(producten). Dit verklaart de aanwezigheid van vijf grote raffinaderijen in Nederland en een grote (petro)chemische sector.

Verder valt uit figuur 4 af te leiden dat van het gehele energetisch verbruik in Nederland slechts een klein deel wordt geconsumeerd in de vorm van elektronen. In 2019 betrof dit ongeveer 14%.⁴⁷ Die elektronen zijn op hun beurt grotendeels, voor ruim 80%, geproduceerd uit aardgas en kolen

⁴⁷ De hoeveelheid geproduceerde elektriciteit in Nederland bedroeg in 2019 436 PJ. Daarnaast werd netto voor 3,1 PJ ingevoerd.



via thermische centrales. Van de ruim 3.000 PJ gebruikte energiedragers in 2019 is zodoende slechts 11% *niet* afkomstig van aardolie, aardgas of kolen. Deze 11% omvat behalve 2,8% hernieuwbare energie van windturbines en zonnepanelen ook nucleaire energie en energie uit bijvoorbeeld afvalverbranding.⁴⁸

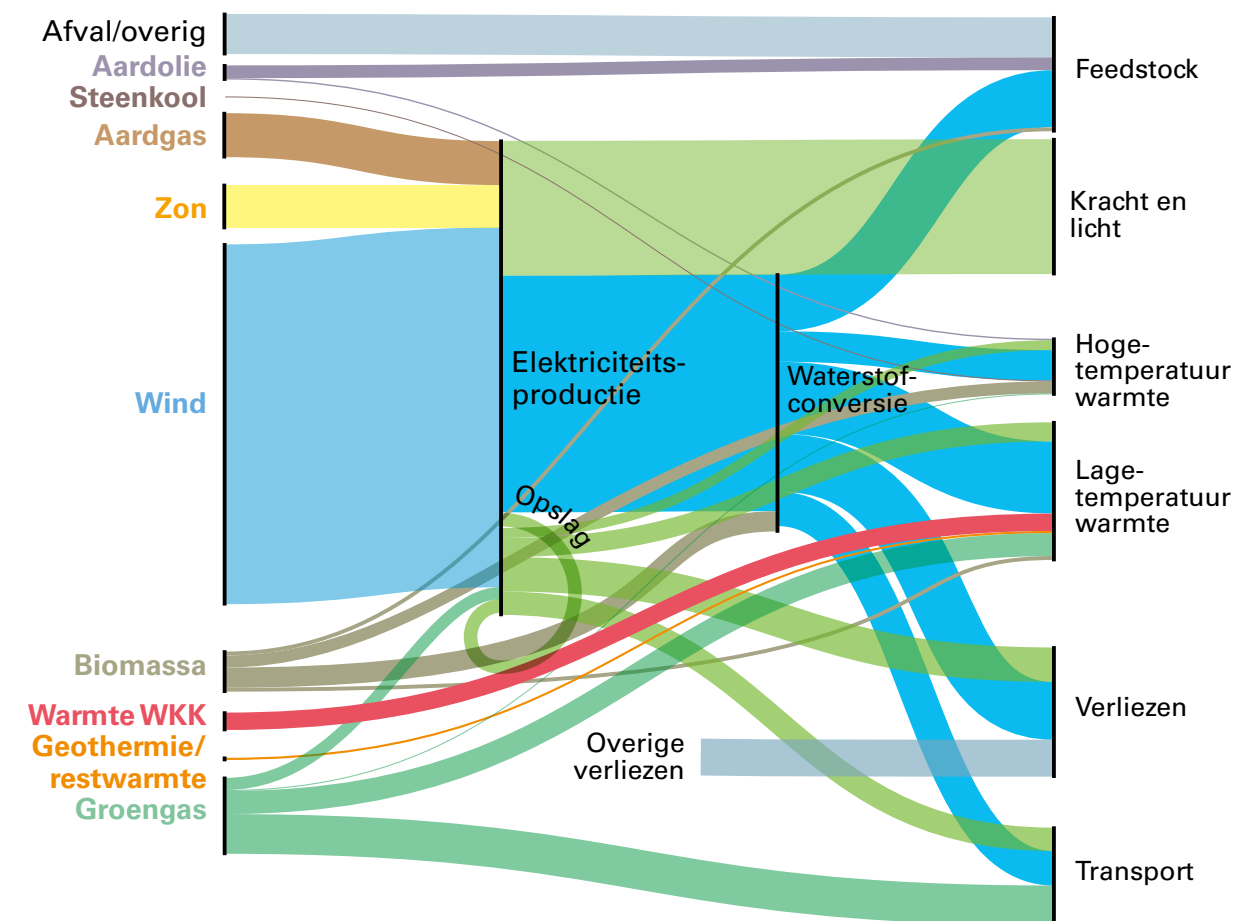
1.2 Energie- en grondstoffensysteem van de toekomst

Figuur 5 geeft een indruk van de gehele energie- en grondstoffenvoorziening zoals die eruit zou kunnen zien na de energietransitie in 2050. Het is de grafische weergave van een van de vier scenario's uit *Net voor de toekomst* (Afman & Rooijers, 2017), dat overigens is geüpdatet in de *Klimaatneutrale energiemilieuscenario's 2050* – maar de nieuwe scenario's voorzien niet in een soortgelijk diagram (Den Ouden *et al.*, 2020).

In het in figuur 5 weergegeven scenario ligt de nadruk op energieproductie door middel van windparken op zee. Andere scenario's gaan uit van meer energieopwekking uit biomassa of meer import van waterstof. De verschillende scenario's maken hierin verschillende keuzes. De scenario's worden nader besproken in hoofdstuk 2 hierna.

⁴⁸ Hernieuwbare energie omvat volgens de definitie van het CBS het totaal van waterkracht, aardwarmte, omgevingsenergie, zonne-energie, windenergie, biomassa.

Figuur 5: Impressie energie- en grondstoffenstromen in 2050



Bron: eigen productie op basis van Afman & Rooijers, 2017

Wanneer we figuur 4 en figuur 5 met elkaar vergelijken, wordt de impact van de energie- en grondstoffentransitie goed duidelijk. Het gaat hier om totaal verschillende systemen. In dertig jaar tijd zullen moleculaire energiedragers als olie, gas en kolen sterk zijn gereduceerd en grotendeels zijn vervangen door andere bronnen en dragers zoals biomassa, geothermie, elektriciteit uit zon en wind, groen gas en (deels geïmporteerd) waterstof.



Een deel van de bronnen kan direct worden ingezet, maar een deel van de energie zal via een of meer tussenstappen bij de eindgebruiker komen. In dat proces speelt onder meer waterstof een rol.

De koppeling tussen elektriciteitsproductie en waterstofconversie (door middel van elektrolyse) vormt het hart van het energie- en grondstoffen-systeem zoals het is afgebeeld in figuur 5. Te zien is dat zowel elektriciteit als waterstof kunnen worden geproduceerd vanuit diverse bronnen. Ook toont figuur 5 dat elektriciteit kan worden omgezet in waterstof en omgekeerd (in een waterstofcentrale die elektriciteit produceert in geval van weinig wind en zon, of decentraal, bijvoorbeeld in een brandstofcel in een auto, en daardoor minder zichtbaar is in de figuur) en dat beide energiedragers kunnen worden ingezet om te voorzien in de hiervoor besproken energiebehoeften.⁴⁹

Elektronen en waterstof hebben daarmee in het energie- en grondstoffen-systeem van de toekomst een *systeemfunctie*. Ze nemen deze functie over van olie en aardgas. Over de systeemfunctie van dragers en bronnen in het energiesysteem in relatie tot waterstof gaat figuur 6. Deze figuur geeft een beeld van de kwaliteiten en beperkingen die verbonden zijn aan elektriciteit

⁴⁹ Het omzetten van elektriciteit in waterstof en vice versa (door middel van bijvoorbeeld brandstofceltechniek of verbranding in een elektriciteitscentrale) gaat gepaard met conversieverliezen. Dergelijke verliezen zijn op zichzelf gebruikelijk in de energiewereld. Bijvoorbeeld: de *fuel-to-wheel efficiency* van een benzineauto is niet hoger dan circa 30%, terwijl die bij een batterijgevoede elektrische auto rond de 85% ligt en bij een brandstofcelauto rond de 43% (Committee on Climate Change, 2018). Verliezen worden uiteraard zoveel mogelijk vermeden. In de context van een energie- en grondstoffenvoorziening waarin waterstof een rol speelt zal dat niet anders zijn en zullen marktmechanismen zo ingericht moeten zijn dat conversieverliezen tot een minimum worden beperkt.

en waterstof. Uit figuur 6 blijkt dat elektriciteit en waterstof gezamenlijk over vrijwel alle kwaliteiten van olie en gas beschikken, maar dat ze afzonderlijk hun eigen kwaliteiten en beperkingen hebben. Elektriciteit heeft vooral kwaliteiten op het vlak van distributie en lage temperatuurwarmte, maar laat zich minder gemakkelijk over grote afstanden transporteren (transmissie), niet opslaan voor langere termijn en is ook minder geschikt voor het produceren van hoge temperatuurwarmte. Waterstof is meer *allround* inzetbaar dan elektriciteit. De kwaliteiten van waterstof zijn sterk aanvullend op de beperkingen van elektriciteit, terwijl elektriciteit geschikter is voor distributie (de maatschappelijke behoefte aan licht en kracht).

Figuur 6: Systeemrollen in huidige en toekomstige energie- en grondstoffenvoorziening

Systeemrollen	Huidige systeem		Energietransitie	
	Olie	Aardgas	Elektriciteit	Waterstof
Diverse bronnen/omzettingen	✓	✓	✓✓	✓✓
Opslag – Korte termijn	✓✓	✓✓	✓	✓
Opslag – Lange termijn/strategisch	✓✓	✓✓	—	✓✓
Transmissie	✓✓	✓✓	✓	✓✓
Netwerkeffecten in distributie	✓✓	✓✓	✓✓	✓
Warmte – Hoge temperatuur	✓✓	✓✓	—	✓✓
Warmte – Lage temperatuur	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓

Vallen weg in transitie

✓✓ Goed geschikt
 ✓ Enkele beperkingen
 — Gelimiteerd

CIEP

Bron: CIEP, 2019b



Elektronen, die CO₂-arm kunnen worden geproduceerd met windturbines en zonneparken, gaan een veel grotere rol spelen in het energie- en grondstoffensysteem van de toekomst. Dat impliceert dat op een andere manier zal worden voorzien in de vier eerdergenoemde maatschappelijke energiebehoeften (hogetemperatuurwarmte, lagetemperatuurwarmte, transport & mobiliteit, licht & kracht), die – in iets andere bewoordingen – ook in figuur 5 worden genoemd. Voor een belangrijk deel zal hiervoor elektriciteit gaan worden gebruikt. De eerste stappen in deze ontwikkeling naar verre-gaande elektrificatie zijn nu al zichtbaar: voor lagetemperatuurwarmte in de gebouwde omgeving worden steeds vaker warmtepompen ingezet en in de mobiliteitssector zien we een opmars van elektrische auto's met accu.

Bij de huidige stand van de techniek is echter de inschatting dat elektrificatie niet overal mogelijk zal zijn – of alleen met dusdanig veel aanpassingen dat het een te dure operatie wordt. Deze barrières zijn er met name bij de productie van hogetemperatuurwarmte voor de industrie en bij onderdelen van het transportsysteem (zwaar vervoer, vliegtuigen en zeeschepen). Ook bepaalde grondstoffen lijken vooralsnog lastig vervangbaar. In hoofdstuk 2 hierna gaat de raad hier nader op in.

Afgezien van deze technologische factoren die volledige elektrificatie in de weg staan, is er een capaciteitsprobleem: vanuit wind- en zonneparken zal niet voldoende elektriciteit kunnen worden opgewekt om aan de gehele energiebehoefte van Nederland te voldoen, zoals verderop in dit hoofdstuk zal worden toegelicht.

In het systeem van de toekomst blijft dus een belangrijke rol bestaan voor moleculaire energiedragers (zie paragraaf 1.3 hierna). De opgave die daarbij voorligt is om over te gaan op CO₂-neutrale energiedragers. Waterstof, groen gas en biomassa zijn daar de meest voor de hand liggende opties.

Overigens zal Nederland ook in een klimaatneutraal energie- en grondstoffensysteem niet volledig in zijn eigen behoefte kunnen voorzien. Import van energie blijft dus noodzakelijk. Ook de ons omringende landen zijn voor hun energie afhankelijk van import, met name Duitsland en België. Noorwegen en Denemarken daarentegen zullen juist energie exporteren. In een toekomstig energie- en grondstoffensysteem zal Nederland nog steeds een belangrijk knooppunt kunnen vormen in het transport en de doorvoer van energie, waarbij met name waterstof (of op waterstof gebaseerde dragers als ammoniak en methanol) een belangrijke rol kan spelen. Dat Nederland deze functie behoudt, is echter niet vanzelfsprekend en vraagt om actief beleid (zie ook de hoofdstukken 3 en 4 van dit deel 2).

1.3 Onmisbaarheid van moleculen in een klimaatneutraal systeem

De algemene verwachting is dat CO₂-vrij geproduceerde elektriciteit binnen de toekomstige energiemix van Nederland een groter aandeel in het primaire energieaanbod zal innemen. De schattingen variëren tussen de 25% tot 71%, waarbij Berenschot & Kalavasta (Den Ouden *et al.*, 2020) in absolute termen spreken van hoeveelheden tussen de 765 en 1.232 PJ (212 – 342 TWh) als primair aanbod, en 690 en 863 PJ (192 – 240 TWh) in finaal



verbruik (zie ook Scheepers *et al.*, 2020). Dat betekent een forse opschaling ten opzichte van de nog geen 3% die energie uit zon- en windparken op dit moment bijdraagt aan de energiemix.⁵⁰

Het is de vraag hoe realistisch deze verwachting is. Wanneer het zou lukken om in 2050 te komen tot een opgesteld vermogen van 60 GW windparken op zee en 80 GW zonneparken, zou dit gemiddeld per jaar tussen de 1.325 PJ en 1.440 PJ opleveren aan primair energieaanbod. Dat is in geen van de vier door Berenschot & Kalavasta (Den Ouden *et al.*, 2020) opgestelde klimaatneutrale energiescenario's voldoende om in 2050 te voorzien in de gehele minimale energiebehoefte.⁵¹ Bovendien is het, zo een 'groene' elektriciteitsproductie van deze omvang al te realiseren zou zijn, een nog een aanzienlijke opgave om het Nederlandse elektriciteitsnetwerk tijdig en tegen acceptabele investeringen zodanig op te schalen dat het deze grote additionele hoeveelheden energie kan verwerken. De verwachting is dat de piekvraag veel sneller zal stijgen dan het tempo waarin het netwerk kan worden aangepast. Illustratief in dit verband is dat een zonnepark met een vermogen van 100 MW, waarvan de aanleg onder een licht planologisch regime valt, binnen anderhalf jaar kan worden gerealiseerd, terwijl het

⁵⁰ Windenergie was in 2019 goed voor 1,85% en zonne-energie voor 0,94% van de totale primaire aanbod. Zie: <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2020/22/verbruik-hernieuwbare-energie-met-16-procent-gegroeid>

⁵¹ In de vier klimaatneutrale energiescenario's voor 2050 (opgesteld door Den Ouden *et al.*, 2020) wordt de behoefte aan primair energieaanbod rond 2050 ingeschat op 1.775 PJ tot 2.964 PJ per jaar (waarbij nog geen rekening is gehouden met de benodigde energie voor internationale lucht- en scheepvaart en seizoensopslag).

veel langer duurt om het daarvoor benodigde hoogspanningsstation om te bouwen (vooral vanwege het doorlopen van procedures).⁵²

In één van de zojuist genoemde klimaatneutrale energiescenario's, het scenario *Regionale sturing*, is de Nederlandse behoefte aan primair energieaanbod in 2050 berekend op 1.775 PJ. In het scenario *Internationale sturing* is dat 2.964 PJ (Den Ouden *et al.*, 2020). Hierbij is nog geen rekening gehouden met brandstof voor lucht- en scheepvaart (zie hoofdstuk 2 in deel 2). Ten opzichte van de hierboven genoemde theoretisch mogelijke 1.440 PJ aan opgewekte elektronen blijft er dus altijd een tekort bestaan. Dat tekort kan op verschillende manieren worden opgevuld, bijvoorbeeld door import van elektriciteit of door de inzet van een mix van moleculaire energiedragers als biomassa, groen gas en waterstof, die deels zullen moeten worden geïmporteerd.

Zelfs binnen een systeem dat volledig in zijn primaire energieaanbod kan voorzien door middel van elektronen zal er nog steeds een rol blijven bestaan voor moleculen, om de volgende twee redenen:

- Aangezien het Nederlandse elektriciteitsnetwerk niet in staat zal zijn om alle geproduceerde elektronen te verwerken, en aangezien er niet altijd voldoende vraag zal zijn op de momenten dat er veel aanbod is van wind- en/of zonne-energie, zal een deel van de opgewekte 'groene' elektriciteit onvermijdelijk via een andere route moeten worden geleid. Opslag van kleine hoeveelheden elektriciteit voor een korte termijn is

⁵² Uitspraak van H. Slootweg in het Technisch Weekblad d.d. 5 november 2019; zie <https://www.technischweekblad.nl/artikelen/tech-achtergrond/contouren-van-een-nieuw-energienet>



mogelijk (in onder) meer accu's, maar de opslag van grotere hoeveelheden elektriciteit voor een langere termijn kan alleen in de vorm van moleculen (zie paragraaf 1.5 hierna). Een logische optie daarvoor is de omzetting van elektriciteit in waterstof door middel van elektrolyse.

- Aangezien niet in de gehele maatschappelijke behoefte aan energie en grondstoffen kan worden voorzien door middel van elektronen, is ook vanuit dat oogpunt de inzet van moleculen als aanvullend alternatief voor aardolie, aardgas en kolen onontkoombaar.

Grenzen aan elektriciteitsproductie uit wind en zon

Met een opgesteld vermogen van 60 GW⁵³ in windparken op zee zou jaarlijks gemiddeld zo'n 1.080 PJ aan energie kunnen worden opgewekt.⁵⁴ De plaatsing van voldoende windturbines om aan deze hoeveelheid energie te komen vraagt om een aanzienlijke ruimtereservering op het Nederlands continentaal plat van de Noordzee. Het Planbureau voor de leefomgeving (PBL) komt, afhankelijk van de hoeveelheid geplaatste turbines per km², uit

⁵³ Het nationale Klimaatakkoord (hoofdstuk 5, p. 158) spreekt van een maximum van 60 GW aan opgesteld vermogen wind-op-zee.

⁵⁴ De opbrengst van windparken op zee wordt beïnvloed door diverse factoren, die in de berekening moeten worden meegenomen. Het nationale Klimaatakkoord rekent met jaarlijks 3.237 vollasturen voor windturbines op land; voor windturbines op zee ligt het aantal vollasturen hoger. RVO rekent op dit moment met 4.600 vollasturen (capaciteitsfactor van 52,51%), en de verwachting is dat dit dankzij innovaties kan oplopen tot 5.000 (capaciteitsfactor 57,07%) bij moderne turbines onder optimale omstandigheden. Hier wordt met 5.000 vollasturen gerekend. Het maximale potentieel aan op te wekken windenergie op de Noordzee is op ruimtelijke gronden berekend op 72 GW, wat zou resulteren in 1.296 PJ.

op 11% tot 26% van het Nederlandse deel van de Noordzee.⁵⁵ Er is daarnaast veel geld nodig. De kosten van de bouw van de windparken (plus elektrolysecapaciteit) worden geschat op € 110 miljard, en die voor infrastructuur voor aanlanding op land op € 35 miljard (Ecofys & Berenschot, 2018, p. 92). Een lastig aspect van de bouw van windparken is dat zulke projecten commercieel aantrekkelijk moeten blijven voor de energiebedrijven die erin gaan investeren. Veel wind leidt momenteel tot een overschot een elektriciteit en daardoor tot lage prijzen voor elektriciteit en gering financieel rendement (AFRY Management Consulting, 2020).

De energieopbrengst uit windturbines op land zal naar verwachting relatief klein blijven; het PBL gaat uit van circa 63 PJ in 2030 (Schoots & Hammingh, 2019). Daar staat tegenover dat zonne-energie mogelijk een grotere rol gaat spelen in de Nederlandse energievoorziening dan tot voor kort werd aangenomen.⁵⁶ De huidige ramingen van het jaarlijks te produceren vermogen aan zonne-energie variëren van 20 GW tot 80 GW. Desondanks blijft de jaarlijkse opbrengst van zonneparken in Nederland bij een opgesteld vermogen

⁵⁵ Deze productiedichtheid (ook wel 'winddichtheid' genoemd) van windturbines op zee wordt uitgedrukt in termen van MW per km². Het PBL (2018) rekent met een gemiddelde productiedichtheid van 6 MW per km². In de praktijk komen zowel lagere als hogere dichtheden voor. Grote turbines met een vermogen van 10 MW (waarvan er dus 6.000 nodig zouden zijn om tot in totaal 60 GW aan opgesteld vermogen te komen) hebben een grotere afstand nodig tot elkaar dan kleinere. In het Geminipark, één van de Nederlandse windparken op de Noordzee, wordt 9 MW per km² geproduceerd met behulp van relatief kleine turbines van 5 MW (waarvan er dus 12.000 nodig zouden zijn voor 60 GW). Voor de productie van 60 GW zou dan 11% van het nationale continentale plat moeten worden gereserveerd, terwijl dat 26% is bij een productiedichtheid van 4 MW/km². Het PBL concludeert dat een hogere productiedichtheid een gunstig effect heeft op het ruimtegebruik, maar ook nadelen heeft in termen van minder medegebruik van de ruimte op zee, meer vogelsterfte en minder vollasturen per turbine.

⁵⁶ Zie <https://www.tennet.eu/nl/ons-hoogspanningsnet/ons-hoogspanningsnet/werken-aan-capaciteit-zonne-energie>



van 80 GW relatief laag; naar schatting 245 tot 360 PJ.⁵⁷ Daarvoor zijn circa 230 miljoen geïnstalleerde panelen nodig en een oppervlakte van zo'n 450 km², grofweg de gehele Noordoostpolder. Eind 2019 telde Nederland in totaal zo'n 24 miljoen zonnepanelen, met een gezamenlijk vermogen van circa 6,9 GW. Het theoretisch potentieel aan opgesteld vermogen is overigens berekend op 180 GW (en zelfs 370 GW indien 5% van het Nederlands continentaal plat zou worden gereserveerd voor zonneparken, iets wat gezien de geringe capaciteitsfactor van zonneparken niet voor de hand ligt).

Grenzen aan verzwaring elektriciteitsnetwerk

De huidige capaciteit van het Nederlandse elektriciteitsnetwerk schiet tekort wanneer Nederland op korte termijn zou overgaan tot grootschalige elektrificatie. Uitbreiding en capaciteitsverzwaring zijn met het oog op de aankomende transitie noodzakelijk. Maar zowel planologische, juridische als financiële obstakels beperken de mogelijkheden tot snelle uitbreiding en verzwaring.

Het gehele elektriciteitsnetwerk transporteert op dit moment zo'n 130 TWh (450 PJ) aan elektronen per jaar. Ter vergelijking: het gasnet vervoert jaarlijks circa 110 miljard m³ gas, bijna tien keer zoveel energie, tegen (veel) lagere kosten per kilometer.⁵⁸ Een groter aandeel van elektronen in de gehele energie- en grondstoffenvoorziening vraagt om een aanzienlijk

⁵⁷ In het nationale Klimaatakkoord wordt gerekend met 854 vollasturen zon per jaar, hetgeen 9,7% is van de 8.760 uren die een jaar in totaal heeft. Windturbines zijn daarmee in het Nederlandse klimaat een efficiëntere vorm van energieopwekking dan zonnepanelen. De capaciteitsfactor van turbines op land ligt namelijk rond de 30% en op zee tussen de 40% en 60%. De verwachting is dat door innovaties het aantal vollasturen van zonnepanelen nog zal toenemen.

⁵⁸ Zie <https://energiecijfers.info/hoofdstuk-8-financiele-kentallen>

grotere netcapaciteit dan nu. Op basis van de klimaatneutrale energietoekomstscenario's zou het gaan om volumes van 190 TWh tot 240 TWh in finaal verbruik, en tot 342 TWh aan primaire energiebehoefte. Volgens verschillende betrokkenen vraagt een netverzwaring waarmee volumes van rond de 220 TWh kunnen worden verwerkt een grote inspanning.

De verwachting is dat de totale jaarlijkse elektriciteitsvolumes wel door het netwerk zullen kunnen worden verwerkt, maar dat er een probleem zal ontstaan op piekmomenten in het aanbod van door wind en zon opgewekte elektriciteit, dat grote fluctuaties kent. Tegelijkertijd gaat naar verwachting ook de dagelijkse piek in de vraag naar elektriciteit een probleem vormen, omdat deze sneller zal toenemen dan het netwerk en productie aankunnen. De dagelijkse piekvraag zal groeien doordat steeds meer processen in de maatschappij overgaan op elektrificatie. Zo zal een deel van de lage temperatuurwarmte voor het verwarmen van gebouwen op termijn worden geëlektrificeerd. Verder zal elektrisch rijden het gebruik van benzine en diesel deels vervangen en ook dat zal resulteren in een flinke toename in de vraag naar elektriciteit. Accu's in elektrische voertuigen en ook zelfstandige accu's zullen worden ingezet om pieken door de dag heen op te vangen, waardoor er meer volume over het net kan worden getransporteerd.

Netbeheer Nederland heeft in 2019 aangegeven dat het realiseren van de verzwaring van het netwerk om vanaf 2030 jaarlijks de in het nationale Klimaatakkoord afgesproken additionele 35 TWh aan duurzaam opgewekte elektriciteit op land te kunnen transporteren, niet mogelijk is binnen het huidige systeem (Netbeheer Nederland, 2019a). De ombouw van een vraaggestuurd centraal gevoed elektriciteitsnet naar een bij de energietransitie



passend aanbodgestuurd en decentraal weersafhankelijk gevoed net, vraagt volgens de netbeheerders om een complete herziening van de regelgeving en randvoorwaarden.

De Taskforce Infrastructuur Klimaatakkoord Industrie (TIKI) geeft eveneens aan dat de benodigde verzwaring van het netwerk een grote opgave is.

De taskforce schat de totale investeringskosten tot 2030 voor publieke infrastructuur, het geheel van hoogspanningsnetwerk, de regionale distributienetten, CO₂-pijpleidingen hoofdinfrastructuur en een waterstof hoofdtransportnetwerk) op € 40 tot € 50 miljard. Hiervan is € 12,5 miljard nodig voor het hoogspanningsnetwerk en € 27 tot € 30 miljard voor de regionale distributienetwerken. De TIKI stelt vast dat netverzwaring lange doorlooptijden heeft en niet in alle gevallen de meest kostenefficiënte optie en dat transport van waterstof kostenefficiënter kan worden gerealiseerd. De TIKI beveelt daarom aan het uitgangspunt *moleculen, tenzij* te hanteren en in eerste instantie te opteren voor moleculentransport. Ook na 2030, wanneer het elektriciteitsnet zo'n 160 TWh kan transporteren, zal het volgens de taskforce niet eenvoudig zijn voor de netbeheerders om de verzwaring naar minimaal 220 TWh te realiseren (TIKI, 2020).

1.4 Routes naar klimaatneutrale moleculen

Het wegvallen van de moleculenstroom wanneer fossiele bronnen worden afgebouwd, zal de komende jaren deels moeten worden opgevuld met CO₂-neutrale moleculen. Dat kan op verschillende manieren (Scheepers *et al.*, 2020):

1. Aardgas en olie als brandstof en/of grondstof in combinatie met afvang, hergebruik en/of opslag van de vrijkomende CO₂;
2. Productie en/of import van biomassa als brandstof en/of grondstof, waarna de vrijgekomen hoeveelheid CO₂ wordt afgevangen ofwel op de lange termijn weer wordt opgenomen door groeiend bos of ander organisch materiaal;
3. Productie van groen gas als brandstof en/of grondstof op basis van vergisting of vergassing van biomassa;
4. Productie van grondstoffen uit gerecycled afval of elektriciteit uit afvalverbranding, waarbij de vrijgekomen CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen;
5. Productie en/of import van groene waterstof of blauwe waterstof (deze laatste in combinatie met afvang, hergebruik en/of opslag van de bij productie vrijgekomen CO₂).

Het grootste deel van de vraag naar klimaatneutrale moleculen zal worden ingevuld door de inzet van biomassa en/of waterstof. Daarnaast zullen voor een klein deel van de energie- en grondstoffenvoorziening fossiele bronnen gebruikt blijven worden, vooral als grondstof voor specifieke producten. Hierbij valt te denken aan de productie van smeeroliën en bepaalde kunststoffen.

Over optie 1, het gebruik van aardolie en aardgas in combinatie met afvang en opslag van CO₂, kan worden opgemerkt dat dit het voordeel heeft dat bestaande installaties hiermee om kunnen gaan en dat deze oplossing op korte termijn op grote schaal kan worden ingezet. Een nadeel is echter dat



de afvang en opslag van CO₂, afhankelijk van de gekozen techniek,⁵⁹ niet in alle gevallen volledig zal zijn. Ook zijn er kosten verbonden aan opvang en opslag van CO₂; het zal op termijn duurder zijn dan andere klimaatneutrale opties.

Bij optie 2, de inzet van biomassa, zijn diverse onderscheidingen te maken: tussen droge en natte biomassa, tussen binnenlandse en buitenlandse biomassa, tussen houtige en niet-houtige biomassa. Natte biomassa omvat mest en reststromen als rioolwater, slib en GFT.⁶⁰ Natte biomassa heeft als nadeel dat het een groot gewicht heeft, waardoor import prijstechnisch niet voor de hand ligt en de toepassing zich dus beperkt tot binnenlandse productie. Droge biomassastromen omvatten houtpallets, snoeihout, houtsnippers, maaisel (gras, heide, riet). Droge biomassa kan worden ingezet voor energiedoeleinden, in de biochemie, of als grondstof voor de productie van (vee)voer, suikers, plastics, materialen en brandstoffen. Een voordeel van droge biomassa is de internationale beschikbaarheid. Er is al handel in droge biomassa (houtpellets). Verwacht wordt dat deze handel zal toenemen en dat de prijs zal dalen. Biobrandstoffen zoals biodiesel, bio-ethanol en hernieuwbare diesel worden nu al verhandeld en de verwachting is dat ook deze handel zal groeien.

⁵⁹ Er zijn op dit moment drie belangrijke manieren voor de afvang van CO₂: 'post-combustion' (afscheiding van CO₂ uit de verbrandingsgassen), 'pre-combustion' (afscheiding van CO₂ uit de brandstof, bijvoorbeeld door middel van 'autothermal reforming' oftewel ATR) en CO₂-afvang met behulp van 'oxyfuel'-technologie. De laatste twee methodes zijn alleen toepasbaar in nieuwe installaties (Koelemeijer *et al.*, 2018). De voorkeur gaat in de praktijk steeds meer uit naar twee technieken die hoge afvangpercentages halen, te weten 'partial oxidation' (POX) of het eerder genoemde ATR. Veel bestaande installaties zijn evenwel gebaseerd op 'steam methane reforming' (SMR), een techniek waarbij slechts een deel van de CO₂ kan worden afgevangen.

⁶⁰ GFT staat voor groente-, fruit- en tuinafval.

Bij optie 3 gaat het om de productie van groen gas (methaan), gemaakt uit biomassa. Dit is een duurzame variant van aardgas en wordt gemaakt door biogas op te waarderen en te ontdoen van CO₂ tot het eenzelfde kwaliteit en samenstelling heeft als aardgas en dus naadloos aansluit op de bestaande gasinfrastructuur, installaties, productieprocessen en -systemen. Groen gas is hernieuwbaar en kan voor dezelfde toepassingen worden gebruikt als aardgas.⁶¹ Groen gas wordt op twee manieren gewonnen uit biomassa: op basis van vergisting van natte biomassa-stromen (zoals mest of andere natte reststromen zoals rioolwater) en op basis van vergassing van droge biomassastromen (zoals ruwe biomassa of houtpellets). Het potentieel van groengasproductie door middel van vergisting is beperkt, vanwege het beperkte aanbod van natte biomassa in Nederland. Er wordt tot op heden dan ook maar in beperkte mate groen gas geproduceerd. De minister van Economische Zaken en Klimaat (EZK) spreekt in zijn 'Routekaart groen gas' van 70 PJ in 2030, en mogelijk 351 PJ in 2050. Dat zijn aanzienlijke hoeveelheden waarvan onzeker is of deze haalbaar zijn. In de afgelopen twintig jaar is gebleken dat de opschaling van de productie van groen gas niet eenvoudig is en om veel innovatie en investeringen vraagt (Tweede Kamer, 2020b).

Optie 4 omvat (a) de productie van elektriciteit door middel van afvalverbranding en (b) circulaire processen waarbij gebruikte organische en niet-organische chemicaliën (zoals plastics) opnieuw worden gebruikt als grondstof voor de productie van materialen.

⁶¹ Bij afvang van CO₂ bij verbranding bestaat tevens de mogelijkheid om negatieve emissies te bewerkstelligen.



Bij (a), de afvalverbranding, gaat het om afvalstromen die niet kunnen worden gerecycled. Ongeveer 10% van de huidige hernieuwbare energieproductie komt op deze manier tot stand; er is weinig potentie tot verdere groei. Bij (b), het hergebruik van materialen als grondstof voor nieuwe producten, is de verwachting dat op termijn zo'n 20% tot 30% van alle Europese plastic afvalstromen na mechanische of chemische recycling opnieuw kan worden ingezet. Hoewel dit in de Nederlandse context mogelijkheden biedt, kan hiermee slechts een klein deel worden ingevuld van de toekomstige grondstoffenvraag (VNCI, 2018).

Optie 5 vormt het onderwerp van dit advies. In potentie is er een zeer grote hoeveelheid waterstof beschikbaar in de toekomst, zowel afkomstig van eigen productie als afkomstig van import. Of die potentie daadwerkelijk wordt gerealiseerd is afhankelijk van de vraag die zal ontstaan naar klimaatneutrale waterstof.

1.5 Opslag van energie en de rol van waterstof

Wind en zon zijn 'fluctuerende' bronnen van energie. Bij een teveel aan wind en zon moet de overtollige elektriciteit worden opgeslagen; anders moet deze worden 'weggegooid' (ook wel *curtailment* genoemd),⁶² om de balans op het elektriciteitsnetwerk te waarborgen. In de zomer zal doorgaans voldoende energie worden opgewekt door zon en wind. In de winter

⁶² Aan curtailment zijn kosten verbonden. De te veel geproduceerde elektriciteit wordt namelijk door de netbeheerder aangekocht bij producenten voordat ze wordt afgedankt. In Duitsland schommelen de kosten van curtailment jaarlijks rond de € 1 miljard.

ligt dit anders. Zowel voor de warmtelevering als voor de elektriciteitsvoorziening is er vooral in de winter behoefte om uit grootschalige seizoensopslag van energie te kunnen putten.

Seizoensopslag van energie moet aan een aantal voorwaarden voldoen: het moet opschaalbaar en goedkoop zijn en er mag niet of nauwelijks sprake zijn van zelfontlading of verliezen (FME, 2019). Verder moet er een gemakkelijke manier voorhanden zijn om de energie naar de opslaglocaties en van daaruit weer naar eindgebruikers te transporteren.

Op dit moment wordt de energie die nodig is voor warmte en elektriciteit centraal bewaard in de vorm van grote hoeveelheden opgeslagen aardgas. Deze gasvoorraad kan worden benut op momenten dat de vraag naar warmte en elektriciteit groot is. In een toekomstig systeem zal waarschijnlijk sprake zijn van een gedecentraliseerde opslagsystemen.

1.5.1 Toekomstige opslag van energie voor warmtevoorziening

Ongeveer de helft van het finale energieverbruik in Nederland wordt aangewend voor de productie van warmte.⁶³ Vooral in de winter is de vraag naar energie voor de warmtevoorziening groot. De piekvraag naar aardgas waarmee in deze vraag wordt voorzien ligt op koude winterdagen tussen de 100 GW en 110 GW (Netbeheer Nederland, 2019b). Dat is ruim vijf keer hoger dan de huidige piekvraag naar elektriciteit en ook veel hoger dan de

⁶³ In 2017 is 989 PJ energie aangewend voor het verwarmen van gebouwde omgeving, nijverheid, en de land- en tuinbouw. Dit is nog exclusief het elektriciteitsgebruik voor cv-pompen, elektrische boilers en warmtepompen, die het totaal opdrijven naar 1.008 PJ (Schoots & Hammingh, 2019)



piekvraag naar aardgas in de zomer. Per dag gaat het voor heel Nederland om verscheidene petajoules aan extra benodigde energie. Dat zijn enorme hoeveelheden energie, die in een toekomstig aardgasvrij systeem slechts met moeite kunnen worden opgewekt en geleverd. Bijlage B geeft een overzicht van wat de productie en opslag van 1 PJ aan energie betekent.

Voor de gebouwde omgeving zal het warmtesysteem gaan bestaan uit een combinatie van warmtenetten, elektrische en hybride warmtepompen (welke laatste bij koude situaties worden ondersteund door gas) en groen gas of waterstof geleverd via het gasnet. Voor de opwekking van de energie voor het warmtesysteem zal gebruik worden gemaakt van een diversiteit aan klimaatneutrale energiebronnen, waaronder restwarmte, afval, biomassa, groen gas, geothermie, wind, zon en ook waterstof.

Door de spreiding over bronnen zal de vraag naar grootschalige centrale energieopslag geringer zijn dan nu, maar niet verdwijnen. Alle opties vragen in periodes van koude om grote hoeveelheden direct aanspreekbare en dus opgeslagen energie. Voor de energieopslag ten behoeve van warmtenetten komen waterstof en uit biomassa opgewekt groen gas nadrukkelijk in beeld. Welke optie de voorkeur zal krijgen hangt af van onder meer het aanbod van klimaatneutrale waterstof, de kostprijs en het beoogde gebruik (zie ook hoofdstuk 2 hierna).

In het aardgastijdperk werden piekvraagperioden overbrugd door de aardgasproductie van 'Groningen' op te schroeven en opgeslagen voorraden aan te spreken. Deze voorraden bevinden zich in oude gasvelden die sinds

1997 zomers worden gevuld met aardgas om bij grote vraag, in de winter, deze weer te winnen.⁶⁴ In totaal beschikt Nederland over zo'n 500 PJ aan aardgasberging, waarvan de helft bestaat uit laagcalorisch gas en de andere helft uit hoogcalorisch gas.⁶⁵

Behalve in deze oude gasvelden wordt er ook aardgas opgeslagen in lege zoutcavernes in Zuidwending in Groningen.⁶⁶ De aardgasbuffer Zuidwending is sinds 2011 in gebruik en bestaat op dit moment uit vijf cavernes op ongeveer 1 km diepte, van circa 300 tot 500 meter hoog en 60 tot 80 meter in diameter. In totaal is hier 620 miljoen m³ aardgas opgeslagen, waarvan 310 miljoen m³ (10,9 PJ) werkgas dat met een snelheid van 1,51 PJ per dag kan worden gewonnen. Het pilotproject HyStock⁶⁷ waar de komende jaren aan wordt gewerkt, richt zich op het opslaan van waterstof in één van de zes zoutcavernes, die ruimte zou bieden aan 240.000 MWh (0,86 PJ) aan energie (ter vergelijking: de huidige grootste operationele batterij kan 100 MWh leveren).

Een derde vorm van gasopslag bevindt zich op de Maasvlakte bij de LNG-terminal, waar gas wordt bewaard in zogenoemde 'peakshaver tanks'.

⁶⁴ Deze bergingen liggen op een diepte tussen de 2.500 en 4.000 meter. Het gas wordt opgeslagen in een poreuze zandsteenlaag in het veld, daarboven ligt een afdichtende zoutlaag. Zie <https://www.nam.nl/gas-en-oliewinning/ondergrondse-gasopslag/belang-van-ondergrondse-gasopslag.html>

⁶⁵ In het Norgveld met een opslagcapaciteit van 5 miljard m³ (175 PJ) en uitzendcapaciteit van 75 kubieke megameter per dag (2,64 PJ) wordt laagcalorisch gas opgeslagen dat bestemd is voor Nederlandse huishoudens. Dit veld is tussentijds uitgebreid als gevolg van de teruglopende capaciteit (als gevolg van drukdepletie) van het Groningenveld. Het Grijpskerkveld (2 miljard m³/70 PJ) is bestemd voor hoogcalorisch gas en industriegebruik.

⁶⁶ Informatie over de Aardgasbuffer Zuidwending is te vinden op <https://www.agbzw.nl>

⁶⁷ Zie <https://www.energystock.com/about-energystock/the-hydrogen-project-hystock>



Deze opslag bevat 78 miljoen m³ LNG (2,74 PJ) en heeft een maximale productiecapaciteit van 1,3 miljoen m³ (0,035 PJ) per uur.

1.5.2 Toekomstige opslag van energie voor elektriciteitsvoorziening

Ook voor de elektriciteitsvoorziening is een vorm van opslag nodig. In een centraal vraaggestuurd elektriciteitssysteem zoals we dat op dit moment nog kennen is dat gemakkelijker dan het zal zijn in het weersafhankelijke aanbodgestuurde elektriciteitssysteem van de toekomst. Traditioneel wordt fluctuatie in de vraag naar elektriciteit opgevangen door centrales een tandje bij of af te laten schakelen. In een weersafhankelijk elektriciteitssysteem is meer nodig. Er is dan immers niet alleen sprake van pieken en dalen in de *vraag*, maar ook van pieken en dalen in de productie van elektriciteit. Dat vraagt om een hogere mate van flexibiliteit en dus om aanvullende oplossingen. Aanvullende oplossingen die nu worden toegepast voor het opvangen van fluctuaties zijn: (1) import en export, (2) aanbodsturing en (3) vraagsturing.⁶⁸ Algemeen is de consensus dat deze drie oplossingen nog wel uitkomst bieden voor de komende jaren, maar dat met de toename van duurzaam opgewekte elektriciteit niet te ontkomen valt aan een vorm van seizoensopslag.

⁶⁸ Van import en export wordt in toenemende mate gebruikgemaakt. Dit biedt echter niet in alle situaties uitkomst. De weersituatie is in de landen van Noordwest-Europa namelijk vaak vergelijkbaar, waardoor er in veel gevallen geen evenwicht bestaat tussen vraag en aanbod. Daarnaast is de interconnectiecapaciteit tussen landen fysiek begrensd. Prognoses van TenneT geven aan dat de interconnectiecapaciteit in 2022 9,1 GW bedraagt, in 2025 9,8 GW en in 2026 10,8 GW (TenneT, 2020). Een vorm van aanbodsturing is het tijdelijk afkoppelen van duurzame bronnen (het eerder in paragraaf 1.5 besproken curtailment). Nadeel hiervan is dat er veel energie verloren gaat en dat de kosten om producenten hiervoor te compenseren hoog kunnen oplopen. In Duitsland bedroegen de kosten in 2016 bijvoorbeeld € 860 miljoen en ging 3,5 TWh verloren (FME, 2019). Veel aandacht en innovatie is gericht op vraagsturing, wat een verzamelterm is voor allerlei maatregelen gericht op het beïnvloeden van het gebruikspatroon bij de eindgebruiker.

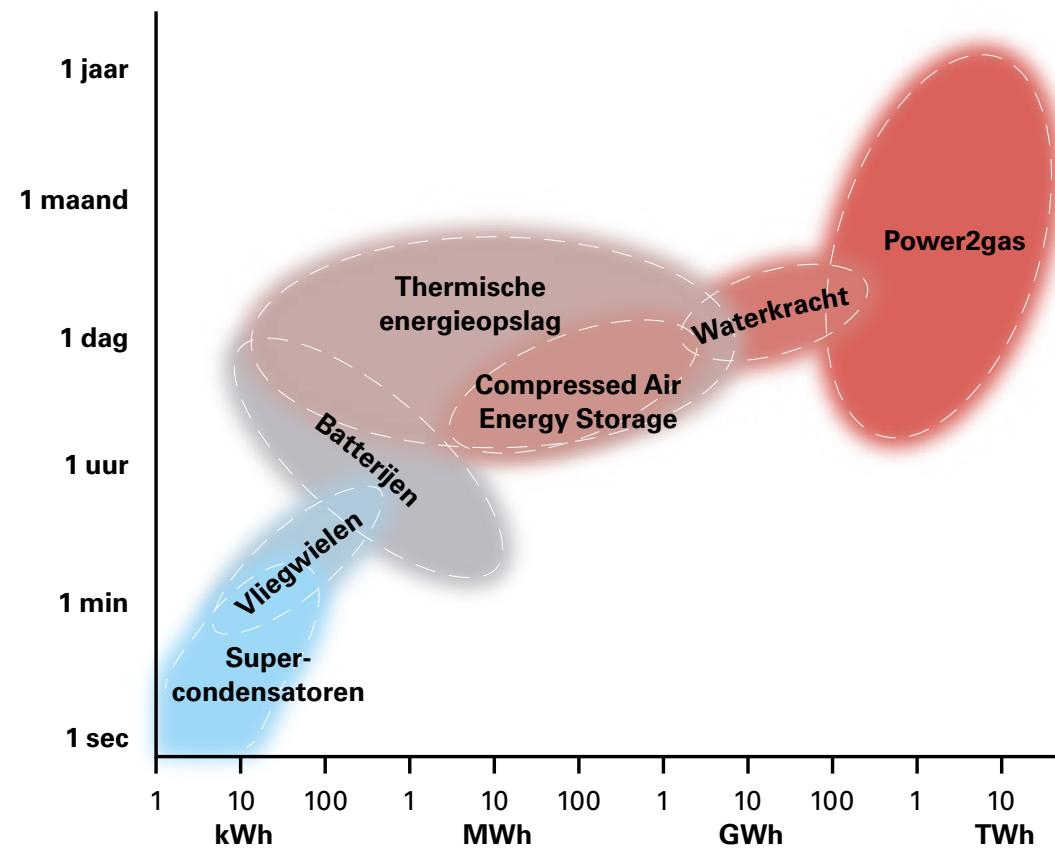
De verwachting is dat onbalans tussen productie en vraag op dagelijkse basis tot periodes van 48 uur kan worden opgevangen met technieken voor kortdurende opslag, bijvoorbeeld in accu's. Een grotere opgave vormt het doorkomen van een langere aaneengesloten koude, donkere en/of windstille periode, een zogenaamde *dunkelflaute*. Daarbij wordt al snel gedacht aan een periode van twee weken, maar recent Duits onderzoek laat zien dat de afgelopen veertig jaar slechts eenmaal een periode is voorgekomen van acht aaneengesloten dagen zonder wind. Wel is met enige regelmaat sprake van een periode van vijf aaneengesloten dagen zonder wind (Ohlendorf & Schil, 2020). Wanneer wind én zon veel minder energie opleveren dan in een gemiddeld weerjaar, wordt gesproken van *misoogst*. Jaren van *misoogst* zorgen voor langdurige tekorten aan energie. Daarin moet worden voorzien door (onder andere) langdurige CO₂-neutrale opslag van energie.

1.5.3 Mogelijkheden voor seizoensopslag van elektriciteit

Er zijn verschillende methoden voor seizoensopslag van elektriciteit, die elk een eigen capaciteit en opslagduur kennen. Het gegeven dat er bij langdurige opslag zelfontlading en dus verlies van capaciteit optreedt, verkleint het aantal bruikbare mogelijkheden. Er zijn voor de opslag van elektriciteit gedurende langere tijd drie alternatieven in beeld met een geschikte schaal-grootte en een acceptabele mate van zelfontlading: waterkracht, thermische opslag en 'power2gas'. Deze drie opslagmethoden worden hierna nader toegelicht. Andere opslagmethoden voldoen vooralsnog niet aan de gewenste hoeveelheden en aan het vereiste van geringe zelfontlading; zie figuur 7 (FME, 2019).



Figuur 7: Overzicht energie lange termijn opslagtechnologieën



Bron: eigen productie op basis van FME, 2019

Waterkracht als vorm van energiereserve is in de Nederlandse context te realiseren in bijvoorbeeld ondergrondse cavernes. Zo wordt in Limburg gewerkt aan een waterkrachtcentrale op basis van een waterreservoir dat in verbinding staat met een ondergronds reservoir op 1.400 meter diepte, waarmee 1.400 MW stroom voor zes uur kan worden geleverd, oftewel

0,03 PJ aan energie.⁶⁹ Ook kunstmatige valmeren kunnen worden gebruikt voor de tijdelijke productie van extra energie uit waterkracht, hoewel levering van voldoende capaciteit op seizoensschaal lastig zal zijn. Daarnaast is er het probleem dat de energie moet worden getransporteerd. Lokaal en regionaal kan een valmeer een oplossing bieden, maar niet overal in Nederland is deze techniek toepasbaar.⁷⁰

Thermische opslag betreft het opslaan van warmte, bijvoorbeeld de zonnewarmte of industriële restwarmte, in een opslagmedium. Ook overschotten aan elektriciteit kunnen thermisch worden opgeslagen ('power2heat'). In Nederland gaat het dan vaak om ondergrondse opslag in tanks, boorgaten en 'aquifers' (watervoerende lagen in de ondergrond). Een andere techniek in dit verband is het omzetten van warmte in gesmolten zout.

Thermische opslag is op dit moment volop in ontwikkeling en kent weliswaar een brede waaier van technieken waarvan een aantal in potentie langdurig energie kunnen vasthouden, maar het is de vraag hoe snel deze technieken opschaalbaar zijn.⁷¹

Power2Gas ten slotte, betreft het omzetten van elektriciteit via elektrolyse in waterstof (en eventueel een vervolproduct, bijvoorbeeld ammoniak). De waterstof kan daarna worden opgeslagen in bijvoorbeeld zoutcavernes.

⁶⁹ Zie <https://o-pac.nl/#battery>

⁷⁰ De uitzondering is wellicht een gepland valmeer op de Doggersbank, dat naar verwachting een schaal zal kunnen bereiken van 50 GWh (0,18 PJ) bij een diameter tussen de 6 km en 8 km en een productie van 8 GW (De Vilder, 2017). Een ander gepland project betreft het Plan Brouwersdam, geïnspireerd op een al langer bestaande idee uit het Plan Lievense; zie <https://www.cobouw.nl/infra/nieuws/2017/03/valmeer-voor-brouwersdam-kan-windstroom-bufferen-101174639>

⁷¹ Zie <https://www.topsectorenergie.nl/tki-urban-energy/kennisdossiers/warmteopslag>



Deze techniek vormt voor de Nederlandse situatie de best opschaalbare optie, die daarom hieronder nader wordt toegelicht.

1.5.4 Mogelijkheden voor opslag van waterstof

Opslag van energie in de vorm van waterstof, of een afgeleide daarvan, vraagt om grote elektrolysecapaciteit. Het nationale Klimaatakkoord gaat ervan uit dat er in 2030 3 GW tot 4 GW aan elektrolysecapaciteit beschikbaar zal zijn, afkomstig van windturbines op zee. Dat deze elektrolysecapaciteit werkelijk zal kunnen worden gerealiseerd is niet vanzelfsprekend, zoals uiteengezet in paragraaf 1.3. Voor rendabele exploitatie van elektrolyseinstallaties is een continue aanvoer van elektriciteit nodig en dat vereist een minimumaantal vollasturen per jaar. Dit is ook de reden waarom het niet mogelijk is om elektrolysecapaciteit alleen te laten draaien wanneer er sprake is van het hiervoor besproken *curtailment* of van lage stroomprijzen.

De ondergrondse opslag van de geproduceerde waterstof is gemakkelijker realiseerbaar. Een verkenning van TNO wijst uit dat waterstof, net als aardgas, ondergronds kan worden opgeslagen in zoutcavernes en mogelijk ook in (lege) gasvelden en aquifers (Van Gessel *et al.*, 2018). Deze conclusie trekt TNO op basis van vergelijking met opslag van waterstof in zoutcavernes in de Verenigde Staten, waar wordt gewerkt volgens het principe van compressie en decompressie (net als bij aardgasopslag).

Gasunie en TenneT (2019) geven in hun gezamenlijke *Infrastructure Outlook 2050* aan dat grootschalige seizoensopslag van energie noodzakelijk blijft na de transitie en eigenlijk alleen mogelijk is in gasvorm. Op basis van

modellering wordt verwacht dat ongeveer twintig keer de huidige hoeveelheid opslagcapaciteit in zoutcavernes nodig is voor voorzieningszekerheid aan waterstof. Schattingen gaan uit van een vraag naar 60 tot 80 zoutcavernes, wat past binnen de potentiële maximale capaciteit in Nederland; deze wordt geschat op 100 tot 120 zoutcavernes.⁷²

In de begin- en opschalingsfase zal opslag van waterstof in zoutcavernes waarschijnlijk de voorkeur krijgen. Over verschillende alternatieven merkt TNO (2018) het volgende op:

- Gasvelden zijn nog niet bewezen als een geschikte en efficiënte opslaglocatie voor waterstof.
- Zoutcavernes voldoen vrijwel zeker aan de eisen, zowel op het punt van afsluiting als op het punt van vermenging met natuurlijke aanwezige gassen en kussengas (dat nodig is om de waterstof uit de caveerne te pompen). Het Committee on Climate Change (2018) plaatst hierbij de kanttekening dat de uitvoersnelheid van waterstof mogelijk beperkt is (tot 10% van de gehele inhoud per dag) omdat een te hoge snelheid zou kunnen leiden tot fragmentatie van de zoutlaag.
- Opslag van waterstof in gasvelden en aquifers kan interessant worden wanneer er vraag ontstaat naar grotere (seizoensgebonden) buffercapaciteit en/of wanneer er in de nabijheid van een gewenste opslaglocatie geen geschikte zoutstructuren liggen.
- Bovengrondse opslag van waterstofgas in druktanks is alleen mogelijk op zeer kleine schaal, vergeleken met de volumes die ondergronds kunnen

⁷² Bron: gesprek met R. Schutte, programmamanager waterstof bij Gasunie.



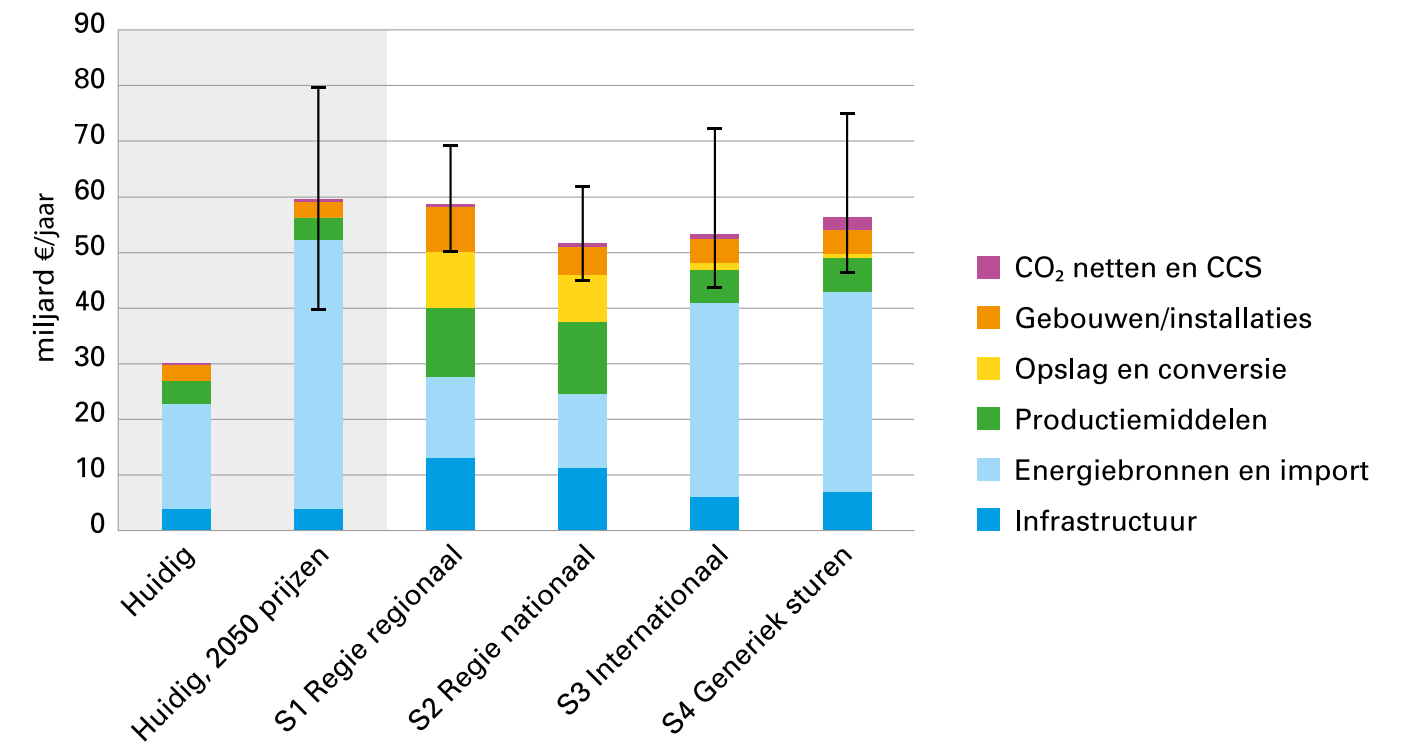
worden opgeslagen. Maar wanneer waterstofgas wordt omgezet naar vloeibare waterstof, ammoniak of zogenoemde *liquid organic hydrogen carriers* (LOHC: de techniek voor deze laatste omzetting is in ontwikkeling), wordt de energie-inhoud per volume-eenheid vergroot. Daarmee wordt het mogelijk om met enkele tientallen tanks het equivalent van de hoeveelheid waterstofgas in een forse zoutcaverne te leveren. Wel gaan dergelijke omzettingen gepaard met energieverlies (bijvoorbeeld 15% tot 25% voor ammoniak) en hogere kosten.

Productie, transport en (ondergrondse) opslag van waterstof in zoutcavernes zijn in principe bewezen technologieën die al worden toegepast binnen de industriële grondstoffenvoorziening.

1.6 Stijging energieprijzen in klimaatneutraal systeem

Een gevolg van de overgang naar een klimaatneutraal energie- en grondstoffensysteem zal zijn dat het prijspeil van energie hoger komt te liggen dan we gewend zijn. Figuur 8 laat zien dat in verschillende scenario's de kosten gemiddeld gezien met 70% toenemen of zelfs verdubbelen ten opzichte van het huidige prijspeil.

Figuur 8: Jaarlijkse kosten van de energievoorziening, nu en straks



Bron: Afman & Rooijers, 2017

Deze ontwikkeling in het prijspeil wordt veroorzaakt door een aantal factoren:

- De huidige fossiele energiebronnen zijn te goedkoop, mede doordat de negatieve externe effecten ervan niet in de prijs zijn verdisconteerd.
- De infrastructurele aanpassingen die nodig zijn voor transport en opslag vragen om investeringen die zullen moeten worden verwerkt in de prijs van klimaatneutrale energie en grondstoffen.



- Het aanleggen van extra zonne- en windparken, elektrolyzers, vergisters enzovoort vergt investeringen die de prijs van energie en grondstoffen extra zullen doen stijgen.

Er zijn verschillende berekeningen gemaakt van de (meer)kosten van de energietransitie. In een actualisering van een eerdere studie komt het PBL tot jaarlijkse meerkosten van het Energieakkoord 2000-2050 van € 2,1 miljard tot € 3,3 miljard tot 2030, wat een aanzienlijke reductie betekende van de eerder berekende kosten van € 3,5 miljard tot € 5,5 miljard (Koelemeijer *et al.*, 2018).

Gasunie heeft Berenschot laten berekenen wat de energietransitie betekent voor de kosten van het gehele energiesysteem.⁷³ Deze berekening is gedaan voor elk van de vier maatschappelijke energiebehoeften: laagtemperatuurwarmte, hogetemperatuurwarmte, vervoer & mobiliteit en kracht & licht. Ook de kosten van het plaatsen van nieuwe energieopwekcapaciteit (windparken, zonneparken, waterstofcentrales) zijn hierin meegenomen. De voorlopige conclusie is dat de totale jaarlijkse kosten van het energiesysteem flink gaan toenemen: van de huidige € 25 miljard naar € 44 miljard in 2030 tot € 61 miljard in 2050. Hierbij moet worden opgemerkt dat deze cijfers een zeker houvast kunnen bieden in discussies, maar niet als vaststaand gegeven kunnen worden gehanteerd. De prognoses kunnen immers door allerlei ontwikkelingen worden ingehaald.

⁷³ De resultaten van deze berekening en een beschrijving van de gehanteerde methode staan beschreven in een door Gasunie uitgebrachte verkenning (Gasunie, 2018).

Op de berekening van Berenschot zijn verschillende gevoeligheidsanalyses toegepast. Daaruit blijkt dat met name de ontwikkeling van de prijzen voor biomassa en waterstofproductie tussen nu en 2050 veel invloed heeft op de uiteindelijke kosten.⁷⁴ Voor Nederland geldt daarbij dat in de berekening van Berenschot geen rekening is gehouden met de mogelijkheid van groot-schalige import van groene waterstof, bijvoorbeeld uit de Sahara of het Midden-Oosten.

Voor de berekening van de investeringskosten voor opwekkingscapaciteit en onderhoud heeft Berenschot gekeken naar tien factoren, die gezamenlijk 47% van de kosten voor de energievoorziening bepalen. In de context van dit advies hebben de belangrijkste investeringsposten betrekking op: windparken op zee, windparken op land, zonneparken, warmtepompen, afvang en opslag van CO₂ en waterstofcentrales. De kostenpost van windparken op zee is verreweg het grootst: € 6,9 miljard tot 2030 en € 11,2 miljard tot 2050. De (om)bouw van waterstofcentrales kost zo'n € 1 miljard in beide perioden, vergelijkbaar met de investeringen voor afvang en opslag van CO₂.

De berekeningen van Berenschot gaan ervan uit dat waterstof uiteindelijk de belangrijkste brandstof in het energiesysteem van 2050 wordt, met groen gas als goede tweede. Anders dan groen gas, dat alleen voor

⁷⁴ Voor de productie van waterstof, die sterk afhankelijk wordt gesteld van de kostprijontwikkeling van windparken op zee, is gerekend met de verwachtingen van het Internationaal Energieagentschap (IAE) voor 2050. De conservatieve prijzen die het IEA rekent voor 2050 zijn echter nu al bijna bereikt (zie bijlage Kengetallen). Mogelijk verloopt de ontwikkeling van de techniek dus sneller dan het IAE had voorzien en zal het voorziene totale bedrag van € 8 miljard voor alleen de productie van waterstof in 2050, lager gaan uitvallen.



lagetemperatuurwarmte wordt ingezet, zal waterstof volgens Berenschot voor alle vier de maatschappelijke energiebehoeften als brandstof fungeren.

In 2050 wordt volgens de berekeningen 13% van de kosten van de energievoorziening bepaald door de kosten van de energienetwerken. Het elektriciteitsnetwerk neemt hiervan met € 3,3 miljard het grootste deel voor zijn rekening. Het netwerk voor waterstof en gas is goed voor € 2 miljard, wat neerkomt op 24,3% van de totale infrastructuurkosten van € 8,2 miljard en dat is minder dan de huidige kosten van de gasinfrastructuur. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat er sprake zal zijn van een lager distributievolume in de gebouwde omgeving, waar warmtenetten (met kosten van € 2,9 miljard) een belangrijker rol zullen gaan spelen.

1.7 Samenvattend beeld

In de komende dertig jaar zal het gebruik van moleculaire energiedragers als olie, gas en kolen sterk teruglopen en grotendeels worden vervangen door andere bronnen en dragers zoals biomassa, geothermie, elektriciteit uit zon en wind, groen gas en (deels geïmporteerde) waterstof.

Waarschijnlijk zal elektrificatie technisch gezien echter niet in alle sectoren mogelijk zijn; denk bijvoorbeeld aan de zware industrie en het zware transport. Daarnaast is er een capaciteitsprobleem: vanuit wind- en zonneparken zal niet voldoende elektriciteit kunnen worden opgewekt om aan de gehele energiebehoefte van Nederland te voldoen. Mocht er wel een systeem ontstaan dat volledig in zijn primaire energieaanbod kan voorzien

door middel van elektronen, dan zullen die niet altijd op het juiste moment beschikbaar zijn en zal het elektriciteitsnet niet in staat zijn te transporteren. Zodoende zal er een rol blijven bestaan voor moleculen. Deze rol zal voornamelijk worden vervuld door waterstof en biomassa en in mindere mate door groen gas en recycling.

Voor de (seizoens)opslag van energie lijkt Nederland voldoende mogelijkheden in huis te hebben, en lijkt vooral waterstof een belangrijk alternatief. Een gevolg van de overgang naar een klimaatneutraal energie- en grondstoffensysteem zal wel zijn dat het prijspeil van energie hoger komt te liggen dan we gewend zijn.





2 AANBOD, VRAAG EN CONCURRENTIEPOSITIE VAN WATERSTOF

Hoe groot zal de toekomstige vraag naar waterstof zijn en vanuit welke sectoren zal die vraag vooral komen? Hoe concurrerend is waterstof ten opzichte van alternatieven? En zijn er belangrijke verschillen tussen enerzijds de verwachte situatie vanaf 2050 en anderzijds de transitie daarnaartoe? De raad inventariseert in dit hoofdstuk de verschillende inzichten over deze onderwerpen. De raad heeft daartoe niet alleen gekeken naar de bestaande scenario's, maar ook informatie geput uit expertsessies en gesprekken. Aanvullend en ter bevestiging zijn scenario's bestudeerd uit Groot-Brittannië en Noordrijn-Westfalen. Deze regio's en landen zijn sterk vergelijkbaar met Nederland qua economische ontwikkeling, industrie en bevolkingsdichtheid.

2.1 Aanbod van waterstof

Met een jaarlijkse productie en afzet van rond de 0,8 miljoen ton waterstof heeft Nederland op dit ogenblik al een aanzienlijke waterstofmarkt. Een recent onderzoek van TNO en CBS (2020) wijst uit dat de huidige productie

en verbruik van waterstof nog veel hoger ligt, namelijk rond de 1,5 miljoen ton (circa 175 PJ) per jaar. Echter, het betreft hier voornamelijk 'grijze' waterstof geproduceerd uit aardgas en deels ook uit methaanrijke restgassen van olieraffinage en het kraken van nafta; omvormingsprocessen waarbij CO₂ vrijkomt.

Het marktpotentieel voor klimaatneutrale waterstof wordt groter ingeschat dan het huidige verbruik (Afman & Rooijers, 2017). Het aanboren van dat potentieel is afhankelijk van het tempo waarin bedrijven kunnen omschakelen.

Grijze, blauwe en groene waterstof

Het potentiële aanbod van waterstof is in grote lijnen onder te verdelen in grijze waterstof (geproduceerd door chemische omvorming van aardgas of kolen tot waterstof), blauwe waterstof (geproduceerd door omvorming van aardgas of kolen in combinatie met afvang en hergebruik of ondergrondse opslag van CO₂) en groene waterstof (geproduceerd door elektrolyse met behulp van stroom uit wind- of zonne-energie). Vanuit Nederlands perspectief kan voor elk van deze vormen een nader onderscheid gemaakt worden tussen eigen productie en import.

Er lopen initiatieven om het aanbod van zowel blauwe als groene waterstof verder te ontwikkelen. Op dit moment is grijze waterstof het goedkoopst, gevolgd door blauwe waterstof. Groene waterstof is het duurst. Voor zowel blauwe als groene waterstof geldt echter dat de kans groot is dat de kosten in de toekomst fors omlaag kunnen worden gebracht. Gezien de

klimaatdoelen is grijze waterstof is op termijn geen optie meer. De verwachting is dat uiteindelijk, omstreeks 2050, de gehele waterstofproductie groen zal zijn.

Het tempo waarin blauwe en groene waterstof op grote schaal kunnen worden geproduceerd is verschillend. De productie van blauwe waterstof is relatief eenvoudig op te schalen door gebruik te maken van de mogelijkheden voor afvang en opslag van CO₂ in bestaande productieprocessen. De productie van groene waterstof is minder eenvoudig op te schalen. Het vereist beschikbaarheid van grote hoeveelheden groene elektriciteit en bijbehorende elektrolysecapaciteit. Beide zijn op dit moment nog niet in voldoende mate aanwezig.

Gegeven het voorgaande liggen er op dit moment twee strategische keuzes voor waarover de Nederlandse overheid zal moeten beslissen:

- Wordt er meteen ingezet op de ontwikkeling van groene waterstof, of is er een transitierol weggelegd voor blauwe waterstof?
- Wordt er ingezet op het opbouwen van een eigen toeleverende industrie voor waterstofproductie, of moet Nederland zich primair ontwikkelen tot de voorkeurslocatie voor exporteurs van waterstof om het Europese achterland te bedienen?

2.1.1 Routes naar vergroten van het waterstofaanbod

Grofweg zijn er twee routes te onderscheiden voor het vergroten van het aanbod van waterstof:

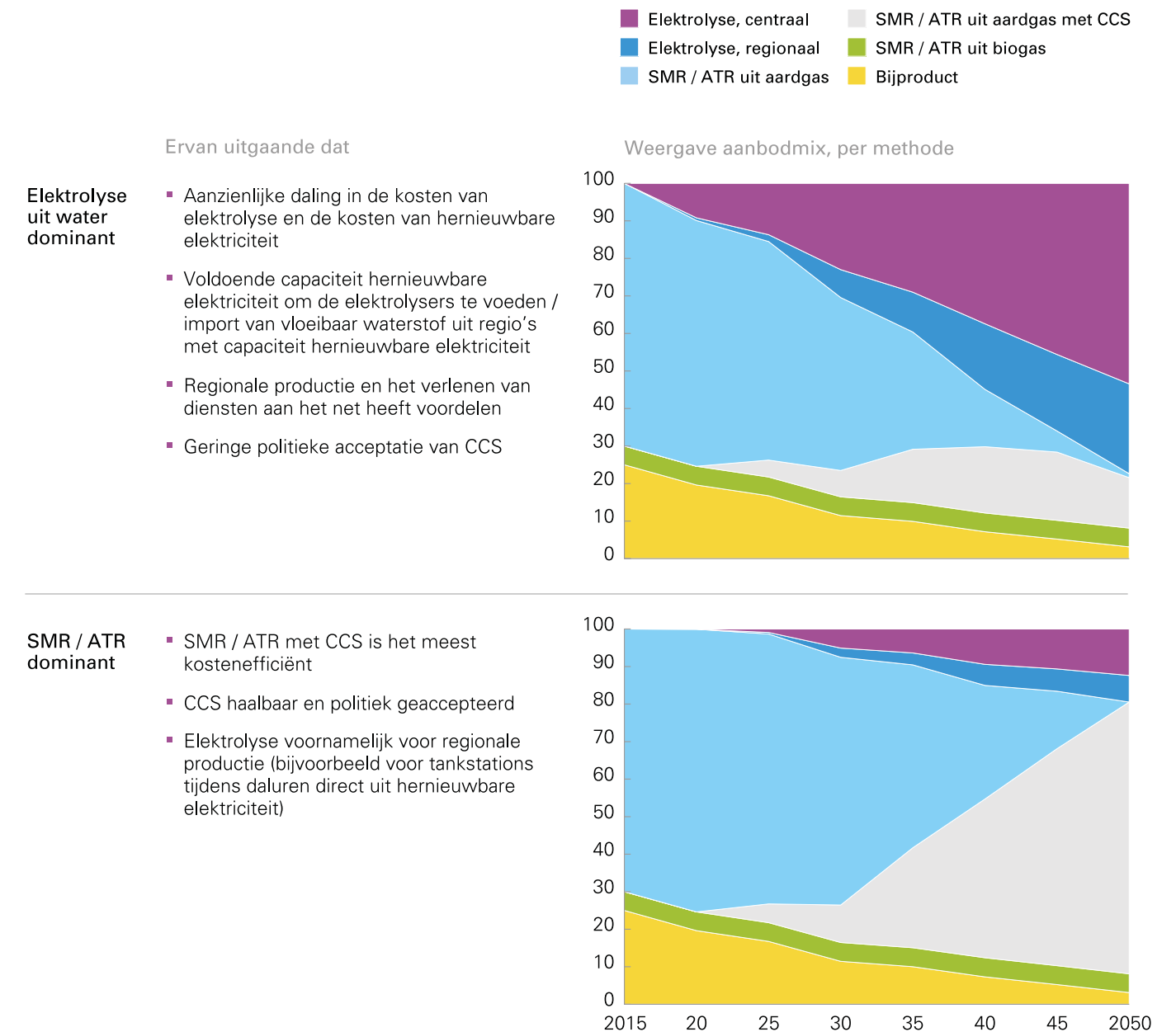


1. ontwikkeling van blauwe waterstof parallel aan de ontwikkeling van groene waterstof;
2. ontwikkeling van alleen groene waterstof, dus het uitsluiten van blauwe waterstofproductie.

Beide routes zijn beschreven in een rapport van de Fuel Cell & Hydrogen Joint Undertaking (FC-H2JU) uit 2019. In de eerste route groeit het aandeel blauwe waterstof vanaf 2030 sterk; in 2050 ligt dit rond de 75%. Groene waterstof wint slechts langzaam terrein met een aandeel van 10% in 2030 en 20% in 2050. In de tweede route wordt vol ingezet op de ontwikkeling van groene waterstof, waardoor het percentage groen in 2030 30% van de totale hoeveelheid geproduceerde waterstof bedraagt en in 2050 is opgelopen tot 75%. Het aandeel blauwe waterstof groeit in dit scenario maar langzaam en blijft beperkt tot 15% in 2050.

Het impliciete *business as usual* bij alle drie de routes is het gebruik van grijze waterstof in de industrie, waarbij niet of nauwelijks sprake is van volumegroei. De routes zijn grafisch weergegeven in figuur 9. Overigens komt uit het rapport van de FC-H2JU naar voren dat een mix tussen deze twee uitersten het meest voor de hand ligt.

Figuur 9: Twee scenario's voor vergroting aanbod van waterstof



Bron: FC-H2JU, 2019



Voorbeelden van andere studies waarin de integrale kosten van mogelijke productieketens in kaart worden gebracht, zijn:

- CE Delft (2018). In deze studie vergelijkt CE Delft de kosten van drie routes: import van blauwe waterstof uit Noorwegen, productie van groene waterstof uit Noordzeewind en import van groene waterstof uit Marokko.
- Mulder & Perey (2019). In deze studie worden de kosten van de binnenlandse productie van blauwe waterstof vergeleken met die van groene waterstof uit Noordzeewind en die van waterstof uit generieke elektriciteit uit het Nederlandse stroomnet.
- Visser (2020). In deze studie wordt gekeken naar de kosten van de import van groene waterstof uit de Sahara.

2.1.2 Voors en tegens van de verschillende routes

De aantrekkelijkheid van de verschillende routes is enerzijds afhankelijk van de kostenontwikkeling, anderzijds van de maatschappelijke en politieke acceptatie van afvang en opslag van CO₂. Daarnaast speelt voorzieningszekerheid een rol.

Een bezwaar dat van sommige kanten wordt opgeworpen tegen route 1 is dat het gebruik van blauwe waterstof de ontwikkeling van groene waterstof zou kunnen afremmen. Bij route 2, waar uitsluitend wordt ingezet op de ontwikkeling van groene waterstof, speelt dit bezwaar niet. Een afweging die bij deze route moet worden gemaakt is of duurzaam opgewekte elektriciteit direct moet worden omgezet in waterstof (met de daarbij optredende

conversieverliezen), of dat de voorkeur ligt in het eerst zoveel mogelijk vervangen van het aanbod niet-duurzaam opgewekte elektriciteit.

Een voordeel van de 'blauwe' route 2 is dat deze op korte termijn goedkoper is en daardoor de transitie naar waterstof kan versnellen. Er kunnen dan immers grotere volumes waterstof op kortere termijn worden geproduceerd. Op lange termijn kunnen de kosten van de blauwe waterstof gaan stijgen, vooral als gevolg van een mogelijke stijging van de aardgasprijs. Ook de CO₂-prijs speelt een rol, maar het belang daarvan neemt af naarmate de CO₂-afvangtechnieken beter worden.

Omgekeerd betekent het bovenstaande dat de 'groene' route 1 op korte termijn nog duur is en slechts beperkte volumes waterstof oplevert. De potentie en de snelheid van de kostendaling van zowel elektrolyse als duurzame elektriciteitsproductie (met name uit wind en zon) is dan ook cruciaal voor het succes van route 1. Daarnaast is de ontwikkeling van de marktprijs van elektriciteit van belang, omdat groene waterstofproductie concurreert met andere vormen van stroomopwekking. Ook de benuttingsgraad van de elektrolyser (het aantal uren per jaar dat de elektrolysecapaciteit wordt benut) is een bepalende variabele voor de kostprijs van groene waterstof.

Als de kosten van groene waterstof de komende jaren sterk dalen, zal groene waterstof goedkoper worden dan blauwe waterstof vóóordat de investeringen in de productie van blauwe waterstof zijn terugverdiend. Dit betekent een financieel risico voor route 2.



2.1.3 Eigen productie versus import

Vanuit de nationale overheid bezien is behalve de keuze tussen het inzetten op groene dan wel blauwe waterstofproductie ook de keuze tussen eigen productie dan wel import van belang. Bij productie en import is echter geen sprake van een of-of-keuze. Beide zullen plaatsvinden en nodig zijn. De vraag is wel waar Nederland strategisch het zwaartepunt legt: op het creëren van optimale voorwaarden voor import en het opbouwen van relaties met waterstof exporterende landen, of op het stimuleren van een eigen industrie voor waterstofproductie. Hierbij spelen niet alleen economische belangen een rol, maar ook geopolitieke afwegingen (zie hoofdstuk 4). Energieonafhankelijkheid kan van grote waarde zijn, maar het opbouwen van goede relaties met landen die waterstof produceren (denk aan Noord-Afrika) ook.

Tegelijkertijd moet worden nagedacht over de mogelijkheden van export van waterstof. De Duitse industrie biedt een aantrekkelijk achterland, dat Nederland kan helpen bij het opbouwen van een positie als doorvoerland van waterstof voor de rest van Europa. Dit zou een logisch vervolg zijn van de Nederlandse gasrotondestrategie, waarmee werd beoogd Nederland een centraal knooppunt te maken van internationale gasstromen. Naarmate export van waterstof een grotere rol speelt in de nationale waterstofstrategie, is ook de behoefte aan import van waterstof groter.

2.1.4 Samenvattend beeld

Nederland heeft op dit ogenblik al een aanzienlijke waterstofmarkt, waarin het voornamelijk gaat om 'grijze' waterstof. Het huidige aanbod van

waterstof kan langs twee routes worden vergroot: (1) parallelle ontwikkeling van blauwe en groene waterstof; (2) ontwikkeling van alleen groene waterstof. De aantrekkelijkheid van elk van de routes is afhankelijk van de kostenontwikkeling én van de maatschappelijke en politieke acceptatie van afvang en opslag van CO₂ die nodig is bij de productie van blauwe waterstof. Vanuit de overheid bezien is behalve de keuze tussen groene dan wel blauwe waterstofproductie ook de keuze tussen eigen productie dan wel import van waterstof van belang. Beide wegen kunnen tegelijk worden bewandeld, maar de vraag is waar Nederland strategisch het zwaartepunt legt.

2.2 Verwachte vraag naar waterstof per sector

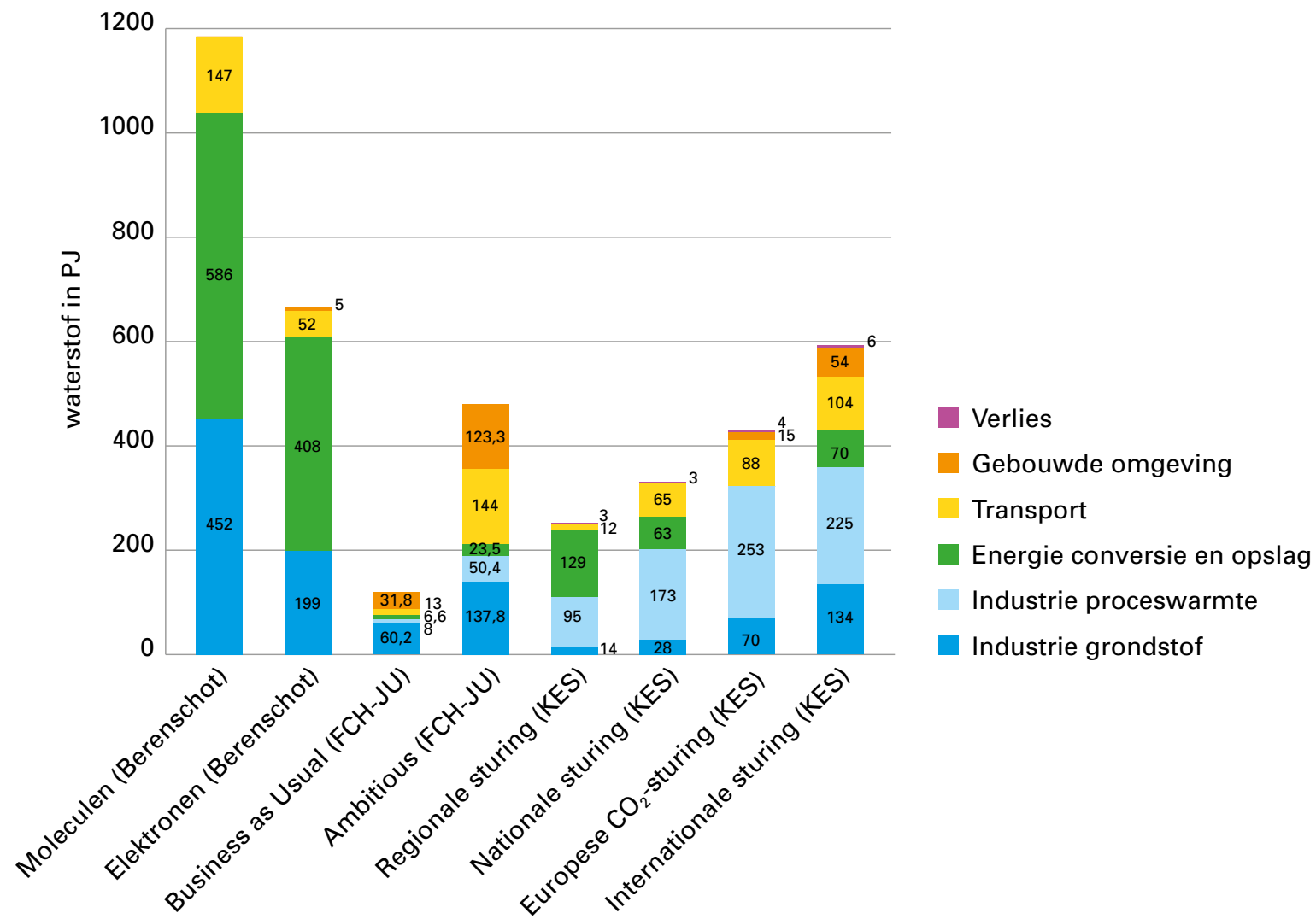
Het valt te verwachten dat in alle sectoren van de Nederlandse economie de vraag naar klimaatneutrale waterstof zal groeien. De mate waarin dat gebeurt zal echter verschillen. Elke sector heeft zijn eigen ontwikkelingstraject en eigen kwaliteitseisen, afhankelijkheden en condities waaronder de vraag naar waterstof tot stand komt. Die factoren bepalen het potentiële vraagvolume per sector.

Op basis van acht bestudeerde scenario's (die verderop in deze paragraaf nader worden toegelicht) en ondersteund door expertopinions komt de raad tot de verwachting dat waterstof in alle sectoren een rol zal spelen, maar dat die rol per sector en per segment sterk zal verschillen.



Figuur 10 brengt de bevindingen van acht scenario's samenvattend in beeld. Bij de gepresenteerde finale verbruikscijfers per scenario moet worden aangetekend dat er allerlei factoren zijn die de uiteindelijke vraag zullen beïnvloeden. De vraag wordt immers niet alleen bepaald door de behoefte, maar ook door het aanbod in de context van een markt met alternatieven.

Figuur 10: Waterstofverbruik per sector per scenario, exclusief lucht- en scheepvaart (absoluut verbruik, in petajoules)



De weergegeven bandbreedtes en verschillen tussen de scenario's zijn te verklaren uit onderliggende principiële keuzes. Het kan daarbij gaan om maatschappijbeelden, keuzes voor specifieke technieken of bijvoorbeeld geopolitieke afwegingen. Verschillen in uitkomsten hebben vervolgens betrekking op de samenstelling van de vraag, de wijze van productie van waterstof en de bijbehorende infrastructuur. Conditie die de vraagontwikkeling beïnvloeden zijn: de prijsverhouding tussen gas en elektriciteit, de mate waarin systeemkosten (hoogspanningsnetwerk, gasnet) en de flexibiliteitskosten worden doorberekend aan eindgebruikers, de beschikbaarheid van een landelijk dekkend transportnetwerk en een infrastructuur voor afvang en opslag van CO₂, de snelheid van technologische innovatie (voor elektrolyzers, brandstofcellen, accu's), de mate van fiscale stimulering en de ontwikkeling van de CO₂-emissiehandelsprijs.

Toelichting bij de acht bestudeerde scenario's

De raad heeft verschillende scenario's voor het toekomstige energieverbruik bestudeerd. Elke scenario heeft zijn eigen doel en karakteristieken. Hieronder worden de scenario's kort toegelicht.

Om te beginnen is gekeken naar de vier Klimaatneutrale energiescenario's voor 2050 van Berenschot & Kalavasta (Den Ouden *et al.*, 2020). Deze vormen een update van de scenario's uit Net van de Toekomst (Afman & Rooijers, 2017), die een status hebben verworven als algemeen referentiepunt in het debat over toekomstige energie- en grondstoffenvoorziening:



- *Regie regionaal.* In dit scenario staat energieonafhankelijkheid centraal. Elektriciteit wordt voornamelijk opgewekt uit zon en wind op land. Er is veel aandacht voor *power-to-gas* en accu's. Er is geen uitwisseling met het buitenland. De industrie is sterk innovatief en circulair.
- *Regie nationaal.* Ook dit scenario draait om energieonafhankelijkheid. Elektriciteit wordt voornamelijk opgewekt uit wind op zee, in combinatie met zon. Er is ook hier veel aandacht voor *power-to-gas* en accu's. Er is gelimiteerde uitwisseling met het buitenland. De industrie is sterk innovatief en circulair.
- *Regie internationaal.* In dit scenario is het beleid internationaal georiënteerd, met een focus op energie-uitwisseling met het buitenland. Er is geen sprake van grootschalige aanleg van wind- en zonneparken. Er is veel import van energie. De industrie is concurrerend.
- *Generieke sturing.* In dit scenario ontwikkelt het energiesysteem zich organisch onder invloed van een sterk CO₂-prijssignaal, maar zonder overheidsregie. Er zijn geen collectieve oplossingen en geen grootschalige aanleg van wind- en zonneparken. Er is veel import van energie. De industrie is relatief klein.

Ook is gekeken naar de twee energiescenario's van Berenschot (Den Ouden *et al.*, 2018). Het gaat om twee uiterste scenario's waarin het energiesysteem op basis van moleculen wordt ingericht, of juist op basis van elektronen:

- *Moleculen.* In dit scenario ontwikkelt wind- en zonne-energie zich tot aan de piekvraag en wordt gas geïmporteerd als basis voor blauwe waterstof. De waterstof wordt via het gasnet gedistribueerd.
- *Elektronen.* In dit scenario is sprake van grootschalige aanleg van wind- en zonneparken, met een vermogen tot zevenmaal de piekvraag. Stroom wordt via elektrolyse omgezet naar waterstof. Deze groene waterstof wordt gebruikt voor het stoken van elektriciteitscentrales. Verder wordt waterstof ingezet voor industrie en langeafstandswegtransport.

Voorts is gekeken naar twee scenario's van de Europese organisatie die waterstof- en brandstofcelontwikkeling in Europese Unie stimuleert (FC-H2JU, 2019):

- *Business as usual.* Dit EU-scenario gaat uit van het uitblijven van een breed gecoördineerde aanpak van waterstof en voortzetting van bestaand beleid. Realisatie van de Parijsafspraken over CO₂-reductie, gericht op maximaal 2 graden Celsius temperatuurstijging, blijft (ver) buiten bereik.
- *Ambitious.* Er wordt een CO₂-reductie gerealiseerd waarmee het doel van hooguit 2 graden Celsius temperatuurstijging binnen bereik komt. Het scenario gaat uit van een gecoördineerde aanpak van beleidsmakers, industrie en investeerders.



2.3 Concurrentiepositie van waterstof per sector

Op dit moment is klimaatneutrale waterstof in geen enkel marktsegment een concurrerende optie. Voor elke toepassing is er een goedkoper fossiel alternatief voorhanden. Het concurrerend vermogen van waterstof kan zich op verschillende manieren ontwikkelen, al naar gelang de sector waarin het wordt toegepast:

- *Waterstof als enige (reële) alternatief.* In de industrie wordt grijze waterstof gebruikt voor hogetemperatuurverwarming en als grondstof. Hiervoor zijn vooralsnog geen reële alternatieven voorhanden. Op termijn zullen innovaties andere procesroutes mogelijk maken. De mate waarin dit gebeurt en de termijn waarop zijn echter onzeker. De vraag is hier dus vooral: hoe kan het bestaande waterstofgebruik worden verduurzaamd?
- *Waterstof als concurrerende optie naast duurzame alternatieven.* In een aantal andere sectoren, zoals de gebouwde omgeving en de mobiliteit, is de verduurzaming al ingezet, en is het vooral de vraag welk duurzaam alternatief het voordeligst is. In het wegvervoer concurreert waterstof vooral met batterij-elektrische voertuigen. In de gebouwde omgeving is waterstof een van de mogelijkheden voor duurzame ruimteverwarming naast geheel elektrische verwarming, verwarming door middel van een warmtenet of verwarming door middel van groen gas.
- *Waterstof als concurrerende optie naast fossiele alternatieven.* In een aantal andere sectoren is de verduurzaming nog nauwelijks op gang gekomen. Hier is het fossiele alternatief dominant en is klimaatneutrale waterstof verre van concurrerend. Dit geldt voor de scheepvaart, de luchtvaart, de flexibele elektriciteitsproductie, de energieopslag en het

energietransport. Met name de grote volumes brandstoffen die worden gebruikt in de internationale scheep- en luchtvaart bieden aanknopingspunten om de vraag naar klimaatneutrale waterstof te stimuleren.

Als de toepassing van waterstof geleidelijk meer en meer wordt opgeschaald en er leereffecten optreden, zijn er op termijn grote kostenreducties mogelijk. Als deze worden gerealiseerd, kan waterstof op den duur voor een aantal toepassingen een concurrerend, duurzaam alternatief worden. De positie van waterstof in de *merit order* (de rangorde van opties, oplopend van goedkoopst naar duurst) verschilt echter per sector. Dit betekent dat de prijs waarbij waterstof concurrerend wordt ook per sector verschilt. Om een goed beeld te krijgen van het concurrerend vermogen van waterstof is dan ook een per sector gedifferentieerde aanpak nodig, waarbij zowel wordt gekeken naar de prijs van waterstof als naar de prijs van de (al dan niet duurzame) alternatieven. De beschikbaarheid van dergelijk onderzoek is echter beperkt.

De meest recente sectoroverstijgende studie op dit gebied is afkomstig van de Hydrogen Council (2020).⁷⁵ In deze studie wordt een inschatting gemaakt van de verwachte kostenontwikkeling van waterstof ten opzichte van andere (zowel klimaatneutrale als niet-klimaatneutrale) opties en de betekenis hiervan voor de concurrentiepositie van waterstof voor een breed scala aan toepassingen. Voor 35 verschillende toepassingen is onderzocht hoe

⁷⁵ De Hydrogen Council is een samenwerkingsverband van achttien multinationals (waaronder bedrijven als Shell, Equinor, Total, Toyota, Hyundai, Daimler, Air Liquide en Linde), dat in 2017 in samenwerking met organisatieadviesbureau McKinsey het rapport *Hydrogen scaling-up: A sustainable pathway for the global energy transition* heeft gepubliceerd.



concurrerend waterstof kan zijn in 2030. De Hydrogen Council concludeert dat waterstof voor 22 toepassingen⁷⁶ concurrerend zou kunnen worden, mits zo'n \$ 70 miljard wordt geïnvesteerd in elektrolyzers, netwerken voor transport en distributie, tankstations en installaties voor afvang en opslag van CO₂. Deze toepassingen bevinden zich in de transportsector, de industrie, de energiesector en de gebouwde omgeving.

De Hydrogen Council (2020) geeft een inschatting van de prijs waarbij waterstof concurrerend wordt ten opzichte van duurzame alternatieven voor verschillende toepassingen. Voor een aantal industriële toepassingen en mobiliteitstoepassingen is waterstof het enige klimaatneutrale alternatief, waardoor waterstof in die segmenten per definitie de meest concurrerende duurzame optie is. Omdat er geen duurzaam alternatief beschikbaar is, is waterstof voor deze toepassingen feitelijk bij elke prijs concurrerend. Het eerstvolgende marktsegment waar waterstof concurrerend wordt, is de ruimteverwarming in de gebouwde omgeving. Het winstomslagpunt ligt daar bij een prijs van 4 \$/kg. Bij een verdere daling van de prijs wordt waterstof in steeds meer segmenten aantrekkelijk. Wanneer de prijs daalt tot onder de 1 \$/kg is waterstof in vrijwel alle segmenten competitief. In het rapport van de Hydrogen Council wordt de wereldwijde vraag naar waterstof geschat op 120 exajoule (EJ). Het Internationaal Energieagentschap schat het totale wereldwijde energieverbruik in 2030 op 600 à 700 EJ, wat zou betekenen dat waterstof bij deze prijs (en energievraag) in ongeveer

⁷⁶ Het rapport noemt onder andere de productie van methanol, staal, kunstmest en ammoniak, het gebruik van waterstof in raffinaderijen, het bijmengen van waterstof in aardgasleidingen en het gebruik als brandstof voor vorkheftrucks, langeafstandsbussen, zwaar vrachtvervoer, veerboten en treinen.

een vijfde van het totale wereldwijde energieverbruik zou kunnen voorzien (IEA, 2020).

Op basis van één enkele bron kan uiteraard niet worden geconcludeerd dat waterstof in 2030 een concurrerend alternatief zal zijn in een groot aantal marktsegmenten – temeer daar de conclusies in het hiervoor besproken rapport van de Hydrogen Council niet zijn toegesneden op de Nederlandse situatie. In de nu volgende subparagrafen werkt de raad daarom op basis van beschikbare bronnen de analyse van de Hydrogen Council verder uit voor de belangrijkste waterstoftoepassingen per sector, toegespitst op de Nederlandse situatie.

2.4 Inzichten per sector

2.4.1 Industriesector

Waterstof kan worden gebruikt voor het genereren van hogetemperatuurwarmte en als grondstof voor industriële processen. Waterstof wordt in die hoedanigheden in vrijwel alle vigerende scenario's als noodzakelijk gezien voor de industriesector. De absolute vraag wordt geraamd tussen de 100 en 400 PJ. Hierbij is een belangrijke factor hoe de Nederlandse industrie van de toekomst eruit zal zien. Ten opzichte van grijze waterstof is de concurrentiepositie van klimaatneutrale waterstof slecht, zeker ook gezien de geringe financiële marges in de industrie. Als grondstof concurreert klimaatneutrale waterstof met biomassa, waarbij de aantrekkelijkheid verschilt per toepassing.



Er wordt in de industriesector op dit moment in zeer grote mate gebruik gemaakt van grijze waterstof. In het proces van CO₂-reductie kan dus een enorme vraag ontstaan naar klimaatneutrale waterstof, ter vervanging van grijze waterstof.⁷⁷ Belangrijk is daarbij de inschatting hoe de industrie in Nederland zich zal ontwikkelen. Een deel van de huidige productie van brandstoffen (zoals benzine of kerosine op basis van olieraffinage) en de daaraan gerelateerde waterstofvraag zal tegen 2050 wegvallen. Daar staat tegenover dat de vraag naar waterstof uit getransformeerde en nieuwe industriële sectoren, die niet zijn gebaseerd op olieraffinage,⁷⁸ zal groeien. Nu al blijkt dat de productie van groene waterstof een latente vraag naar waterstof blootlegt die voorheen niet zichtbaar was.⁷⁹

Het bovenstaande is gebaseerd op de aanname dat het industriële waterstofverbruik jaarlijks zo'n 100 tot 110 PJ bedraagt. Tot voor kort werd hier door alle deskundigen van uitgegaan. Maar zoals eerder opgemerkt toont een recente studie van TNO en CBS (2020) aan dat het werkelijke verbruik veel hoger ligt, namelijk rond 175 PJ. Dat betekent dat in de industriële sector ook de vraag naar groene waterstof ter vervanging van de huidige grijze (en deels op restgassen gebaseerde) waterstof groter zou kunnen zijn dan tot nu toe werd aangenomen. De hier geanalyseerde scenario's gaan nog uit van de oude gegevens. Doorrekeningen op basis van de nieuwe

⁷⁷ Het gaat hier om waterstof als energiedrager én om waterstof als grondstof.

⁷⁸ Denk aan biochemie, fijnchemie, synthetische brandstoffen, klimaatneutrale plastics, *waste-to-chemicals* (vergassing van niet-recyclebaar afval tot methanol) en bio-raffinage.

⁷⁹ Verschillende bronnen wijzen hierop. Zo signaleert Nouryon een latente vraag naar waterstof in relatie tot de 20 MW-elektrolyser die dit bedrijf ontwikkelt op Chemie Park Delfzijl (zie <https://www.nouryon.com/nl-nl/nieuwsberichten/consortium-nouryon-en-gasunie-wint-eu-steun-voor-groen-waterstofproject>). CE Delft (2018) doet een soortgelijke observatie.

TNO & CBS-cijfers zullen mogelijk uitwijzen dat de toekomstige vraag van de industrie naar klimaatneutrale waterstof als grond- en brandstof omvangrijker is dan tabel 2 hieronder aangeeft.

Het inpassen van klimaatneutrale waterstof in industriële processen vraagt overigens nog aandacht: de productie van groene en blauwe waterstof als tussenproduct moet deel uit gaan maken van een bestaand complex industrieel ecosysteem. Hiervoor zal een leercurve moeten worden doorlopen.

Voor waterstof zien alle acht door de raad bestudeerde scenario's een rol weggelegd als grondstof in de chemische industrie. Ook biomassa kan volgens de genoemde scenario's in belangrijke mate als grondstof voor chemische processen fungeren.⁸⁰ Verder voorzien alle scenario's in een rol voor waterstof als energiedrager bij het genereren van de hogetemperatuurwarmte die noodzakelijk is voor industriële processen. Uit de scenario's blijkt dat de industrie een gecombineerde vraag naar waterstof (als grondstof én als energiedrager) zal hebben die tussen de circa 15% en 60% zal liggen van de gehele waterstofvoorraad; zie tabel 2.

⁸⁰ Zie ook Ecofys & Berenschot (2018).



Tabel 2: Verwachte ontwikkeling van vraag naar waterstof in industriesector

Bron	Klimaatneutrale energiemogelijkheden (Den Ouden <i>et al.</i> , 2020)				Twee wegen naar Parijs (2018)		Hydrogen Roadmap Europe (FC-H2JU, 2019)	
	Regionale sturing	Nationale sturing	Europese CO ₂ -sturing	Internationale sturing	Moleculen	Elektronen	Business as usual	Ambitious
Waterstof als grondstof (% = aandeel van totaal)	14 PJ (groene waterstof)	28 PJ (groene waterstof)	70 PJ (blauwe waterstof)	134 PJ (import waterstof)	38,1% (452 PJ blauwe waterstof)	29,9% (199 PJ groene waterstof)	50,2% (489 TWh = 135 PJ)	28,7% (648 TWh = 180 PJ)
Waterstof voor hogetempwarmte (% = aandeel van totaal)	95 PJ	173 PJ	253 PJ	225 PJ			6,7% (53 TWh = 14 PJ)	10,5% (237 TWh = 65 PJ)
Aandeel waterstof op totale finale energiebehoefte	7,0% (van 1.567 PJ)	10,8% (van 1.854 PJ)	13,4% (van 2.406 PJ)	14,2% (van 2.526 PJ)	23,3%	12,9%	5,8%	9,5%

In de *Business as usual*-scenario's, waarin geen of weinig gecoördineerde overheidssturing plaatsvindt, is het aandeel waterstof dat door de industrie in 2050 wordt gebruikt, afgezet tegen de gehele waterstofvoorraad, groot. Tegelijkertijd is de absolute hoeveelheid waterstof in die scenario's kleiner dan in de *Ambitious*-scenario's, waarin de overheid in samenwerking met bedrijfsleven richting kiest. Ook in het minst gecoördineerde scenario, *Europese CO₂-sturing*, is in 2050 (blauwe) waterstof in de industrie nodig als grondstof. Met andere woorden, in de industriesector zal zich in elk denkbaar scenario een vraag ontwikkelen naar waterstof.

Als aandeel van de gehele finale energiebehoefte varieert de toekomstige industriële vraag naar waterstof in de verschillende scenario's van 5,8% (*Business as usual*) tot 23,3% (*Moleculen*). Dit laatste scenario gaat uit van het gebruik van blauwe waterstof. Opvallend zijn op dit punt de scenario's *Regionale sturing* en *Nationale sturing*. Hierin is het uitgangspunt dat de industrie in 2050 in hoge mate heeft geïnnoveerd en circulair is. De waterstof die wordt gebruikt is in deze scenario's afkomstig uit elektrolyse.



De beide Europese scenario's (*Business as usual* en *Ambitious*) laten ook de ontwikkeling zien voor de komende tien jaar, tot 2030 (niet in tabel 2 aangegeven). Volgens deze scenario's bedraagt in 2030 de industriële vraag naar waterstof 89% respectievelijk 73% van de gehele waterstofvoorraad. Beide scenario's gaan ervan uit dat de industriële vraag naar waterstof veel sneller zal groeien dan in de andere sectoren, wat niet verrassend is gezien het huidige industriële waterstofgebruik. In 2030 gaat het dan dus deels om blauwe en deels om groene waterstof ter vervanging van de huidige grijze waterstof.

2.4.2 Energiesector

Er bestaat binnen het energiesysteem van ons land behoefte aan een flexibele energiedrager die kan worden ingezet voor zowel warmte- als elektriciteitsproductie, voor seizoensopslag en voor het efficiënt transporteren van energie. Waterstof kan in al deze behoeften voorzien, maar de verwachtingen over de mate waarin dit ook echt zal gaan gebeuren verschilt enorm tussen de door de raad bestudeerde scenario's: van nihil tot meer dan 100 PJ. Veel hangt af van de rol die seizoensopslag van energie zal gaan vervullen in het systeem en van de vraag of elektriciteitscentrales op waterstof zullen gaan draaien. Als voeding voor klimaatneutrale elektriciteitscentrales concurreert waterstof met groen gas, dat echter als nadeel heeft dat het beperkt beschikbaar is. Waterstof uit overtollige elektriciteit is op dit moment nog niet concurrerend.

Wanneer het toekomstige elektriciteitssysteem in veel grotere mate dan nu gaat draaien op groene stroom afkomstig van windturbines en zonneparken, zal toepassing van waterstofconversie naar verwachting noodzakelijk zijn. Het elektriciteitssysteem kan immers de fluctuaties in de weers- elektriciteitsproductie niet volledig opvangen.

Hetzelfde geldt voor seizoensafhankelijke fluctuaties; gedurende elk jaar komen er periodes voor waarbij het opgestelde vermogen aan zon- en windenergie niet beschikbaar is op momenten van piekvraag. Om deze *dunkelflautes* op te vangen is voldoende emissieloos op- en afschakelbaar vermogen nodig.⁸¹ Op termijn kunnen aan- en uitschakelbare waterstofcentrales (in plaats van de huidige gascentrales) voor de benodigde flexibiliteit zorgen.⁸² Ook seizoensopslag van waterstof is dan van belang, bijvoorbeeld in zoutcavernes en, indien technisch mogelijk, in lege gasvelden. Zoals besproken in hoofdstuk 1 is seizoensopslag is ook nodig om jaren van 'misoogst' op te vangen, wanneer de opwekking van hernieuwbare energie onder het gemiddelde ligt en zorgt voor langdurige tekorten (Den Ouden *et al.*, 2020).

⁸¹ Dit betreft een punt waarop studies en scenario's verschillen. Berenschot & Kalavasta (Den Ouden *et al.*, 2020) nemen dit aspect en het zelfstandig door Nederland overeind kunnen houden van het elektriciteitssysteem mee als expliciet uitgangspunt. Dat geldt ook voor het scenario 'Twee wegen naar Parijs' uit (Den Ouden *et al.*, 2018). Andere scenario's doen dit niet.

⁸² Vattenfall baseert zijn bedrijfsstrategie expliciet op dit scenario en is voornemens een van de drie turbines in de Magnumcentrale om te bouwen naar 100% waterstof.



Tabel 3: Waterstofvraag in energievoorziening

Bron	Klimaatneutrale energiescenario's (Den Ouden et al., 2020)				Twee wegen naar Parijs (Den Ouden et al., 2018)		Hydrogen Roadmap Europe (FC-H2JU, 2019)	
	Regionale sturing	Nationale sturing	Europese CO ₂ -sturing	Internationale sturing	Moleculen	Elektronen	Business as usual	Ambitious
Energieconversie en opslag (% = aandeel van totaal H2 binnen scenario)	47% (121 PJ) waterstofinzet 42 GW elektrolyse 26 GW power to heat 6 GW accu 93 PJ waterstofopslag 18 PJ groen gasopslag 15 GW interconnectie	19,1% (64 PJ) waterstofinzet 45 GW elektrolyse 17 GW power to heat 17 GW accu 57 PJ waterstofopslag 7 PJ groen gasopslag 15 GW interconnectie	0% (0 PJ) waterstofinzet 3 GW elektrolyse 13 GW AT-reforming + afvang & opslag CO ₂ 170 PJ waterstofimport 6 GW power to heat 4 GW accu 172 PJ waterstofopslag 410 PJ groen gasopslag 15 GW interconnectie	11,8% (73 PJ) waterstofinzet 3 GW elektrolyse 580 PJ waterstofimport 7 GW power to heat 1 GW accu 695 PJ waterstofopslag 18 PJ groen gasopslag 15 GW interconnectie	49,4% (586 PJ voor waterstofcentrales)	61,4% (408 PJ voor waterstofcentrales)	5,5% (43 TWh)	4,9% (112 TWh)
Opgesteld vermogen Zon = grootschalig zon-PV Woz = wind-op-zee Wol = wind-op-land	35-39 GW waterstof 3 GW groen gas + afvang & opslag CO ₂ 47 GW zon 43 GW wind op zee 20 GW wind op land	39-45 GW waterstof 0,4 GW afvalverbranding (deel afvang & opslag CO ₂) 41 GW zon 72 GW wind op zee 20 GW wind op land	39-47 GW groen gas 6 GW groen gas + afvang & opslag CO ₂ 0,7 GW afvalverbranding (deel afvang & opslag CO ₂) 25 GW zon 42 GW wind op zee 10 GW wind op land	41-48 GW waterstof 5 GW groen gas + afvang & opslag CO ₂ 0,7 GW afvalverbranding (deel afvang & opslag CO ₂) 25 GW zon 38 GW wind op zee 10 GW wind op land	18 GW wind op zee 8 GW wind op land 29 GW zon 26 GW gascentrales	105 GW wind op zee 8 GW wind op land 34 GW zon 28 GW zon op dak 42 GW gascentrales		
Aandeel H2 op totale finale energie behoefte	7,7% (excl. opslag) (van 1.567 PJ)	3,5% (excl. opslag) (van 1.854 PJ)	0% (excl. opslag) (van 2.406 PJ)	2,9% (excl. opslag) (van 2.526 PJ)	30,1% (incl. opslag)	26,4% (incl. opslag)	0,5%	1,2%

Vrijwel alle in tabel 3 weergegeven scenario's voorzien een rol voor waterstof in de elektriciteitsproductie, waarbij het echter absoluut én relatief om geringe volumes gaat: tussen de 2% en 13% van de totale waterstofvraag.

Als aandeel in de totale energiemix bedraagt de vraag naar waterstof voor het produceren van elektriciteit tussen de 0% en 1,2%.



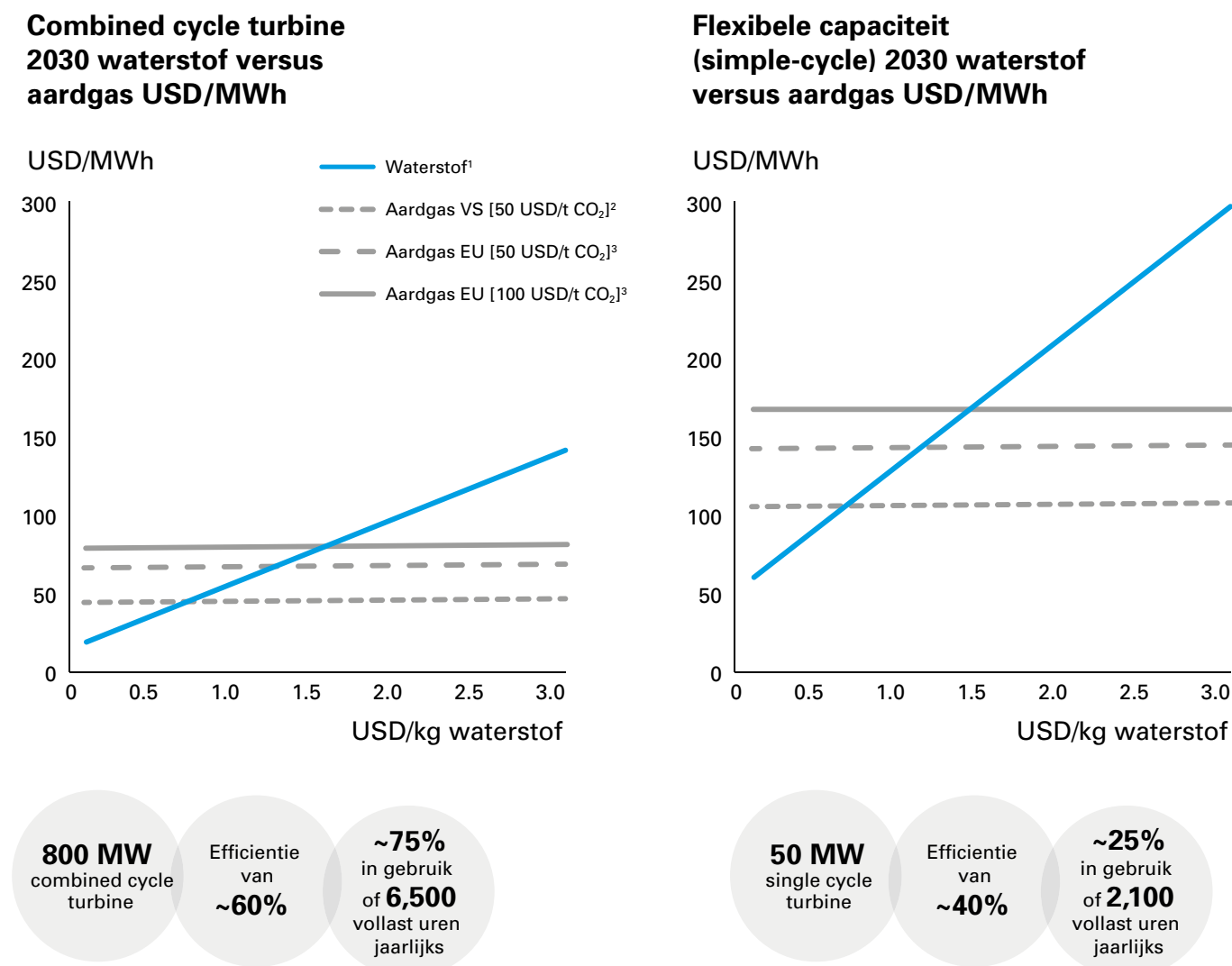
Tussen de zeven scenario's die in 2050 klimaatneutrale elektriciteitscentrales voorzien, varieert het opgesteld vermogen van de 26 GW tot 53 GW, al naar gelang de binnen het scenario verwachte piekvraag. Deze centrales zullen dan maar een paar honderd uur per jaar draaien. Dat is weinig, maar wel cruciaal voor de leveringszekerheid van elektriciteit. Met andere woorden, de in tabel 3 genoemde percentages betreffen geen continue vraag, maar eerder een buffer, zodat in periodes zonder wind en zon aan de elektriciteitsbehoefte kan worden voldaan. Het uiteindelijk benodigde opgesteld vermogen kan nog significant dalen als gevolg van technologische ontwikkelingen en bijvoorbeeld een andere inzet van warmtepompen.

De belangrijkste concurrent voor de flexibele productie van elektriciteit met behulp van waterstof is aardgas. Figuur 11 toont het omslagpunt waar waterstof concurrerend wordt ten opzichte van aardgascentrales in 2030. Dat punt ligt, zo heeft de Hydrogen Council becijferd, bij een kostprijs van rond de 1,5 €/kg, afhankelijk van de CO₂-prijs van het moment.

2.4.3 Mobiliteitssector

Het uitfaseren van CO₂ uitstotende brandstoffen zoals benzine, diesel en kerosine vereist een vervangende brandstof. Waterstof kan hierin voorzien, in combinatie met brandstofcellen die waterstof en zuurstof omzetten in elektriciteit en water. Er zijn verschillende alternatieven (elektriciteit opgeslagen in batterijen, biobrandstoffen, groen gas), maar de kansen voor waterstof lijken groot. Met name voor bepaalde vormen van zwaar vervoer (vrachtwagens) zal waterstof waarschijnlijk onmisbaar zijn. Voor andere segmenten is sprake van een grote bandbreedte in verwachte vraag naar

Figuur 11: Elektriciteitsproductie op waterstof versus aardgas



1. Aanname waterstofkosten uit ATR met CCS in 2030 in de VS 1,1 USD/kg, in de EU/Duitsland 1,7 USD/kg, Japan/Korea 1,8 USD/kg
2. Aardgaskosten 0,12 USD/kg
3. Aardgaskosten 0,31 USD/kg

Bron: Hydrogen Council, 2020

waterstof, variërend van enkele PJ's tot ruim 200 PJ. Omdat het prijspeil van benzine en diesel al hoog ligt als gevolg van accijnzen, is waterstof nu al bijna een concurrerende optie in die segmenten waar accu-elektrische voertuigen geen uitkomst bieden.

Zwaar vrachtverkeer, licht vrachtverkeer, langeafstand-touringcars en personenauto's zullen allemaal een bepaalde vraag naar waterstof ontwikkelen, vooral vanaf 2030. In dergelijke voertuigen wordt waterstof via een brandstofcel omgezet in elektriciteit. Voor het openbaar busvervoer, het treinverkeer op niet-geëlektrificeerd spoor en de binnenvaart vormt waterstof één van de alternatieven. Afhankelijk van de gewenste inzet van vervoermiddelen, inpassing in logistieke processen, verwachte continuïteit en comforteisen zullen wagenparkbeheerders en particulieren kiezen voor ofwel accu-elektrische ofwel brandstofcel-elektrische oplossingen. In heel specifieke toepassingen, bijvoorbeeld heftrucks, vormt waterstof nu al een concurrerend alternatief.

Het personenautoverkeer neemt op dit moment 13% van de CO₂-uitstoot in Nederland voor zijn rekening, het zwaar vrachtverkeer 5%. Voor personenauto's zijn alternatieven beschikbaar in de vorm van accu-elektrische auto's. Bij vrachtauto's is sprake van een steile ontwikkelingscurve als het gaat om accutechniek, maar deze techniek is vanwege de lange oplaadtijden en het belang van continuïteit in het logistieke proces in veel gevallen vooralsnog geen economisch haalbaar alternatief.

De productie van vrachtauto's (*heavy duty vehicles*) op brandstofceltechniek moet nog op gang komen, hoewel een enkele producent al op beperkte schaal levert. Technisch gezien is hier nog een aantal barrières te nemen. De productie van brandstofceltechniek voor personenauto's is technisch eenvoudiger en maakt nu een schaalvergroting door. Dit proces wordt door assemblerende automerken beschouwd als een innovatietechnische wegbe-reider voor de toepassing van brandstofceltechniek bij het zware vracht-vervoer. Voor bedrijfswagens (*light duty vehicles*) vormen zowel accu als brandstofcel een optie. Wat uiteindelijk de beste optie wordt voor de markt is nu nog niet aan te geven; dit is afhankelijk van veel factoren.

Tabel 4 laat zien dat alle scenario's een toekomstige rol voorzien voor waterstof in de mobiliteits- en transportsector. Voor het zwaar vrachtverkeer wordt in alle scenario's vraag naar waterstof voorzien. Wat het personen-vervoer betreft verschillen de scenario's. Een aantal verwacht dat personen-voertuigen volledig elektrisch zullen worden. Andere scenario's zien een gedifferentieerd voertuigenlandschap ontstaan, waarbij een aanzienlijk deel van de personenvoertuigen (25%) op waterstof zal gaan rijden.



Tabel 4: Verwachte ontwikkeling van vraag naar waterstof in mobiliteits- en transportsector

Bron	Klimaatneutrale energiestenari'o's (Den Ouden <i>et al.</i> , 2020)				Twee wegen naar Parijs (Den Ouden <i>et al.</i> , 2018)		Hydrogen Roadmap Europe (FC-H2JU, 2019)	
	Regionale sturing	Nationale sturing	Europese CO ₂ -sturing	Internationale sturing	Moleculen	Elektronen	Business as usual	Ambitious
Personenvervoer (pv) Vrachtovervoer (vv) (% = aandeel van totaal waterstof)	12 PJ 0% pv 50% vv	65 PJ 25% pv 50% vv	88 PJ 25% pv 50% vv	104 PJ 25% pv 50% vv	12,4% (blauwe waterstof 147 PJ)	7,8% (groene waterstof 52 PJ)	10,8% (85 TWh)	30% (675 TWh)
Aandeel waterstof op totale finale energiebehoefte	0,7% (van 1.567 PJ)	3,5% (van 1.854 PJ)	3,7% (van 2.406 PJ)	4,1% (van 2.526 PJ)	7,5%	3,4%	0,6%	7,2%

Tabel 5: Indicatieve kostenaspecten van waterstof in de mobiliteit*

	Prijs aan de pomp / thuisladen	per	prijs pomp per kWh	Verbruik / 100 km	per	Kosten per kilometer	Belasting per kWh (ex BTW)
Benzine	€ 1,55	liter	€ 0,18	6,63	liter	€ 0,10	€ 0,09
Diesel	€ 1,40	liter	€ 0,14	5,52	liter	€ 0,08	€ 0,05
Elektrisch laden o.b.v. 1e schijf energiebelasting	€ 0,20	kWh	€ 0,20	27,64	kWh	€ 0,06	€ 0,10
Waterstof	€ 10,00	kg	€ 0,29	1,1	kg	€ 0,11	0

* Bron: <https://opwegmetwaterstof.nl/kostenaspecten-bij-waterstof-voor-de-mobiliteit/>
 Bron voor gemiddeld gebruik benzine, diesel en elektrisch: <https://www.autoweek.nl/verbruiksmonitor>
 Bron voor waterstof: <https://opwegmetwaterstof.nl/2017/07/26/rijden-op-waterstof-duur-dat-valt-best-mee>



Het aandeel waterstof voor transport in totale energiemix varieert in de verschillende scenario's van nihil tot ruim 7%. Vervoer op basis van waterstof concurreert niet alleen met fossiele brandstoffen zoals benzine en diesel, maar ook met vervoer op basis van batterijen. In verschillende studies worden deze vervoersopties met elkaar vergeleken. Daaruit komen twee doorslaggevende factoren naar voren. De eerste factor betreft de mate van gebruik. Omdat het opladen van batterijen relatief veel tijd kost, kunnen batterijvoertuigen een deel van de dag niet rijden. Dit is nadelig voor bijvoorbeeld voertuigen in de logistiek, die continu op de weg moeten kunnen zijn. Voor een personenauto is dit aspect vaak minder relevant. De tweede factor betreft het energieverbruik in combinatie met de gelegenheid tot opladen/bijtanken. Batterijen nemen relatief veel ruimte in, waardoor de hoeveelheid energie die kan worden opgeslagen in een voertuig beperkt is. Naarmate een voertuig meer energie verbruikt en minder vaak de gelegenheid heeft om energie te verversen, wordt dit in sterkere mate een beperkende factor. Om deze reden zijn batterijen minder geschikt voor zwaar vrachtvervoer over lange afstanden, maar passen ze (opnieuw) prima bij personenvervoer.

De Hydrogen Council (2020) heeft de kosten ('total cost of ownership') van waterstofvoertuigen en batterijvoertuigen tot 2050 met elkaar vergeleken. De competitiviteit van waterstof verschilt sterk per segment. Zwaar goederentransport en taxiverkeer zijn vóór 2030 al goedkoper op basis van waterstof. Voor stadsvervoer per auto en bus blijven batterijen de goedkopere optie.

Het H2-platform publiceerde op zijn website de volgende kostenvergelijking voor personenauto's (zie tabel 5), die laat zien dat waterstof onder het Nederlandse belastingregime al concurrerend is in termen van kosten per km (de aanschafprijs van een voertuig is daarin niet meegenomen).

Milieuorganisatie Transport & Environment heeft in 2020 een vergelijking gemaakt tussen vrachtwagens op batterijen en vrachtwagens op waterstof. Batterijen blijken in deze studie goedkoper. Daar staat tegenover dat waterstofvrachtwagens een groter bereik en een kortere laadtijd hebben (Transport & Environment, 2020).

2.4.4 Sector gebouwde omgeving

Het verwarmen van huizen gebeurt op dit moment grotendeels met behulp van aardgas. Vervanging door elektrische warmtepompen en warmtenetten is in sommige wijken erg duur en/of ingewikkeld. In die situaties kan groen gas of waterstof aangeleverd via de bestaande aardgasleidingen een goed alternatief zijn. Ramingen van dit potentieel lopen sterk uiteen: van nihil tot enkele tientallen PJ's. Gezien de inrichting van de sector gebouwde omgeving ligt de keuze voor een energiebron niet bij de afnemer, maar bij de energieleverancier. Deze maakt per situatie een afweging tussen waterstof en beschikbare alternatieven, waarbij de kosten worden doorbelast aan de eindverbruiker.

De netbeheerders Stedin en Alliander voorzien in hun analyses dat een deel van de gebouwde omgeving voor hun warmtevoorziening niet zal kunnen overstappen op een warmtenet en ook niet zal kunnen worden



geëlektrificeerd. Voor deze categorie is een alternatief nodig. Waterstof en groen gas worden het meest genoemd als alternatief. Stedin heeft onlangs een onderzoek laten verrichten naar de mogelijkheden tot verduurzaming van buurten. In dit 'Openingsbod Warmtetransitie' zijn alle 3.400 buurten in het verzorgingsgebied van Stedin geanalyseerd. Voor 25% van de buurten kon een duidelijke voorkeursoptie worden bepaald. In 68% van deze buurten (17% van het verzorgingsgebied) kwam duurzaam gas als beste optie naar voren. Omdat het hier vaak ging om relatief dunbevolkte buurten was het percentage gemeten in warmte-equivalenten kleiner: 28% van de buurten en 7% van het verzorgingsgebied.

Onder druk van besluitvorming in de EU en in buurlanden (met name Duitsland) is het ook mogelijk dat er een bijmengverplichting komt voor waterstof in het gasnet. In Nederland is (fysiek)⁸³ bijmengen tot 30% van het volume (= 10% energetische waarde ten opzichte van laagcalorisch aardgas) mogelijk zonder dat (veel) apparatuur bij eindgebruikers hoeft te worden vervangen. In Nederland staan de betrokken partijen over het algemeen sceptisch tegenover fysiek bijmengen van 'dure' en energetisch gezien minder efficiënte waterstof in het aardgasnet; ze zien meer in een hoogwaardige, pure waterstofeconomie, temeer daar Nederland beschikt over een uitgebreid en technisch hoogstaand aardgasnetwerk en bijbehorende kennis. Vanuit het perspectief op vraagontwikkeling naar

⁸³ Administratief bijmengen van waterstof is de tegenhanger van fysieke bijmenging van waterstof in het aardgasnet. In het geval van administratieve bijmengen wordt de leverancier verplicht om een bepaalde percentage waterstof af te nemen ten opzichte van de hoeveelheid aardgas die wordt geleverd. De afgenomen hoeveelheid waterstof kan vervolgens op de markt worden gebracht.

klimate neutrale waterstof is een bijmengverplichting te overwegen omdat het gaat om aanzienlijke hoeveelheden.

Als het gaat om de ontwikkeling van de vraag naar waterstof voor verwarming van de gebouwde omgeving valt op dat de verschillende scenario's sterk uiteenlopen. Tabel 6 laat zien dat de prognoses van het aandeel waterstof in de totale energiemix variëren van 0% tot 6%.

In de beide scenario's afkomstig uit de Europese Roadmapstudie (*Business as usual* en *Ambitious*) krijgt waterstof een belangrijke rol toegedicht in de gebouwde omgeving. Deze sector zou maar liefst een kwart van de gehele waterstofvraag voor zijn rekening gaan nemen.

Zoals aangegeven vormt het bijmengen van waterstof in het gasnet binnen de EU een optie die nadrukkelijk wordt overwogen, ofschoon in de EU-landen gemiddeld maar zo'n 40% van de woningen is aangesloten op het gasnet. In Nederland daarentegen loopt het percentage van op het gasnet aangesloten woningen richting de 100%. In de scenario's *Europese CO₂-sturing* en *Internationale sturing* wordt dit bestaande gasnet beperkt ingezet voor lage temperatuurverwarming van gebouwen. Gezien de tussentijdse analyses van zowel Stedin als Alliander en ook de berekeningen van het PBL (2020), die in specifieke gevallen toch gebruik van waterstof in de gebouwde omgeving voorzien, is het opvallend dat de klimate neutrale energiescenario's van Berenschot & Kalavasta inschatten dat de waterstofvraag in de gebouwde omgeving juist laag zal uitpakken. De andere Nederlandse scenario's kiezen voor alternatieve verwarming,



door middel van groen gas, geheel elektrische oplossingen, geothermie en warmtenetten.

In de gebouwde omgeving kan waterstof worden ingezet voor stoken en tapwaterverwarming (koken ligt minder voor de hand). Hiervoor wordt nu nog voornamelijk aardgas gebruikt. Op termijn concurreert waterstof echter met een aantal andere duurzame opties: geheel elektrisch, stadswarmte en hybride oplossingen waarbij een combinatie van elektriciteit en groen gas wordt gebruikt. De Hydrogen Council (2020) heeft becijferd dat gebruik van waterstof in de gebouwde omgeving in 2030 een concurrerende optie is. De onzekerheidsmarges zijn echter groot. Hoe concurrerend waterstof zal zijn,

hangt sterk af van lokale omstandigheden (bevolkingsdichtheid, type en bouwjaar huizen, aanwezigheid warmtebronnen) en van de aanwezigheid en de kosten van de benodigde infrastructuur.

2.4.5 Landbouwsector

De door de raad bestudeerde scenario's en visies voorzien weinig toepassing en gebruik van waterstof binnen de agrarische sector. Binnen de sector is wel sprake van interesse voor waterstof. Het gaat dan om de toepassing van waterstof als brandstof voor landbouwmachines en als oplossing voor de opslag van op bedrijfsniveau met windmolens en zonnepanelen opgewekte elektriciteit die niet aan het net kan worden geleverd.⁸⁴ In de tuin-

Tabel 6: Verwachte ontwikkeling van de vraag naar waterstof in de gebouwde omgeving

Bron	Klimaatneutrale energiescenario's (Den Ouden <i>et al.</i> , 2020)				Twee wegen naar Parijs (Den Ouden <i>et al.</i> , 2018)		Hydrogen Roadmap Europe (FC-H2JU, 2019)	
	<i>Regionale sturing</i>	<i>Nationale sturing</i>	<i>Europese CO₂-sturing</i>	<i>Internationale sturing</i>	<i>Moleculen</i>	<i>Elektronen</i>	<i>Business as usual</i>	<i>Ambitious</i>
Gebouwde omgeving (% = aandeel van totaal waterstof)	0 PJ	0 PJ	15 PJ	54 PJ	0%	0,7%	26,5% (207 TWh)	25,7% (579 TWh)
Aandeel waterstof op totale finale energie-behoefte	0% (van 1.567 PJ)	0% (van 1,854 PJ)	0,6% (van 2.406 PJ)	2,1% (van 2.526 PJ)	0%	0,3%	1,5%	6%

⁸⁴ Een project gericht op het omzetten op boerenbedrijven met wind en zon opgewekte opgewekte elektriciteit naar waterstof betreft de proef van Wageningen University & Research en TNO in een Fieldlab in Lelystad. Zie <https://www.acres.nl>



bouwsector wordt waterstof gezien als één van de mogelijke opties, maar hebben duurzame alternatieven gekoppeld aan CO₂-toevoer de voorkeur (Provincie Zuid-Holland, 2020).

2.4.6 Internationale lucht- en scheepvaartsector

Nederland speelt met zijn grote zee- en luchthavens een grote rol in zowel de luchtvaart- als de scheepvaartsector. Beide sectoren zijn vanwege hun grensoverschrijdende karakter zowel buiten de Parijsafspraken als buiten het nationale klimaatakkoord gehouden en hebben daarmee een aparte status. Binnen de luchtvaart is klimaatneutrale (synthetische) kerosine op basis van waterstof voorlopig de enige schaalbare oplossing om CO₂-uitstoot te verlagen. Voor de scheepvaart zijn er meer alternatieven voorhanden. Daar kan worden gekozen tussen (a) het direct inzetten van waterstof als brandstof, (b) het gebruiken van synthetische brandstoffen op basis van waterstof of (c) het gebruiken van uit biomassa opgewekte elektriciteit in combinatie met accu's. Met ramingen van minimaal 500 tot meer dan 1.000 PJ aan benodigde waterstof overstijgt de toekomstige vraag uit de luchtvaart- en scheepvaartsector die van alle andere sectoren bij elkaar. Synthetische kerosine en scheepsbrandstoffen op basis van waterstof kunnen op dit moment echter kostentechnisch niet concurreren met fossiele kerosine of stookolie.

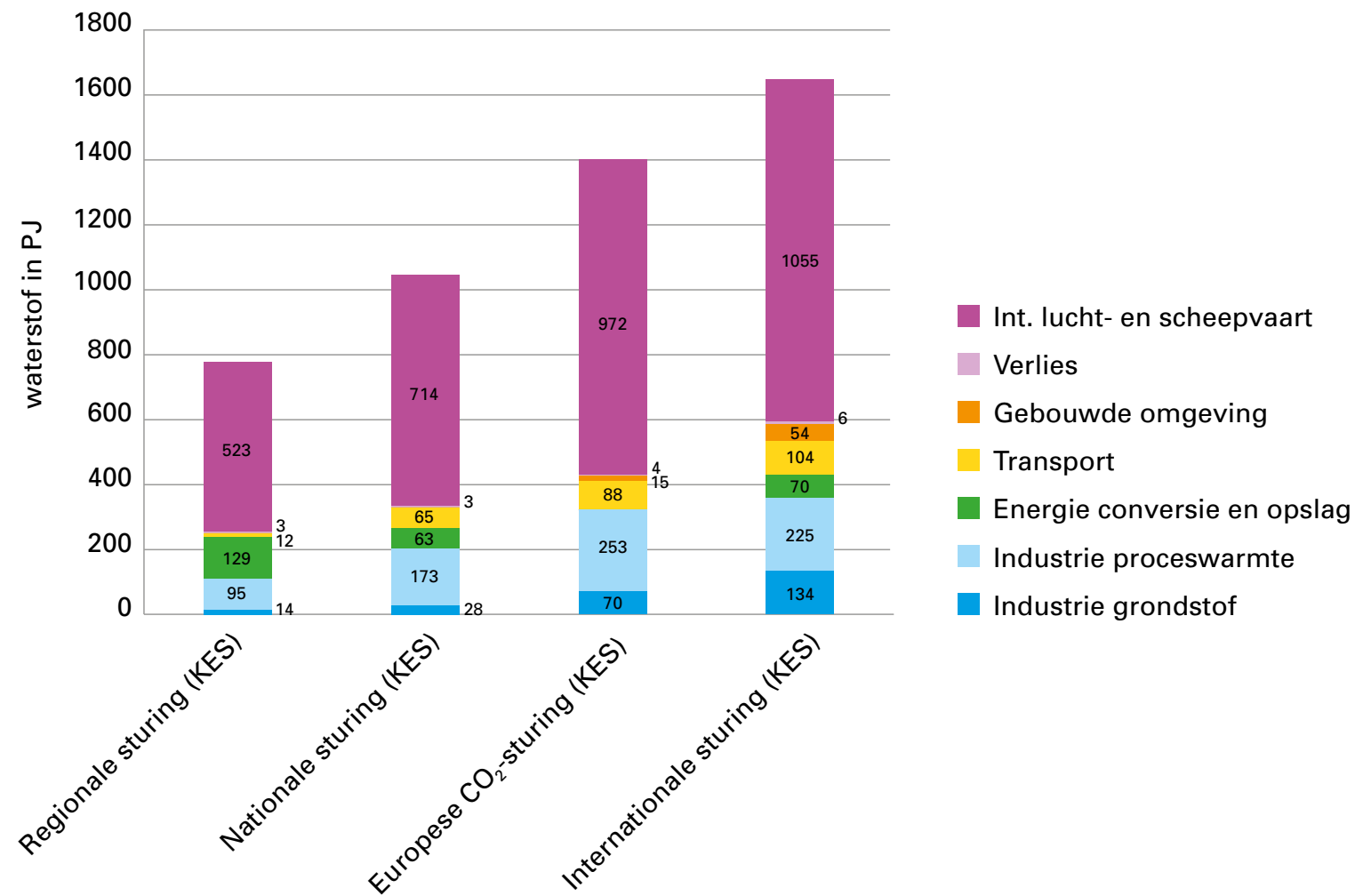
Gezien de status van de lucht- en scheepvaart worden deze vooralsnog vaak buiten scenario's en berekeningen gelaten. Dat is gezien de benodigde volumes niet terecht. In de klimaatneutrale energiescenario's is wel gekeken

naar deze sector. Deze scenario's bieden inzicht in de extra energievraag van de lucht- en scheepvaart in 2050. In figuur 12 is deze vraag afgezet tegen de verwachte vraag naar waterstof in andere sectoren. Er wordt van uitgegaan dat het grootste deel van de toekomstige waterstofvraag door middel van import zal worden voldaan. Ook is gekeken naar het maximale vermogen uit wind-op-zee dat extra kan worden opgewekt, exclusief voor de productie van energiedragers voor lucht- en scheepvaart. Maximaal kan er 72 GW aan wind-op-zee-vermogen worden geplaatst in het Nederlandse deel van de Noordzee. Dat is 20,5 GW, oftewel 40% extra vermogen ten opzichte van het maximale scenario (*Nationale sturing*).

Voor zowel de lucht- als de scheepvaart gaat het om een enorme vraag naar synthetische brandstoffen (zie tabel 7). In het geval van de luchtvaart gaat het om synthetische kerosine die wordt geproduceerd uit waterstof en CO₂. Voor de scheepvaart kan behalve waterstof ook biomassa een grondstof zijn voor synthetische brandstoffen. Daarnaast kan waterstof direct worden ingezet voor scheepvaart.



Figuur 12: Waterstofverbruik lucht- en scheepvaart in 2050, ten opzichte van andere sectoren in PetaJoules



Bron: Den Ouden et al, 2020

De lucht- en scheepvaart vormen in potentie dus een enorme afzetmarkt voor waterstof. Onder de huidige internationale regelgeving zal deze echter niet van de grond komen. Nationaal liggen hier wel mogelijkheden.

Tabel 7: Behoeftte synthetische brandstoffen internationale lucht- en scheepvaart

Bron	Klimaatneutrale energiescenario's (Den Ouden <i>et al.</i> , 2020)			
	Regionale sturing	Nationale sturing	Europese CO ₂ -sturing	Internationale sturing
Luchtvaart	125 PJ	170 PJ	232 PJ	315 PJ
Scheepvaart	398 PJ	543 PJ	740 PJ	740 PJ
Extra benodigde waterstof (ten opzichte van totale finale energiebehoefte)	523 PJ (+ 1.567 PJ)	714 PJ (+ 1.854PJ)	972 PJ (+ 2.406 PJ)	1.055 PJ (+ 2.526 PJ)

2.4.7 Samenvattend beeld

Vrijwel alle door de raad bestudeerde scenario's voorzien een rol voor waterstof in de elektriciteitsproductie, waarbij het echter om geringe volumes gaat. Omdat het gebruik van grijze waterstof in de industriesector op dit moment al groot is (zelfs nog veel groter dan tot voor kort werd aangenomen), kan in het proces van CO₂-reductie een grote vraag ontstaan naar klimaatneutrale waterstof ter vervanging van grijze waterstof. Alle scenario's voorzien daarnaast een rol voor waterstof in de mobiliteits- en transportsector. Ook in de gebouwde omgeving kan waterstof worden ingezet: voor stoken en tapwaterverwarming.



De bestudeerde scenario's en visies voorzien weinig toepassing en gebruik van waterstof binnen de agrarische sector.

In de internationale scheep- en luchtvaart ten slotte, wordt in de scenario's juist een enorme vraag naar waterstof voorzien, die de gezamenlijke vraag van alle andere sectoren overtreft. Dit is een belangrijk aandachtspunt omdat deze internationale sectoren zowel buiten de internationale als nationale klimaatakkoorden worden gehouden.

2.5 Inschatting potentie van waterstof in onze buurlanden

De uitkomsten van scenario's die specifiek kijken naar de potentiële vraag naar waterstof in Nederland zijn door de raad vergeleken met uitkomsten van scenariostudies in andere landen. Hieruit blijkt dat de bevindingen niet op zichzelf staan. In tal van Europese landen wordt door middel van scenariostudies geprobeerd greep te krijgen op toekomstige ontwikkelingen in de energie- en grondstoffenvoorziening. In vrijwel alle studies komt waterstof naar voren als een onmisbare schakel. De studies bevatten ook observaties op het punt van draagvlak, prijspeil en de keuze voor centrale dan wel decentrale oplossingen. De raad heeft specifiek gekeken naar scenario's voor Duitsland en het Verenigd Koninkrijk, landen die in termen van onder meer bevolkingsdichtheid, aanwezigheid industrie, welvaart en klimaat goed vergelijkbaar zijn met Nederland.

2.5.1 Duitsland: Noordrijn-Westfalen

Van Duitsland als geheel en Noordrijn-Westfalen⁸⁵ in het bijzonder is bekend dat er grootschalig wordt ingezet op waterstof. Er is daar op dit moment al sprake van een grote vraag naar waterstof vanuit de industriële sector. Zowel de 'nieuwe vraag' naar waterstof als de vraag naar klimaatneutrale waterstof ter vervanging van grijze waterstof is hier groot. Tegelijkertijd zet Duitsland grootschalig in op waterstof voor mobiliteit. Er zal een grote vraag ontstaan naar pure groene waterstof. Een studie naar waterstof in opdracht van het ministerie van economische zaken van Noordrijn-Westfalen concludeert dat een klimaatneutrale energie- en grondstoffenvoorziening voor de deelstaat kan worden gebaseerd op elektriciteit in combinatie met waterstof (NRW Wirtschaft, 2019).

In de Duitse scenario's wordt vergeleken hoe het energiesysteem verandert bij een CO₂-reductiedoelstelling van respectievelijk 55% in 2030 en 80% tot 95% in 2050, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen enerzijds de situatie met elektriciteit als voornaamste energiebron en anderzijds de situatie waarin de focus in het energiesysteem komt te liggen op waterstof. Een belangrijke uitkomst is dat elk scenario voorziet in een aanzienlijke rol voor waterstof.

Een andere opvallende uitkomst van de Duitse scenario's betreft de locatie van elektrolysecapaciteit. In de scenario's die waterstof een sleutelrol

⁸⁵ De Nederlandse minister van Economische Zaken en Klimaat (EZK) heeft op 29 januari 2020 met Noordrijn-Westfalen een samenwerkingsovereenkomst gesloten die zich expliciet richt op de rol van waterstof in de energietransitie.



toedichten in het energiesysteem is de benodigde elektrolysecapaciteit vooral in Noord-Duitsland gesitueerd, waar energie wordt opgewekt met windturbines. Deze energie wordt omgezet in waterstof en vervolgens per pijpleiding getransporteerd naar andere delen van Duitsland. In scenario's met elektriciteit als voornaamste energiebron is de elektrolysecapaciteit voor een belangrijk deel gesitueerd in Noordrijn-Westfalen, dichtbij industriële afnemers.

Vermeldenswaard is verder de doorrekening die in de Duitse scenario's wordt gemaakt van de jaarlijkse kosten van een klimaatneutraal energiesysteem. Hieruit komt naar voren dat de energiesysteemkosten lager worden naarmate het aandeel waterstof groter is en dat een groter aandeel waterstof bovendien leidt tot een grotere mate van integratie van hernieuwbare energie in het systeem. Daarnaast wijst de Duitse kostendoorrekening uit dat in klimaatneutrale energiesystemen met een focus op waterstof de kosten van import van energie het laagst zijn en de binnenlandse toegevoegde waarde het hoogst. Ook leveren klimaatneutrale energiesystemen de meeste werkgelegenheid op.

2.5.2 Verenigd Koninkrijk

Voor het Verenigd Koninkrijk is gekeken naar twee afzonderlijke scenario studies: van het Committee on Climate Change (2018) en van National Grid (2019). Het Committee on Climate Change stelt dat waterstof een cruciale factor zal worden in de energie- en grondstoffenvoorziening. Het comité voorziet, net als de zojuist besproken Duitse scenario's, gebruik van waterstof vooral in de sectoren industrie, mobiliteit en gebouwde omgeving. Voor

lage temperatuurverwarming in de gebouwde omgeving wordt, afhankelijk van het gekozen scenario, een groot tot enorm verbruik van waterstof voorzien. Dat is een opvallend verschil met de Nederlandse inschattingen. Ten aanzien van industrie, energie en transport zijn de toekomstbeelden vergelijkbaar. De grootste vraag naar waterstof zal voortkomen uit de transportsector en de sector gebouwde omgeving. De vraag naar waterstof vanuit de elektriciteitssector is in elk van de Britse scenario's min of meer gelijk. Over de kosten en een mogelijke prijspeilverhoging voor burgers en gebruikers luidt de conclusie dat er met name sprake zal zijn van een kostenstijging in de gebouwde omgeving. Deze kostenstijging wordt echter naar verwachting gecompenseerd door lagere transport- en energiekosten. Wel vormt de verdeling van kosten over groepen van de bevolking een aandachtspunt.

National Grid (2019) onderscheidt in zijn studie vier scenario's: twee ambitieus en twee minder ambitieus. Binnen de ambitieuze scenario's, waarin de klimaatdoelstellingen worden gehaald, is sprake van vrij grote verschillen tussen het scenario dat is gebaseerd op decentrale sturing (*Community Renewables Pathway*) en het scenario dat uitgaat van centrale aansturing (*Two Degrees*). In beide scenario's speelt waterstof evenwel een cruciale rol. Het Community Renewables Pathway-scenario lijkt op het regionale sturingsscenario in de Nederlandse Klimaatneutrale energiescenario's (Den Ouden *et al.*, 2020). Kenmerkend voor dit scenario is de nadruk op besparing in energieverbruik en de hoge mate van *stand-alone*-oplossingen voor lokale productie van elektriciteit en energieopslag (in batterijen en via *smart vehicle charging*). Waterstof speelt in dit scenario vooral een rol in de transportsector.



Het Two Degrees-scenario gaat uit van elektriciteitsopwekking door wind op zee, centrale energiesystemen en opslag, commerciële toepassing van CO₂-afvang en -opslag ten behoeve van waterstofproductie, en grote vraag naar waterstof in het transport en de gebouwde omgeving. Opvallend is dat beide scenario's hoog scoren op maatschappelijk draagvlak en economische groei, terwijl de beide scenario's die de klimaatdoelstellingen niet halen daar significant lager op scoren.

2.5.3 Samenvattend beeld

Volgens de scenario's van het toekomstige energiesysteem in Duitsland zal waterstof net als in Nederland een essentiële rol gaan spelen. Opvallend is dat de energiesysteemkosten in de Duitse berekeningen lager worden naarmate het aandeel waterstof groter is.

Ook in het Verenigd Koninkrijk zal waterstof naar verwachting een cruciale factor worden in de energievoorziening. Voor industrie, energie en transport zijn de toekomstbeelden vergelijkbaar met die van Nederland. Alleen voor lage temperatuurverwarming in de gebouwde omgeving wordt een fors groter verbruik van waterstof voorzien dan in ons land; daar wordt dan ook een prijspeilverhoging verwacht voor gebruikers.





3 UITGANGSPOSITIE VAN NEDERLAND

In dit hoofdstuk gaat de raad na of de Nederlandse uitgangssituatie voldoende is om een concurrerende waterstofeconomie op te tuigen. Voor grootschalige inzet van waterstof geldt dat moet worden voldaan aan een aantal voorwaarden. Er moet om te beginnen een potentiële markt bestaan van gebruikers die op korte termijn de overstap naar waterstof kunnen maken. Verder moet de mogelijkheid bestaan om CO₂-vrije waterstof te produceren en op te slaan. Ook moet er infrastructuur aanwezig zijn voor het transporteren van waterstof van producent naar eindgebruiker. Daarnaast is de mogelijkheid tot import van belang. En ten slotte is een technologie gemakkelijker te adopteren als zij aansluit op de bestaande kennis- en economische infrastructuren.

3.1 Potentiële markt voor waterstof op korte termijn

Nederland is op dit moment al een waterstofland. Binnen Europa is Nederland na Duitsland een van de grootste gebruikers en producenten van waterstof.

Huidige vraag

De huidige vraag naar waterstof komt met name vanuit de energie-intensieve industrie: raffinaderijen, chemiebedrijven en kunstmestproducenten. Het huidige gebruik betreft volgens TNO en CBS (2020) circa 16,5 miljard m³ waterstof per jaar (in verschillende puurheidgraden), wat overeenkomt met zo'n 178 PJ aan energie.⁸⁶ Het grootste deel daarvan, zo'n 60%, betreft grijze waterstof en wordt geproduceerd met behulp van aardgas (TNO & CBS, 2020). Deze productie gaat gepaard met een CO₂-emissie van 12,5Mton (Natuur en Milieu, 2018).

Deels komt de waterstof anders tot stand: bij bepaalde petrochemische processen ontstaat het als rest- of tussenproduct. Deze waterstof wordt vervolgens weer elders in het proces ingezet.⁸⁷

De waterstofmarkt in de Nederlandse energie-intensieve industrie is op dit moment gebaseerd op business-to-business-contracten. Gebruikers produceren waterstof op hun eigen terrein, of laten dit doen door derden.

Toekomstige vraag

Ook voor het ontwikkelen van een toekomstige circulaire economie is waterstof nodig, bijvoorbeeld voor het recyclen van plastics. Er is een

⁸⁶ Ter vergelijking: het jaarlijks Nederlands aardgasverbruik ligt tussen de 35 en 45 miljard m³ (zo'n 1.230 PJ tot 1.580 PJ).

⁸⁷ Een voorbeeld hiervan is de recente samenwerking tussen Dow Chemical en Yara, waarbij Yara gebruikmaakt van de waterstof die als restproduct vrijkomt bij chemische processen van Dow. Via een 12 km lange voormalige gasleiding wordt ruim 4 kton waterstof tussen beide bedrijven getransporteerd. Dat levert een daling op van 0,15 PJ aan energiegebruik en CO₂-emissiereductie van 10.000 ton. Zie ook: <https://nl.dow.com/nl-nl/news/waterstofleiding-gasunie-van-dow-naar-yara-in-gebruik-genomen.html>

kennisintensieve chemische sector in Nederland die hieraan kan bijdragen. Voor de raffinage van biograndstoffen kan waterstof eveneens nodig zijn, net als voor de productie van staal zonder de steenkool (cokes) die daarvoor in de huidige processen wordt ingezet.

In Nederland sorteren industriële clusters op verschillende manieren voor op de productie en het gebruik van CO₂-vrije waterstof:

- De industrie in de regio Rotterdam/Moerdijk zet in op zowel de aanleg van elektrolysecapaciteit voor de productie van groene waterstof als op de aanleg van installaties voor het afvangen en opslaan van CO₂ waarmee grijze waterstof kan worden 'verblauwd'.
- De industrie in de regio Noord-Nederland zet in op de aanleg van elektrolysecapaciteit voor de productie van groene waterstof.

In alle gevallen geldt dat voor het doen van investeringsbeslissingen wordt gewacht op meer duidelijkheid over de vraag in hoeverre de overheid financiële ondersteuning en een langetermijnperspectief zal gaan bieden.

3.2 Mogelijkheden voor productie en opslag van waterstof

De productie van groene waterstof staat in Nederland (net als in de rest van de wereld) op dit moment nog in de kinderschoenen. Op termijn zal Nederland zelf kunnen voorzien in een deel van de vraag naar groene waterstof, omdat het over de ruimtelijke en klimatologische mogelijkheden beschikt voor de aanleg van grote windparken op zee. De Noordzee biedt immers in potentie meer energie dan nodig is om te voorzien in de vraag



naar elektriciteit. De resterende windenergie kan worden aangewend om via elektrolyse groene waterstof te produceren. Het omgekeerde geldt ook: de vraag naar waterstof vergroot de potentie van de opwekking van windenergie op zee. In tegenstelling tot veel andere Europese landen, die niet over voldoende ruimte, wind en/of zon beschikken, heeft Nederland met de Noordzee een mogelijkheid om voor een deel zelf te voorzien in zijn duurzame energiebehoefte.

Echter, gezien de benodigde hoeveelheid hernieuwbare elektriciteit en elektrolysecapaciteit is de verwachting dat de productie van groene waterstof pas enige omvang zal krijgen vanaf 2030, en pas vanaf 2040-2050 de schaal zal bereiken die nodig is om aan de vraag te voldoen. Voor wat betreft groene waterstof is er nog geen sprake van voldoende aanbod van hernieuwbare stroom. Ook gaat het om het doorlopen van de learningcurve en kostencurve die hoort bij het opschalen van elektrolyse capaciteit. De stap van elektrolyzers van enkele MW's naar elektrolyzers met 100 tot 1000 keer die capaciteit (1 of 2 GW elektrolyzers) vraagt om een aantal tussenschappen. Tot die tijd zal moeten worden gewerkt met tussenoplossingen om in de huidige (vervangings)vraag te kunnen voorzien. Klimaatneutrale waterstof waar bij de productie (een deel van) de CO₂-uitstoot wordt afgevangen is dan het belangrijkste alternatief. Zowel voor elektrolyse als blauwe waterstof worden projecten ontwikkeld en uitgevoerd.⁸⁸

⁸⁸ Een doorlopend geactualiseerd overzicht van projecten gericht op de productie en toepassing van waterstof is te vinden op: <https://projecten.topsectorenergie.nl/projecten>

De mogelijkheid van het afvangen, opslaan en hergebruiken van CO₂, doorgaans aangeduid als CCUS,⁸⁹ is in het Rotterdamse en Amsterdamse havengebied in potentie aanwezig en ook in Den Helder wordt deze onderzocht. De haalbaarheid van deze technologie is aangetoond in de projecten Porthos en Athos.⁹⁰ De aanleg van de benodigde infrastructuur voor Porthos, dat zich richt op de productie van blauwe waterstof, is begroot op € 450 miljoen. Het betreft een pijpleidingenstelsel specifiek voor het transport van CO₂ naar opslagbergingen en eventuele gebruikers. Opslag is daarbij voorzien in lege gasvelden onder de Noordzee. Er zullen op termijn mogelijk meer projecten volgen; de Stimuleringsregeling Duurzame energietransitie (SDE++) biedt in 2020 voor het eerst subsidies aan voor projecten die zich richten op CCUS (Tweede Kamer, 2020c).

De mogelijkheid van CCUS is binnen Europa geen vanzelfsprekendheid. Alleen in Noorwegen is expliciet gekozen voor afvang, opslag en hergebruik van CO₂; daar bestaat al sinds 1996 een succesvolle aanpak. Samen met het Verenigd Koninkrijk vormt Nederland een voorhoede binnen Europa als het gaat om nieuwe CCUS-projecten (International Association of Oil & Gas Producers, 2019). CCUS biedt kansen om op korte termijn in te zetten op de productie van blauwe waterstof. Hiermee kan de huidige vraag naar (grijze) waterstof worden vervangen en kan tevens een springplank ontstaan voor nieuwe initiatieven die gebruik willen maken van CO₂-arme waterstof.

⁸⁹ CCUS staat voor carbon capture, usage and storage.

⁹⁰ Athos staat voor Amsterdam-IJmuiden CO₂ Transport Hub & Offshore Storage.

Zie <https://athosccus.nl>. Porthos staat voor Port of Rotterdam CO₂ Transport Hub and Offshore Storage. Zie <https://www.porthosCO2.nl>



Zoals uiteengezet in paragraaf 1.5 van hoofdstuk 1 zijn de opslagmogelijkheden voor waterstof in Nederland in relatief ruime mate aanwezig. Waterstof kan in de toekomst ondergronds worden opgeslagen in zoutcavernes en wellicht in lege gasvelden en aquifers.

3.3 Beschikbare infrastructuur voor transport van waterstof

Nederland beschikt over een hoogstaand en uitgebreid aardgasnetwerk. Voor een belangrijk deel is dit gasnet overgedimensioneerd en is bovendien ruimte 'over', met name nu het gebruik van het Groningengas versneld wordt afgebouwd. Een deel van het gasnet zou tegen geringe infrastructuurele aanpassingskosten kunnen worden ingezet voor transport en distributie van waterstof. Volgens Gasunie en TIKI (2020) bedragen de investeringen voor aanpassing tussen de € 1,5 tot 2 miljard, wat relatief weinig is vergeleken bij een situatie waarin nieuwe pijpleidingen moeten worden aangelegd.

De Taskforce Infrastructuur Klimaatakkoord Industrie (TIKI, 2020) heeft aanbevolen om het vrijkomende deel van het aardgastransportnet inderdaad aan te passen voor gebruik van waterstof om zodoende een landelijk dekkend waterstofnetwerk te ontwikkelen, met aftakkingen naar Duitsland en België. De raad ondersteunt deze aanbeveling van de taskforce.

H-net, L-net en distributienetten

De gasinfrastructuur in Nederland is dubbel uitgevoerd. Een deel van het pijpleidingennet is specifiek bestemd voor laagcalorische Groningengas;

dit is het L-gasnet. Een ander deel van de gasinfrastructuur is bestemd voor het transport van hoogcalorisch gas uit kleine gasvelden en uit het buitenland; dit is het H-gasnet.⁹¹ Beide gastransportnetten worden beheerd door Gasunie. Behalve het gastransportnet zijn er ook nog gasdistributienetten, beheerd door de regionale netbeheerders, waarmee L-gas bij onder meer huishoudens wordt gebracht.

Geschikt maken transport- en distributienetwerken voor waterstof

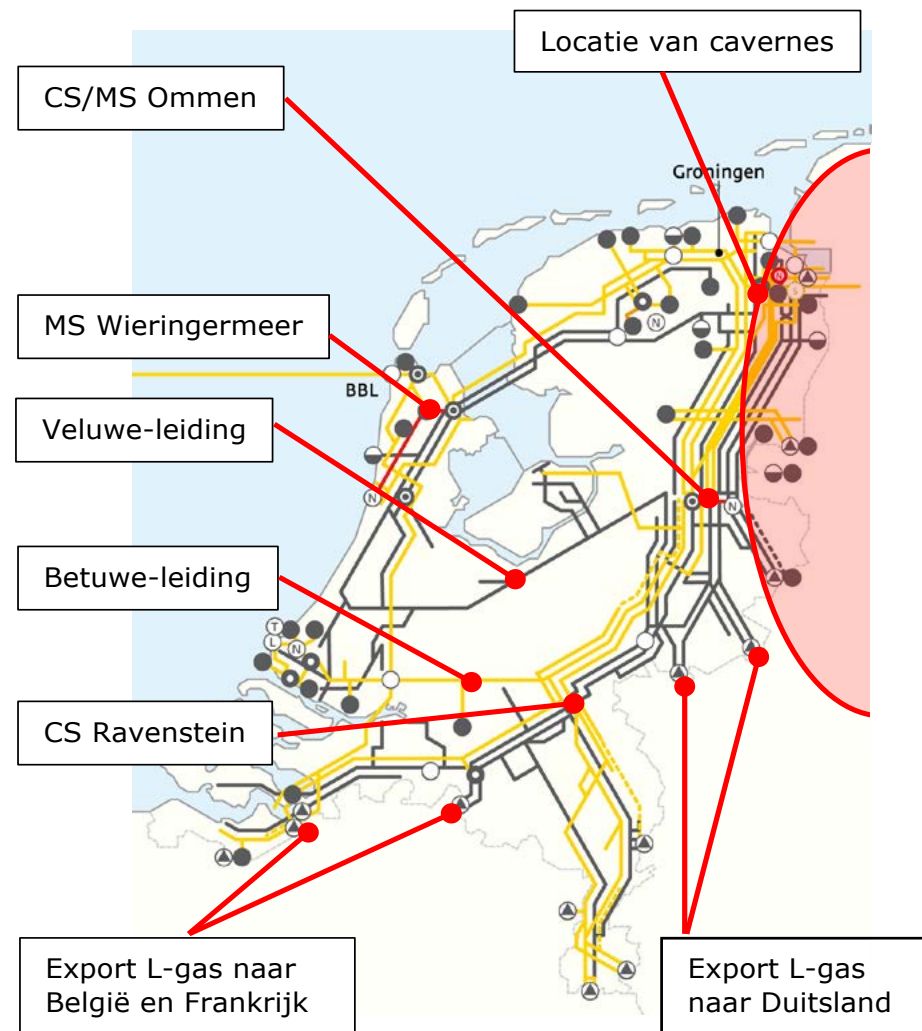
Op korte termijn speelt de vraag in hoeverre (een deel van) de huidige gasinfrastructuur geschikt is te maken voor waterstof. Het betreft dan zowel de gastransportinfrastructuur, die onder verantwoordelijkheid valt van Gasunie, als de gasdistributienetwerken van regionale netwerkbedrijven. Van beide netten is vastgesteld dat deze technisch gezien geschikt zijn (te maken) voor waterstof.

De pijpleidingen zelf zijn al geschikt voor het transport van waterstof. Aanpassingen zijn nodig op het vlak van de compressorstations (zie figuur 13). De centrifugaal-compressoren dienen te worden vervangen. Voor de zuigercompressoren geldt dit niet, omdat die ook geschikt zijn voor waterstof. De drukregelstations en meetstations zijn in staat om met waterstof om te gaan. In het geval van meetstations kan zelfs sprake zijn van kosten-daling wanneer sprake is van een gassamenstelling van 100% waterstof, die gemakkelijker te meten is dan de huidige gasmengsels.

⁹¹ Hoogcalorisch gas bevat minder stikstof dan laagcalorisch gas (dat een aandeel stikstof bevat van 14%). Door toevoeging van stikstof kan van hoogcalorisch gas laagcalorisch gas worden gemaakt).



Figuur 13: Gasinfrastructuur bestaande uit H-gas leidingen (geel), L-gasleidingen (zwart), stikstoffabrieken (MS) en compressorstations (CS)



Bron: DNV-GL, 2017

Test- en certificatie-instelling Kiwa (2018; 2019) heeft onderzoek gedaan naar de geschiktheid van bestaande distributienetwerken voor (100%) waterstof en biomethaan (biogas). Technisch gezien verwacht Kiwa geen

problemen bij de inzet van het bestaande gasdistributienetwerk voor waterstof. Er wordt gewezen op twee fenomenen die vaak in relatie worden gebracht met waterstof: de permeatie⁹² van waterstof door kunststofleidingen en 'waterstofbrosheid' van staal. Kiwa geeft aan dat beide effecten bij de omstandigheden die gelden in distributienetten verwaarloosbaar zijn en niet zorgen voor een significante degradatie of verhoging van het veiligheidsrisico. Een studie van DNV-GL (2017) komt tot eenzelfde conclusie, waarbij wel wordt opgemerkt dat het aantal drukwisselingen in de leidingen dient te worden beperkt. Kiwa trekt de conclusie dat bestaande netwerken met de juiste maatregelen zonder problemen kunnen worden ingezet voor waterstoftransport en distributie. Dit komt overeen met de onderhoudsstrategie van netbeheerders, die sinds 2000 al het onderhoud aan de gasnetwerken uitvoeren op zodanige wijze dat het net geschikt is voor onder meer waterstof.

Op basis van de vier energiescenario's van CE Delft (2017) heeft Kiwa een ruwe berekening gemaakt van de kosten voor het aanpassen van de gasdistributienetwerken; deze zouden uitkomen op circa € 700 miljoen. De grootste kostenpost daarbij betreft het vervangen van alle gasmeters en het vernieuwen van de procedure voor verrekening van de gaskosten als gevolg van verschillen in samenstelling. Bij een overstap naar biomethaan/biogas komen daar nog extra kosten bij vanwege variërende calorische waarde. De kosten die zijn verbonden aan de aanpassingen die nodig zijn per huishouden zijn in de berekening van Kiwa niet meegenomen. Dit

⁹² Permeatie verwijst naar de snelheid waarmee op moleculair niveau deeltjes door een materiaal heendringen.

betreft bijvoorbeeld de kosten voor vervanging van apparaten als cv-ketels en het verbeteren van leidingwerk binnen gebouwen. De gezamenlijke kosten per huishouden liggen veel hoger dan de netwerkbeheerkosten.

3.4 Mogelijkheden voor import

Voor de mondiale energiehandel (die op dit moment nog vooral olie en gas betreft) vormt Rotterdam een belangrijk knooppunt. Dit is te danken aan het diepe vaarwater van de Rotterdamse haven dat nodig is voor olietankers, en aan de aanwezigheid van een achterland met veel vraag naar energie, dat zich uitstrekt naar Duitsland en België en de daar aanwezige petrochemische industrie⁹³ maar ook naar overige landen. Net als Nederland kunnen deze landen in een toekomstige klimaatneutrale economie niet volledig voorzien in hun energie- en grondstoffenbehoefte en zullen zij dus afhankelijk zijn van import. En net als in Nederland verwachten veel industriële spelers dat daarom op termijn een overstap naar waterstof noodzakelijk is. Duitsland is daar op dit moment het meest concreet in; dit land investeert fors in de opbouw van een duurzame waterstofindustrie (zie hoofdstuk 4). Om Nederland heen zal dus een aanzienlijke vraag naar waterstof ontstaan; er worden her en der al concrete stappen gezet om hierin te voorzien.

Het is niet vanzelfsprekend dat Rotterdam in een klimaatneutrale economie zijn positie in de mondiale energiehandel behoudt. Met de transitie van olie

⁹³ Het gaat hier om het zogenoemde ARRRRA-cluster: de (petro)chemische industrie en de bijbehorende pijpleidingeninfrastructuur in het Antwerpen-Rotterdam-Rijn-Ruhrgebied. Ook het bedrijf Chemelot maakt deel uit van dit cluster. Gezamenlijk is het cluster goed voor 40% van de petrochemische productie in Europa.

naar gasachtige energiedragers valt immers de noodzaak van diep vaarwater weg. Van belang voor een positie in een toekomstige waterstofhandel is vooral de aanwezigheid van terminals, opslagmogelijkheden, transportinfrastructuur en afnemers van waterstof. Rotterdam is niet de enige haven die aan deze voorwaarden voldoet.

Overigens is het nog geen uitgemaakte zaak hoe het langeafstandstransport van waterstof technisch vorm zal krijgen. Er liggen hier nog aanzienlijke opgaven. Anders dan LNG vraagt het vloeibaar maken van waterstof zowel om hoge druk als om extreem lage temperaturen; daarmee is dus veel energie gemoeid. Japan heeft recent het eerste waterstoftransportschip van de helling af laten lopen. Dit schip vervoert waterstof in vloeibare toestand (op een temperatuur van -253 graden Celsius) tussen Australië en Japan. Ook wordt gedacht aan transport van waterstof in de vorm van ammoniak of methanol. Dat zijn gemakkelijker te hanteren stoffen, maar hierbij treden wel conversieverliezen op. Op langere termijn is het voorstelbaar dat binnen Europa een waterstofpijpleidingennetwerk ontstaat, zodat de aanvoer van in de Sahara of Midden-Oosten geproduceerde waterstof kan plaatsvinden via havens aan de Middellandse zee.

3.5 Kennis en economische infrastructuur

De betrokkenheid van Nederlandse bedrijven en kennisinstellingen in waterstof is groot. Illustratief is de omvang van de Nederlandse afvaardiging bij de laatste Hydrogen Ministerial in Japan (2019), die de grootste was na

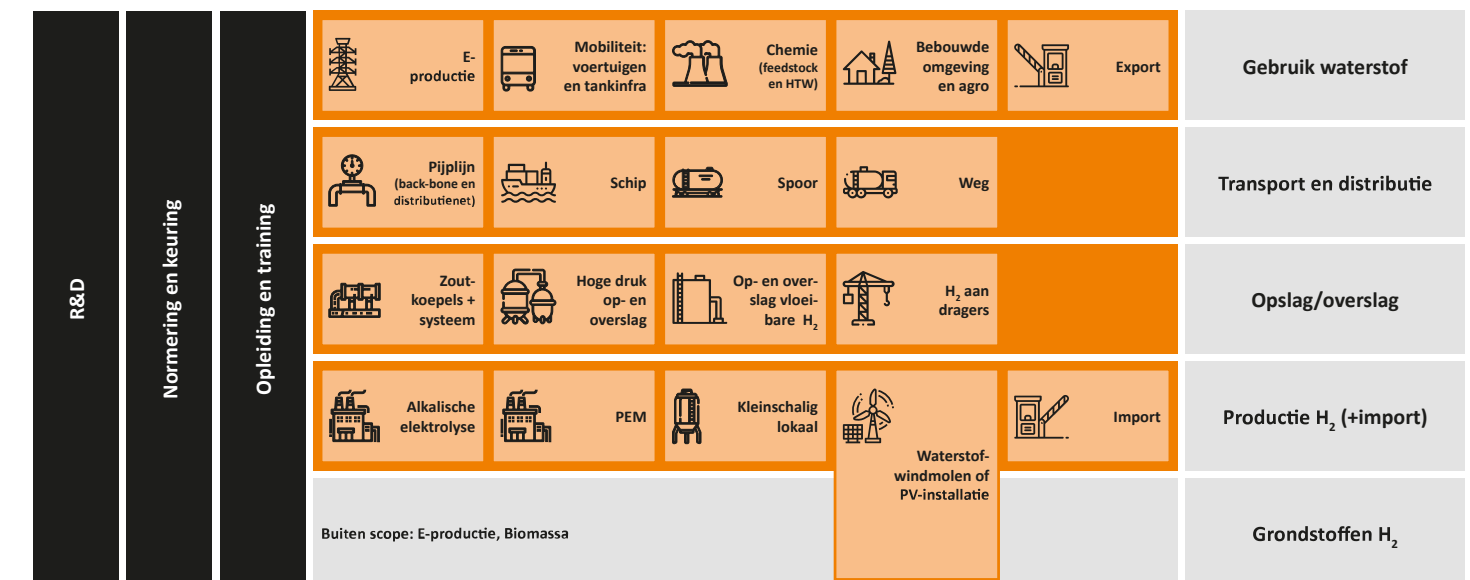


die van Japan zelf (Van Hulst, 2019).⁹⁴ Uit het laatste projectoverzicht van TKI Nieuw Gas (2020) blijkt dat er op dit moment wordt gewerkt aan circa honderd waterstofprojecten. De projecten kennen een grote variatie, zowel in omvang als in oriëntatie. De projecten richten zich op alle onderdelen van de waterstoftechnologie waardeketen, zoals productie, transport en distributie, opslag en toepassingen in verschillende sectoren. De status van de projecten varieert van haalbaarheidsstudies en business cases tot investeringsbeslissingen, implementaties en testen. Het soort bedrijven dat zich richt op waterstoftechnologie varieert van multinationals tot MKB-ondernemingen en eenmansbedrijfjes.

In een verkennende studie is FME (Reijerkerk & Van Rhee, 2019) tot de conclusie gekomen dat het Nederlandse bedrijfsleven kansrijk is in het ontwikkelen van een industrie, handel en productieketens rond waterstof. Er zijn op dit ogenblik twee grotere clusters van bedrijven, één rond Rotterdam en één rond Arnhem. Na een rondgang langs Nederlandse bedrijven en sectoren kwam FME tot de conclusie dat overal in Nederland bedrijven actief zijn in alle onderdelen en systemen van de integrale waterstofketen (zie figuur 14). Toch is er nog een aantal witte vlekken waar Nederlandse bedrijven minder zijn vertegenwoordigd. FME concludeert "...dat de waterstofproductieketen een nieuw perspectief biedt voor zowel de bestaande (aard)gassector als voor andere sectoren in de maakindustrie die relevante (toe)leveranciers zijn voor specifieke systemen, componenten en onderdelen nodig in de waterstofketen" (Reijerkerk & Van Rhee, 2019, p. 6).

⁹⁴ De Hydrogen Ministerials zijn jaarlijkse bijeenkomsten van energieministers uit diverse landen, die tot doel hebben het gebruik van waterstof op wereldwijde schaal te bevorderen.

Figuur 14: Indruk van de integrale waterstofproductieketen (Reijerkerk & Van Rhee, 2019, p. 16)



Aan de productiekant van groene waterstof liggen er vooral kansen voor het bedrijfsleven op het gebied van elektrolyse en windturbines. De techniek van windturbines ligt in handen van gevestigde (buitenlandse) partijen. Voor elektrolyse geldt dat de kennis hierover is geconcentreerd in Europa, onder andere bij Siemens, Nel Hydrogen, McPhy, ITM-power en ThyssenKrupp. In Japan houdt Asahi Kasei zich met elektrolyse bezig, maar daar moet de markt in feite nog op gang komen.

Nederland heeft geen *original equipment manufacturer* (OEM) binnen de grenzen. Toch liggen er kansen voor Nederlandse partijen op verschillende terreinen:

- *Toeleverings- en procesindustrie:* Nederland heeft een grote toeleverings- en procesindustrie die in de waterstofeconomie verdien capaciteit voor Nederland zou kunnen genereren. Kansrijke sectoren en markten zijn onder meer de chemische sector (indien deze de overstap maakt naar groene chemie), de componentenmarkt (compressie en regelkleppen, computerchipindustrie, waterbehandeling) en de markt voor productietechnieken van materialen en componenten gericht op waterstof. Daarnaast beschikt Nederland over een sector die is gespecialiseerd in dienstverlening op het gebied van procesoptimalisatie, over een ontwerp- en engineeringsector gespecialiseerd in waterstofleidingen en opslag en over een sterke positie in de test- en keuringsmarkt.
- *Maakindustrie:* Nederland heeft een MKB-sector waarin expertise bestaat met de toepassing van waterstof in brandstofcellen en branders. Een aantal partijen in het Arnhemse waterstofcluster produceert brandstofceltechniek voor bedrijfsmatige toepassingen en is vooral *business to business* actief. Dit geldt in potentie ook voor de *automotive* sector (door in te zetten op bussen en trucks). Kansrijk is verder met name de cv-ketelsector, die op dit moment al inspeelt op de projecten in binnen en buitenland met bijmengen van waterstof in het gasnet.
- *Innovatie en technologische ontwikkeling:* innovatieopgaven voor waterstof zijn er over de gehele keten van productie, opslag, transport en distributie tot en met eindgebruik. Voor Nederland liggen er vooral kansen als het gaat om innovatie en technologische ontwikkeling bij de opslag, het transport en de distributie van waterstof. Op een aantal onderdelen zijn Nederlandse bedrijven goed gepositioneerd. Denk aan technologieën voor eindgebruikstoepassingen zoals brandstofcellen

en branders en aan het implementeren en testen van systemen, met name brandstofcellen systemen voor bussen, trucks, mobiele werktuigen en schepen. Technologische ontwikkeling op het gebied van waterstofproductie, brandstofcellen en transportmogelijkheden is mondiaal in een versnelling aan het raken – iets wat eveneens geldt voor alternatieven zoals accu's. Er zijn zodoende ook overkoepelende innovatieopgaven die betrekking hebben op het ontwikkelen van passende normeringen en standaarden, bijvoorbeeld voor veilig gebruik en het standaardiseren van de kwaliteit van waterstof (dat in verschillende puurheidsgraden kan worden aangeboden) (Gigler & Weeda, 2018).⁹⁵

3.6 Samenvattend beeld

Nederland heeft een goede uitgangspositie om een concurrerende waterstofeconomie op te tuigen. Er is in de Nederlandse industrie ruime vraag naar (op termijn CO₂-vrije) waterstof. Op termijn zal Nederland zelf kunnen voorzien in een deel van de vraag naar groene waterstof. Opslagmogelijkheden voor waterstof zijn in Nederland in relatief ruime mate aanwezig. Verder beschikt ons land over uitgebreid aardgasnetwerk dat tegen relatief geringe kosten kan worden ingezet voor transport, distributie en import van waterstof. En ten slotte is het Nederlandse bedrijfsleven kansrijk als het gaat om het ontwikkelen van een industrie, handel en productieketens rond waterstof.

⁹⁵ Deze onderwerpen worden uitvoeriger besproken in hoofdstuk 5 over veiligheid.



Binnen Europa zijn er weinig landen die beschikken over een soortgelijke set aan gunstige condities. Nederland heeft daarmee een relatief voordeel. Het kan een voorsprong nemen binnen Europa en een voortrekkersrol vervullen.





4 ONTWIKKELING WATERSTOFECONOMIE IN INTERNATIONAAL PERSPECTIEF

Wereldwijd werken landen en regio's aan de omslag naar een klimaatneutrale economie. Terwijl aanvankelijk de interesse in waterstof zich beperkte tot enkele pionierende landen en bedrijven, zien inmiddels overheden over de gehele wereld waterstof als een onmisbaar instrument voor het bereiken van energie- en klimaatdoelen. Er zijn nu meer dan vijftig landen en regio's met langetermijnstrategieën voor het ontwikkelen van een waterstofeconomie. In dit hoofdstuk bespreekt de raad de internationale koplopers. Ook belicht de raad enkele geopolitieke ontwikkelingen die op de achtergrond meespelen. Immers, de omschakeling naar nieuwe energiebronnen biedt landen en regio's ook kansen om hun afhankelijkheid van geïmporteerde energie te verminderen en daarmee hun eigen strategische positie te versterken.

4.1 Internationaal momentum

Er is de laatste jaren steeds meer aandacht voor waterstof; het onderwerp staat wereldwijd hoog op de agenda's. Dat komt doordat het nakomen van de internationale klimaatafspraken steeds urgenter wordt, terwijl tegelijkertijd duurzaam opgewekte energie in toenemende mate beschikbaar komt, tegen steeds lagere prijzen. De zoektocht naar alternatieven voor fossiele brand- en grondstoffen leidt als het ware vanzelf in de richting van waterstof en andere klimaatneutrale opties. Vooral de moleculaire eigenschappen van waterstof, de mogelijkheden tot grootschalige productie en opslag en de veelheid aan toepassingsmogelijkheden hebben de belangstelling voor waterstof aangewakkerd.

Recent hebben de G20, het International Energy Agency (2019), de Hydrogen Council (2017) en de International Renewable Energy Agency (IRENA, 2019) aandacht gevraagd voor de kansen en mogelijkheden van waterstof. Ook zijn in 2018 en 2019 onder leiding van Japan Hydrogen Ministerials georganiseerd (bijeenkomsten van energieministers ter bevordering van het gebruik van waterstof), die hebben geresulteerd in respectievelijk het Tokyo Statement⁹⁶ en de Global Action Agenda. Nederland was hierbij vertegenwoordigd.

⁹⁶ Zie: <https://www.meti.go.jp/press/2018/10/20181023011/20181023011-5.pdf> en https://h2em2019.go.jp/summary/summary_en.pdf

4.2 Multinationals: voorzichtige stappen in afwachting van overheid

Invloedrijke multinationals, waaronder ook traditionele oliemaatschappijen, zien in toenemende mate de noodzaak om te verduurzamen.⁹⁷ Waterstof wordt door dit soort bedrijven nadrukkelijk genoemd als alternatief voor fossiele brandstoffen. Zij aarzelen echter met het zetten van concrete stappen. Net als overheden lopen ze tegen het zogenoemde kip-ei-probleem aan dat optreedt wanneer grootschalige (voor)investeringen moeten worden gedaan zonder dat men zekerheid heeft over de afzetmogelijkheden en het prijsniveau van een product.

De verwachting is dat een groeiende rol van waterstof en dalende productiekosten uiteindelijk zullen leiden tot investeringen vanuit de gas- en olie-sector. Maar niet alleen daar; ook enkele grote autoproducenten zetten in op waterstof. Zij verwachten dat er bestaansrecht zal zijn voor auto's die op waterstof rijden en hebben plannen voor het ontwikkelen van brandstofcelauto's. Dit helpt hen om de brandstofceltechniek verder te ontwikkelen en daarmee ook geschikt te maken voor implementatie in zwaar vervoer als trucks en lange afstandsbussen. Een enkele producent verkoopt nu al vrachtwagens met brandstofcel op commerciële basis.

⁹⁷ Illustratief is in dit verband een vraaggesprek met de non-executive president-commissaris van Shell van oktober 2019, waarin hij uitsprak dat de aarde stervende is, dat waterstof de oplossing is en dat Shell daarin voor € 2 miljard gaat investeren. Zie <https://www.ad.nl/economie/shell-richt-zich-op-waterstof-de-aarde-is-stervende~a0e23e15>. Ook oliemaatschappij BP vraagt sinds kort om meer aandacht voor klimaatneutrale oplossingen en specifiek voor waterstof.



Behalve multinationals die zich vanuit een gevestigde positie nu voorzichtig op de waterstofmarkt begeven, is er ook een aantal bedrijven dat zich specifiek richt op waterstof.⁹⁸ Dit zijn nu nog vaak nichespelers van beperkte omvang. Wel breidt het aantal bedrijven zich uit, blijken ze levensvatbaar, nemen ze in omvang toe en lijkt er toenemend vertrouwen te zijn in hun toekomst.⁹⁹

Voor de meeste bedrijven geldt dat grootschalig investeren in waterstof vraagt om 'diepe zakken', gevuld met de inkomsten uit 'mainstream'-producten. Ook is een lange adem nodig; het vertrouwen moet er zijn dat de investeringen in waterstof op den duur rendement zullen opleveren. En verder is overheidsinzet onmisbaar. Zonder stimulerende maatregelen zal de markt zich niet vanzelf ontwikkelen tot een pijler van de energietransitie.

4.3 Landen en regio's: van beleidsintenties tot concrete investeringen

De afgelopen jaren hebben vrijwel alle westerse landen een visie, strategie of plan op het gebied van waterstof gepresenteerd. In sommige landen zijn al daadwerkelijk besluiten genomen. Internationale koplopers op het gebied van waterstof zijn landen c.q. staten als Australië, China, Californië, Zuid-Korea, Japan en Duitsland.

⁹⁸ Voorbeelden van dergelijke bedrijven zijn Nikola, Ballard power systems, Powercell, Nel Hydrogen, McPhy.

⁹⁹ De explosieve koersstijgingen van waterstofgerelateerde aandelen lijken erop te duiden dat beleggers toekomst zien in deze bedrijven. Zie bijvoorbeeld: <https://www.lynx.nl/kennis/artikelen/beste-brandstofcel-waterstof-aandelen>

Potentiële waterstofproducenten: Midden-Oosten, Sahara, Australië

Landen met een grote (potentiële) beschikbaarheid van goedkope duurzame energie uit wind, zon of waterkracht zien mogelijkheden om een rol op zich te nemen als waterstofproducent en exporteur. Australië is daar een voorbeeld van.

Op dit moment is Australië internationaal de tweede exporteur van LNG, maar het land verwacht een waterstofexport te kunnen ontwikkelen die groter is dan de huidige LNG-export¹⁰⁰ (Commonwealth of Australia, 2018). De strategie is om voor 700% meer dan de eigen behoefte aan groene elektriciteit te gaan produceren en deze stroom om te zetten in voor export bestemde waterstof. Een belangrijke drijfveer achter de ambities zijn de snel dalende kosten van energie uit wind en zon en de verwachte kostendalingen voor elektrolyzers. Transport van waterstof over grote afstanden (vooral naar Japan, Zuid-Korea, China en Singapore) wordt vooralsnog gezien als een ingewikkelde opgave. De verwachting is dat dit de prijs van waterstof zal verdubbelen.

Saudi-Arabië, Marokko, Chili, Nieuw-Zeeland, Portugal en Spanje hebben plannen gepresenteerd voor de productie van groene waterstof op basis van uit zon en wind verkregen elektriciteit. Ook andere landen in het Midden-Oosten en het (sub)Sahara-gebied verkennen voorzichtig de mogelijkheden van waterstofproductie. De ontwikkelingen gaan hier echter langzaam, bij gebrek aan concrete (investerings)partners en vooruitzichten op een afzetmarkt. De aandacht is in deze landen toch nog vooral gericht op winning van fossiele energie en verdienvermogen op korte termijn.¹⁰¹

¹⁰⁰ Australië mikt op een export van 35 Mton waterstof, energetisch het equivalent van 84 Mton LNG.

¹⁰¹ Bron: gesprek met H. Dekker, Oman Oil Company, 28 april 2020.



Californië: actief in stimuleren mobiliteit op waterstof

De Amerikaanse staat Californië is een voorloper als het gaat om het opbouwen van een waterstofeconomie, met name in de sector mobiliteit. Door middel van een systeem van CO₂-credits stimuleert de overheid de industrie en energiebedrijven om klimaatneutrale waterstof te produceren, zowel voor de mobiliteitssector als om zelf te gebruiken. Het doel is om in samenwerking met de private sector te zorgen voor minimaal 5 miljoen *zero-emission vehicles* op de Californische wegen in 2030. Hiertoe worden de komende jaren tweehonderd waterstoftankstations gebouwd. De staat garandeert daarbij dat elektrisch opladen en waterstof tanken betaalbaar en toegankelijk zal zijn voor alle automobilisten.¹⁰²

Noordoost-Azië: Japan, Zuid-Korea en China

In Noordoost-Azië richten vooral Japan, Zuid-Korea en China zich op de ontwikkeling van een waterstofmarkt. Japan en Zuid-Korea hebben, net als Nederland en veel andere Noordwest-Europese landen, niet genoeg potentieel om zelf in hun duurzame energie te voorzien. Zij zien grootschalige import van waterstof als een mogelijkheid om hun economie klimaatneutraal te maken. Een rol voor waterstof wordt voorzien in de sectoren industrie, mobiliteit, elektriciteitsvoorziening en gebouwde omgeving. Bovendien maakt waterstof deel uit van de industriepolitiek van deze landen. China, dat eveneens deels afhankelijk is van import van energie, voorziet een toekomstige rol van waterstof in de industrie- en de

¹⁰² Zie <https://www.ca.gov/archive/gov39/2018/01/26/governor-brown-takes-action-to-increase-zero-emission-vehicles-fund-new-climate-investments/index.html>

openbaarvervoersector (met name busvervoer), ook om fijnstofuitstoot en luchtvervuiling tegen te gaan.

Japan verdient speciale aandacht. Dit land heeft een groot vertrouwen dat waterstof kan voorzien in de nationale klimaat- en energieopgaven en wil de eerste 'hydrogen society' ter wereld worden. Japan richt zich op het tot stand brengen van een volledig geïntegreerde waterstofeconomie. Waterstof moet in alle sectoren (industrie, mobiliteit, warmte, elektriciteit, lucht- en scheepvaart) een voorname rol gaan spelen. Er is hiertoe \$ 1,5 miljard aan onderzoeksbudget voor een periode van zes jaar vrijgemaakt (Nagashima, 2018). Om het bredere publiek bekend te maken met de mogelijkheden van waterstof is een complete zelfvoorzienende stad gebouwd die volledig op waterstof functioneert¹⁰³ en ook de Olympische Spelen van Tokio komen in het teken van waterstof te staan.

De kern van de Japanse strategie bestaat uit de realisatie van een volledige waterstofketen, van productie en import tot en met markttoepassingen. Het succes hangt af van de vraag of op termijn een marktprijs van \$ 17ct/m³ waterstof kan worden gerealiseerd, zodat waterstof kan concurreren met olie en LNG. Een tastbaar bewijs van Japans dadendrang is het eerste waterstoftransportschip ter wereld,¹⁰⁴ dat een belangrijke schakel vormt in de transportketen met Australië.

Het zal voor Japan nog wel een forse opgave worden om op korte termijn voldoende marktvraag naar waterstof te organiseren. Op dit moment zijn

¹⁰³ Zuid-Korea werkt eveneens aan drie van dergelijke voorbeeldsteden.

¹⁰⁴ Zie <https://www.nieuwsbladtransport.nl/scheepvaart/2020/01/02/eerste-transportschip-voor-waterstof-verlaat-droogdok/?gdpr=accept>



vrijwel alle waterstof- en brandstofcelprojecten nog financieel afhankelijk van overheidsgaranties.

Duitsland

Duitsland is na Japan en Zuid-Korea op dit ogenblik het concreetst in zijn toekomstplannen met waterstof. Het land beschouwt een transitie naar waterstof als een mogelijkheid om zijn grootschalige industrie- en transportsector klimaatneutraal te maken. De federale regering heeft een nationale waterstofstrategie opgesteld, met als hoofddoel de wereldwijde nummer 1 te worden in de waterstofindustrie (Bundesregierung, 2020). De regering heeft deze intentie kracht bijgezet door uit het Coronaherstelfonds van € 130 miljard voorlopig € 9 miljard te reserveren voor projecten gericht op een waterstofinfrastructuur (Van der Marel, 2020). Duitsland beschouwt, net als Japan en Korea, waterstof als een belangrijke economische groei-markt voor zijn eigen industrie en daarmee als bron van werkgelegenheid. Tot 2030 voorziet de regering een jaarlijkse nationale behoefte aan groene waterstof van circa 90 tot 110 TWh (324 tot 396 PJ). Omdat Duitsland niet beschikt over voldoende elektrolysecapaciteit, is import van waterstof (via pijpleidingen uit Noord Duitse havens, Rotterdam, Antwerpen en op termijn uit Italië en Marseille) een belangrijke pijler onder de strategie.

Kern van de Duitse waterstofstrategie is het verhogen van de CO₂-prijs voor fossiele brandstoffen in de sectoren mobiliteit en warmte, gecombineerd met een belastingvrijstelling voor de productie van groene waterstof. Waterstof wordt dan eerder concurrerend. De strategie is uitgewerkt in 38 concrete maatregelen. Voorbeelden van maatregelen zijn het bevorderen van de samenwerking tussen elektrolysebedrijven en gas- en

elektriciteitsnetbeheerders, het ontwikkelen van een waterstoftransportnet op basis van bestaande gaspijpleidingen, het ondersteunen van de industrie in de overstap naar waterstof, de inzet op offshore-windparken in combinatie met offshore-elektrolyse en het verplicht stellen van een percentage CO₂-vrije kerosine voor het binnenlands vliegverkeer. De strategie bekrachtigt verder eerder genomen beslissingen over het stimuleren van onderzoek op het gebied van waterstof en de realisatie van rond de 400 waterstoftankstations in 2025.

Overige landen in West-Europa

- België lijkt op Nederland als het gaat om waterstof. De petrochemische industrie in Antwerpen maakt net als de industrie in Nederland al grootschalig gebruik van waterstof. Ook ligt in België een van de uitgebreidste waterstofleidingennetwerken ter wereld. Er wordt op dit ogenblik een studie uitgevoerd naar grootschalige waterstof import per schip vanuit andere continenten. Een aantal grote spelers uit de havens van Antwerpen en Zeebrugge wil een grote rol spelen in de productie, het transport en de opslag van waterstof. Waterstof wordt gezien als een essentiële schakel in een CO₂-arm ecosysteem.¹⁰⁵
- In Noorwegen vormt afvang en opslag van CO₂ (CCS) een belangrijk onderdeel van de nationale strategie om de klimaatdoelstellingen te halen. Opslag van CO₂ in lege gasvelden op de Noordzee is in Noorwegen al sinds 1996 gaande en heeft zich bewezen als een betrouwbare methode. Noorwegen wil eenmalig 10% van zijn jaarlijkse gasbaten

¹⁰⁵ Bron: <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2019/11/21/primeur-in-belgie-zeven-toonaangevende-spelers-tekenen-samenwe>



steken in de ontwikkeling van CCS.¹⁰⁶ In potentie beschikt de Noordzee over een opslagcapaciteit van zo'n 130 Mton CO₂. De prijs van CCS is gemiddeld zo'n € 100 per ton, afhankelijk van de bron, het gebruik en de hoeveelheid benodigd transport. Voor de Nederlandse industrie is dit relevant. Er bestaan plannen om de CO₂ die bij de Magnum Centrale aan de Eemshaven is afgevangen te verschepen naar Noorwegen.¹⁰⁷

- In Frankrijk is mede naar aanleiding van de coronacrisis meer aandacht ontstaan voor de potentie van waterstof. Waterstof is volgens een groep industrieën de brandstof om het land weer uit de economische crisis te krijgen.¹⁰⁸ Gezamenlijk heeft deze groep (de Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible; AFHYPAC) een omvangrijk plan gepresenteerd om € 24 miljard te investeren in de transitie naar waterstof. Met dat geld moet het mogelijk zijn om mobiliteits- en industriële sectoren niet meer op fossiele brandstoffen te laten draaien, maar op waterstof. Ook moet er een landelijk dekkend tankstationnetwerk komen. Volgens de AFHYPAC moet het mogelijk zijn om in 2030 700.000 ton (zo goed als) groene waterstof te produceren – deels met elektrolyzers, deels met thermolyse uit biomassa. In hoeverre de staat betrokken is bij dit initiatief is onduidelijk, maar het signaal uit de industrie is helder.

¹⁰⁶ Bron: interview met N. Rokke in Technisch Weekblad, 4 juni 2019; <https://www.technischweekblad.nl/achtergrond/weg-met-klimaataboetes/item13334>

¹⁰⁷ Dit verschepen van CO₂ is nu nog juridisch lastig. Eerst moet een amendement op het 'Verdrag inzake de voorkoming van verontreiniging van de zee ten gevolge van het storten van afval en andere stoffen' (het London Protocol) door voldoende landen zijn geratificeerd. In de oorspronkelijke tekst wordt CO₂ als afval gezien en dat mag niet zomaar naar andere landen worden geëxporteerd.

¹⁰⁸ Zie <https://www.ttm.nl/materieel/waterstof/frankrijk-zet-vol-in-op-waterstof/128443>

- In Spanje heeft het ministerie voor Ecologische Transitie een 'Roadmap Waterstof' beschikbaar gesteld voor publieke consultatie.¹⁰⁹ Het doel is om de kansen van waterstoftechnologieën te verkennen, met name voor de Spaanse industrie. De roadmap bevat 57 maatregelen met doelstellingen voor 2030 en daarnaast een visie voor 2050. De toepassing van duurzame waterstof moet bijdragen aan het behalen van klimaatneutraliteit in 2050, het bereiken van een volledig hernieuwbaar elektriciteitssysteem en vermindering van de energieafhankelijkheid van het buitenland.
- In het Verenigd Koninkrijk heeft de Britse premier waterstof genoemd als de technologie waarin het Verenigd Koninkrijk leidend is en moet blijven in de wereld.¹¹⁰ Het Committee on Climate Change (2018), een evenknie van de Rli, heeft positief geadviseerd over waterstof en aanbevelingen gedaan om op grote schaal projecten op te zetten om meer ervaring op te doen (zie ook paragraaf 2.5 van dit deel 2). Ook netbeheerder National Grid voorziet een belangrijke rol voor waterstof als technologie om klimaatneutraal te worden, met grootschalige toepassing in (zware) mobiliteit, industrie en gebouwde omgeving.
- In Italië ten slotte, is de uitgangssituatie voor een deel vergelijkbaar met die van Nederland. Ook dit land heeft potentie voor de opwekking van hernieuwbare elektriciteit, er is een grootschalige industrie, een uitgebreid bestaand gasleidingennet en er zijn infrastructurele verbindingen met Noord-Afrika (via Sicilië). De nationale gasnetbeheerder SNAM heeft een studie verricht naar de potentie van waterstof.¹¹¹ In één van de

¹⁰⁹ Zie <https://www.handelmetspanje.com/nl/news/spanje-lanceert-roadmap-waterstof>

¹¹⁰ Zie <https://www.bbc.com/news/science-environment-53238512>

¹¹¹ Zie https://www.snam.it/en/hydrogen_challenge/potential_hydrogen_italy



scenario's zou waterstof 25% van de gehele energiebehoefte uitmaken en vooral in de sectoren mobiliteit, warmte en industrie een rol gaan spelen. Op korte termijn wordt gedacht aan het bijmengen van waterstof in het gasnet en het ontwikkelen van een grote pilot locatie op Sicilië. Daarnaast wordt waterstof gezien als flexibiliteitsoptie voor het elektriciteitsnetwerk. Verwacht wordt dat groene waterstof in prijs eerder concurrerend kan zijn met grijze waterstof dan in andere landen, en al vóór 2030.

4.4 EU: plannen voor vergroten productiecapaciteit en aanleg waterstofnetwerk

Green Deal en waterstofstrategie

Op 8 juli 2020 heeft de Europese Commissie een voorstel voor een EU-waterstofstrategie gepresenteerd, als onderdeel van de Green Deal (European Commission, 2020). Op diezelfde dag heeft de Commissie de EU-strategie voor energiesysteemintegratie vastgesteld, waarin waterstof een belangrijke component vormt.¹¹²

De voorgestelde waterstofstrategie van de Europese Commissie beschrijft hoe het potentieel van waterstof kan worden ontsloten door middel van investeringen, regulering, opbouw van de markt en onderzoek en innovatie. De Commissie benadrukt dat dit alleen lukt als de publieke en particuliere sectoren gecoördineerd maatregelen treffen op EU-niveau. Hoewel de

¹¹² Zie https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/nl/IP_20_1259

Commissie prioriteit legt bij hernieuwbare waterstof uit wind- en zonne-energie, wijst zij erop dat op de korte en middellange termijn ook andere vormen van CO₂-arme waterstof nodig zijn om de emissies snel terug te dringen en de ontwikkeling van een levensvatbare markt te ondersteunen.

De voorgestelde EU-waterstofstrategie gaat uit van een gefaseerde opbouw:

- van 2020 tot 2024: ondersteunen van de aanleg van elektrolyse-installaties met een capaciteit van ten minste 6 GW en produceren van één miljoen ton hernieuwbare waterstof;
- van 2025 tot 2030: integreren van waterstof in het Europese energiesysteem met ten minste 40 GW productiecapaciteit en produceren van 10 miljoen ton hernieuwbare waterstof in de EU;
- tussen 2030 en 2050: verder ontwikkelen van hernieuwbare-waterstoftechnologieën die op grote schaal kunnen worden toegepast in alle sectoren die moeilijk CO₂-arm te maken zijn.

Financiering van projecten en onderzoek

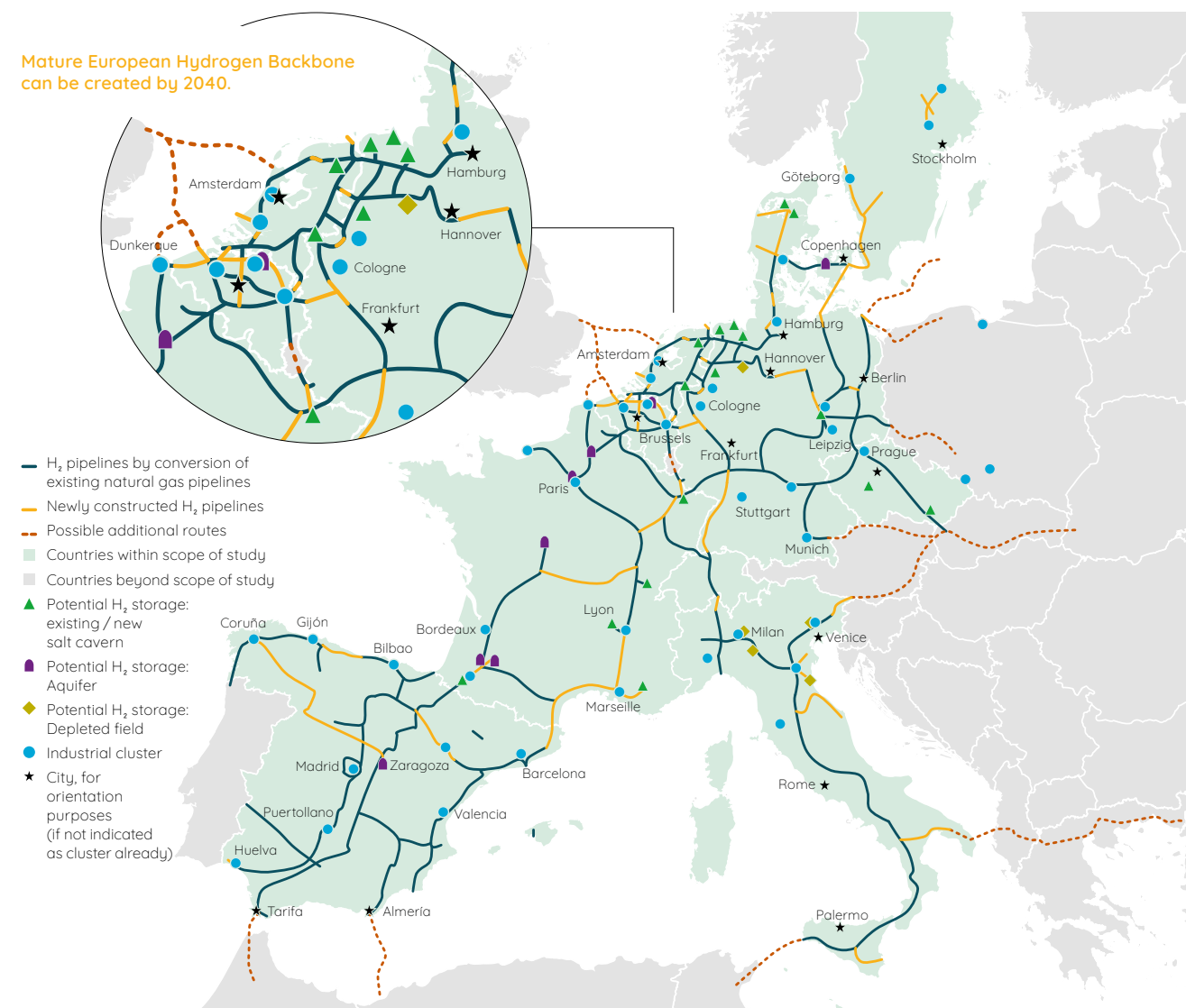
Via de Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH-JU) stimuleert de EU al sinds 2008 waterstofprojecten in de industrie. Onder de vleugels van de FCH-JU zoeken regio's en steden elkaar op. Dit heeft geleid tot de oprichting van de European Hydrogen Valleys Partnership bestaande uit 31 regio's uit dertien EU-lidstaten die zich inzetten op waterstof (peildatum september 2019). Noord-Nederland is één van de vier 'founding members'. Regionale overheden hebben zich gecommitteerd voor een gezamenlijke investering van € 1,8 miljard voor de periode 2018-2023.



Samenwerkende gasnetbeheerders: Europees waterstofnetwerk

In juli 2020 hebben elf Europese gastransportbedrijven, waaronder de Nederlandse Gasunie, een studie uit laten voeren naar de mogelijkheid om een Europabreed waterstofleidingennetwerk te ontwikkelen (Guidehouse, 2020); zie figuur 15.

Figuur 15: Europabreed waterstofleidingennetwerk per 2040



Bron: Guidehouse (2020). Enagás, Energinet, Fluxys Belgium, Gasunie, GRTgaz, NET4GAS, OGE, ONTRAS, Snam, Swedegas, Teréga: European Hydrogen Backbone, <https://gasforclimate2050.eu/ehb/>

Het rapport van Guidehouse werkt een programma uit in stappen van vijf jaar. Om in 2040 23.000 km waterstofleiding te hebben liggen, inclusief verbindingen met Noord-Afrika, zou in de komende vijf jaar een begin moeten worden gemaakt met het aanpassen van bestaande vrijgekomen leidingen. Zo kan er in 2030 6.800 km waterstofleiding liggen. Op dat moment zou een waterstoftransportnetwerk dat Nederland verbindt met Noord-Duitsland, het Ruhrgebied, België en Noord-Frankrijk al gereed zijn. Voor 2040 voorziet Guidehouse een netwerk dat voor 75% bestaat uit aangepaste bestaande aardgasleidingen en voor 25% uit nieuwe waterstofleidingen.

De totale kosten van een groot deel van het Europese netwerk zouden € 27 tot 64 miljard bedragen. Kosten van opslag zijn niet in de berekening meegenomen. Per 1.000 km afstand zouden de kosten transportkosten in een gemiddeld scenario 13 eurocent per kg waterstof bedragen.¹¹³

4.5 Nederland in het internationale speelveld

Nederland heeft in het internationale speelveld rond waterstof een gunstige positie (zie ook hoofdstuk 3). De Nederlandse overheid is actief als het gaat om deelname aan internationale bijeenkomsten, samenwerkingsverbanden en bilaterale overeenkomsten. De instelling van een waterstofgezant, zoals

¹¹³ Zie <https://www.technischweekblad.nl/nieuws/europees-waterstofnetwerk-goedkoper-dan-gedacht>

die tot september 2020 ingevuld is geweest door Noé van Hulst, is hierin behulpzaam.¹¹⁴

Ook het Nederlandse bedrijfsleven is internationaal stevig vertegenwoordigd. Het gaat dan niet alleen om de traditionele industriële ondernemingen die van oudsher grote hoeveelheden (grijze) waterstof produceren en afnemen, maar ook om veel kleinere innovatieve bedrijven die willen inzetten op de nieuwe mogelijkheden die duurzame waterstof biedt.¹¹⁵

Binnen Europa participeert Nederland onder meer in het zogeheten Pentalateraal Energieoverleg,¹¹⁶ dat in de context van de voorzieningszekerheid van elektriciteit ook de mogelijkheden van waterstof bespreekt. Verder is er vanuit de provincie Groningen contact met de Duitse deelstaten Nedersaksen en Hamburg, die vergaande plannen hebben voor waterstof: zij willen de waterstofregio van Europa worden. Groningen heeft zich bij dit initiatief aangesloten en wil nauw gaan samenwerken.¹¹⁷ Op nationaal niveau wordt gesproken met de deelstaat Noordrijn-Westfalen. Tegelijkertijd werkt Nederland samen met Portugal aan plannen om een waterstoftransportketen op te zetten. De bedoeling is om groene waterstof in Portugal te produceren en deze vervolgens naar Nederland te vervoeren, eerst per schip, later per pijpleiding. Daarnaast zijn er initiatieven om een overleg op te starten over energieopwekking tussen landen rond de Noordzee.

¹¹⁴ Zie <https://podcastluisteren.nl/ep/Studio-Energie-Afl-67-Waterstofgezant-Noe-van-Hulst-over-leidende-rol-Nederland-in-wereldwijde-waterstofeconomie>

¹¹⁵ Op de Hydrogen Ministerial in Japan in september 2019 was Nederland met 600 bedrijven vertegenwoordigd, wat na Japan veruit de grootste afvaardiging was.

¹¹⁶ Overleg van de Beneluxlanden aangevuld met Duitsland, Frankrijk, Oostenrijk en Zwitserland.

¹¹⁷ Zie <https://www.groningerondernemerscourant.nl/nieuws/groningen-en-hamburg-samen-europese-topregio-op-gebied-van-waterstof>

4.6 Geopolitieke ontwikkelingen

Nederland is net als andere landen in West-Europa voor een groot deel van zijn energie- en grondstoffenvoorziening afhankelijk van niet-Westerse landen en regio's zoals Rusland, het Midden-Oosten en delen van Afrika.¹¹⁸ Geopolitieke spanningen, zoals met Rusland, hebben invloed op de keuze waar Nederland zijn olie vandaan haalt. De onderliggende vraag is daarbij: met welk land wil Nederland wel of liever niet een afhankelijkheidsrelatie? Dat wil overigens niet zeggen dat er altijd iets te kiezen is.

Nieuwe mondiale energiestromen

De energietransitie zal de mondiale kaart van energiestromen grondig veranderen. Landen die nu energie importeren, kunnen in de nieuwe situatie zelfvoorzienend zijn. Landen die gewend zijn energie te exporteren, kunnen afhankelijk worden van import. Er zullen nieuwe afhankelijkheden en relaties ontstaan tussen landen en tussen regio's. De ontwikkeling van de waterstoftransportketen van Australië naar Japan en andere Oost-Aziatische landen is hiervan een voorbeeld.

Op dit moment tekenen zich mondiaal een aantal potentiële transnationale waterstofroutes¹¹⁹ af die van belang zijn in de geopolitieke verhoudingen:

¹¹⁸ Nederland is voor zijn olieconsumptie voor 95% afhankelijk van import, in afnemende hoeveelheden vooral uit Rusland, Noorwegen, het Verenigd Koninkrijk, Nigeria en Saoedi-Arabië. Ook voor gas is Nederland met de afbouw van het Groningengas afhankelijk geworden van import. Het gas komt vooral uit Noorwegen, Rusland en het Verenigd Koninkrijk (Clingendael, 2015).

¹¹⁹ Behalve waterstofhandelsketens zullen er ook nieuwe handelsketens voor biomassa ontstaan.



- Australië – Oost-Azië (Japan)
- Midden-Oosten – Oost-Azië (Japan)
- Midden-Oosten – Sahara – Noordwest-Europa

Een waterstofroute waar binnen Europa al enige tijd op wordt gezinspeeld en die nu langzaam maar zeker realiteitswaarde begint te krijgen, betreft de ‘gele’ waterstofroute vanuit de Sahara naar Europa. In de Sahara wordt duurzame energie opgewekt in zonnecentrales, die vervolgens (onder meer) in de vorm van waterstof naar Europa kan worden getransporteerd.

Geopolitieke implicaties

Het ontstaan van waterstofroutes zal wereldwijd consequenties hebben in de vorm van nieuwe internationale handelsrelaties en industriële samenwerking. Dit is de conclusie van een studie naar de geopolitieke implicaties van de Japanse waterstofstrategie (Nagashima, 2018). Zo hebben Japan en zijn industriële belanghebbenden al strategische samenwerking gezocht met Australië, Brunei, Noorwegen en Saudi-Arabië. Japan is niet in staat om alle waterstof die het nodig heeft zelf op te wekken en heeft daarom een strategische alliantie gesloten met Australië, dat waterstof per schip wil vervoeren naar Japan. Daarnaast is technologie voor afvang en opslag van CO₂ (CCS) een centrale component in de Japanse strategie, hoewel de ontwikkeling daarvan in Japan nog in de kinderschoenen staat. Een nieuwe alliantie met Noorwegen is hieruit te verklaren. Omdat de Japanse overheid voor de langere termijn een volledig CO₂-vrije waterstofeconomie ambiëert, ligt het in de verwachting dat ook landen met grote potentie voor de

opwekking van hernieuwbare energie belangrijke partners zullen worden voor Japan.

Europa zal in de toekomst eveneens voor een deel van zijn energie- en grondstoffenvoorziening afhankelijk zijn van import van onder meer waterstof. De potentie van regio's als het Midden-Oosten en de Sahara om goedkoop hernieuwbare energie op te wekken zal leiden tot nieuwe en herziene relaties. Op termijn zal een open handel in waterstof ontstaan. Dat zou verstrekkende gevolgen kunnen hebben. Zo is het niet ondenkbaar dat vanwege de lagere kosten van grondstoffen en energie, een deel van de Europese industrie zal overwegen om zich te vestigen in regio's buiten Europa met een surplus aan hernieuwbare energie.

Wereldbalans

De consequenties van de energietransitie vallen samen met een verschuivende mondiale machtsbalans. Van een situatie met één dominante macht is een nieuwe balans aan het ontstaan waarin twee supermachten, de Verenigde Staten en China, met elkaar in concurrentie zijn. Als er op termijn een nieuw evenwicht zal zijn ontstaan, kunnen nieuwe internationale normen en waarden dominant worden, die de westerse waarden deels verdringen.

De vraag is hoe verschillende geografische regio's en machtsblokken zoals de EU, het Midden-Oosten en Rusland zich tot de nieuwe wereldorde gaan verhouden. De EU heeft op dit moment nog geen duidelijk antwoord



op het Chinese staatskapitalisme en de nieuwe koers van de VS. In het Midden-Oosten en de Noord-Afrikaanse landen heeft de Arabische Lente niet geresulteerd in de gehoopte democratie en liberalisering, maar juist in consolidatie van autocratische systemen, oorlogen, contrarevoluties en spanning. Rusland onttrekt zich tegelijkertijd steeds meer aan de internationale normen (Colijn, 2019). Mochten de spanningen tussen China en de VS en/of tussen Rusland en EU/VS toenemen, dan zal dit effect hebben op de wereldeconomie (Bergeijk *et al.*, 2015).

Blijvende en mogelijk toenemende instabiliteit in regio's die voor de EU belangrijk zijn, zoals Rusland, het Midden-Oosten en Noord-Afrika, heeft effecten op de grondstoffen- en energievoorziening. Binnen deze context is het voor Europa en dus ook voor Nederland van groot belang om strategisch af te wegen onder welke condities en met welke zekerheden nieuwe afhankelijkheidsrelaties men zal aangaan op het vlak van energie en grondstoffen.

Coronacrisis legt kwetsbaarheid wereldorde bloot

De COVID-19-pandemie lijkt vooralsnog drie tendensen op gang te hebben gebracht die indirect zijn gerelateerd aan het waterstofdossier:

- De rol van de overheid is versterkt. In tijden van oorlog en crisis ligt overheidsingrijpen meer voor de hand. Dat brengt ook overheidsingrijpen in de energiesystemen en -markten tijdens en na de crisis wellicht dichterbij.
- De kwetsbaarheid van lange ketens is zichtbaar geworden. Het feit dat beademingsapparatuur, mondkapjes en medicijnen voor een deel buiten

onze invloedssfeer in mondiale ketens worden geproduceerd, bleek in maart/april 2020 tot problemen te leiden waar de overheid weinig grip op had. Hoe verhoudt zich dat tot een toekomstige situatie waarin energie, waaronder waterstof van ver komt? Het lijkt erop dat een voorzichtige beweging op gang is gebracht naar meer autarkie. Voor waterstof zou dat concreet kunnen betekenen: de keuze om een deel op de Noordzee en in Europa te produceren en niet al te zeer afhankelijk te worden van import uit verre landen.

- Er wordt op grote schaal staatssteun ingezet om omzet- en banenverlies te dekken. Wereldwijd ging het in maart 2020 om \$ 2.100 miljard (IIF, 2020). Het is onduidelijk of en hoe de enorme staatschulden in Europa gaan worden afgelost. Dit kan op termijn problemen opleveren voor de doorgaans kapitaalintensieve duurzame energietechnologie en -infrastructuur.

Bij elkaar maken de drie tendensen de kwetsbaarheid inzichtelijk van het huidige westerse systeem, waarin de overheid zich beperkt tot een marktregulerende rol en vertrouwt op soepele mondiale handelsketens.

Twee verhaallijnen over geopolitieke ontwikkelingen en de invloed op energie- en klimaatbeleid

Wanneer de hierboven geschetste ontwikkelingen worden samengenomen, ontstaan verschillende mogelijke toekomst. In een essay van het Clingendael International Energy Programme (CIEP, 2019a) zijn twee verhaallijnen uitgewerkt die de mogelijke implicaties weergeven voor het Nederlandse energie- en klimaatbeleid. Het betreft twee uitersten, waarbij



scenario 2 een positief beeld geeft en scenario 1 een moeizamere toekomst schetst:

- Scenario 1: Door een afname van internationale handel en samenwerking wordt nationale voorzieningszekerheid en bescherming van de eigen economie belangrijker. Klimaatbeleid schuift naar de achtergrond.
- Scenario 2: Door toegenomen internationale samenwerking wordt het mogelijk om bindende afspraken te maken over het beperken van de CO₂-uitstoot. Hierdoor ontstaan de benodigde randvoorwaarden voor de ontwikkeling van duurzame energieproductie op eigen bodem en een verduurzaming van de industrie.

In onderstaand schema zijn deze beide scenario's nader ingekleurd (dit betreft een verkorte versie; zie voor de oorspronkelijke verhaallijnen CIEP, 2019a).

Terugkijkend vanuit 2032: hoe heeft het Nederlandse klimaatbeleid uitgekapt en hoe is de energietransitie verlopen?

Scenario 1: afname internationale handel	Scenario 2: toename internationale samenwerking
<i>Resultaten van nationaal klimaatakkoord 2019</i>	
Sinds het nationale klimaatakkoord van 2019 is er weinig gebeurd. Er is een grote internationale crisis ontstaan, met gevolgen voor internationale handel en investeringen. De open Nederlandse economie is daardoor flink geraakt en geopolitieke relaties zijn onder spanning komen te staan, onder meer met gevolgen voor olie- en gasleveranties.	Sinds het klimaatakkoord van 2019 is er veel gebeurd. Er is een CO ₂ -heffing ingevoerd die de uitstoot significant heeft verminderd. Verschillende projecten over opslag van CO ₂ zijn gerealiseerd met subsidie vanuit het <i>Projects of Common Interest</i> -programma van de EU. Twee grote waterstoffabrieken in Rotterdam en de Eemshaven en drie grote elektrolyseprojecten zijn gaan draaien met SDE++-financiering en een investeringsbijdrage uit het nieuwe EU-structuurfonds. Dit heeft het mogelijk gemaakt om ook in de gebouwde omgeving en het vervoer stappen te zetten in aanvulling op elektrificatie.
<i>Gevolgen van handelsoorlog VS-China</i>	
De VS en China hebben het afgelopen decennium hun handelsconflict niet weten op te lossen. De internationale economie heeft nu al vele jaren last van handelsbeperkingen en de druk om voor één van beide kampen te kiezen. De geopolitieke onrust leidt tot toenemende cyberaanvallen op het energiesysteem. De kwetsbaarheid is toegenomen en heeft geleid tot een herbezinning op het <i>internet of things</i> en tot erkenning van het belang om vitale systemen goed te beschermen.	De handelsoorlog tussen de VS en China sleepte zich het afgelopen decennium voort. Dit was de reden waarom de olieprijs in de loop van de jaren '20 nog verder wegzakten. De zorgen over de periode na 2025 namen toe. De investeringen in nieuwe olie- en aardgasvelden liepen terug, maar ook die in zonne- en windenergie. Het is inmiddels duidelijk dat er een andere investeringsagenda moet komen om te zorgen dat de investeringen in een nieuw energiesysteem doorgaan. Samenwerking en aansluiting met de buurlanden wordt belangrijker.



Scenario 1: afname internationale handel	Scenario 2: toename internationale samenwerking
<i>Ontwikkelingen in internationale samenwerking</i>	
Binnen de EU heeft de onmacht om economische en monetaire beleidsinstrumenten werkbaar te krijgen, de afgelopen jaren geleid tot verdere verbrokkeling van samenlevingen en toenemend nationalisme. De EU is uiteindelijk niet bestand gebleken tegen de woeste geopolitieke en economische krachten die werden losgemaakt.	De VS trad uiteindelijk toch niet uit het klimaatverdrag van Parijs. Dat was een belangrijk signaal aan de wereld. Het betekende ook dat een aantal grieven van de VS over de afspraken opnieuw moesten worden geagendeerd. Er moest een transparant administratiesysteem komen voor de uitstoot van CO ₂ . Sinds de nieuwe handelsregels zijn vastgelegd, zijn alle landen gebonden aan het gebruiken van energie met de kleinste CO ₂ -voetafdruk. Terugdringen van de uitstoot door op grotere schaal CCUS toe te passen moet zorgen voor deelname van zo veel mogelijk landen. Een belangrijke ontwikkeling die heeft geleid tot steeds meer steun voor de plannen van de VS was dat zowel in Japan, Australië alsook de VS de oplossingsrichtingen voor een CO ₂ -arme economie uiteindelijk steeds meer naar elkaar toe zijn gegroeid.
<i>Veranderingen in energiesysteem</i>	
Na 2023 veranderde in Nederland de drijfveer voor de grote verandering in het energiesysteem. Centraal stond niet langer het klimaatprobleem maar veeleer de wens om zoveel mogelijk lokale energieproductie te realiseren, om zo voorzieningszekerheid te organiseren en de Nederlandse economie te beschermen tegen grote fluctuaties in energieprijzen en importstromen.	Sinds enige tijd komen de plannen voor de energietransitie in Nederland in een ander daglicht te staan. Het bouwen van een nieuwe energieprovincie op de Noordzee en het feit dat waterstof met diverse energiedragers en technieken kan worden gemaakt, draagt niet alleen bij aan reductie van de CO ₂ -uitstoot, maar ook aan het verminderen van de importafhankelijkheid. De discussie over de te volgen strategie en de stap-voor-stap-aanpak van de transitie wint aan publiek draagvlak door goede communicatie en discussie. Klimaat- en voorzieningszekerheid komen samen in een agenda die ook meer aanhang krijgt in de EU en daarbuiten.

Scenario 1: afname internationale handel	Scenario 2: toename internationale samenwerking
<i>Rol van waterstof in economie</i>	
De aanleg van grote Nederlandse windparken op de Noordzee is na 2025 versneld, doordat als gevolg van geopolitieke en geoeconomische ontwikkelingen de toegang tot de internationale energiemarkten onzekerder werd en Nederland vol ging inzetten op zo veel mogelijk binnenlands voortgebrachte energie. Zowel de productie van groene als blauwe waterstof werd gestimuleerd. Het Nederlandse energiesysteem beschikte daardoor over zowel een flinke elektriciteitsproductie als een industrieel voortgebrachte energiedrager en grondstof. De Nederlandse industrie is een belangrijke pion in het welslagen van deze strategie geweest, omdat zij in eerste instantie als spons fungeerde voor de aanlanding van grote hoeveelheden windenergie en tegelijkertijd de conversie in waterstof verder ontwikkelde.	De economische recessie van begin jaren '20 zorgde voor veel economische problemen. Daardoor moesten investeringen in windparken op zee, waterstofproductie, restwarmte- en geothermieprojecten vooral worden aangezwengeld door de overheid. Inmiddels is waterstof als energiedrager net zo ingeburgerd als aardgas dat vroeger was. Samen met stroom vormt waterstof nu de ruggengraat van ons energiesysteem. Integraal energiemanagement zorgt ervoor dat iedere Nederlander een afgewogen energiebudget krijgt, grotendeels gebaseerd op binnenlandse productie en aangevuld met importen uit de Noordzeelanden, die samen een energiegemeenschap vormen.

De twee uiteenlopende (hier verkort weergegeven) verhaallijnen laten zien dat de waarde van het opbouwen van een energiesysteem dat (mede) op binnenlandse bronnen is gestoeld, in beide scenario's groot is. In beide omstandigheden draagt de nationale productie bij aan de beschikbaarheid van energie en ook aan het innovatieve vermogen van de economie. De slotsom voor Nederland is dan ook dat de keuzes tot 2030 op het gebied van energietransitie en nieuwe energie-infrastructuren solide kunnen zijn in beide scenario's, om verschillende redenen.



Er zijn nog meer scenario's te bedenken. Denkbaar is bijvoorbeeld een verhaallijn waarin de wereld voortmoddert zonder dat het tot een radicale wijziging in de internationale verhoudingen komt. Dat zou wellicht desastreuzer zijn voor het Nederlandse energie- en klimaatbeleid dan de hier geschetste toekomstbeelden. Naarmate de onzekerheid voortduurt en de uitvoering van de benodigde transitie vertraagt of zelfs doet stagneren, wordt de handelingsruimte na 2030 immers kleiner en korter. Bovendien zal langdurige onzekerheid over de energietransitie de industrie hinderen en leiden tot een verslechtering van de Nederlandse concurrentiepositie.

4.7 Samenvattend beeld

Wereldwijd zijn regeringen én bedrijfsleven volop bezig met het uitwerken en implementeren van strategieën voor het gebruik van waterstof. De een is al verder dan de ander; in Noordwest-Europa is Duitsland de koploper. Binnen de EU wordt gewerkt aan concrete plannen voor een Europabreed waterstofleidingennetwerk, inclusief verbindingen met Noord-Afrika. Als op termijn waterstof steeds belangrijker wordt en de energiestromen in de wereld anders gaan lopen, gaat dat ook geopolitieke gevolgen hebben. Het zal impact hebben op de toch al verschuivende machtsverhoudingen in de wereld. Hoe dat precies gaat uitpakken, is op dit moment nog niet te voorzien. Duidelijk is wel dat in de nieuwe situatie de energieafhankelijkheid van Europa – en dus ook van Nederland – zal veranderen. Toch zal ook in de toekomst import van energie en grondstoffen aan de orde blijven, ook voor Nederland. Ons land kan immers niet op eigen kracht voorzien in alle duurzaam opgewekte stroom die nodig zal zijn voor

het produceren van groene waterstof. Binnen de context van een veranderende wereld is het van belang om strategisch af te wegen onder welke condities en met welke zekerheden nieuwe afhankelijkheidsrelaties kunnen worden aangegaan op het vlak van energie en grondstoffen. Welke balans tussen eigen productie en import vindt Nederland aanvaardbaar? Uit welke landen en langs welke routes gaat Nederland zijn duurzame elektriciteit en grondstoffen betrekken? Welke strategische allianties moet ons land daarbij aangaan? Deze en andere vragen zullen aan de orde komen en het is cruciaal om daarin als overheid weloverwogen keuzes te maken.





5 VEILIGHEID VAN WATERSTOF

De toepassing van waterstof breidt zich in de toekomst uit van grootschalig industrieel gebruik naar vele kleinschalige toepassingen in het publieke domein. Wat betekent dit voor veiligheid? Die vraag is relevant, want waterstof gedraagt zich anders dan aardgas. De bestaande wet- en regelgeving houdt daarmee nog geen rekening. Veel vragen over de veiligheid van waterstoffoepassingen zijn ook nog niet onderzocht. Ontwerpen voor en standaardisering van waterstoffoepassingen zullen de komende vijf tot tien jaar worden ontwikkeld, maar op dit moment is het kennisniveau rond specifieke veiligheidsissues rond waterstof nog laag. Om te komen tot een standaardisering, regels en veiligheidseisen is, kortom, nog een lange weg te gaan.

5.1 Verschillen tussen waterstof en aardgas

Waterstof is een ander gas dan het bekende aardgas. Zo heeft waterstof in vergelijking met aardgas een lagere ontstekingstemperatuur, ruimere explosiegrenzen en een hogere stijgkracht. Bij verbranding van waterstof is de vlam slecht tot niet zichtbaar en ligt de verbrandingssnelheid hoger dan bij aardgas. Daarnaast is waterstof net als aardgas van zichzelf niet ruikbaar.

Voor een veilige toepassing van waterstof in het publieke domein moet rekening worden gehouden met deze eigenschappen.

Kenmerken van waterstof

- Waterstof is niet waar te nemen met onze zintuigen.
- Waterstof stijgt snel op (voordeel in de open lucht, nadeel in gesloten ruimtes).
- Waterstof heeft een grote ontvlambaarheidsrange.
- Waterstof heeft een lage ontstekingsenergie.
- Waterstof heeft een lage zelfontbrandingstemperatuur.
- Waterstof heeft een hoge energiedichtheid.

Als het om veiligheid gaat heeft waterstof overigens ook voordelen ten opzichte van aardgas, bijvoorbeeld dat er bij (slechte) verbranding geen koolmonoxide vrij kan komen (ieder jaar komen in Nederland tien personen om het leven door koolmonoxide vergiftiging).

5.2 Toenemend gebruik van waterstof in publieke domein

Waterstof wordt al decennialang grootschalig gebruikt in de raffinage en chemische industrie. In de industrie zijn standaarden en werkwijzen ontwikkeld die ervoor zorgen dat er veilig met waterstof kan worden gewerkt.

Het is onder meer vanwege deze bewezen industriële praktijk dat soms gemakkelijk wordt gedacht over de potentiële gevaren van werken met

waterstof. Nils Rosmuller¹²⁰ van het Instituut voor Fysieke Veiligheid wijst erop dat industriële toepassing van waterstof niet gelijk mag worden gesteld aan de toepassing van waterstof in het publieke domein. Ten eerste biedt de ervaring die in de industrie is opgebouwd met waterstof geen garantie in het publieke domein. In het publieke domein is immers geen sprake van eenzelfde veiligheidscultuur als in de industrie. Ten tweede kan bij schaalverkleining van grote industriële toepassingen naar kleinschalige toepassing risico-onderschatting optreden. Als het gebruik van waterstof in het dagelijks leven op een gegeven moment als gewoon wordt ervaren, zullen veel mensen ervan uitgaan dat het 'dus wel veilig zal zijn.'

Taken rond de beheersing van de veiligheidsrisico's van waterstof enerzijds en incidentenbestrijding anderzijds zullen binnen het publieke domein door andere spelers worden vervuld dan binnen een industrieel complex. Risicobeheersing betreft het voorkomen van incidenten. Wetgeving, normen en onderwijs spelen daar een rol. In dat verband is er een belangrijke rol voor overheden, branche-organisaties, netbeheerders, de installatiebranche en kennisinstituten. Bij incidentbestrijding gaat het vooral om spelers als veiligheidsregio's die de hulpdiensten organiseren en coördineren (brandweer en GHOR: Geneeskundige Hulpverleningsorganisatie in de Regio).

¹²⁰ Zie <https://www.ifv.nl/kennisplein/transportveiligheid-tunnels/nieuws/blog-nils-rosmuller-waterstof-tot-nadenken>



De meeste van deze belanghebbenden staan pas aan het begin van hun leercurve als het gaat om de veiligheidsrisico's van waterstof en het omgaan met waterstof gerelateerde incidenten en hoe deze te beheersen.

Zoals het nu gesteld is met de kennishuishouding rond veiligheid van waterstof zal de leercurve voornamelijk proefondervindelijk plaatsvinden. Dit zou tot onverantwoorde risico's kunnen leiden voor medewerkers van hulpdiensten, installateurs en gebruikers. Fouten in ontwerp, toepassing en installatie van waterstoftechniek als gevolg van gebrek aan kennis, worden dan bewust en onbewust als het ware afgewenteld op hulpdiensten. Er is dan sprake van een 'repressieve' aanpak van risico's, aan de achterkant van het proces.

Het is van belang om permanent te investeren in het vergroten van bewustwording bij de uitvoering van projecten en pilots, zowel als het gaat om risicobeheersing als incidentenbestrijding. Dit betekent onder meer inzet op kennisopbouw rond veilig gebruik van waterstof in het publieke domein. Op basis van verkregen kennis kan veiligheid dan worden ingebouwd aan de voorkant van het proces, in het design en de aanleg van waterstoftoepassingen.

5.3 Vragen rond veiligheid van waterstoftoepassingen

Wat gebeurt er als waterstof ontsnapt uit leidingen binnenshuis? Bij welke temperaturen ontploft een waterstoftank in een auto? Aan welke gecombineerde veiligheidseisen dient een *multifuel* tankstation te voldoen? Hoe kan de brandweer een waterstofbrandhaard blussen? Onder welke

omstandigheden kunnen veiligheidsdiensten veilig werken bij een probleem met waterstof? Kan een klusjesman mijn leidingen geschikt maken voor waterstof? Kan ik waterstof opslaan in mijn achtertuin of boerenerf?

Dit zijn zomaar enkele voor de hand liggende vragen waarmee particulieren, boeren, brandweer, ambulance, politie, veiligheidsregio's, milieudiensten en installateurs kunnen worden geconfronteerd, zeker wanneer het aantal toepassingen van waterstof in het publieke domein zich uitbreidt. Op dit moment zijn dergelijke toepassingen nog beperkt. Het aantal waterstofauto's is gering, slechts een paar woonwijken zijn of worden aangesloten op waterstof en het omzetten van overtollige stroom in waterstof voor eigen gebruik verkeert nog in de experimentele fase. Waterstof zal echter in de toekomst zijn toepassing in het publieke domein gaan krijgen. Het zal een normaal begrip worden in onze samenleving, vergelijkbaar met de bekendheid van bijvoorbeeld elektrische auto's nu. Tegen die tijd is het wenselijk dat onder meer bovenstaande vragen eenvoudig en afdoende kunnen worden beantwoord.

Dat is geenszins vanzelfsprekend, ook niet over een aantal jaar. In de loop van de tijd zullen er wel voorlopige antwoorden kunnen worden gegeven, op basis van proefondervindelijk opgebouwde kennis en op basis van (ook negatieve) ervaringen. Er zullen werkwijzen ontstaan die veilig worden geacht. Maar sluitende antwoorden op veiligheidsvragen, die zowel theoretisch als empirisch zijn onderbouwd, vereisen een mate van kennis die verder gaat dan al doende opgebouwde ervaring. Ze vragen om kennis die



is gebaseerd op testen en proeven in een gecontroleerde omgeving. Hoe sneller dergelijke kennis voorhanden is, hoe meer deze kennis kan worden benut bij het ontwerp en de productie van waterstoftoepassingen.

Een volgende stap is dat de bewezen kennis wordt vertaald in technische richtlijnen, principes en regels. Hoe noodzakelijk die zijn bewijst een incident in Noorwegen uit 2019. Ondanks goede voorzorgen kon zich toch waterstofgas ophopen in een tankstation, doordat hogedrukkleppen niet volledig betrouwbaar bleken te zijn (zie kader).

Ontploffing waterstoftankstation Noorwegen 2019

Op 10 juni 2019 ontplofte in het Noorse Sandvika/Kjörbo een waterstoftankstation. Er waren twee lichtgewonden. Het station werd stilgelegd en er werd een onderzoek ingesteld naar de oorzaak. Samen met producent NEL heeft onderzoeksbureau Gexcon vastgesteld dat een verkeerd aangedraaide bout in een van de waterstoftanks binnen een hogedruk opslageenheid, heeft geleid tot lekkage en vervolgens tot ophoping van waterstof. Onduidelijk is wat de ontstekingsbron is geweest.

Toyota en Honda hebben als onmiddellijke reactie op de ontploffing de productie van brandstofcelauto's stilgezet en ook zijn direct alle waterstoftankstations in Noorwegen gesloten totdat er meer bekend was over de oorzaak. Dit geeft aan hoezeer incidenten het imago van waterstof kunnen bepalen.

Als reactie is NEL gestart met een nieuw testschema voor hogedruk eenheden en een programma gestart gericht op nieuwe procedures voor installatie, testen en documentatie.

5.4 Initiatieven gericht op veiligheid van waterstoftoepassing

De afgelopen twee jaar zijn vanuit verschillende kanten initiatieven ontstaan die zich specifiek richten op veiligheid rond de toepassing van waterstof.

Het gaat om initiatieven van:

1. de interdepartementale werkgroep veiligheid waterstof;
2. de Community of Practice Waterstof;¹²¹
3. het Waterstof Veiligheid Innovatie Programma.

Ad 1. Vanuit de rijksoverheid is eind 2019 een interdepartementale werkgroep opgericht: WIGO – Waterstof in de gebouwde omgeving. De betrokken departementen zijn onder meer: Economische Zaken en Klimaat (EZK), Infrastructuur en Waterstaat (IenW), Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (BZK) en Justitie en Veiligheid (JenV).

Ad 2. In 2018 is de 'Community of Practice Waterstof' opgericht. Deze staat onder leiding van het Instituut voor Fysieke Veiligheid en is in augustus 2018 voor het eerst bijeengekomen. Het doel van de community is om kennis en ervaringen te delen over waterstofveiligheid. De concrete aanleiding daarvoor was de bouw van een nieuwe waterstofwijk (Nystad-Oost) in Hoogeveen. Dat leidde bij de Veiligheidsregio Drenthe, als adviseur bij de vergunningverlening, tot allerlei vragen op het gebied van waterstof en veiligheid. Veel vragen bleken niet te kunnen worden beantwoord.¹²²

¹²¹ Dit samenwerkingsverband bestaat uit brandweerspecialisten, lectoren transportveiligheid en brandweerkunde van het Instituut Fysieke Veiligheid, specialisten uit het bedrijfsleven en overheden. Zie <https://www.ifv.nl/nieuws/Paginas/Waterstof-in-de-bewoonde-wereld.aspx>

¹²² Bron: gesprek met N. Rosmuller en R. Weever van het Instituut voor Fysieke Veiligheid.

Ad 3. Het Waterstof Veiligheid Innovatie Programma ten slotte, is een initiatief van het H2 Platform en het Nederlandse normeringsinstituut NEN. NEN verzorgt onder de vlag van het H2 Platform de coördinatie van het programma.

5.5 Bestaande wet- en regelgeving

Op dit moment geldt de wet- en regelgeving voor aardgas voor de toepassing van waterstof in thuissituaties. Onduidelijk is of deze afdoende is voor een veilige toepassing en risicobeheersing van waterstof. De bestaande normeringen en protocollen voor het publieke domein houden nog geen rekening met waterstof. In internationaal verband wordt door normcommissie 'CV-ketels en warmtapwaterbereiding' gewerkt aan het opstellen van regels voor verbrandingstoestellen op waterstof.

In een studie naar de mogelijkheid om waterstof te distribueren via regionale netbeheerders heeft test- en certificatie-instelling Kiwa aandacht geschonken aan het onderwerp veiligheid (Kiwa, 2018). Kiwa adviseerde herziening van de normen, werkwijzen, instructies en opleidingen voor monteurs en andere deskundigen die voor gas zijn ontwikkeld, zodra wordt overgestapt op waterstof. De specifieke eigenschappen van waterstof vragen volgens Kiwa om een kritische beoordeling om na de overstap minimaal hetzelfde niveau van veiligheid te kunnen handhaven.

Er is op dit moment nog onvoldoende praktijkervaring om de risico's bij distributie van 100% waterstof te kwantificeren. Er is eenvoudigweg nog

veel onbekend over waterstofgas in de grootschalige toepassingen buiten de industrie. Ook de complexiteit van de praktijk maakt het lastig om normen te formuleren. Het valt dan ook niet te verwachten dat normstellers zoals NEN binnen een of twee jaar veiligheidsnormen zullen vaststellen voor waterstoftoepassingen.

5.6 Onderzoek naar veiligheidsaspecten

Kiwa heeft in de zojuist genoemde studie uit 2018 naar de geschiktheid van gasdistributienetten voor waterstof en biogassen geconstateerd dat er objectief gezien geen veiligheidsprobleem hoeft te zijn met het distribueren van waterstof in bestaande gasnetten. Wel waarschuwt het instituut dat de menselijke factor doorslaggevend is. Uit decennialange ervaring met gasdistributie gaat het om de volgende essentiële zaken: veiligheidsperceptie, bedrijfscultuur en leiderschap.

Tegelijkertijd constateert Kiwa dat "de vraag welke maatregelen nodig zijn om – in geval van waterstoflekkages – risico's op brand of een explosie voldoende te beheersen nog niet definitief kan worden beantwoord." Op dit moment is nog veel onderzoek nodig door middel van testopstellingen, pilotprojecten en praktijkervaringen om tot een op waterstof toegespitst pakket van normen en werkwijzen te komen.

Volgens Kiwa zijn nagenoeg geen van de bestaande toestellen bij eindgebruikers geschikt voor gebruik bij 100% waterstof: "De verbranding van waterstof in bestaande cv-ketels resulteert mogelijk in vlaminslag en beschadiging van de brander. Ook het beveiligingsprincipe (ionisatiestroom) in de huidige toestellen is niet toepasbaar bij 100% waterstof. Dit



geldt ook voor de meeste gaskooktoestellen. Een verhoogd veiligheidsrisico met kooktoestellen is dat verbranding van waterstof geen zichtbare vlam produceert” (Kiwa, 2018).

Nationaal en internationaal komt onderzoek naar risico's en veiligheidsaspecten van waterstof langzaam op gang. Hoewel de middelen schaars zijn, is er bij partijen die zich specifiek richten op toepassingen van waterstof in het publieke domein en woningen wel een gevoel van urgentie om al in een vroegtijdig stadium waterstoftoepassingen goed te testen en het gedrag van waterstof in openbare ruimten te bestuderen. Dit hangt samen met de zoektocht naar alternatieven voor aardgas voor lage-temperatuurverwarming en de mogelijkheid dat waterstof daar een rol in kan gaan spelen. Engeland loopt op dit vlak voorop. Hier is een aantal programma's als HySafe, HyResponder, HyTunnel en HyHouse opgestart waarin ook wordt gekeken naar de veiligheidsaspecten van waterstof. Binnen Nederland heeft het Instituut voor Fysieke Veiligheid een rapport opgeleverd over de veiligheidsaspecten van waterstof in besloten ruimten (Spoelstra, 2020). Dat rapport zal binnenkort worden aangevuld met maatregelen voor het gebruik van waterstof binnenshuis. Daarnaast heeft ook Netbeheer Nederland een onderzoeksprogramma gestart voor het introduceren van waterstof in de Nederlandse huishoudens. Netbeheerder Liander heeft in Lochem een modelwoning gebouwd om proef te draaien voordat ze in echte woningen een pilot draaien.

5.7 Samenvattend beeld

Dat er in de industrie standaarden en werkwijzen zijn vastgelegd voor het veilig werken met waterstof, betekent niet dat waterstoftoepassingen zonder meer door particulieren en in de publieke ruimte kunnen worden gebruikt. Voordat dit op een verantwoorde manier mogelijk is, moet er nog veel gebeuren. Zo zullen de professionals, met name de installatiebranche, nog grotendeels moeten worden opgeleid. En voor veel voor de hand liggende vragen over wat er wel en niet kan en mag met waterstoftoepassingen, zijn nog geen sluitende antwoorden beschikbaar. Het is van belang dat dergelijke kennis snel voorhanden komt.

De huidige (overheids)initiatieven die aandacht hebben voor veiligheid rond waterstoftoepassingen staan nog in de kinderschoenen. De vraag is of de huidige wet- en regelgeving rond het gebruik van aardgas voldoende zijn voor het gebruik van waterstof in het publieke domein en in thuissituaties. Evenmin is helder welke protocollen gelden bij incidentenbestrijding. Volgens de raad moet worden voorkomen dat een situatie ontstaat waarbij risico's worden afgeschoven op hulpdiensten. Het is beter om veiligheid in te bouwen in het ontwerp en in de aanleg van waterstoftoepassingen. Dat vereist echter wel dat er op korte termijn wordt geïnvesteerd in het testen van waterstoftoepassingen, bij voorkeur in Europees verband.





6 ROL OVERHEID BIJ ONTWIKKELING WATERSTOFMARKT

Wat kan de overheid doen om ervoor te zorgen dat er in de economie van de komende decennia een gelijk speelveld ontstaat waarin klimaatneutrale waterstof eerlijk kan concurreren met fossiele alternatieven? Die vraag staat in dit hoofdstuk centraal. De raad belicht manieren waarop de overheid marktfalen op de waterstofmarkt kan corrigeren met gericht beleid.

6.1 Marktfalen in de waterstofmarkt

Op dit moment is de markt voor waterstof ongereguleerd. Producenten en consumenten van waterstof opereren in een vrije markt. De afgelopen jaren heeft deze markt goed gefunctioneerd en is er geen aanleiding geweest voor overheidsingrijpen.

De gewenste grootschalige introductie van klimaatneutrale waterstof creëert echter een nieuwe situatie. Zonder overheidsingrijpen zal er sprake zijn van 'marktfalen' (zie kader), waardoor een volwaardige markt voor klimaatneutrale waterstof niet tot stand kan komen.

Marktfalen

De vier klassieke vormen van marktfalen, oftewel de situaties waarin een markt niet optimaal werkt, treden op bij:

1. *Publieke goederen.* Sommige goederen worden niet vanzelf door private partijen op de markt gebracht, omdat dit niet lonend is. Denk bijvoorbeeld aan straatverlichting of zeeweringen. Dat zulke goederen te weinig opleveren heeft in de eerste plaats te maken met het feit dat niemand van het gebruik kan worden uitgesloten, waardoor het lastig is consumenten te laten betalen voor het gebruik. In de tweede plaats ontstaat er geen schaarste bij de consumptie van het goed. Ook dit bemoeilijkt commerciële exploitatie. De overheid kan in deze situaties ingrijpen door de publieke goederen zélf te produceren, op niet-commerciële basis.
2. *Monopolievorming.* Ook als er te veel marktmacht ligt bij één partij en er dus te weinig concurrentie is, kan dit leiden tot marktfalen. Een monopolist kan ongestraft zijn prijzen verhogen tot boven zijn marginale kosten. Ook krijgt een monopolist weinig prikkels om de kwaliteit van producten te optimaliseren. Dit is een maatschappelijk ongewenste uitkomst en dat kan een reden zijn voor overheidsingrijpen.
3. *Externe effecten.* Van marktfalen is eveneens sprake als er producten op de markt komen die negatieve externe effecten hebben – die bijvoorbeeld schadelijk zijn voor het milieu of de volksgezondheid. Marktpartijen houden hiermee over het algemeen weinig rekening; zij kijken naar de private kosten en opbrengsten van hun activiteiten en niet naar de maatschappelijke kosten en opbrengsten. Hun producten

zijn dan in feite te goedkoop, omdat de maatschappelijke kosten er niet in zijn verdisconteerd. Hier kan de overheid ingrijpen door middel van bijvoorbeeld accijnsheffing.

4. *Asymmetrische informatie.* De markt kan voorts verstoord raken als producenten en consumenten niet over dezelfde informatie beschikken. Wanneer consumenten bijvoorbeeld de kwaliteit van producten niet kunnen waarnemen, zijn zij niet bereid om meer te betalen voor een product met een hogere kwaliteit. Daardoor zullen producten met een hoge kwaliteit niet meer worden aangeboden en blijven alleen de producten met een lage kwaliteit over. De overheid kan ingrijpen in de informatievoorziening om hierin verandering te brengen.

Er is daarnaast nog een vijfde fenomeen dat niet onder de strikte definitie valt van marktfalen, maar er wel aan verwant is:

5. *Hold-up-probleem.* De markt van een product komt soms niet tot ontwikkeling omdat de producent grootschalige investeringen moet doen zonder dat hij zekerheid heeft over het gebruik van het product. Denk aan investeringen in laadpalen die pas rendabel worden als er voldoende elektrische auto's zijn, terwijl omgekeerd deze auto's pas worden aangeschaft als er voldoende laadpalen zijn. Zo'n situatie staat in het dagelijks spraakgebruik ook wel bekend als het kip-ei-probleem. De overheid kan in zulke gevallen de impasse doorbreken door een coördinerende rol op zich te nemen. Vraag, aanbod en infrastructuur kunnen zich dan gelijktijdig ontwikkelen.



Op de energie- en grondstoffenmarkt kunnen, zolang de overheid niet inter-venieert, verscheidene vormen van marktfalen optreden die de groeikansen van klimaatneutrale waterstof belemmeren.

Ten eerste is er op de energie- en grondstoffenmarkt sprake van negatieve externe effecten: de fossiele alternatieven voor klimaatneutrale waterstof (aardolie, aardgas en kolen) zijn vervuilend. Het bestaande overheidsbeleid adresseert deze externe milieueffecten onvoldoende; fossiele grond- en brandstoffen zijn nog steeds relatief goedkoop. Daardoor is er geen gelijk speelveld waarop klimaatneutrale waterstof kan concurreren met fossiele alternatieven zoals aardgas, benzine, diesel en kerosine.

Ten tweede is er sprake van positieve externe effecten als het gaat om innovatie en technologische ontwikkeling. De kosten van waterstof zullen fors omlaag kunnen als de waterstoftechnologie eenmaal is uitontwikkeld en geoptimaliseerd, zodat de productie op grotere schaal kan plaatsvinden. Innovatie is echter duur, de resultaten zijn onzeker en successen kunnen snel worden gekopieerd door concurrenten. Producenten zullen daardoor over het algemeen minder innoveren dan maatschappelijk wenselijk is. Daarom ligt er ook hier een taak voor de Nederlandse overheid: het ondersteunen van innovatie.

Ten derde spelen er in de waterstofmarkt hold-up-problemen. Er zijn tal van investeringen nodig om alle onderdelen van de waardeketen 'waterstofklaar' te maken. Het gaat om investeringen in productiefaciliteiten zoals elektrolyzers, om investeringen in transport- en opslagcapaciteit

zoals pijpleidingen, schepen en tankstations, en om investeringen in installaties bij de afnemer, zoals fabrieken, cv-ketels en vrachtwagens. Deze investeringen moeten min of meer gelijktijdig tot stand komen. Als er in het ene deel van de keten wél wordt geïnvesteerd maar in het andere niet, zijn de investeringen waardeloos. Om investeringen plaats te laten vinden en te laten renderen, moeten investeerders dus in elk deel van de keten voldoende zekerheid hebben dat ook in andere delen van de keten wordt geïnvesteerd. Ook hier ligt een rol voor de overheid.

6.2 Benodigde prijsontwikkeling

Het marktfalen zoals beschreven in de vorige paragraaf heeft tot gevolg dat klimaatneutrale waterstof op dit moment niet of zeer beperkt kan concurreren met fossiele alternatieven.

De milieukosten van fossiele brandstoffen en grondstoffen worden niet volledig in rekening gebracht en de productiekosten van klimaatneutrale waterstof zijn nog erg hoog. Deze situatie van marktfalen is min of meer stabiel: zonder overheidsingrijpen komt hier geen verandering in. Pas als de overheid fossiele brandstoffen en grondstoffen duurder maakt (bijvoorbeeld met een CO₂-heffing) en innovatie op waterstofgebied stimuleert, zal een situatie ontstaan waarin waterstof kan concurreren met fossiele alternatieven.

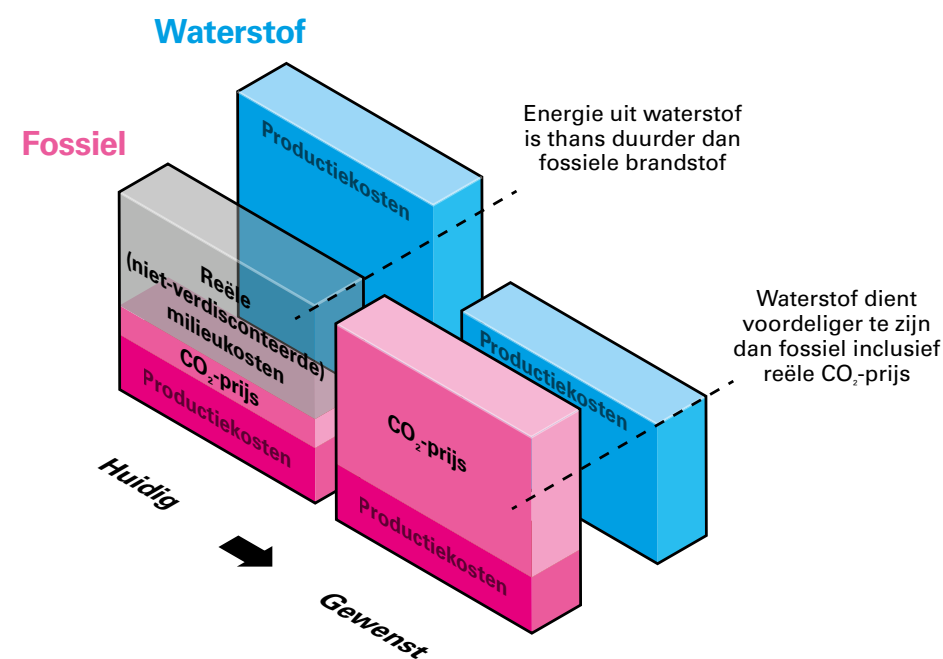
Overigens zal het prijsniveau van energie en grondstoffen *over de hele linie* moeten stijgen. Dat wil zeggen: als de fossiele alternatieven duurder



worden zal waterstof wel goedkoper kunnen worden, maar niet zo goedkoop als de fossiele alternatieven op dit moment zijn.

De benodigde ontwikkeling van de prijzen voor waterstof en fossiele alternatieven ten opzichte van de huidige prijsniveaus zijn weergegeven in figuur 16.

Figuur 16: Gewenste prijsontwikkeling waterstof en fossiele alternatieven



Met het corrigeren van de relatieve prijsniveaus is overigens het hiervoor besproken hold-up-probleem nog niet opgelost. Hiervoor is zoals gezegd een andere vorm van overheidsingrijpen vereist: het coördineren van de ontwikkelingen en investeringen in verschillende delen van de waterstofketen.

6.3 Keuze van beleidsinstrumenten

De theorie van het marktfalen geeft wel aan welke problemen moeten worden aangepakt, maar niet hoe dat moet gebeuren. De overheid zal een weloverwogen keuze moeten maken uit de beschikbare beleidsinstrumenten om marktfalen te corrigeren. In een eerder advies heeft de Rli deze instrumenten geanalyseerd en gecategoriseerd (Rli, 2019). De categorieën zijn in onderstaand kader beschreven.

Beleidsinstrumenten om marktfalen te corrigeren

- **Beprijzing.** Prijsmaatregelen brengen de milieuschade direct in rekening bij de veroorzaker ervan. Vervuilende activiteiten worden duurder en duurzame alternatieven aantrekkelijker. Prijsmaatregelen werken het beste als ze direct aangrijpen op de schade zelf. Belastingen en heffingen zijn voorbeelden van beprijzen. Ze kennen relatief hoge uitvoeringskosten. Ook het uitgeven van emissierechten geeft bedrijven een prijsprikkel om de milieuschade te verminderen. Dit instrument geldt als kosteneffectief omdat daarmee de emissiereductie tot stand komt op de plek waar dat het goedkoopst mogelijk is. Immers, bedrijven zullen naar de goedkoopste opties zoeken.
- **Subsidiëring.** In plaats van het belasten van een productieproces is ook het belonen van een schoon productieproces een optie. Bedrijven krijgen dan subsidie voor milieuvriendelijke vormen van productie. De subsidie prikkelt bedrijven om meer te investeren in duurzame innovatie en productiemethoden. Subsidies gaan gepaard met relatief hoge uitvoeringskosten. Verder speelt hier het probleem dat ook



bedrijven die de subsidie niet nodig hebben, aanspraak kunnen maken op subsidie.

- *Normering.* De overheid kan wettelijke normen stellen aan productie en consumptie met negatieve milieueffecten, om zo activiteiten met een negatieve maatschappelijke impact te remmen of te verbieden. Milieuwetgeving is hiervan een voorbeeld. Een norm kan bedrijven ook prikkelen om innovatieve alternatieven te ontwikkelen voor het vervuilende gedrag; dit heet technologie-forcerende normstelling. Regelgeving heeft duidelijkheid als voordeel, maar een nadeel kan zijn dat burgers en bedrijven geen prikkel krijgen om meer inspanningen te verrichten dan nodig is om aan de norm te voldoen. Daarnaast heeft regelgeving als nadeel dat het niet vanzelfsprekend tot efficiënte oplossingen leidt en dat het innovatie kan beperken.
- *Gedragseconomische beïnvloeding.* Gedragsverandering kan ook worden bewerkstelligd met voorlichtingscampagnes, informatievoorziening en 'nudges' (het 'duwen' van de consument, bijvoorbeeld door milieuvriendelijke producten op ooghoogte in het schap van de supermarkt te plaatsen). Dergelijke gedragseconomische maatregelen kunnen prijsbeleid en regelgeving effectiever maken.
- *Overheidsinvestering.* In sommige gevallen vindt de overheid de maatschappelijke effecten dermate belangrijk, dat ze besluit zelf actief te worden als producent of investeerder. Zo is het aanleggen en beheren van transportnetten in de energie een publieke taak die wordt uitgevoerd door staatsbedrijven zoals TenneT (elektriciteitsnet) en GTS (gasnet).

De voor- en nadelen van individuele beleidsinstrumenten verschillen per vorm van marktfaalen, maar zijn ook afhankelijk van de sector waar het instrument wordt toegepast. Voor het gebruik van waterstof in bijvoorbeeld de industrie zijn andere instrumenten het best geschikt dan voor het gebruik van waterstof in de gebouwde omgeving. Concreet betekent dit voor de marktordening het volgende:

1. De negatieve externe effecten van milieuvervuiling moeten in de markt worden geïnternaliseerd om ervoor te zorgen dat duurzame waterstof eerlijk kan concurreren met vervuilende alternatieven. Dit kan door vervuilende alternatieven te beprijsen, of door wettelijke eisen te stellen aan de milieuprestaties van producten en/of afnemers (normeren).
2. De positieve externe effecten van innovatie moeten eveneens in de markt worden geïnternaliseerd. Ook dit kan op een aantal manieren: door het subsidiëren van onderzoek en ontwikkeling en proefprojecten, of door het verplichten van waterstofgebruik door hiervoor bijvoorbeeld normen op te nemen in de voorwaarden van aanbestedingen voor de aanleg en exploitatie van windparken op zee of voor concessies in het openbaar vervoer.
3. Hold-up-problemen (oftewel kip-ei-situaties) bij de ontwikkeling van de waterstofketen moeten worden opgelost. Dit kan door middel van overheidsinvesteringen (bijvoorbeeld via een publieke partij als Gasunie) in infrastructuur. Een alternatief is om een privaat consortium een wettelijke taak mee te geven om de markt te ontwikkelen. Hiervoor is mogelijk een ontheffing nodig van de gebruikelijke mededingingsregels.



De succesvolle ontwikkeling van windenergieproductie op zee kan als voorbeeld dienen voor de waterstofmarkt. Het hierbij ingezette beleidsinstrumentarium bestond uit een geslaagde combinatie van subsidie (een bedrag per geproduceerde kWh), overheidsinvesteringen (via TenneT), normering (een helder regelgevend kader voor de beschikbaarstelling van kavels in de Noordzee) en gedragseconomische beïnvloeding (een goede informatievoorziening over de geplande uitrol van windenergieopwekking op zee tot 2030 en verder).

6.4 Samenvattend beeld

De groeikansen van waterstof worden op dit ogenblik nog belemmerd door vormen van marktfalen. De overheid staan diverse beleidsinstrumenten ter beschikking om dit te corrigeren. Om te beginnen zal de overheid fossiele brandstoffen en grondstoffen duurder moeten maken, bijvoorbeeld met een CO₂-prijs en/of met wettelijke milieunormen, rekening houdend met de concurrentiepositie van de industrie en mogelijke CO₂-weglekeffecten (zie paragraaf 3.3). Daarnaast zal de overheid innovatie op waterstofgebied moeten stimuleren. Dat kan bijvoorbeeld door het subsidiëren van onderzoek en ontwikkeling en proefprojecten, of door bij bepaalde tenders het gebruik van waterstof verplicht te stellen. Tot slot zal de overheid een coördinerende rol op zich moeten nemen bij het ontwikkelen van verschillende delen van de waterstofketen.



LITERATUUR

Afman, M. & Rooijers, F. (2017). *Net voor de Toekomst: achtergrondrapport*. Delft.

AFRY Management Consulting (2020). *The business case and supporting interventions for Dutch offshore wind: a report to the Ministry of Economic Affairs and Climate policy*. Te raadplegen via <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/publicaties/2020/03/05/the-business-case-and-supporting-interventions-for-dutch-offshore-wind>

Bergeijk, P. van, Putten, F-P van der, Rood, J. & Meijnders, M. (2015). *Geopolitieke en economische kwetsbaarheid: verdiepingsstudie Clingendael monitor 2015*. Clingendael. Te raadplegen via https://www.clingendael.org/pub/2015/clingendael_monitor_2015/3_economische_kwetsbaarheid/.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020). *Die nationale wasserstoffstrategie*. Te raadplegen via <https://www.bmbf.de/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf>

Bundesregierung (2020). *Nationale wasserstoffstrategie: schlüsselement der energiewende*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

CIEP (2019a). *Kijken in een spiegel van de toekomst...: twee verhaallijnen over geopolitieke ontwikkelingen en de invloed op het energie- en klimaatbeleid*. Den Haag: Clingendael International Energy Programme.

CIEP (2019b). *Van onzichtbare naar meer zichtbare hand? Waterstof en elektriciteit: naar een nieuwe ruggengraat van het energiesysteem*. Den Haag.

Colijn, K. (2019). *Dit waren de belangrijkste geopolitieke gebeurtenissen van het afgelopen decennium*, 27 december 2019, Vrij Nederland. Te raadplegen via <https://www.vn.nl/belangrijkste-gebeurtenissen-decennium/>.

Committee on Climate Change (2018). *Hydrogen in a low-carbon economy*. London.

Commonwealth of Australia (2018). *Hydrogen for Australia's future: a briefing paper for the COAG Energy Council*. Canberra City: Office of the Chief Scientist. Te raadplegen via <https://www.chiefscientist.gov.au/2018/08/briefing-paper-hydrogen-for-australias-future.pdf>

DNV GL (2017). *Verkenning waterstofinfrastructuur*. Groningen.

Ecofys & Berenschot (2018). *Chemistry for climate: acting on the need for speed. Roadmap for the Dutch chemical industry towards 2050*. Utrecht: Ecofys.

European Commission (2020). *A hydrogen strategy for a climate neutral Europe*. Te raadplegen via https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_1296

FC-H2JU (2019). *Hydrogen roadmap Europe: a sustainable pathway for the European energy transition*. Luxemburg: Publications Office of the European Union.

FME (2019). *Nationaal actieplan energieopslag en conversie 2019: werkpaarden voor de transitie*. Zoetermeer: Energy Storage NL.

Hers, S., Scholten, T., Veen, R. van der, Water, S. van de, Leguijt, C. & Rooijers, F. (2018). *Waterstofroutes Nederland: blauw, groen en import*. Delft: CE Delft.

Gasunie (2018). *Verkenning 2050: discussiestuk*. Groningen.

Gessel, S.F. van (TNO), Breunese, J. (TNO), Larré, J.J. (TNO), Huijskes, T.D. (EBN) & Rimmelts, G. (TNO) (2018). *Ondergrondse opslag in Nederland: technische verkenning*. Utrecht: TNO.

Gigler, J. & Weeda, M. (2018). *Contouren van een routekaart waterstof*. TKI Nieuw Gas. Te raadplegen via <https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/TKI%20Gas/publicaties/20180307%20Routekaart%20Waterstof%20TKI%20Nieuw%20Gas%20maart%202018.pdf>

Hydrogen Council (2020). *Path to hydrogen competitiveness: a cost perspective*. Brussels.

Hydrogen Europe (2020). *Green hydrogen for a European green deal: a 2x40 GW initiative*. Brussel. Te raadplegen via https://hydrogeneurope.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Europe_2x40%20GW%20Green%20H2%20Initiative%20Paper.pdf

International Energy Agency (2020). *World Energy Outlook 2020*. Paris.

Institute of International Finance (IIF) (2020). *Global debt monitor: COVID-19 lights a fuse*. April 2020. Te raadplegen via https://www.iif.com/Portals/0/Files/content/Research/Global%20Debt%20Monitor_April2020.pdf

Institute for Sustainable Process Technology (2019). *HyChain 1: assessment of future trends in industrial hydrogen demand and infrastructure*. Te raadplegen via <https://projecten.topsectorenergie.nl/storage/app/uploads/public/5e5/d1e/e7b/5e5d1ee7b79ac528570581.pdf>

International Association of Oil & Gas Producers [IOGP] (2019). *The potential for CCS and CCU in Europe: report to the thirty second meeting of the European gas regulatory forum 5-6 June 2019*. Madrid.



International Renewable Energy Agency (IRENA) (2019). *Hydrogen: a renewable energy perspective. Report prepared for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting in Tokyo, Japan*. Abu Dhabi.

Kearney Energy Transition Institute (2020). *Hydrogen applications and business models: going blue and green?* Te raadplegen via https://www.kenearney.com/documents/17779499/18269679/Hydrogen+applications+and+business+models_single_page.pdf/c72700b3-e66a-6338-82bb-46ca8031e86d?t=1594994670696

Kiwa (2018). *Toekomstbestendige gasdistributienetten*. Apeldoorn.

Koelemeijer, R., Daniëls, B., Koutstaal, P., Geilenkirchen, G., Ros, J., Boot, P., Born, G. J. van den & Schijndel, M. van (2018). *Kosten energie- en klimaattransitie in 2030 – update 2018*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Marel, G. van der (2020). Duitsland zet in op waterstof en dat is ook lucratief voor Nederland. *Financieele Dagblad*, 11 juni 2020.

Ministerie van Economische Zaken (2015). *Biomassa 2030: strategische visie voor de inzet van biomassa op weg naar 2030*. Den Haag.

Mulder, M., P. Perey (2019). Groene waterstof laat zich lastig rendabel maken. *Economisch Statistische Berichten*, 105 (4782), 80-83.

Nagashima, M. (2018). *Japan's hydrogen strategy and its economic and geopolitical implications*. Etudes de l'IFRI. Paris: IFRI – Institut français des relations internationales – Centre for energy.

Natuur & Milieu (2018). *Duurzaamheidskaders waterstofgebruik in de industrie*. Utrecht.

Netbeheer Nederland (2019a). *Position paper voor het rondetafelgesprek over netcapaciteit: 25 november 2019*. Geraadpleegd op 3 juli 2020 via https://www.netbeheernederland.nl/upload/Files/Postition_paper_rondetafel_netcapaciteit_28_november_2019_162.pdf

Netbeheer Nederland (2019b). *Basisinformatie over energie-infrastructuur: opgesteld voor de regionale energie strategieën*. Geraadpleegd op 3 juli 2020 via https://www.netbeheernederland.nl/upload/Files/Basisdocument_over_energie-infrastructuur_149.pdf

Netbeheer Nederland (2017). *Net voor de toekomst: een vooruitblik op de energievoorziening in 2050*. S.I.

NRW Wirtschaft (2019). *Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen*. Düsseldorf: Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen.

Ohlendorf, N. & W.P. Schil (2020). Frequency of low-wind power events in Germany. *Environmental Research Letters*, 15 (8) Te raadplegen via <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab91e9>

Ouden, B. den, Graafland, P. & Warnaars, J. (2018). *Elektronen en/of moleculen: twee transitiepaden voor een CO₂-neutrale toekomst*. Utrecht: Berenschot.

Ouden, B. den, Kerkhoven, J., Warnaars, J., Terwel, R., Coenen, M., Verboon, T., Tiihonen, T. & Koot, A. (2020). *Klimaatneutrale energiescenario's 2050: scenariostudie ten behoeve van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050*. Utrecht: Berenschot.

Planbureau voor de Leefomgeving (2020a). *Startanalyse aardgasvrije buurten: achtergrondstudie*. Den Haag.



- Planbureau voor de Leefomgeving (2020b). *Waterstof voor de gebouwde omgeving: operationalisering in de startanalyse 2020*. Den Haag.
- Provincie Zuid-Holland (2020). *Waterstofvisie en strategie: de rol van waterstof in de energie- en grondstoffentransitie in Zuid-Holland 2030 (-2050)*. Den Haag.
- PwC 2020. *Speelveldtoets 2020: de impact van het voorgenomen klimaatbeleid op het speelveld van de Nederlandse industrie*. 18 juni 2020 –Eindrapportage. Amsterdam: PricewaterhouseCoopers Advisory N.V. Amsterdam.
- Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (2019). *Naar een duurzame economie: overheidssturing op transitie*. Den Haag.
- Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (2015). *Rijk zonder CO₂: naar een duurzame energievoorziening in 2050*. Den Haag.
- Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (2014). *Risico's gewaardeerd: naar een transparant en adaptief risicobeleid*. Den Haag.
- Reijerkerk, J. & Rhee, G. van (2019). *Waterstof: kansen voor de Nederlandse industrie. Perspectief voor duurzame groei door waterstof*. Zoetermeer: FME, Ekinetix, Stratelligence.
- Scheepers, M., Faaij, A. & Brink, R. van den (2020). *Scenario's voor klimaatneutraal energiesysteem: slimme combinaties van energie-opties leiden tot duurzame en betaalbare energiehuishouding [whitepaper]*. Den Haag: TNO.
- Schoots, K. & P. Hammingh (2019). *Klimaat- en Energieverkenning 2019*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- SenterNovem (2006). *Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO₂-emissiefactoren*. Te raadplegen via <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2013/10/Vreuls%202006%20NL%20Energiedragerlijst.pdf>
- Sociaal-Economische Raad (2020). *Biomassa in balans: een duurzaamheidskader voor hoogwaardige inzet van biograndstoffen*. Den Haag.
- Sociaal-Economische Raad (2019). *Nationale klimaataanpak voor regionale industriële koplopers*. Den Haag.
- Spoelstra, M.B. (2020). *Veiligheidsaspecten van waterstof in een besloten ruimte*. Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid (IVF).
- Stork, M., Beer, J. de, Lintemeijer, N. & Ouden, B. den (2018). *Chemistry for climate: acting on the need for speed. Roadmap for the Dutch chemical industry towards 2050*. Utrecht: Ecofys.
- TenneT & Gasunie (2020). *Infrastructure outlook 2050: a joint study by Gasunie and TenneT on integrated energy infrastructure in the Netherlands and Germany*. Te raadplegen via <https://www.gasunie.nl/expertise/systeemintegratie/infrastructure-outlook-2050>
- Taskforce Infrastructuur Klimaattafel Industrie (2020). *Meerjarenprogramma infrastructuur energie en klimaat 0.1*. Arnhem: DNV-GL.
- TIKI (2020). *Taskforce infrastructuur klimaatakkoord industrie: meerjarenprogramma Infrastructuur energie en klimaat 0.1*. Arnhem: DNV-GL.
- TNO & CBS (2020). *The Dutch hydrogen balance and the current and future representation of hydrogen in the energy statistics*. Amsterdam: TNO.
- Transport & Environment (2020). *Comparison of hydrogen and battery electric trucks: methodology and underlying assumptions*. Brussels.



- Tweede Kamer (2020a). *Industriebeleid. Kabinetsaanpak Klimaatbeleid. Brief van de minister van Economische Zaken en Klimaat aan de Tweede Kamer van 6 oktober 2020*. Vergaderjaar 2020–2021, 29 826, nr. 123
- Tweede Kamer (2020b). *Kabinetsaanpak Klimaatbeleid: routekaart groen gas. Brief van de minister van Economische Zaken en Klimaat aan de Tweede Kamer van 30 maart 2020*. Vergaderjaar 2019-2020, 32 813, nr. 487.
- Tweede Kamer (2020c). *Stimulering duurzame energieproductie: voortgang SDE++ en eerste openstelling SDE++ 2020. Brief van de minister van Economische Zaken en Klimaat aan de Tweede Kamer van 17 februari 2020*. Vergaderjaar 2019-2020, 31 239, nr. 312.
- Vilder, L. de (2017). *Offshore pumped hydropower storage: technical feasibility study on a large energy storage facility on the Dogger Bank* (Master's thesis). Geraadpleegd via <http://resolver.tudelft.nl/uuid:0c70253e-7c32-4c5e-b259-5b756ab2f49c>
- Visser, M. (2020). *Waterstof: cruciaal voor behalen klimaatdoelen*. Column op Energiepodium.nl d.d. 11 februari 2020. Te raadplegen via <https://energiepodium.nl/artikel/waterstof-cruciaal-voor-behalen-europese-klimaatdoelen>



Inleiding

Er zijn veel cijfers in omloop over waterstof. Om deze te kunnen interpreteren en op waarde te kunnen schatten is enige basiskennis vereist over de gebruikte eenheden en de onderliggende aannames.

Prijzen

De prijs van waterstof wordt vaak uitgedrukt in €/kg. De hoeveelheid wordt hier dus uitgedrukt in een gewichtsmaat, in tegenstelling tot de prijzen voor elektriciteit en aardgas, die meestal worden uitgedrukt in een energiemaat (€/MWh of €/ct/kWh) of een volumemaat (€/m³). Deze eenheid is praktisch in het gebruik, omdat kostenschattingen zich typisch bevinden binnen een bandbreedte van 0,5 tot 5 €/kg. Om de prijs van waterstof toch uit te drukken in een energiemaat, kunnen de volgende omrekenfactoren worden gehanteerd:

$$1 \text{ €/kg} = 8,33 \text{ €/GJ} = 30 \text{ €/MWh} = 3 \text{ €/ct/kWh}.$$

Om de prijs van waterstof te kunnen vergelijken met de prijs van aardgas in m³, is ook een omrekenfactor nodig. 1 kg waterstof heeft dezelfde energie-inhoud als 3,4 m³ aardgas (beide 120 MJ), dus:

$$1 \text{ €/kg waterstof} = 0,29 \text{ €/m}^3 \text{ aardgas}.$$

De productie van waterstof kan onder andere plaatsvinden met behulp van een elektrolyser. De capaciteit van een elektrolyser wordt uitgedrukt in elektrisch vermogen: kW, MW of GW, afhankelijk van de grootte. De kosten van een elektrolyser worden over het algemeen uitgedrukt in €/kW. Schattingen van de huidige en verwachte toekomstige kosten van een elektrolyser bevinden zich in een bandbreedte van 100–1.000 €/kW.

Wanneer waterstof wordt geproduceerd uit elektriciteit, is de inkoopprijs van elektriciteit een belangrijke component van de kostprijs van waterstof. Als vuistregel kan hierbij worden gehanteerd dat 10 €/MWh elektriciteit overeenkomt met 0,5 €/kg waterstof (exclusief overige kosten zoals CAPEX), 20 €/MWh elektriciteit overeenkomt met 1,0 €/kg waterstof enzovoort. Hierbij wordt uitgegaan van een conversie-efficiëntie van 80% (Hydrogen Europe, 2020).

Iets dergelijks geldt voor de relatie tussen de prijs van grijze waterstof en de CO₂-prijs. Elke 10 €/ton CO₂ draagt 0,1 €/kg bij aan de prijs van grijze waterstof (Hydrogen Europe, 2020).

Hoeveelheden

Wanneer wordt geschreven over de geproduceerde hoeveelheden in grote waterstofprojecten of de waterstofconsumptie van hele landen, is de eenheid kg niet erg praktisch meer. Deze hoeveelheden worden dan uitgedrukt in Mton (= 10⁹ kg) of in PJ (=10¹⁵ Joule, een energie-eenheid). Op basis van de *lower heating value* (LHV) geldt de verhouding 1 Mton = 120 PJ (of 1 kg = 120 MJ) (Institute for Sustainable Process Technology, 2019).

Schattingen van het huidige jaarlijkse waterstofverbruik in Nederland lopen sterk uiteen. De meest recente schatting is afkomstig van TNO en CBS (TNO & CBS, 2020). Zij schatten het verbruik op 1,48 Mton of 178 PJ. Precieze schattingen van het verbruik in Nederland zijn moeilijk te verkrijgen, omdat een groot deel van de productie voor eigen gebruik is en daarom niet wordt geregistreerd. De schatting van TNO en CBS is gebaseerd op de aanname dat de waterstofproductiecapaciteit voor 90% wordt benut.

Bijna 60% van de totale hoeveelheid waterstof wordt verkregen uit aardgas. De rest is afkomstig uit olie (37%), kolen (3%) en elektriciteit (1%). De belangrijkste toepassingen van waterstof zijn het gebruik in raffinaderijen (37%), de productie van ammoniak (33%) en methanol (7%) en het gebruik als brandstof (13%). Daarnaast wordt waterstof op kleinere schaal gebruikt in een brede waaier aan industriële toepassingen. Het verbruik van waterstof is volledig geconcentreerd in de vijf grote industriële clusters. De grootste verbruiker is Rotterdam Moerdijk (44%), gevolgd door Zeeland (32%), Zuid-Limburg (14%), Delfzijl (7%) en IJmond (3%) (TNO & CBS, 2020).

Om de hoeveelheid waterstof in te kunnen schatten die een elektrolyser met een bepaald vermogen produceert, zijn twee aannames vereist:

1. De hoeveelheid elektriciteit die nodig is om 1 kg waterstof te produceren. Deze ligt op dit moment tussen de 40 en 60 kWh/kg, afhankelijk van de gebruikte technologie (Kearney Energy Transition Institute, 2020). Naar verwachting zal deze hoeveelheid de komende jaren gestaag verder dalen.



2. De load factor: het aantal uren per jaar dat een elektrolyser daadwerkelijk 'aan' staat. Dit verschilt afhankelijk van het businessmodel en de bronnen waarmee een elektrolyser verbonden is. Bij een bijna maximale benutting wordt bijvoorbeeld gerekend met 8.000 uur/jaar. Wanneer de enige bron echter een windpark op zee is, is dit niet haalbaar en is een schatting van 4.000–5.000 uur realistischer. De recent gepresenteerde plannen voor een 10 GW windpark op de Noordzee van het NorthH2-consortium, bestaande uit Shell, Gasunie en Groningen Seaports,¹ spreken bijvoorbeeld over een productie van 800.000 ton waterstof per jaar, wat overeenkomt met: 10 GW (= 10.000.000 kW) maal 4.000 uur/jaar, gedeeld door 50 kWh/kg = 800.000 ton waterstof.

Kostenschattingen (nu, 2030, 2050)

Er zijn diverse recente kostenschattingen voor de productie van waterstof beschikbaar. Hierbij wordt onderscheid gemaakt naar de productiemethode. Verschillende vormen van blauwe waterstof (onder andere geproduceerd door middel van *steam methane reforming* (SMR) en *autothermal reforming* (ATR)) en groene waterstof (onder andere geproduceerd met behulp van zonne- en windenergie) passeren de revue. Ook de productielocatie (Nederland, Marokko, onshore/offshore enzovoort) is van belang. Door de snelle daling van de prijzen is ook het jaar (2020, 2030, 2050 en verder) waarvoor de schatting geldt van belang. Ook wanneer met deze verschillen rekening wordt gehouden, lopen de schattingen uiteen. Dit geeft aan dat er

¹ Zie <https://nos.nl/artikel/2324772-plannen-voor-het-grootste-europese-waterstofproject-in-groningen.html>

nog veel onduidelijkheid bestaat over de huidige productiekosten en veel onzekerheid over de toekomstige ontwikkeling van deze kosten.

In een studie uit 2018 vergelijkt CE Delft de kosten van drie waterstofketens: blauw, groen uit Noordzeewind en groen uit Marokkaanse zon.² Dit leidt tot de volgende kostenschattingen:

	Integrale kosten	vs	marginale kosten
<i>in €/kg:</i>	2017 => 2030		2017 => 2030
• Blauw:	1,6 => 2,2	vs	1,0 => 1,7
• Groen-wind (Noordzee):	5,2 => 2,9	vs	2,5 => 1,7
• Groen-zon (Marokko):	4,1 => 2,2	vs	1,8 => 1,2

Mulder & Perey (2019) schatten de huidige productiekosten van waterstof als volgt in:

- Blauw – SMR: 1,5 – 2 €/kg (afhankelijk van CO₂-afvangpercentage en CO₂-transportkosten).
- Groen – elektriciteit van de groothandelsmarkt: 3,6 €/kg.
- Groen – elektrolyse op zee: 2,8 €/kg exclusief transport naar land, 4,0 €/kg inclusief transport naar land.

M. Visser (2020) schat de kostprijsontwikkeling voor groene waterstof uit de Sahara op basis van prognoses van Bloomberg New Energy Finance als volgt in:

² Afman, M. & Rooijers, F. (2017). Net voor de Toekomst: achtergrondrapport. Delft.



- Huidige productiekosten: 2,7 €/kg
- In 2030: 1,4 €/kg
- In 2050: 0,8 €/kg

Voor transport per pijpleiding vanuit de Sahara naar Nederland komt daar nog 0,3 €/kg bij.

Berenschot & Kalavasta (Den Ouden *et al.*, 2020) komen in een recente scenariostudie uit op de volgende getallen³:

Type Waterstof en productiemethode	2025	2030	2035
Grijs SMR	in 2025 1,8 €/kg	in 2030 1,9 €/kg	in 2035 2,0 €/kg
Blauw SMR	in 2025 2,3 €/kg	in 2030 2,3 €/kg	in 2035 2,4 €/kg
Blauw ATR	in 2025 2,3 €/kg	in 2030 2,3 €/kg	in 2035 2,3 €/kg
Groen NL PEM	in 2025 2,4 €/kg	in 2030 2,2 €/kg	in 2035 2,1 €/kg
Groen NL Alkaline	in 2025 2,2 €/kg	in 2030 2,1 €/kg	in 2035 1,9 €/kg
Groen Portugal PEM	in 2025 3,2 €/kg	in 2030 2,9 €/kg	in 2035 1,8 €/kg
Groen Portugal Alkaline	in 2025 3,0 €/kg	in 2030 2,8 €/kg	in 2035 1,7 €/kg

Hierbij moet worden aangetekend dat Berenschot & Kalavasta (2020) aannemen dat in 2035 waterstof vanuit Portugal via een pijpleiding naar Nederland kan worden vervoerd. Of dit valt te realiseren, is maar zeer de vraag.

³ Ouden, B. den, Kerkhoven, J., Warnaars, J., Terwel, R., Coenen, M., Verboon, T., Tiihonen, T. & Koot, A. (2020). Klimaatneutrale energiescenario's 2050: scenariostudie ten behoeve van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050. Utrecht: Berenschot.



WAT IS NODIG VOOR PRODUCTIE EN OPSLAG VAN 1 PETAJOULE ENERGIE?

Onderstaande gegevens illustreren de capaciteit en brandstof die nodig is om 1 petajoule energie te produceren en op te slaan als reservecapaciteit.

1 petajoule staat voor 1.000.000.000.000.000.000 joule of 0,2778 terawattuur (TWh)

Benodigde productiecapaciteit:

- 6 grote windturbines op zee produceren 1 PJ per jaar⁴
- 11 grote windturbines op land produceren 1 PJ per jaar⁵
- 1 miljoen zonnepanelen produceren 1 PJ per jaar⁶
- 6 geothermiedoubletten produceren 1 PJ per jaar

4 Uitgaande van 10 MW-turbines en 4.600 vollasturen wordt de jaarproductie: $6 \times 10 \text{ MW} \times 4.600 \text{ vollasturen} \times 3,6 = 0,99 \text{ PJ}$.

5 Uitgaande van elf 7,5 MW-turbines (zoals in gebruik in windpark Noordoostpolder) en 3.234 vollasturen.

6 Uitgaande van 1 miljoen zonnepanelen van 325 wattpiek en 854 vollasturen per jaar.

- 6 groengasvergisters produceren 1 PJ per jaar
- 23,8 etmalen productie kerncentrale Borssele (485MWe) op vol vermogen
- 7,5 etmalen productie Eemshavencentrale (1.560MWe) op vol vermogen⁷

Benodigde brandstof:

- Circa 30 miljoen m³/25 kton groen gas/Groningengas
- Circa 23 miljoen m³/19,6 kton hoogcalorisch gas
- Circa 89 miljoen m³/8 kton waterstof⁸
- Circa 59 kton biomassa⁹
- Circa 40 kton steenkool¹⁰
- Circa 23,4 kton/27,8 miljoen liter diesel¹¹

7 De Eemshavencentrale van RWE is een kolengestookte centrale en momenteel met een vermogen van 1560 MWe de grootste elektriciteitscentrale van Nederland.

8 De energiedichtheid van laagcalorisch Groningengas is 31,7 MJ/m³, die van waterstof bedraagt 10,7 MJ/m³ en die van hoogcalorisch aardgas ligt tussen de 38,8 en 46,1 MJ/m³. Het gewicht van waterstof is met 0,08988kg/m³ veel lager dan dat van aardgas 0,833kg/m³. Waterstof heeft daarmee een hogere energiedichtheid per kilo dan aardgas.

9 Uitgaande van een gemiddelde energie-inhoud van 17 GJ/ton biomassa. Het jaarlijkse aanbod van biomassa zal in Nederland liggen in de bandbreedte van 115 PJ (7 Mton) tot 753 PJ (45 Mton) (zie EZ, 2015).

10 Uitgaande van een energiedichtheid van steenkool tussen de 20 en 30 MJ per kg.

11 Op basis van een stookwaarde van 42,7 MJ/kg en een gewicht van 0,84 kg/l. De waarden van ruwe olie, zware stookolie, kerosine, benzine, nafta, raffinaderijgassen en grondstoffen en chemisch restgas komen min of meer overeen (SenterNovem, 2006).



TOTSTANDKOMING ADVIES

Benodigde opslagcapaciteit:

- 4,6 miljoen elektrische auto's met een gemiddelde accucapaciteit van 60 kWh
- 20,5 miljoen Tesla powerwalls à 13,5 kWh
- 33 ondergrondse pompaccumulatiecentrales¹²
- 5 valmeren van 6 km tot 8 km diameter op de Doggersbank¹³
- 1 zoutcaverne gevuld met waterstof
- 1/3 zoutcaverne gevuld met groen gas (bij gelijke druk als waterstof)
- 1,2 peakshavertankopslag gevuld met vloeibare waterstof
- 2,67 20MW elektrolyzers produceren ongeveer 1 PJ waterstof per jaar¹⁴

Samenstelling raadscommissie

Drs. P. (Pallas) Agterberg, raadslid Rli en commissievoorzitter vanaf 1-8-2020

Ir. M. (Marjolein) Demmers MBA, raadslid Rli en commissievoorzitter tot 1-8-2020

F.A.T. (Fred) van Beuningen, directeur Clean Tech Delta en managing partner Chrysalix RoboValley Venture Capital

Prof. dr. J.G. (Coby) van der Linde, programmadirecteur Clingendael International Energy Programme (CIEP) en (deeltijd)hoogleraar geopolitiek en energie aan de RUG

M.W.B. (Mart) Lubben MSc, junior-raadslid Rli tot 1-8-2020

Ir. A.G. (Annemieke) Nijhof MBA, raadslid Rli tot 1-8-2020

Ir. F.J. (Frans) Rooijers, directeur CE Delft

Samenstelling projectteam

Ir. F.W. (Folmer) de Haan, projectleider

Dr. M. (Menno) van Benthem, extern projectmedewerker (senior consultant natural resources Ecorys)

C.I.A. (Katja) de Vries BC, projectassistent

Dr. B. (Bas) Waterhout, projectmedewerker

¹² Uitgaande van een waterbekkenoppervlakte van 500 x 500m en 10m diepte en een centrale die gedurende 6 uur 1.400 MW kan leveren. Zie: <https://o-pac.nl>

¹³ Zie De Vilder (2017).

¹⁴ Nouryon ontwikkelt samen met vier andere partijen een 20 MW-elektrolyser in Delfzijl, wat op dit moment de grootste ter wereld zou zijn. Deze gaat per jaar 3.000 ton waterstof opleveren. Zie <https://www.nouryon.com/nl-nl/nieuwsberichten/consortium-nouryon-en-gasunie-wint-eu-steun-voor-groen-waterstofproject>

Geraadpleegde personen en instanties

Peter Bareman, VNCI
Arij van Berkel, Lux Research
Manon Bloemer, VNCI
Lau Bosse, Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties
Martin Bottema, Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties
Martijn Broekhof, VNCI
Andreas ten Cate, Institute for Sustainable Process Technology
Hub Cox, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Hajo-Wisse Dekker, OQ
Harry van Dijk, Deltalinqs
Nico van Dooren, Havenbedrijf Rotterdam
Stijn van Els, Havenbedrijf Rotterdam
Frits Eulderink, Vopak
Albert Faber, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Han Feenstra, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Gerrie Fenten, Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties
Gertjan Fonk, Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit
Sandor Gaastra, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Jorg Gigler, TKI Nieuw Gas
Reinier Grimbergen
Noé van Hulst, waterstofgezant Nederland
Marcel van de Kar, Vopak
Peter Kiela, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Laura Koppen, Vopak
Alice Krekt, Deltalinqs

Frank Kuijpers, Sabic
Frans Lips, Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit
Aart van der Pal, Vattenfall
Michelle Prins, Natuur en Milieu
Nils Rosmuller, Instituut Fysieke Veiligheid
Diederik Samsom, Kabinetschef Frans Timmermans
Wouter Schaaf, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Dirk Schaap, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
René Schutte, Gasunie
Frank Stevens van Abbe, Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties
Sebastian Treyer, IDDRI
Martien Visser, Hanze Hogeschool
Hans Warmenhoven, Energiebeheer Nederland
Ricardo Weever, Instituut Fysieke Veiligheid
Ron Wit, Eneco

Expertbijeenkomst Gebouwde omgeving 22 januari 2020

Marco Bijkerk, Remeha
Elbert Huijzer, Alliander
Albert van der Molen, Stedin
Bert den Ouden, Berenschot
René Schutte, Gasunie
Marcel Weeda, TNO
Ton van Wingerden, DNV GL



Expertbijeenkomst Waterstof in Mobiliteit 22 januari 2020

Robert Dencher, H2-platform
Chris van Dijk, RAI Vereniging
Jeroen Erens, Leaseplan
Carlijne Mouthaan, Shell
Jean-Paul de Poorter, H2-platform
Marc van der Steen, Rebel
Ton van Wingerden, DNV GL

Expertbijeenkomst Industrie 15 januari 2020

Kees Biesheuvel, Dow Benelux B.V.
Katharina Gruenberg, Shell
Jaap Oldenziel, Air Liquide
Harro van de Rhee, ExxonMobil
Joost Sandberg, Nouryon

Expertbijeenkomst Energiesysteem 15 januari 2020

Maarten Abbenhuis, TenneT
Pallas Agterberg, Alliander
Alan Croes, TenneT
Aart van der Pal, Vattenfall
René Schutte, Gasunie

Externe referenten

Nico van Dooren, Havenbedrijf Rotterdam
Koen Schoots, Planbureau voor de Leefomgeving
Ad van Wijk, TU Delft

Bert den Ouden en Joachim Schellekens, Berenschot hebben tijdens het traject een keer inhoudelijk getoetst.



OVERZICHT RLI PUBLICATIES

2020

Toegang tot de Stad: hoe publieke voorzieningen, wonen en vervoer de sleutel voor burgers vormen. September 2020 (Rli 2020/06)

Stop bodemdaling in veenweidegebieden: het Groene Hart als voorbeeld. September 2020 (Rli 2020/05)

Groen uit de crisis. Juli 2020 (Rli 2020/04)

Verzet de wissel: naar beter internationaal reizigersvervoer per trein. Juli 2020 (Rli 2020/03)

De bodem bereikt?! Juni 2020 (Rli 2020/02)

Greep op gevaarlijke stoffen. Februari 2020 (Rli 2020/01)

2019

Naar een duurzame economie: overheidssturing op transities. November 2019 (Rli 2019/05)

Waardevol toerisme: onze leefomgeving verdient het. September 2019 (Rli 2019/04)

Europees landbouwbeleid: inzetten op kringlooplandbouw. Mei 2019 (Rli 2019/03)

Luchtvaartbeleid: een nieuwe aanvliegroute. April 2019 (Rli 2019/02)

De som der delen: verkenning samenvallende opgaven in de regio. Maart 2019 (Rli 2019/01)

2018

Warm aanbevolen: CO₂-arme verwarming van de gebouwde omgeving. December 2018 (Rli 2018/07)

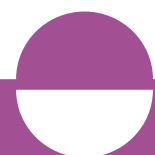
Nationale omgevingsvisie: lakmoesproef voor de Omgevingswet. November 2018 (Rli 2018/06)

Versnellen woningbouwproductie, met behoud van kwaliteit. Juni 2018 (Rli 2018/05)

Van B naar Anders: investeren in mobiliteit voor de toekomst. Mei 2018 (Rli 2018/04)

De stad als gezonde habitat: gezondheidswinst door omgevingsbeleid. April 2018 (Rli 2018/03)

Duurzaam en gezond: samen naar een houdbaar voedselsysteem. Maart 2018 (Rli 2018/02)



Stroomvoorziening onder digitale spanning. Februari 2018 (Rli 2018/01)

2017

Brede blik op erfgoed: over de wisselwerking tussen erfgoed en transities in de leefomgeving. December 2017 (Rli 2017/03)

Energietransitie en leefomgeving: kennisnotitie. December 2017 (Rli 2017)

Grond voor gebiedsontwikkeling: instrumenten voor grondbeleid in een energieke samenleving. Juni 2017 (Rli 2017/02)

Technologie op waarde schatten: een handreiking. Januari 2017 (Rli 2017/01)



Colofon

Tekstredactie

Saskia van As, Tekstkantoor Van As, Amsterdam

Infographic

Frédéric Ruys, Vizualism, Utrecht (pagina's 13, 22, 29, 44, 48, 50, 61 en 122)

Fotoverantwoording

Cover: ogonekipit / Depositphotos

Pagina 6: concept w / Shutterstock

Pagina 19: malpetr / Depositphotos

Pagina 26: Sander van der Werf Fotografie & Illustratie / Nationale Beeldbank

Pagina 31: hopsalka / Depositphotos

Pagina 38: Novum RegioFoto / ANP

Pagina 41: Peter Hilz / ANP

Pagina 66: Ben Stockphotos / Nationale Beeldbank

Pagina 90: VanderWolf-Images / iStock

Pagina 99: Capitano Productions Film / Shutterstock

Pagina 113: Frank de Roo / ANP

Pagina 119: Willem Blauw / Nationale Beeldbank

Grafisch ontwerp

Jenneke Drupsteen Grafische vormgeving, Den Haag

Publicatie Rli 2021/01

Januari 2021

Vertaling

Deel 1 van het advies is vertaald in het Engels en te downloaden via <http://en.rli.nl>

Bronvermelding

Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (2021).

Waterstof: de ontbrekende schakel. Den Haag. Digitale uitgave

ISBN 978-90-77166-93-2

NUR 740

