



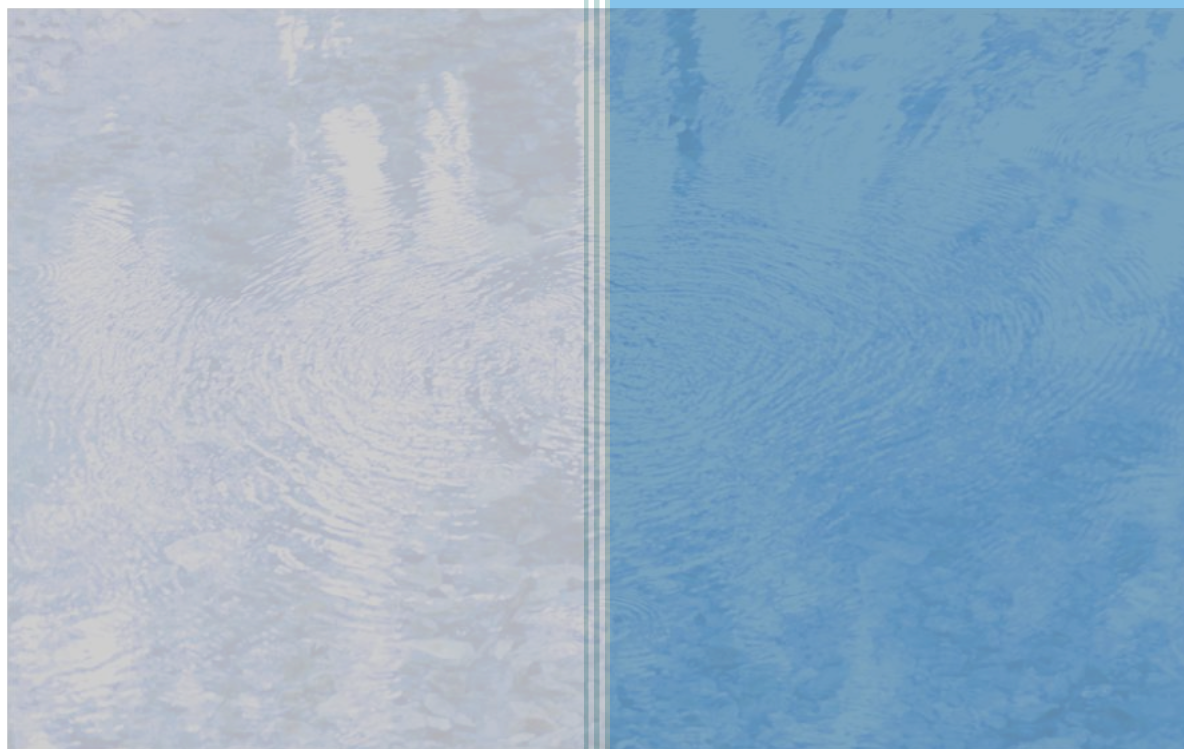
Dit is een achtergrondnotitie
ten behoeve van de
sectortafels Elektriciteit en
Industrie



2019

Waterstof in het klimaatakkoord

Rapportage van de cross-sectorale Werkgroep Waterstof
aan de Klimaattafels Elektriciteit en Industrie



Werkgroep Waterstof

Redactie:

Jan Paul van Soest en Hans Warmenhoven

25-1-2019

Inhoud

1.	Inleiding	7
2.	Waterstof in een CO₂-vrij energie- en grondstoffensysteem - kwalitatieve analyse	8
2.1	Een rol voor waterstof	8
2.2	Potentiële rollen voor waterstof in een CO ₂ -vrij energie- en grondstoffensysteem	9
2.3	Robuuste rollen voor waterstof	11
2.4	Andere mogelijke rollen voor waterstof	13
2.5	Aanbod van waterstof	14
2.6	Coördinatie	15
3.	Vraag, aanbod en infrastructuur, kwantitatieve analyse.	17
3.1	De vraag naar waterstof	17
3.2	Het aanbod van waterstof	18
3.3	Infrastructuur	22
4.	Plannen binnen de industriële clusters.....	25
4.1	Waterstofplannen Noord Nederland	25
4.2	Waterstofplannen Noord Holland	26
4.3	Waterstofplannen Zuid-Holland/Noord-Brabant	27
4.4	Waterstofplannen Zeeland	28
4.5	Waterstofplannen Limburg	29
5.	Stappen in de uitrol.....	31
5.1	Visie op de uitrol van waterstof	31
5.2	Programmatistische aanpak	33
5.3	Noodzakelijke stappen 2019-2030	34
	Bijlage 1: Vraag, aanbod, infra.....	38
	Bijlage 2: Plannen en ontwikkelingen	76
	Bijlage 3: Samenstelling Werkgroep Waterstof	82

Voorwoord

In het kader van het klimaatakkoord hebben de onderhandelingstafels elektriciteit en industrie de opdracht gegeven aan een werkgroep waterstof, om te komen tot een voorstel voor een programma gericht op waterstof als onderdeel van het klimaatakkoord. Er is binnen de werkgroep waterstof gekozen voor een expertmatige benadering, waarbij verschillen in zienswijzen kunnen worden benoemd, maar waarover niet is onderhandeld. Dat gebeurt aan de 'Tafels'. In deze rapportage zijn de kennis, inzichten en opvattingen van de werkgroepleden beschreven, aangevuld met openbare informatie uit rapporten en gesprekken met experts en belanghebbenden. De rapportage is gemaakt onder redactie van Jan Paul van Soest (voorzitter van de werkgroep) en Hans Warmenhoven (secretaris) en beschrijft zoveel mogelijk de zienswijze van de werkgroep als geheel. Dit betekent niet dat elk werkgroeplid of de bedrijven waarvoor zij werken alle uitspraken in de rapportage hoeven te onderschrijven.

Dit rapport is tevens een basis voor afspraken die binnen het klimaatakkoord over waterstof worden gemaakt. Met dien verstande dat de teksten die in het klimaatakkoord over waterstof worden opgenomen leunen op de inbreng van de werkgroep waterstof, maar uiteindelijk het resultaat zijn van discussies en afwegingen die aan de tafels zijn gemaakt.

Jan Paul van Soest
Voorzitter Werkgroep Waterstof

Samenvatting

Stringente klimaateisen, 49% minder broeikasgassen in 2030 en rond 100% in 2050, vragen om een drastische verandering van het energiesysteem en het industrie-/grondstoffensysteem. Nederland kan, dankzij zijn omvangrijke procesindustrie, geografische voordelen en gaskennis en -infrastructuur, door deze transitie proactief aan te pakken een onderscheidende clean-tech-industrie en kennispositie opbouwen die blijvende waarde toevoegt aan de Nederlandse economie. Deze twee overwegingen vormen de basis voor een programmatische en gefaseerde ontwikkeling van een waterstofsysteem, dat een aantal wezenlijke functies in een CO₂-vrije energie- en grondstoffenhuishouding gaat vervullen.

Waterstof in een CO₂-vrije energie- en grondstoffenhuishouding

Op de middellange (2030) en lange (2050) termijn zal waterstof een aantal cruciale functies in het energie- en grondstoffensysteem moeten en kunnen vervullen. Het gaat daarbij met name om:

1. CO₂-vrije *feedstock* voor de procesindustrie. Waterstof wordt nu al veel gebruikt (ca. 100 PJ omgerekend naar energiewaarde), en de behoefte zal groeien door nieuwe duurzame chemische processen. Deze feedstock zal op termijn CO₂-vrije waterstof moeten zijn, waarvoor geen alternatief is.
2. CO₂-vrije energiedragers voor hogetemperatuurwarmte voor de procesindustrie. Alternatieven voor temperaturen boven ca. 600 graden zijn beperkt.
3. Regelbaar CO₂-vrij vermogen, energieopslag voor langere perioden, en energietransport over langere afstanden, voor een *energievoorziening* waarin het aandeel niet regelbare weersafhankelijke duurzame energiebronnen sterk toeneemt, en waar de bronnen zich op grote afstand van de gebruiker bevinden (wind op zee). Die behoeften zullen vooral vanaf ca. 2030 gaan toenemen.

Daarnaast zal waterstof in verschillende andere sectoren een rol kunnen vervullen; de mate waarin en het tempo waarmee ook ten behoeve van deze functies een vraag naar waterstof zal ontstaan hangt onder meer af van de beschikbaarheid en kosteneffectiviteit van alternatieve manieren om aan de gevraagde functies te voldoen:

4. Mobiliteit, met name de zwaardere varianten waaronder scheepvaart en luchtvaart, en zwaar wegvervoer. De Mobiliteitstafel zet voor de automobilititeit ook sterk in op waterstof naast elektrisch vervoer, onder de aanname dat waterstof bijtijds en met voldoende volume beschikbaar gemaakt kan worden;
5. Gebouwde omgeving, mogelijk voor gebouwen en wijken die om verschillende redenen moeilijk op andere wijzen te verduurzamen zijn.

Alleen al gegeven de eerste drie genoemde functies is waterstof – puur als H₂ en/of gebonden aan zogeheten ‘dragers’ – een *robuuste oplossing* in het ‘eindbeeld’ van een CO₂-vrije energie- en grondstoffenhuishouding. Nederland heeft een goede uitgangspositie om een rol voor waterstof voor te bereiden, met zijn omvangrijke procesindustrie, die nu al ca. 100 PJ waterstof gebruikt, met zijn grote potentieel voor wind op de Noordzee, en met zijn gasinfrastructuur en -kennis.

Waterstof geeft de mogelijkheid om grote hoeveelheden duurzame energie op kosteneffectieve manier in het systeem te passen, en om nieuwe circulaire processen en waardeketens in de Nederlandse economie op te bouwen.

Binnen alle industriële clusters bereiden marktpartijen zich voor op een groeiende rol voor waterstof, met studies, ontwikkeling van business-cases en voorgenomen investeringen. De plannen voor groene waterstof tellen op tot een totale ambitie voor 2025 van meer dan 800 MW

electrolyservermogen en 15 kiloton waterstof uit biogene brandstoffen. Daarnaast wordt er op internationale schaal heel veel aandacht besteed aan waterstof als klimaatneutrale energiedrager. De verwachting is dat op termijn een omvangrijke internationale waterstofmarkt zal ontstaan, waarbinnen Nederland een sterke rol kan spelen.

De noodzaak om te werken aan waterstof blijkt ook uit de vraagontwikkeling. In opdracht van de cross-sectorale werkgroep waterstof is de potentiële vraag naar waterstof in kaart gebracht. Hieruit volgt dat er in 2030 alleen al aan de kust een grote potentiële vraag naar waterstof is voor industriële toepassingen (circa 125 tot 213 PJ). Het industriecluster Chemelot in Limburg kent een potentiële vraag naar waterstof van circa 25 tot 40 PJ. Daarnaast kan aan de kust een aanvullende vraag naar waterstof ontstaan voor elektriciteitsproductie. De daadwerkelijke vraag in 2030 is mede afhankelijk van de ontwikkeling van prikkels voor de industrie om te verduurzamen en van prikkels voor duurzame en CO₂-vrije energieproductie (zoals voortzetting van de SDE+ na 2025 waarover nu wordt nagedacht).

Waterstofbronnen

Het streven is om zoveel mogelijk in te zetten op groene waterstof, voornamelijk op basis van elektrolyse geproduceerd uit duurzame elektriciteit, maar ook op basis van biogene grondstoffen. Indien er in het Klimaatakkoord ruimte komt voor CCS (*Carbon Capture and Storage*, CO₂-afvang en -opslag) bij industriële processen, zou ervoor gezorgd moeten worden dat de inzet van blauwe waterstof – geproduceerd uit aardgas met afvang van CO₂ – optimaal bijdraagt aan de ontwikkeling van een breder waterstofsysteem, zonder de groei van groene waterstof te belemmeren. Op grond van internationale plannen en ontwikkelingen lijkt het waarschijnlijk dat er een mondiale waterstofmarkt zal ontstaan die zowel blauwe als groene waterstof omvat. Via certificering is differentiatie naar *carbon footprint* altijd mogelijk.

Een waterstofprogramma

In het kader van het klimaatakkoord zal gestart moeten worden met een substantieel waterstofprogramma. Dat programma zal zich primair richten op het ontwikkelen en ontsluiten van het aanbod van groene waterstof, de ontwikkeling van de benodigde infrastructuur, de samenwerking met diverse sectorprogramma's om de benutting van waterstof te faciliteren, en het faciliteren van lopende initiatieven en projecten. Vanuit dit programma zal ook, als er in het klimaatakkoord ruimte voor CCS/blauwe waterstof is, de synergie tussen infrastructuur en het gebruik van waterstof worden bevorderd.

Het is cruciaal dat dit programma zich al op korte termijn gaat richten op de stapsgewijze opschaling van de productie van groene waterstof uit duurzame elektriciteit. Daarvoor zijn er enkele gegronde redenen:

- a. De noodzakelijke grootschalige productie van groene waterstof vraagt om een snelle prijsreductie van electrolyzers. Door opschaling moet (en kan naar verwachting) tot 2030 een reductie van 60-70% in de prijs van electrolyzers gerealiseerd worden, tot een niveau van 200-500 €/kW_e bij opschaling naar 3-4 GW.
- b. Voor het realiseren van verdergaande CO₂-doelen na 2030 is een versnelde ontwikkeling van wind op zee noodzakelijk, wat vergemakkelijkt wordt als de ontwikkeling van waterstof gelijke tred houdt met de ontwikkeling van duurzame energie.
- c. Gezien de uitstekende uitgangspositie van Nederland voor de productie en de inzet van waterstof kan Nederland een leidende positie op dit gebied gaan vervullen als ons land vooropgaat in die ontwikkeling.

Een doelstelling voor het programma zou dan moeten zijn om in 2030 3-4 GW electrolyzers te hebben gerealiseerd, waarbij de ontwikkeling in de pas moet lopen met de extra groei van het aandeel duurzame energie. Financiering door private bedrijven, publieke bedrijven en cofinanciering uit publieke middelen (specifiek steunkader).

Daarnaast zal het programma zich moeten richten op de aanleg van een optimale waterstofinfrastructuur.

In de periode tot 2025 zal in de verschillende industriële en energieclusters naar verwachting een behoefte aan regionale infrastructuur voor waterstof ontstaan. Zo snel mogelijk moet bepaald worden wanneer er vanuit systeemefficiëntie-oogpunt ook de behoefte aan opslag van waterstof ontstaat en aan koppeling van verschillende clusters. De koppeling van de clusters via een *backbone* kan grotendeels met (aangepaste) bestaande aardgasinfrastructuur. Op basis hiervan zullen de komende jaren voorbereidingen worden getroffen voor het realiseren van een landelijke basisinfrastructuur voor waterstof (transport en opslag).

Tot 2030 worden er in dit programma de volgende fases en doelen onderscheiden:

- 2019-2021: Voorbereidend programma voor de uitrol van waterstof, met de vele lopende initiatieven en projecten als vertrekpunt;
- 2022-2025: Opschaling naar 500 MW geïnstalleerde elektrolysecapaciteit in combinatie met ontwikkeling van waterstofvraag en regionale infrastructuur; koppeling van de verschillende clusters;
- 2026-2030: Opschaling naar 3-4 GW geïnstalleerde elektrolysecapaciteit, koppeling aan opslaglocaties, uitbouw infrastructuur, afstemming met de extra groei van duurzame energie;

Tussen de fases zal steeds geëvalueerd moeten worden in hoeverre de vorderingen zodanig zijn dat het al haalbaar is om de volgende fase in te gaan. Dat geldt met name voor het tempo waarin de elektrolysecapaciteit opgevoerd kan worden.

In het voorbereidende programma voor de periode 2019 tot 2021 worden in ieder geval de volgende onderdelen opgenomen:

- In samenwerking met diverse innovatie- en sectorprogramma's moet gekeken worden hoe het in het kader van het klimaatakkoord in te zetten instrumentarium, met name in de industrie, optimaal bijdraagt aan de uitrol en inzet van waterstof;
- Onderzoek, innovatie, ontwikkeling en demofaciliteiten (ordegrootte 20-30 MW) voor verschillende waterstofketens, met oog voor differentiatie naar gevraagde kwaliteiten ('specs') voor de verschillende toepassingen;
- Voorbereiding van een specifiek financieel instrument voor ontwikkeling en kostenreductie van elektrolysecapaciteit, zoveel mogelijk in afstemming met de uitbreiding van duurzame energie;
- Bepalen van de benodigde transport- en opslaginfrastructuur en de benodigde financiering daarvoor;
- Ontwikkeling van een (EU) waterstof-certificatiesysteem zodat verschillende kwaliteiten in de markt onderscheiden kunnen worden;
- Duidelijkheid in de wet- en regelgeving over waterstof als energiedrager, 'vertaling' EU-richtlijnen in Nederlands beleid;
- Aanpassing wetgeving om in de bestaande gasnetten het transport en de distributie van waterstof mogelijk te maken;
- Wettelijke en regulatorische spelregels voor regionale en landelijke netbeheerders op het gebied van transport en opslag van waterstof;

- Visie op marktordening die de verhoudingen publiek en privaat bij de infrastructuur helder regelt. Vooralsnog kan met het zogeheten 'hybride model' worden gewerkt.

De kosten voor dit voorbereidende programma worden geschat op rond € 25 miljoen per jaar, exclusief bijdragen voor investeringen. Voor dat laatste zal vanaf 2021 een specifiek financieel steunkader in werking moeten zijn dat de beoogde 65% kostenreductie voor elektrolyse taakstellend realiseert. Tot zo'n kader er is zullen investeringsplannen uit bestaande regelingen en financieringsmogelijkheden moeten putten.

Zo'n programma zou moeten bestaan uit een landelijke component als het gaat om de realisatie van de noodzakelijke randvoorwaarden, maar ook uit regionale deelprogramma's met een maatwerk aanpak per industriecluster en omliggend verzorgingsgebied. Daarnaast zet de overheid in op internationale samenwerking voor de ontwikkeling van waterstof, en in lijn hiermee ontsluiten van fondsen via diverse EU-programma's.

Een aldus gefaseerd programma behelst samenwerking tussen sleutelpartijen (overheden, marktpartijen, kennisinstellingen, netwerkbedrijven en maatschappelijke organisaties), zodat de ontwikkeling van een waterstofsysteem gecoördineerd vorm kan krijgen.

1. Inleiding

In het kader van de onderhandelingen om te komen tot een Klimaatakkoord hebben de Elektriciteitstafel en Industrietafel opdracht gegeven aan een cross-sectorale Werkgroep Waterstof om te komen tot conceptafspraken over een programma gericht op waterstof als onderdeel van het klimaatakkoord.

Aan de werkgroep zijn de volgende vragen meegegeven:

- Algemeen
 - Beeld van potentie, kosten (van de gehele keten, inclusief infrastructuur) en randvoorwaarden van productie en gebruik CO₂-vrije waterstof.
 - Rol blauwe en groene waterstof.
- Korte termijn
 - Inventarisatie van benodigde inzet op pilots en demonstraties.
 - Beeld van benodigde inzet voor realiseren van kostenreductie.
- Lange termijn
 - Indicatoren voor het volgen van de scenario's voor uitrol van groene waterstofproductie, inclusief ontwikkelingen internationale markt.
 - Contouren van een programmatische aanpak.
 - Welke vraagstukken, en waar mogelijk richtinggevende uitspraken, op het gebied van infrastructuur, marktordening en energiewetgeving zijn van belang voor grootschalige ontwikkeling van markt en infra voor waterstof?

De werkgroep bestond uit vertegenwoordigers van diverse partijen (bijlage 3). In de periode van oktober 2018 tot de kerst heeft de werkgroep hard gewerkt om te komen tot voorliggende rapportage.

Leeswijzer

In deze rapportage wordt allereerst in hoofdstuk 2 een visie gegeven op de rol van waterstof in de transitie, met name op de rol die op de langere termijn gespeeld kan of wellicht zelfs moet worden.

In het volgende hoofdstuk 3 wordt op basis van verschillende scenario's aangegeven hoe de potentiële vraag van waterstof zich kan gaan ontwikkelen van nu tot 2050. In dat hoofdstuk wordt voorts ingegaan op het aanbod van waterstof, op de verschillende aanbadopties en op de benodigde infrastructuur.

In hoofdstuk 4 worden de plannen die er bestaan op het gebied van waterstof binnen verschillende industriële en energieclusters beschreven.

In het laatste hoofdstuk, 5, wordt aangegeven hoe stapsgewijs toegewerkt kan worden naar de gewenste eindsituatie en welke stappen er op de kortere termijn noodzakelijk zijn om deze ontwikkeling in gang te zetten.

2. Waterstof in een CO₂-vrij energie- en grondstoffensysteem - kwalitatieve analyse

2.1 Een rol voor waterstof

De in Parijs afgesproken doelstelling om de opwarming van de aarde ruim onder de 2 graden te houden heeft grote implicaties. Praktisch gezien komt het er voor westerse, geïndustrialiseerde landen op neer dat per 2050 de economie broeikasgas-emissievrij moet zijn. Mogelijk zijn dan zelfs ook zogeheten negatieve emissies nodig (verwijdering van CO₂ uit de atmosfeer, en berging van deze CO₂ ondergronds of in materialen die langdurig in kringlopen rondgaan). Diverse studies zowel in Nederland als in het buitenland concluderen dat waterstof, als niet-koolstofhoudende energiedrager en tevens grondstof (*feedstock*) veel functies over kan nemen die nu door fossiele brandstoffen worden vervuld, een belangrijke rol zal moeten krijgen in deze transitie.

De inzet van waterstof is niet alleen belangrijk voor de klimaatdoelen, maar brengt ook kansen met zich mee: naast CO₂-reductie biedt waterstof de mogelijkheid om weers- en seizoensafhankelijke duurzame energie op kosteneffectieve manier in het systeem te passen, en om nieuwe circulaire waardeketens in de Nederlandse economie op te bouwen. Door de ligging van Nederland aan de Noordzee is er een groot potentieel voor het produceren van windenergie die omgezet kan worden in waterstof. De bestaande gasinfrastructuur kan bovendien met beperkte aanpassingen worden ingezet voor transport en opslag van waterstof tussen regionale clusters en naar verder gelegen markten, om vraag en aanbod in tijd en plaats met elkaar te verbinden. Door proactief in te zetten op productie en distributie van waterstof wordt binnen Nederland een gunstig vestigingsklimaat gecreëerd voor de industrie omdat ze daarmee relatief eenvoudig kunnen voldoen aan de steeds stringenter eisen die wereldwijd verwacht mogen worden.

De werkgroep waterstof heeft met name het eerste punt, waterstof als optie om aan klimaatdoelen te voldoen, verder uitgewerkt, conform haar taakopdracht vanuit het Klimaatakkoord. Over de economische kansen, zeker voor Nederland, valt zeker meer te zeggen, zie bijvoorbeeld een recente studie van CE Delft¹, maar dat valt in belangrijke mate buiten het bestek van de taakopdracht van de werkgroep. Wel heeft de werkgroep geïnventariseerd welke initiatieven rond waterstof er al in de industriële energieclusters spelen, en alleen al daaruit kan worden afgeleid dat krachtige en innovatieve spelers de kansen positief inschatten.

¹ Werk door groene waterstof, CE Delft, 2018

2.2 Potentiële rollen voor waterstof in een CO₂-vrij energie- en grondstoffensysteem

Uit diverse analyses kan worden afgeleid dat met de verdere verduurzaming van het energie- en grondstoffensysteem de behoefte zal groeien aan een aantal wezenlijke functies:

1. CO₂-vrije *feedstock* voor de procesindustrie.
Waterstof wordt nu al veel gebruikt (ca. 100 PJ omgerekend naar energiewaarde, en de behoefte zal groeien door nieuwe duurzame chemische processen. Deze feedstock zal op termijn CO₂-vrije (groene, blauwe en/of biogene) waterstof moeten zijn, waarvoor geen alternatief is.
2. CO₂-vrije energiedragers voor hoge temperatuur warmte voor de procesindustrie.
Alternatieven voor temperaturen boven ca. 600 graden zijn beperkt.
3. Systeemfuncties: regelbaar CO₂-vrij vermogen, energieopslag voor langere perioden, en energietransport over langere afstanden. In een *energievoorziening* waarin het aandeel niet regelbare, weersafhankelijke, duurzame energiebronnen sterk toeneemt, en waar de bronnen zich op grote afstand van de gebruiker bevinden (wind op zee) kan waterstof een sleutelpositie innemen. De behoeften aan systeemfuncties zullen vooral vanaf ca. 2030 gaan toenemen.

Daarnaast zal waterstof in verschillende andere sectoren een rol kunnen vervullen; de mate waarin en het tempo waarmee ook ten behoeve van deze functies een vraag naar waterstof zal ontstaan hangt onder meer af van de beschikbaarheid en kosteneffectiviteit van alternatieve manieren om aan de gevraagde functies te voldoen:

4. Mobiliteit.
Voor de *mobilititeit*: goed transporteerbare CO₂-vrije energiedragers die liefst tevens snel te 'tanken' zijn, met name het zwaardere transport, waaronder scheepvaart en luchtvaart, en zwaar wegvervoer. Scheepvaart en luchtvaart blijven in het Klimaatakkoord buiten beschouwing. De Mobiliteitstafel zet daarnaast sterk in op waterstof naast elektriciteit voor personenvervoer, onder de aanname dat waterstof bijtijds en met voldoende volume beschikbaar gemaakt kan worden;
5. Gebouwde omgeving.
In de gebouwde omgeving kunnen CO₂-vrije energiedragers nodig zijn voor gebouwen en wijken die om verschillende redenen moeilijk te verduurzamen zijn met combinaties van isolatie, verwarmen op basis van elektriciteit, en geothermie.

Onderstaande tabel geeft illustratief een kwalitatief beeld van een mogelijk verloop van de transitie waarin waterstof in toenemende mate een aantal van deze rollen vervult (eigen 'houtschoolschets' vanuit de werkgroep waterstof):

	Nu	2030	2050
Industrie: Feedstock	Grijze waterstof Methaan (aardgas) als C- en H-bron	Blauwe H ₂ naast grijze H ₂ , geleidelijke toename van het aandeel groene waterstof. Toename biogene C (biomassa)	Groene en blauwe waterstof. 0 grijze H ₂ Biogene C
Industrie: HT energie	M.n. aardgas	Toename elektrificatie processen, dalende aardgasinzet, blauwe waterstof en geleidelijk steeds meer groene waterstof.	Verdere elektrificatie Blauwe en groene H ₂
Industrie: LT en MT (<200 C)	Veelal aardgas, enige biomassa	(Ultradiepe) geothermie, Power to Heat, mogelijk ook waterstof	Verdere ontwikkeling opties 2030, groei inzet waterstof
Elektriciteit: Regelbaar vermogen	Aardgasgestookte centrales	Aardgasgestookte centrales Biomassacentrales Toename vraagsturing. Power to Heat (P2H). Start CO ₂ -vrij gas to power. Geleidelijk meer inzet groene waterstof in centrales.	Waterstofgestookte centrales (G2P, gas to power), vraagsturing
Energiesysteem: Opslag	Aardgasopslag, piek en seizoen	Aardgasopslag, piek en seizoen, start waterstofopslag, decentraal toename batterijen (piek)	H ₂ -opslag. Andere grootschalige opslagvormen bv OPAC (Ondergrondse Pomp Accumulatie), Noordzee- eiland, e.a.
Energiesysteem: Energietransport	Infra elektriciteit & gas. Internationale markten fossiele energiedragers.	Uitbreiding infra elektrisch. Ombouw infra gas → H ₂ . Afname 'ruw' fossiel, toename CO ₂ - vrije producten obv fossiel (start blauwe H ₂)	Uitgebreider infra elektriciteit. Uitgebreide infra H ₂ . Internationale markt H ₂ .
Mobiliteit: Gas/vloeibare E- dragers	Aardolie. Begin elektrisch vervoer (EV) Bijmenging biobrandstoffen Take-off LNG scheepvaart	Verdere elektrificatie EV Biobrandstoffen zwaar transport Start H ₂ (groen) zwaarder PV (personen) en zwaar transport Start LNG naar bioLNG	Meer elektrificatie zwaarder transport Biobrandstoffen zwaar transport en luchtvaart Waterstof
Gebouwde Omgeving: Gas	Aardgas	Isolatie. Geothermie. Restwarmte. Al dan niet hybride warmtepompen. Groen gas. Demo's waterstof.	Verdere isolatie, diverse warmtebronnen, waterstof.

Aangetekend zij dat 'waterstof' een breedspectrum aan kwaliteiten en specificaties (zuiverheid) kan omvatten, die per toepassingsgebied anders kan zijn. Voor bijvoorbeeld ondervuring kan met lagere kwaliteiten worden volstaan dan voor specifieke chemische reacties. In de praktijk zal daar bij de uitrol van waterstof aandacht voor moeten zijn, in het kader van de voorliggende analyse is dit vraagstuk niet verder uitgewerkt.

In hoofdstuk 3 wordt een meer kwantitatieve (scenario-)analyse van de ontwikkeling van vraag, aanbod en infrastructuur gemaakt.

2.3 Robuuste rollen voor waterstof

Dat er in een CO₂-vrij energie- en grondstoffensysteem een potentiële rol is voor waterstof laat de voorgaande paragraaf zien. In welk *tempo* en in welke mate die functionele vraag zich ontwikkelt en in welke mate waterstof een rol krijgt is minder zeker, en is van verschillende factoren afhankelijk, waaronder in elk geval:

- Infrastructuur voor waterstof.
Vindt de ontwikkeling van infrastructuur plaats *volgend* op de ontwikkelingen van vraag en aanbod, of loopt de ontwikkeling er juist op vooruit? Is of wordt de infrastructuur publiek, privaat of zijn er mengvormen? Hoe wordt de infrastructuur bekostigd, zeker in een aanloopfase wanneer de capaciteit, terwijl vraag en aanbod nog aan het groeien zijn, niet ten volle kan worden benut?
- Het tempo van ontwikkeling van hernieuwbare energie.
Met het oog op de grote volumina is in het bijzonder de ontwikkeling van wind op de Noordzee van belang. Daarnaast is het tempo waarmee wind en zon op land zich ontwikkelt van belang.
- Ontwikkeltempo en kosten van elektriciteitsinfrastructuur.
Ook elektriciteit moet van (duurzame) bron naar de gebruiker worden getransporteerd. Dat vergt netverzwaringen en -uitbreidingen, die gelijke pas zullen moeten houden met het ontwikkeltempo van duurzame bronnen en vraag. Ook de kosten van deze infrastructuur spelen een rol, in vergelijking met transportkosten voor andere energiedragers, zoals waterstof.
- Kostprijsontwikkeling van groene waterstof.
Hiervoor zijn in het bijzonder de elektriciteitsprijzen (voor ongeveer 75%, maar dat is uiteraard sterk afhankelijk van de stroomprijzen) en de kosten van electrolyzers (investeringskosten en bedrijfstijd in uren per jaar) van belang.
- Het tempo waarin de behoefte aan specifieke functies die waterstof kan vervullen toeneemt.
Het gaat hierbij de drie wezenlijke functies zoals genoemd in paragraaf 2.2, en de mogelijke andere functies die waterstof als de ontwikkeling eenmaal op gang is ook kan vervullen. Genoemd zijn CO₂-vrije *feedstock*, CO₂-vrije energiedrager voor hoge temperatuurtoepassingen, energie-hoofdtransport en -opslag, CO₂-vrij regelbaar vermogen, en mogelijk ook CO₂-vrije energiedragers voor (zware) mobiliteit en de gebouwde omgeving.
- Het tempo waarmee alternatieven om in deze functies te voorzien zich ontwikkelen.
In het kader van het Klimaatakkoord zijn ook andere cross-sectorale werkgroepen ingesteld om systeemvraagstukken verder te bekijken: hoe kan flexibiliteit worden geleverd, welke rol kan biomassa spelen, wat kan power to heat, en idem waterstof? Ook hier spelen vragen over de snelheid waarmee de verschillende opties verder kunnen worden gebracht.
- De mogelijke ontwikkeling van een internationale waterstofmarkt en de langetermijnprijzen voor waterstof.
Veel studies maken aannemelijk dat op lange termijn zich een commoditymarkt voor waterstof kan ontwikkelen. Daarop kan zowel groene waterstof een rol spelen

(uit zon en wind uit gebieden met veel mogelijkheden daarvoor) als blauwe waterstof (uit landen die hun fossiele koolwaterstoffen willen blijven benutten maar dan met CCS vanwege klimaatrestricties). Hoe snel deze commoditymarkt zich ontwikkelt en welke prijsniveaus voor waterstof kunnen ontstaan is in dit stadium niet goed te zeggen.

De werkgroep concludeert dat er in elk geval drie functies zijn waar waterstof een belangrijke rol moet kunnen vervullen:

1. *CO₂-vrije feedstock (grondstof)*

Binnen de industrie wordt er nu al veel waterstof gebruikt [100 PJ omgerekend naar energetische waarde], voor de productie van diverse producten. Dit is nu overwegend 'grijze' waterstof, geproduceerd uit fossiele brandstoffen, met name aardgas. De verwachting is dat de vraag naar waterstof niet zal afnemen, en wellicht zal toenemen door nieuwe duurzame processen. Het systeem zal moeten blijven voorzien in deze waterstofvraag.

De klimaateisen betekenen dat deze waterstof in toenemende mate CO₂-vrij zal moeten worden gemaakt. Dat kan in de vorm van blauwe waterstof (fossiele basis, met verwijdering van CO₂), en in de vorm van groene waterstof, via elektrolyse met hulp van duurzame elektriciteit. Denkbaar is overigens ook dat waterstof uit (duurzame) biomassa wordt geproduceerd in de vorm van biogeen syngas of biogas, waarbij moet worden geborgd dat de koolstof(verbindingen) worden vastgelegd en niet naar de atmosfeer worden geloosd.

2. *CO₂-vrije energiedragers voor hogetemperatuurwarmte voor de procesindustrie*

Binnen de industrie is veel vraag naar (hogetemperatuur-)warmte die nu in belangrijke mate op basis van aardgas wordt opgewekt. Deze warmtevraag zal deels kunnen worden geëlektrificeerd (Power to Heat, bekeken in de gelijknamige cross-sectorale werkgroep), maar als het gaat om heel hoge temperaturen (600°C en meer) is dat veel lastiger en is het beter om een gasvormige energiedrager² te gebruiken. Waterstof is dan een relatief makkelijk in te passen alternatieve brandstof, ook omdat de beschikbaarheid ervan beter aansluit bij het vraagprofiel van industriële processen.

3. *Systeemfuncties: Regelbaar CO₂-vrij vermogen, energieopslag en langeafstandstransport*

Duurzame elektriciteitsopwekking zal worden gedomineerd door de inzet van zon- en windenergie. Deze opties zijn niet regelbaar in de zin dat ze wel naar believen af te schakelen zijn ('*curtailment*'), maar niet naar behoefte aan te zetten ('*dispatchable*'). Naarmate deze opties een steeds groter aandeel krijgen in de totale mix ontstaat er behoefte aan regelbaar vermogen dat geen CO₂ uitstoot en vormen van energieopslag om te zorgen dat het aanbod goed afgestemd kan blijven op het aanbod. Als het gaat om de langeretermijnopslag, wellicht zelfs seizoensopslag, is omzetting in waterstof een interessante oplossing. Het transport van elektriciteit (bulktransport voor gelijkwaardige energievolumes) is een factor 10-20 duurder dan het transport van gasvormige energiedragers zoals waterstof. Daar staan voor waterstof 1 of 2 extra conversieslagen tegenover, afhankelijk van welke energiedrager uiteindelijk gebruikt

² Verkenning naar mogelijkheden om aardgas te vervangen in industriële verhittingsprocessen, DNV-GL, 2018

wordt. Deze conversie brengt energieverliezen en dus ook kosten met zich mee. Voorts is een sterke toename van het elektriciteitstransport over land lastig, omdat er weerstand bestaat tegen de aanleg van nieuwe hoogspanningsnetten, wat tot vertragingen kan leiden. Tenslotte zijn er capaciteitsbeperkingen; om daar enig gevoel voor te krijgen: het huidige elektriciteitsnetwerk (TenneT) kan ongeveer 25 GW piekvraag aan, het huidige gasnetwerk (Gasunie) 150 GW. Afhankelijk van het al dan niet aanwezig zijn van infrastructuur en de afstand die moet worden overbrugd tussen elektriciteitsbron en energiegebruiker kan het aantrekkelijk zijn om de elektriciteit om te zetten in waterstof en dan als waterstof te transporteren. Op basis van analyses van aanbod- en vraagcurves van elektriciteit en de vraag naar andere energiedragers is een voorlopige conclusie dat in 2050 het aandeel van elektriciteit in de totale energielevering, nu rond 20%, mogelijk tot 40%, 50% procent, wellicht 60% kan groeien. Internationale studies [bronnen, o.a. IEA, IRENA] komen tot vergelijkbare getallen. Gegeven de klimaatrestricties zal in een groot deel van de energievraag moeten worden voorzien middels andere klimaatneutrale energiedragers, zoals waterstof, biogene brandstoffen en warmte uit CO₂-vrije bronnen.

Dit zijn drie robuuste drivers die bepalen dat waterstof naast elektriciteit en biogene brandstoffen een cruciale rol krijgt binnen het industrie- en energiesysteem. Een recente Europese studie³ laat zien dat een transitie-scenario voor Europa waarin waterstof een prominente rol vervult uiteindelijk resulteert in een lagere CO₂-emissie en een gemiddelde 50% lagere kostprijs per vermeden ton CO₂-emissie dan in het basisscenario.

2.4 Andere mogelijke rollen voor waterstof

Daarnaast kan, als er eenmaal een waterstofaanbod en -infrastructuur is, waterstof een rol gaan spelen in de (zware) mobiliteit en in delen van de gebouwde omgeving als andere manieren van verduurzaming problematisch blijken.

Aan de Tafel Mobiliteit wordt een groot belang aan waterstof toegekend. Uit de tekst van die Tafel:

"... Waterstof voor.... mobiliteit, met name personenvervoer voor grotere afstanden en wegtransport als focus richting 2025. Als belangrijke opties voor de wat langere termijn (richting 2030) zijn zwaar wegtransport over lange afstanden, scheepvaart en rail nadrukkelijk in beeld. We zetten naast batterij-elektrisch vervoer sterk op waterstof in als onderdeel van het beleid dat zich richt op 0-emissie mobiliteit. Belangrijk is daarbij de transitie van grijze naar groene waterstof".

Daaraan valt nog toe te voegen dat waterstof ook een belangrijke optie zou kunnen zijn voor de scheepvaart en de luchtvaart. Hoewel deze sectoren in het Klimaatakkoord buiten beeld blijven, zijn het wel sectoren waar de CO₂-emissies groeien en waarvoor bij wereldwijde klimaatrestricties alternatieven nodig zijn. Al spelen deze sectoren in het klimaatakkoord geen rol, in de overwegingen voor het ontwikkelen van een waterstofsysteem moet de potentiële vraag naar waterstof in die sectoren wel worden meegewogen. Schattingen van de Werkgroep Waterstof geven een waterstofvraag in 2030

³ https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/4.presentation_capros.pdf

van rond 20 PJ (vergelijk het huidige waterstofverbruik in de industrie: ca 100 PJ). Dit is in het midden-scenario van de kwantitatieve verkenning (hoofdstuk 3) opgenomen.

Over de inzet van waterstof in de gebouwde omgeving wordt intensief gediscussieerd, aan de Tafel Gebouwde Omgeving en daarbuiten. Enerzijds wordt erop gewezen dat isolatie, elektrificatie en geothermie prioriteit moeten hebben, anderzijds wordt beargumenteerd dat sommige woningen, gebouwen en wijken niet of alleen tegen hoge kosten op deze wijze kunnen worden aangepakt, reden waarom in die visie waterstof als alternatief een optie moet blijven. In onder meer het VK (Manchester, Leeds) als in Nederland (Rozenburg, Hoogeveen) wordt de inzet van waterstof in de gebouwde omgeving beproefd.

De werkgroep waterstof is niet in de positie om de discussies over waterstof in de mobiliteit en in de gebouwde omgeving te beslechten. De mogelijke toepassingen in mobiliteit en gebouwde omgeving zijn ook geen doorslaggevende overwegingen voor het ontwikkelen van een waterstofsysteem. De argumentatie daarvoor wordt primair gevonden in de drie in de vorige paragraaf uitgewerkte functies: CO₂-vrije feedstock, hogetemperatuurwarmte en systeeminzet. Als dan op grond van die overwegingen met de ontwikkeling van een waterstofsysteem wordt begonnen, kan vanuit dat systeem ook aan mobiliteit en gebouwde omgeving geleverd worden, afhankelijk van de mogelijkheden om in die sectoren tot verregaande CO₂-reducties te komen.

Waterstof zal overigens ook voor bredere toepassingen ingezet worden. Biogene CO₂ kan met (groene) waterstof worden omgezet naar methanol. Toepassingen zijn bijvoorbeeld; biobrandstof in personenauto's (dit gebeurt nu al) brandstof in vrachtverkeer of brandstof in de scheepvaart. Verder kan methanol als grondstof ingezet worden ten behoeve van de vergroening van de industrie.

2.5 Aanbod van waterstof

Een breed gedragen streven is om zoveel mogelijk in te zetten op groene waterstof, voornamelijk op basis van elektrolyse geproduceerd uit duurzame elektriciteit. Daarnaast kan ook uit biogene grondstoffen waterstof worden geproduceerd. Het grootste deel van de groene waterstof zal geproduceerd moeten worden uit elektriciteit en het is daarom van belang dat met name wind op zee-vermogen zo snel mogelijk wordt opgevoerd, in de pas met de vergroting van de elektrolysecapaciteit en de vraag naar waterstof. Het plan van de groene waterstofcoalitie kan voor deze ontwikkeling richtinggevend zijn.

Waterstof kan ook geproduceerd worden uit aardgas of andere fossiele brandstoffen. Als de daarbij vrijkomende CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen (CCS) ontstaat een klimaatneutrale waterstof, ook wel 'blauwe' waterstof genoemd. In hoeverre er in Nederland blauwe waterstof gaat worden geproduceerd hangt met name af van de besluiten die genomen worden over CCS. Daarover is maatschappelijke en politieke discussie; de werkgroep waterstof is niet in de positie deze te beslechten, maar kan slechts aangeven wat de keuzes zijn, zonder de afweging te maken.

Indien vanuit het belang van CO₂-emissiereductie in de industrie ervoor gekozen wordt om in de periode tot 2030 CCS toe te gaan passen, is het van belang dat CCS liefst zo wordt ingevoerd dat wordt bijgedragen aan de ontwikkeling van een uitgebreider waterstofsysteem. Dit kan door voor eventuele nieuwe SMR- en ATR-installaties in de

designfase al zo veel mogelijk te kiezen voor pre-combustion CCS, op basis waarvan klimaatneutraal waterstof wordt gemaakt, die dan in diverse functies kan worden toegepast. Als deze route wordt bewandeld kan hiermee een basis worden gelegd voor een waterstofinfrastructuur en waterstofmarkt waar een toenemende stroom groene waterstof op aangesloten kan worden. De aanloopkosten naar een waterstofsysteem kunnen dan mede door blauwe waterstof worden gedragen, dat vooralsnog goedkoper en eerder beschikbaar kan komen dan groene waterstof. Er moet dan echter ook voor gezorgd worden dat de keuze voor CCS geen blokkade gaat opwerpen voor een gestage groei van de hoeveelheid groene waterstof.

Indien er geen (maatschappelijke en politieke) ruimte is voor de toepassing van CCS, dan is ontwikkeling van groene waterstof sec aan de orde. De aanloopkosten naar een waterstofsysteem op weg naar een ruimere inzet van waterstof op termijn zullen dan door kleinere en langzamer op gang komende volumina waterstof worden gedragen, maar bij deze route wordt het risico van een fossiele lock-in vermeden.

Overigens mag verwacht worden dat er op mondiale schaal veel zal gaan gebeuren op het gebied van waterstof, met aanbod van blauwe waterstof vanuit landen die grote voorraden fossiele energie hebben die ze nog te gelde willen maken, en vanuit landen waar heel goedkoop duurzame elektriciteit geproduceerd kan worden. Vermoedelijk zal op de internationale markt puur op prijs en kwaliteit (spec's) geconcurrereerd worden, en zal in deze commoditymarkt geen onderscheid naar productiewijze gemaakt worden. Als dat wenselijk wordt geacht kan evenwel altijd met een certificatenstelsel naar herkomst worden gedifferentieerd.

Met deze internationale ontwikkelingen moet bij de Nederlandse afwegingen wel rekening gehouden worden. Met het creëren van een waterstofinfrastructuur wordt dan aangesloten op een mondiale ontwikkeling en wordt de kwetsbaarheid van het eigen energiesysteem kleiner.

2.6 Coördinatie

Gegeven enerzijds de noodzaak van een ontwikkeling van een waterstofsysteem en de wenselijkheid daarmee tijdig te beginnen, en gegeven de vele vooral tijdgebonden factoren die de mogelijkheden bepalen, wijst de werkgroep waterstof hierbij op het belang van afstemming (coördinatie, orkestratie).

Een waterstofsysteem zal niet van de ene dag op de andere en als vanzelf tot stand kunnen komen, ook niet als de klimaateisen sterk zouden worden aangescherpt, bijvoorbeeld, als denkmodel, in de vorm van een hoge CO₂-prijs. Er is immers sprake van een complex systeem van vraag, aanbod en infrastructuur voor een energiedrager en grondstof die, behoudens toepassing in de specifieke omgeving van de industrie, een nieuw fenomeen is. Er is geen manifeste vraag naar waterstof (behalve in de industrie), maar slechts een latente, in de vorm van een toenemende behoefte aan functies die in het energie- en grondstoffensysteem van de toekomst klimaatneutraal zullen moeten worden vervuld, er is ook nog geen aanbod van waterstof (behalve van grijze waterstof, wederom in de industrie). En tenslotte is er nog geen infrastructuur (behalve bij de industrieclusters) die vraag en aanbod met elkaar kan verbinden.

De kern is daarom een doordachte ontwikkeling qua tijd en locaties vorm te geven, als eerste stappen naar een systeem, dat als dat eenmaal ontwikkeld is als vanzelfsprekend kan gelden, terwijl om daar te komen een slim samenspel nodig is. Het is daarbij, de complexiteit en de lange lead-times van belang snel te beginnen om gereed te zijn voor de vraag en aanbod die zich de komende decennia gaat ontwikkelen.

Dat betreft allereerst het samenspel vraag-aanbod-infrastructuur. Het is logisch vanuit bestaande industriële- en energieclusters te werken waar al een lokaal waterstofsysteem is. Vandaaruit kan worden uitgebouwd naar connecties tussen de clusters en kunnen, bij toenemende waterstofproductie, ook meer gebruikers worden aangesloten. Zo'n ontwikkelproces vergt een zekere afstemming of coördinatie over de keten(s). Ook de afstemming in de tijd is van belang. Met name voor groene waterstof zal de ontwikkeling van het waterstofsysteem gelijke tred moeten houden met de ontwikkeling van duurzame energieopwekking waar waterstof uit geproduceerd wordt. Als bijvoorbeeld een beginnende markt voor waterstof ontstaat en er bij een groeiende vraag naar waterstof niet voldoende duurzame energie is om deze te produceren, terwijl er wel elektrolyse-capaciteit is gebouwd, zal de waterstof niet uit duurzame stroom worden geproduceerd maar stroom uit de elektriciteitsmix die er op dat moment is. En omgekeerd, als extra aanbod van duurzame energie wordt geïnstalleerd, terwijl dit niet maximaal wordt gebruikt, zal dit mogelijk moeten worden afgeschakeld (*curtailment*) waardoor het mogelijke aanbod van deze duurzame energie dan niet ten volle wordt benut. Zo'n situatie zal naar verwachting pas voorbij 2030 kunnen ontstaan, terwijl de eerste situatie zich al eerder kan voordoen. Ook hier weer komt de noodzaak van een zeker coördinatiemechanisme naar voren.

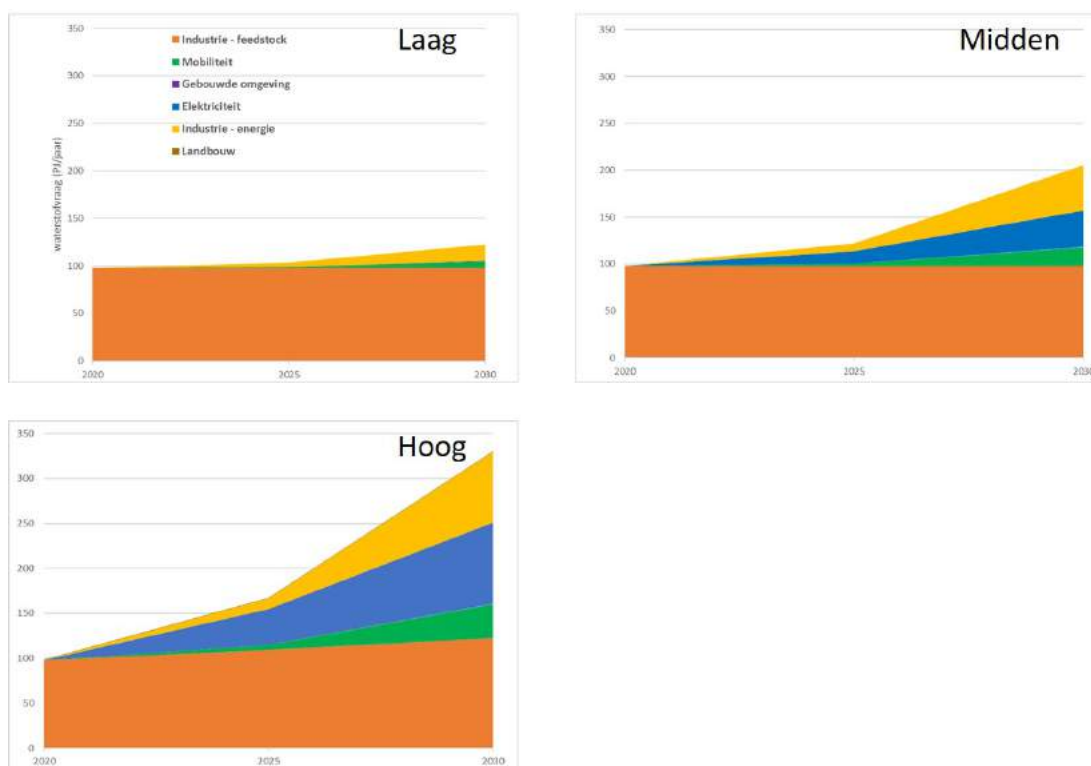
Hoe de benodigde coördinatie daadwerkelijk vormgegeven kan worden zou nader moeten worden onderzocht, maar te denken valt aan 'zachtere' vormen van coördinatie via overleg tussen alle betrokken ketenpartijen tot 'hardere' vormen zoals het gecombineerd tenderen van een hernieuwbare energie-opgave, een specifieke toepassing en de hierbij benodigde infrastructuur. De precieze vormen zouden later moeten worden uitgewerkt.

3. Vraag, aanbod en infrastructuur, kwantitatieve analyse

3.1 De vraag naar waterstof

Aan de hand van bestaande studies, marktinformatie en scenario-analyse (laag, midden en hoog) is voor alle klimaatakkoord sectoren de potentiële vraag naar waterstof in kaart gebracht, zie figuur 1. Er is vooral gekeken naar 2030 maar voor elke sector is ook een doorkijk gegeven naar 2050. De analyse treft u aan als bijlage 1 bij dit rapport.

Figuur 1: de verschillende vraagscenario's laag, midden en hoog voor 2030



Uit de analyse komt naar voren dat er een grote potentiële vraag naar waterstof is in 2030. De huidige vraag naar waterstof is bijna 100 PJ. Deze waterstof wordt voor het overgrote deel gebruikt als grondstof door de industrie. Een klein gedeelte van de waterstof die nu al vrijkomt als bijproduct (bijvoorbeeld bij de productie van chloor) wordt ingezet voor verhitting, omdat er door gebrek aan infrastructuur geen andere toepassing mogelijk is.

In het midden-scenario is voor 2030 bijvoorbeeld een verdubbeling van de huidige vraag voorzien. Deze vraag naar waterstof wordt vooral gedreven door de vraag naar waterstof als grondstof voor (nieuwe) industriële processen, de vraag naar waterstof als brandstof voor zeer hoge-temperatuurprocessen, de vraag naar brandstof voor mobiliteit en de

mogelijke inzet van waterstof als brandstof voor de productie van CO₂-vrije regelbare elektriciteit.

Onderstaand wordt per vraagfunctie een nadere toelichting gegeven op de te verwachten vraag.

Waterstof als grondstof (feedstock)

Richting 2030 zien partijen in het lage- en midden scenario een constante vraag tot 2030. In het lage scenario neemt de vraag daarna 8% per 5 jaar af door teruglopende vraag in o.a. raffinage. In het midden scenario is een constante vraag tot 2050 voorzien, vanwege de afname van de traditionele feedstock en een groei die wordt veroorzaakt door nieuwe toepassingen. Het hoge scenario gaat ervan uit dat de vraag naar waterstof als grondstof met 12% per jaar groeit door toenemende vraag naar waterstof voor raffinage, ammoniak en door een toename van waterstof voor nieuwe industriële processen zoals het maken van synthetische gassen en brandstoffen met behulp van Steel2Chem en Waste2Chem.

Waterstof als brandstof voor verhitting in de industrie

Voor de vraag naar waterstof voor verhittingsprocessen in de industrie zijn ook drie scenario's gehanteerd. De aannames hierachter zijn gebaseerd op een studie van DNV-GL in opdracht van Gasunie. In het lage scenario gaan slechts enkele sectoren deels over op waterstof. Dit zijn vooral de niet te elektrificeren processen die worden toegepast bij de productie van keramiek en glas. In het hoge scenario gaat 70% van alle op dit moment gasgestookte processen over op waterstof om de warmtebehoefte in te vullen.

Waterstof als brandstof voor mobiliteit

Uit de inventarisatie blijkt dat er een relatief groot potentieel is voor de inzet van waterstof als brandstof voor mobiliteit. Deze groei is met name gebaseerd op de doelen voor Europa die voortvloeien uit de 'alternative fuels for sustainable mobility'-richtlijn. De gegevens die zijn gebruikt komen van de mobiliteitstafel, waar het midden scenario wordt gehanteerd. In het midden scenario gaat het om totaal 375.000 voertuigen (waarvan 300.000 voertuigen voor personenvervoer) die tezamen ruim 20 PJ aan waterstof gebruiken.

Waterstof in de sectoren landbouw en gebouwde omgeving

Ook de sectoren landbouw en gebouwde omgeving kennen een potentiële vraag naar waterstof. De vraag naar waterstof in de landbouwsector is in alle drie de scenario's in 2030 zeer beperkt, minder dan 1PJ. De vraag naar waterstof in de gebouwde omgeving is mogelijk in de toekomst aanzienlijk (40-120 PJ). In de periode 2030 zal de rol van waterstof daar naar verwachting klein zijn vanwege de beperkte beschikbaarheid van fijnmazige infrastructuur, en het kleine aantal pilotprojecten dat is voorzien.

3.2 Het aanbod van waterstof

Momenteel wordt waterstof in Nederland voornamelijk gemaakt via SMR (*steam methane reforming*) uit aardgas. Bij dit proces komt CO₂ vrij in de atmosfeer. De resulterende waterstof wordt grijze waterstof genoemd. Een alternatieve productiewijze is het

produceren van waterstof op basis van SMR of ATR (autothermische reforming), waarbij de resulterende CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen via carbon capture and storage (CCS). Deze technologie kan ook bij bestaande SMR-installaties worden toegepast. De resulterende waterstof wordt blauwe waterstof genoemd. Uiteindelijk kan groene waterstof worden gemaakt, op basis van elektrolyse met duurzame elektriciteit of door omvorming van biomassa. Richting 2050 mag, gegeven de klimaatdoelstellingen, verwacht worden dat er helemaal geen grijze waterstof meer ingezet wordt. Daarbij is de verwachting dat groene waterstof steeds goedkoper wordt omdat de productie van duurzame elektriciteit en elektrolyse goedkoper wordt. Zo zal dus de prijs van groene waterstof op den duur ook lager worden dan die van blauwe waterstof. Op de korte termijn is blauwe waterstof nog goedkoper dan groene waterstof.

Hoe de mix tussen grijs, blauw en groen zich in de loop van de tijd zal gaan ontwikkelen is enerzijds afhankelijk van het nationale beleid, anderzijds van de mondiale ontwikkelingen. Belangrijke beïnvloedende factoren zijn:

- Hoe sterk is de prikkel om CO₂-emissies te reduceren?
- Wat wordt de kostprijsontwikkeling van duurzame elektriciteit?
- Idem van elektrolyse?
- Waar en wanneer wordt het elektriciteitsnetwerk limiterend?
- Vanaf wanneer groeit de behoefte aan energieopslag, met name seizoensopslag, sterk (en zijn daar concurrerende alternatieven voor)?
- In welke mate wordt er ruimte gegeven voor het toepassen van CCS?
- Wordt er via het beleid of via de markt een extra premie gegeven aan groene waterstof boven blauwe waterstof?

Op mondiale schaal mag verwacht worden dat op een zich ontwikkelende waterstofmarkt blauwe en groene waterstof vrij met elkaar zullen gaan concurreren, en dat het dus weinig zin heeft om op nationale schaal bij de inkoop van waterstof de voorkeur te hebben voor de ene of de andere vorm. Om te zorgen dat de transitie naar groene waterstof wordt gestimuleerd en partijen die dat willen de mogelijkheid krijgen te kiezen voor de groene variant zou er een waterstof-certificatiesysteem ontwikkeld moeten worden.

Internationale studies laten zien dat in veel toekomstscenario's waterstof een groeiende rol gaat vervullen. In verschillende landen, ook in Nederland, is de *hunt for hydrogen* nu echt begonnen, en wordt hard gewerkt aan onderzoek, pilots en demo's, innovaties, programma's. In verschillende landen zijn of worden budgetten voor waterstofprogramma's vrijgemaakt die uiteenlopen van ca. 1 €/inwoner tot 3 €/inwoner (bronnen: [Duitsland](#) en [Japan](#)).

Binnen het klimaatakkoord worden onder andere afspraken gemaakt over de mate waarin CCS ingezet kan gaan worden om met name de CO₂-doelen in de industrie te realiseren. Vanuit waterstofperspectief worden afspraken over CCS als een gegeven beschouwd, waarbij wel een beroep op partijen wordt gedaan om CCS-projecten zodanig te ontwerpen dat ze bijdragen aan het opzetten van een waterstofinfrastructuur. Vanuit waterstofperspectief is het daarnaast van belang de noodzakelijke stappen te blijven zetten om te zorgen dat de productie van groene waterstof zodanig tot ontwikkeling komt dat daarmee op termijn een substantieel deel van de waterstofbehoefte kan worden voldaan.

Ondanks het feit dat bepaalde factoren vanuit de werkgroep als een gegeven zijn beschouwd, heeft de werkgroep onderzocht op welke wijze de potentiële vraag naar

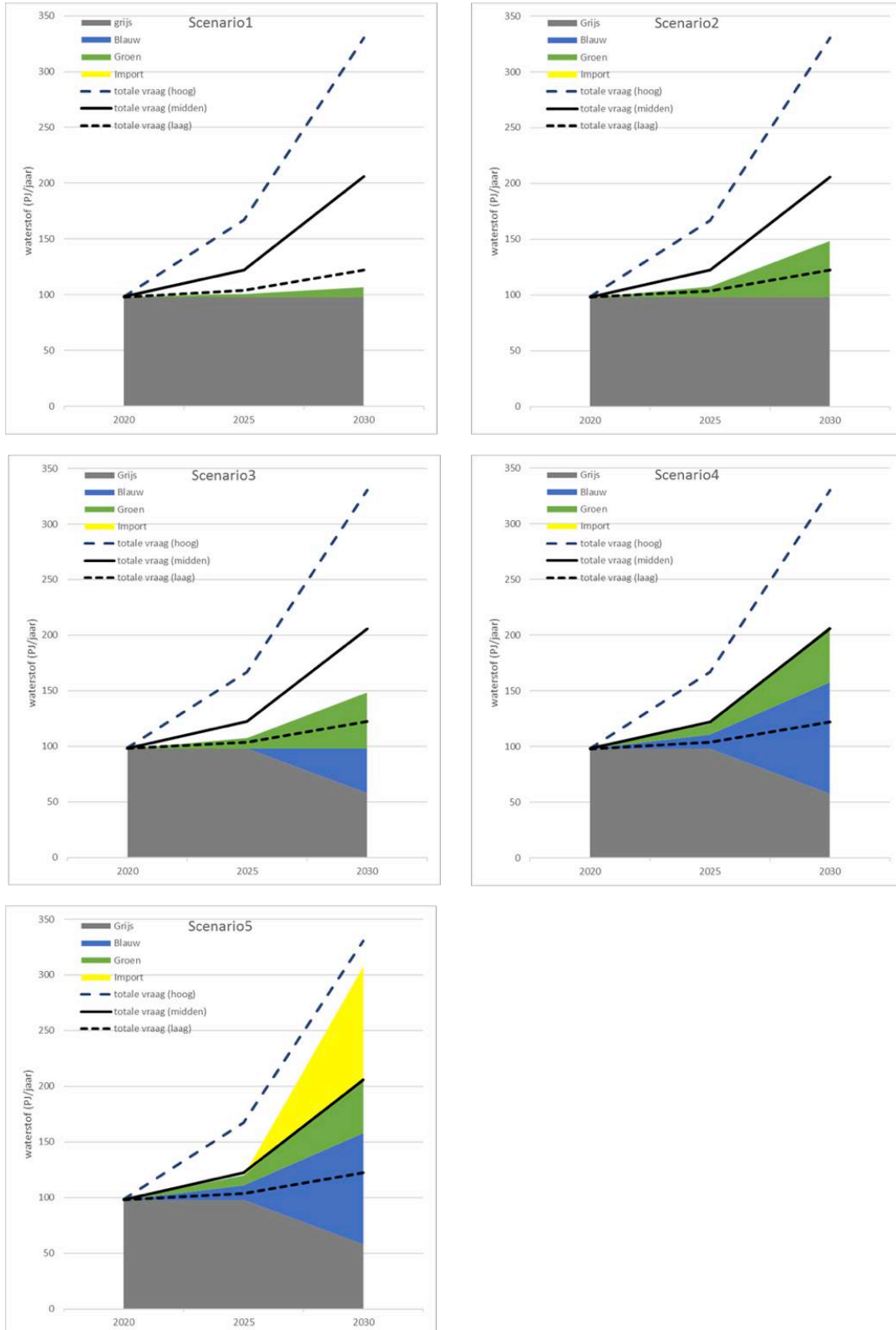
waterstof *in theorie* ingevuld zou kunnen worden. Ook hier is vooral gebruik gemaakt van reeds beschikbare informatie over plannen en projecten. Op basis hiervan zijn vijf scenario's ontwikkeld, zie figuur 2:

1. Scenario 1: Business-as-usual; geen programmatische aanpak
2. Scenario 2: Waterstofcoalitie
3. Scenario 3: Waterstofcoalitie + CCS
4. Scenario 4: Waterstofcoalitie + CCS + H2M-project voor gas-to-power
5. Scenario 5: Waterstofcoalitie + CCS + H2M-project + import

In onderstaande aanbodsscenario's zijn de drie vraagscenario's laag, midden en hoog met lijnen aangegeven. De blokken geven een potentiële invulling van de vraag aan volgens de vijf bovenstaande aanbodsscenario's tot 2030. Het grijze blok in scenario 1 geeft de bestaande productie van grijze waterstof weer en de groene band de reeds geplande electrolysercapaciteit. In de opeenvolgende aanbodsscenario's wordt het aanbod aangevuld met de electrolyseplannen van de waterstofcoalitie, vervolgens aangevuld met CCS, omzetting van centrales op waterstof (gas-to-power) en import.

Binnen de scenario's is er ook een mogelijke rol voor blauwe waterstof en daarmee voor CCS. Binnen de Werkgroep Waterstof is de discussie over de noodzaak of wenselijkheid van CCS niet gevoerd, dat gebeurt in andere gremia binnen het Klimaatakkoordproces. Een maatschappelijke *license to operate* voor CCS is echter wel bepalend voor de mogelijkheden om blauwe waterstof op gang te brengen, die later met een toenemend aanbod van hernieuwbare energie kan 'vergroenen'. Voor blauwe waterstof zijn dan pre-combustion-routes van belang, waarbij de CO₂ met chemische processen voor verbranding wordt afgescheiden en vastgelegd (CCS of CCU). De meeste waterstof die nu wordt gebruikt wordt via *Steam Methane Reforming* (SMR) geproduceerd. Daarbij kan CCS worden toegepast, zoals al in verschillende projecten in de wereld gebeurt. Met het oog op de *license to operate* is het wenselijk maatschappelijke afspraken te maken over de routes naar groene waterstof, zodat partijen erop kunnen vertrouwen dat de eerste stappen naar blauwe waterstof geen fossiele 'lock-in' is maar een tussenstation op weg naar groene waterstof. De 'groene waterstofcoalitie' is een platform dat dergelijke maatschappelijke afspraken kan voorbereiden.

Figuur 2: aanbodscenario's



3.3 Infrastructuur

Nederland is door haar unieke positionering en sterke infrastructuur goed uitgerust om een voorloperrol op het gebied van waterstof in te nemen. De potentiële vraag naar waterstof in de industriële clusters is groot en er ligt al een landelijk dekkende gasinfrastructuur. Om vraag en aanbod in de clusters op elkaar af te stemmen en te kunnen voorzien in een betrouwbare levering van waterstof is het nodig dat vraag en aanbod zowel in tijd als plaats aan elkaar gekoppeld worden.

In de eerste fase (tot 2025) is het noodzakelijk dat in de regionale clusters de infrastructuur gereed wordt gemaakt voor waterstof. Tussen 2025 en 2030 kunnen vervolgens door Nederland transportverbindingen tussen de industrieclusters worden gerealiseerd met beperkte aanpassingen aan de bestaande gasinfrastructuur. De infrastructuur kan fluctuaties tussen productie en gebruik opvangen en verschillende clusters koppelen aan opslag. Daarnaast kan via interconnectiepunten import- en exportcapaciteit naar het buitenland worden gerealiseerd. Door deze koppeling kunnen zowel binnen een regionaal cluster als ook tussen de regionale clusters kostenefficiënt vraag- en aanbodfluctuaties worden opgevangen en kan voldoende leveringszekerheid worden gecreëerd.

Gasunie heeft een studie gedaan naar de mogelijkheid om een dedicated waterstofinfrastructuur (*'backbone'*) te realiseren in 2030 op basis van beschikbare bestaande infrastructuur. Er is onderzocht welke onderdelen van de gasinfrastructuur moeten worden aangepast en waar nieuwe leidingen nodig zijn. De transportcapaciteit die kan worden vrijgespeeld tussen de verschillende industriële clusters bedraagt veelal 10 GW of meer. In onderstaande figuur is een van de mogelijke varianten weergegeven. Afhankelijk van de te realiseren uitrol van vraag en aanbod kan de configuratie van deze backbone wijzigen. Met deze waterstof-basisinfrastructuur is het al mogelijk om op basis van bestaande infrastructuur de verschillende industriële clusters met elkaar en met cavernes voor waterstofopslag te verbinden.

De kosten om deze verbindingen te realiseren en opslag van waterstof gereed te maken bedragen circa 1,5 miljard euro. Bijkomend voordeel is dat het gasnet op land en in zee beschikbaar is, en bovendien is verbonden met het buitenland voor toekomstige import- en exportstromen van waterstof.



De werkgroep heeft ook geanalyseerd welke behoefte aan waterstoftransport en -opslag er kan ontstaan. Voor het bepalen van de behoefte aan transmissie-infrastructuur is de potentiële vraag en het mogelijke aanbod in kaart gebracht en geregionaliseerd; verdeeld over de grote industrieclusters in Nederland (zie voorgaande paragrafen). Op basis van de piek- en daluren van vraag en aanbod is gekeken of de voorgestelde *dedicated backbone* de transportstromen aankan.

Alle vraag- en aanbodscenario's zijn geanalyseerd en het aanbodscenario 5 in combinatie met het hoge vraagscenario van 2030 is als meest strenge test voor 2030 gebruikt om te beoordelen of de bestaande gasinfrastructuur en de daarbinnen vrij te spelen capaciteit deze vraag aankan. Dit lijkt het meeste transport tussen de verschillende industrieclusters op te leveren, vooral tussen de clusters Rijnmond, Noordzeekanaal en Noord-Nederland. Op basis van de voorgestelde mogelijke infrastructuur levert die combinatie van vraag en aanbod geen echte knelpunten op: de grootste transportstromen in 2030 liggen in de orde van 6 GW en passen daarmee binnen de vrij te spelen en beschikbare capaciteit.

Daarnaast is onderzocht of en bij welke vraag- en aanbodscenario's er volume-onbalans ontstaat in de clusters. In het lage vraag scenario zijn de clusters aardig in evenwicht met aanbodscenario's 1,2 en 3. Dit is logisch omdat de voornamelijk bepaald wordt door de huidige vraag van feedstock en aanbod van lokaal gemaakte grijze waterstof. Bij het midden en hoog scenario begint de volumebalans meer uiteen te lopen en ontstaat er vraag naar aansluiting op landelijke infrastructuur. Voor een robuuste analyse van het entry-exit systeem is overigens meer tijd nodig. Dat geldt ook voor de analyse van vraag en aanbod op uurbasis. Op basis van beide analyses kan de exacte behoefte aan infrastructuur tussen de clusters beter in kaart worden gebracht.

De bergingen (zoutcavernes) in het noorden van Nederland kunnen binnen afzienbare tijd een deel van de benodigde flexibiliteit leveren. De werkgroep heeft onderzocht hoeveel flexibiliteit (opslag van waterstof) noodzakelijk is. Het aanbod van flexibiliteit kan uit bergingen komen, of uit de productieflexibiliteit van een waterstoffabriek, of uit flexibiliteit bij de gebruikers. De behoefte aan flexibiliteit is in deze studie geschat, vanwege tijdsbeperkingen. Als we veronderstellen dat de flexibiliteit 50%/50% uit productie en bergingen komt dan zijn er in 2030 in het lage, midden, en hoge scenario 3, 6 of 9 cavernes nodig.

4. Plannen binnen de industriële clusters

Binnen diverse industriële clusters worden momenteel plannen ontwikkeld voor de stapsgewijze uitrol van waterstof zowel blauw als groen. Deze plannen laten zien dat er nu al vanuit diverse bedrijven en organisaties een sterke drive is om een waterstofsysteem tot stand te brengen. Het is duidelijk dat deze plannen de basis moeten vormen voor de uitrol van waterstof en dat er dus vanuit een waterstof programma nauw samengewerkt moet worden met deze clusters om te zorgen dat het centrale programma optimaal ondersteuning geeft aan deze plannen. Kijkend naar de ambities voor groen waterstof tellen deze plannen op tot een totale ambitie voor 2025 van meer dan 800 MW elektrolyser vermogen en 15 kiloton uit biogene grondstoffen.

In onderstaande paragrafen worden de belangrijkste karakteristieken van de clusterplannen weergegeven. Een uitgebreidere rapportage van de subgroep 'Plannen binnen de clusters' is opgenomen als bijlage 2.

4.1 Waterstofplannen Noord Nederland

Plannen waterstofproductie	
Grijs	SMR's: BioMCN (Opmerking BioMCN; productie al +/-140kton per jaar), Evonic, totaal 115 kton per jaar Nouryon via chloor-alkali proces (gedeeltelijk groen)
Blauw	(Equinor/Gasunie), Nuon blauwe waterstof Magnumcentrale – mogelijk tot 10 mln m ³ /dag
Groen	Engie/Gasunie 100+ MW; Nouryon/Gasunie 20 MW (2021 operationeel); Emmtec 5 MW; BioMCN 15 kton per jaar uit groengas
Import, na 2030	LH ₂ -terminal?

Plannen infrastructuur	
Opslag	Zoutcavernes Zuidwending
Transport tussen industrie-clusters en met buurlanden	Koppeling tussen Eemshaven, Delfzijl, Zuidwending, perspectief voor transport naar Emmen, regio's Rijnmond, Hamburg, Ruhrgebied, etc. Aansluiting op de landelijke waterstof-infrastructuur ('backbone')
Distributie naar eindgebruikers	H ₂ -netwerk wordt aangelegd (2020) door Groningen Seaports (havenbedrijf) als openbaar en lokaal transportnet.

Potentiële afnemers	
Industrie, energiedrager (HTW)	Nedmag, Teijin Aramid, Avebe, Delesto Suikerunie, etc.

Industrie, feedstock	Delfzijl bio-methanol (CO ₂ -sink), H ₂ O ₂ -productie, formaldehyde-productie, Teijin, Aramide-productie, ESD-SIC
Mobiliteit (wegverkeer, scheepvaart, luchtvaart)	2 bussen; 20 bussen op komst, waterstoffrein, Theo Pouw, vrachtwagen(s) en heftrucks, 8 tankstations in N-NL
Gebouwde omgeving (LTW)	Hoogeveen, nieuwbouw, datacentra
Net-balans en CO ₂ -vrije elektriciteitsproductie	Magnum-centrale

4.2 Waterstofplannen Noord Holland

Plannen waterstofproductie	
Grijs	
Blauw	
Groen	Tata/ Nouryon/ Havenbedrijf Amsterdam: 100 MW in 2023; ook kleinschalige decentrale initiatieven
Import, na 2030	

Plannen infrastructuur	
Opslag	
Transport tussen industrieclusters en met buurlanden	Aansluiting op de landelijke waterstof-infrastructuur ('backbone')
Distributie naar eindgebruikers	

Potentiële afnemers	
Industrie, energiedrager (HTW)	

Industrie, feedstock	Tata en DOW, voor Nafta-productie. Tata voor staalprocessen. Tata en Nouryon voor nieuwe chemie.
Mobiliteit (wegverkeer, scheepvaart, luchtvaart)	Regio NZK kijkt naar mogelijkheden voor scheepvaart, luchtvaart, gemeentelijk vervoer, en tankstations. Beschikbaarheid groene waterstof in 2023 werkt als vliegwiel voor transitie. Havengebied is van oudsher op- en overslag van oliegebaseerde producten (kerosine). Waterstof biedt een brug naar duurzame toekomst voor deze regio.
Gebouwde omgeving (LTW)	Gemeente Amsterdam en Alliander kijken naar mogelijkheden voor verwarming monumentale binnenstad.
Net-balans	

4.3 Waterstofplannen Zuid-Holland/Noord-Brabant

Plannen waterstofproductie	
Grijs	SMR's: Air Liquide, Air Products, raffinaderijen, totaal 300-400 kton
Blauw	H-Vision: ATR met CCS, blauwe waterstof voor HTW in industrie
Groen	Diverse initiatieven. In HIC Rotterdam opgeteld circa 500 MW; ambitie 1-2 GW in 2030; grootschalig centraal; bij opwek wellicht aanlandlocaties wind koppelen met waterstofproductie (evt. tegelijk in tender); ook kleinschalige decentrale initiatieven.
Import, na 2030	LH ₂ -terminal of andere waterstofdrager

Plannen infrastructuur	
Opslag	LH ₂ en/of andere waterstofdrager
Transport tussen industrie-clusters en met buurlanden	Aansluiting op landelijke waterstof-infrastructuur ('backbone') Privaat: Air Liquide en Air Products Waterstofronde: HIC Rotterdam - Goeree- Overflakkee
Distributie naar eindgebruikers	

Potentiële afnemers	
Industrie, energiedrager (HTW)	Vervanging aardgas: HTW, flexibiliteit centrales (via H-vision naar groen)

Industrie, feedstock	Feedstock chemie (bouwblok); Feedstock raffinaderij (bijmenging en ontzwavelen); Synthetische brandstoffen; Overige CCU-trajecten
Mobiliteit (wegverkeer, scheepvaart, luchtvaart)	Zuid-Holland: 4 bussen; 20 bussen op komst; ook initiatieven scheepvaart (schepen en bunkerinfra); Rangeerterreinen, bv. Kijfhoek; Noord-Brabant: showcase mierenzuur; Dongencentrale als leverancier van waterstof in waterstoftankstations (PitPoint); Green Fuels Motor Lab automotive campus; TNO, DAF en Shell ontwikkelen een motor op solar fuels; DENS heeft een generator (motor) op mierenzuur ontwikkeld
Gebouwde omgeving (LTW)	Zuid-Holland: Rozenburg (bestaande bouw), Stad aan 't Haringvliet (bestaande bouw; waterstofproductie beoogd in windmolen); verkenning inzet waterstof in glastuinbouw; Noord-Brabant: Brabant Water(stof), Brabant water onderzoekt de toepassing van waterstof in woonwijken; Energienetwerk Heusden (inzet waterstof woonwijk); Solenco zet zon om in waterstof, Hebben eigen systeem ontwikkeld; Steenberg glastuinbouw; inzet waterstof als vervanging van gas
Net-balans	Vervanging aardgas: HTW, flexibiliteit centrales (via H-vision naar groen)

4.4 Waterstofplannen Zeeland

Plannen waterstofproductie	
Grijs	SMR's: Zeeland Refinery (ZR) en Yara (kunstmest); totaal > 400 kton per jaar
Blauw	Afvang CO ₂ bij SMR's en toepassing voor CCU en CCS
Groen	Diverse betrokken bedrijven Smart Delta Resources: 100 MW electrolyser in 2025. Behoeftes vele malen groter
Import, na 2030	Kan zeker een optie zijn

Plannen infrastructuur	
Opslag	Waar nodig: opslagtanks op locatie
Transport tussen industrie-clusters en met buurlanden	Aansluiting op landelijke waterstof-infrastructuur ('backbone') DOW – Yara uitwisseling eerste stap. Waterstofronde betrokken bedrijven Smart Delta Resources (o.a. Dow, Yara, ICL, ZR, Sabic, ArcelorMittal)
Distributie naar eindgebruikers	Waterstof- Ronde betrokken bedrijven Smart Delta Resources

Potentiële afnemers	
Industrie,	HTW, maar vooral inzet als grondstof

energiedrager (HTW)	
Industrie, feedstock	Inzet als grondstof o.a. in raffinage, kunstmest en syngas (Steel2Chemicals). Behoeftte > 1.000 kton
Mobiliteit (wegverkeer, scheepvaart, luchtvaart)	Binnenvaart, H ₂ -tankstation(s), industrieel transport
Gebouwde omgeving (LTW)	Vooralsnog n.v.t.
Net-balans	

4.5 Waterstofplannen Limburg

Plannen waterstofproductie	
Grijs	SMR: OCI: NH ₃ / kunstmest; hoogwaardige kunststoffen; totaal 200 kton per jaar. In de huidige situatie krijgt Chemelot twee grote fossiele stromen per buisleiding binnen: aardgas en nafta. Deze worden gebruikt als grondstof en als energiedrager.
Blauw	OCI: afvangen zuivere CO ₂ met CCS; Chemelot: 'carbon black', vaste koolstof Bijzondere categorie: Chemelot: 'Carbon black' met hernieuwbare bron, negatieve emissies
Groen	Chemelot: gasification technologieën: diverse initiatieven in onderzoek
Import, na 2030	

Plannen infrastructuur	
Opslag	
Transport tussen industrie-clusters en met buurlanden	Aansluiting op landelijke waterstof-infrastructuur ('backbone') (NL, Vlaanderen, Nordrhein Westfalen)
Distributie naar eindgebruikers	

Potentiële afnemers	
Industrie, energiedrager (HTW)	Power to Hydrogen-project (electrolyser)
Industrie, feedstock	<p><i>Pilot afval plastic pyrolyse en hydrogenering</i> Pilotplant voor het geschikt maken van pyrolyseolie uit afval plastic als grondstof voor Chemelot.</p> <p><i>Pilot-elektrolyser</i> Waterstof uit pilot-elektrolyser wordt gebruikt voor ammoniakproductie</p> <p><i>Power-to-Hydrogen Demo</i> (na 2030).</p> <p><i>Biomassa-vergasser</i> Vergassing van biomassa zoals slib van de afvalwaterzuivering Chemelot voor de productie van waterstof en lichte koolwaterstoffen</p>
Mobiliteit (wegverkeer, scheepvaart, luchtvaart)	
Gebouwde omgeving (LTW)	
Net-balans	

5. Stappen in de uitrol

5.1 Visie op de uitrol van waterstof

Voorgaande hoofdstukken geven een duidelijk beeld van nut en noodzaak van waterstof voor de wat langere termijn en de ontwikkeling van de potentiële vraag en het aanbod. De vraag is nu wat er moet gebeuren om te zorgen dat die functies vervuld kunnen gaan worden zodanig dat optimaal bijgedragen worden aan de klimaatdoelen en de kansen die waterstof biedt. De eerder aangehaalde EU-studie concludeert onder andere dat het noodzakelijk is om nu te gaan investeren in de benodigde kennis, technologie en infrastructuur, om daarmee te zorgen dat waterstof straks de beoogde rol kan gaan vervullen. Bij het maken van kosten-batenafwegingen voor de kortere termijn kan het zo zijn dat waterstofopties slechter scoren. Investerings in waterstof moeten echter net als wind en zon de afgelopen 10 jaar gezien worden als een strategische keuze die nu gemaakt wordt om de noodzakelijke uitgangssituatie te creëren waardoor de lange termijndoelen gerealiseerd kunnen worden.

De vraag rijst nu hoe de uitrol van waterstof er in de tijd uit zal gaan zien. Dat is afhankelijk van een aantal factoren:

- De keuze om CCS al dan niet in te zetten voor het realiseren van de klimaatdoelen 2030, en daarmee ruimte te scheppen voor pre-combustion CCS met blauwe waterstof. De waterstofplannen van H-Vision in Rotterdam en rond de Magnumcentrale in de Eemshaven (H2M-project: CO₂-vrije elektriciteitsproductie, feedstock en verhittingsprocessen industrie) laten zien dat er met dit soort projecten een basis kan worden gelegd voor een waterstofinfrastructuur die verschillende gebruikers aansluit.
- De ontwikkelingen van de prijzen van de productie van duurzame energie in Nederland, met name op de Noordzee. De elektriciteitsprijs is in hoge mate bepalend voor de prijs van groene waterstof. De huidige prijs van duurzame elektriciteit is nog zodanig hoog dat groene waterstof niet kan concurreren met blauwe waterstof. Over de snelheid waarmee deze prijs kan dalen zijn veel verschillende beelden.
- De prijzen van elektrolyse. De kostprijs van elektrolyzers ligt nu nog hoog maar de verwachting is wel dat de prijzen vergaand kunnen dalen, met circa 60-70%, tot een niveau in de orde van 200-500 €/kW_e in 2030, en mogelijk nog lager daarna. Dat is te bewerkstelligen door schaalvergroting (grootte van de installatie en grotere aantallen) en door een groeiende internationale vraag.
- De wereldprijs van waterstof. De verwachting is dat er naarmate de vraag naar klimaatneutrale brandstoffen toeneemt er steeds meer waterstof op de wereldmarkt aangeboden zal worden. Op diverse plekken zijn er al concrete plannen in deze richting. Het is nu nog niet duidelijk hoe de prijzen van de wereldmarkt zich zullen verhouden tot de prijzen van in Nederland geproduceerde waterstof.

Zoals blijkt uit de bovenstaande opsomming zijn er verschillende onzekerheden. Als de verwachting is dat de prijzen op de internationale markt veel lager komen te liggen dan in Nederland wordt het de vraag in welke mate groene waterstof in Nederland moet worden geproduceerd. Hierbij speelt niet alleen de vraag naar waterstof een rol maar ook de

mogelijkheid om na 2030 additionele in Nederland duurzaam geproduceerde elektriciteit te kunnen ontsluiten. Het lijkt echter, juist omdat er op alle terreinen onzekerheden zijn, en omdat het ook heel goed kan dat Nederlandse groene waterstof concurrerend wordt met buitenlandse waterstof, heel belangrijk om wel al te gaan werken aan de uitrol van groene waterstof in Nederland. En hoe dan ook is het verstandig te anticiperen op een toekomstige rol voor waterstof die er met hoge waarschijnlijkheid wel zal komen in een energie- en grondstoffensysteem dat aan verregaande CO₂-reductie-eisen moet voldoen. Een waterstof strategie voor Nederland moet met alle eerder geschetste onzekerheden en kansen rekening houden.

Daarbij is er overeenstemming tussen veel partijen dat groene waterstofproductie niet goed tot ontwikkeling zal komen op basis van 'overschotten' bij de productie van duurzame elektriciteit. Dat lijkt wel een aantrekkelijk idee, omdat elektriciteit op momenten dat het elektriciteitsaanbod veel groter is dan de vraag heel goedkoop is, maar het aantal uren dat dit zo is, is gering, waardoor de kosten van deze waterstof gezien de kapitaalslasten van de electrolyzers, en de geringe bedrijfstijd daarvan als er nog onvoldoende duurzame energie staat, toch heel hoog worden. Het is dus van belang dat er duurzame elektriciteitscapaciteit ontwikkeld gaat worden die gelijke tred houdt met een groeiende capaciteit aan elektrolyzers. Daarmee ontstaat echter wel een klassiek kip-ei-probleem.

In een programmatische aanpak voor de ontwikkeling van waterstof is het van belang deze kip-ei-situatie op een doordachte manier te doorbreken. Op de lange termijn kan een volwassen markt voor waterstof ontstaan, maar dat is nog lang niet het geval, en deze markt komt er ook niet zomaar. De ontwikkeling van LNG kan als parallel dienen: eerst werden niches en delen van ketens ontwikkeld, vandaaruit kon dan de sprong naar een volwassen markt worden gemaakt.

Voor waterstof kan eenzelfde scenario worden gevolgd: ontwikkeling van waterstof in industrieclusters waar (grijze) waterstof al als feedstock wordt gebruikt, als CCS als optie wordt aanvaard, deze waterstof 'verblauwen' en rondom de clusters verdere toepassingsmogelijkheden voor blauwe waterstof ontwikkelen. Tevens beginnen met (delen van) groene waterstofketens, waarbij enkele schakels in de keten gecoördineerd samenwerken om een businesscase te krijgen. Als er geen maatschappelijke en politieke ruimte voor CCS komt zal de stap via blauwe waterstof worden overgeslagen en moet ineens de sprong naar groene waterstof worden gemaakt. Indien voor CCS wordt gekozen moet, zoals dat binnen diverse clusters toch al gebeurt, een optimale synergie gerealiseerd worden bij de uitrol van groen en blauw.

Voor groene waterstof kan een specifieke tenderregeling waarbij enkele schakels in combinatie kunnen intekenen (bijvoorbeeld een windpark, een industriegebied, een electrolyser en een opslag) het uitrolproces ondersteunen. Zo kan bevorderd worden dat de ontwikkeling van waterstofproductie via elektrolyse hand in hand gaat met de uitbreiding van zon- en windvermogen. Op termijn maakt waterstof het mogelijk dat het volle energetische potentieel aan duurzame energie kan worden benut. Bijvoorbeeld het grote potentieel aan wind offshore kan naar het zich laat aanzien alleen maar ontsloten worden door de inzet van waterstof.

5.2 Programmatische aanpak

Op hoofdlijnen gaan we in het licht van bovenbeschreven visie op de uitrol in van een gefaseerde en programmatische aanpak, in een aantal dakpansgewijs overlappende stappen.

0. Nulfase

2019-2022: Voorbereidend programma voor de uitrol van waterstof, met de vele lopende initiatieven en projecten als vertrekpunt, af te sluiten met een evaluatie ten behoeve van de nadere invulling en doelen van de volgende fases. Ter toelichting: tijdens deze nulfase lopen de bestaande initiatieven en plannen door, gebruikmakend van regelingen en voorzieningen zoals ze er nu zijn. Een belangrijk element van de nulfase is het doordenken van een verder uitrolplan c.q. versnelling van bestaande plannen en het uitbroeden en vastleggen van de beleidskaders die daarvoor nodig zijn. Daarnaast wordt in de nulfase een (missiegedreven) innovatieprogramma waterstof op gang gebracht.

1. Tot 2030

In een aantal industriële clusters is al gestart met plannen voor blauwe en groene waterstofprojecten en zal worden begonnen met de eerste aanleg van regionale infrastructuren. Stapsgewijs kan begonnen worden met de uitbouw van de productie van groene waterstof. Tot 2025 zou toegewerkt moeten worden naar een capaciteit van 500 MW aan elektrolyzers in 2025⁴, en circa 3-4 GW in 2030, waarbij de versnelling van wind op zee gelijke tred zou moeten houden met het tempo waarin waterstof zich ontwikkelt en omgekeerd. Als die afstemming niet wordt gedaan heeft een groei van de elektrolyser-capaciteit vanuit CO₂-optiek weinig zin. Dit doel vergt dus nauwe samenwerking met de plannen rond wind op zee. In deze fase moet ook nagedacht worden over de koppeling van de regionale infrastructuur aan de in Nederland beschikbare opslagcapaciteit en of er rond de opslaglocaties interconnectie moet plaatsvinden van de verschillende regionale infrastructuur, de 'waterstofhubs', om de flexibiliteit en daarmee de efficiency van het systeem te vergroten.

2. 2030-2040

Tot 2040 zal het aandeel groene waterstof toenemen, afhankelijk van de prijsontwikkeling in binnen- en buitenland op basis van een versnelde uitbouw van de Nederlandse productie en/of een toenemende import.

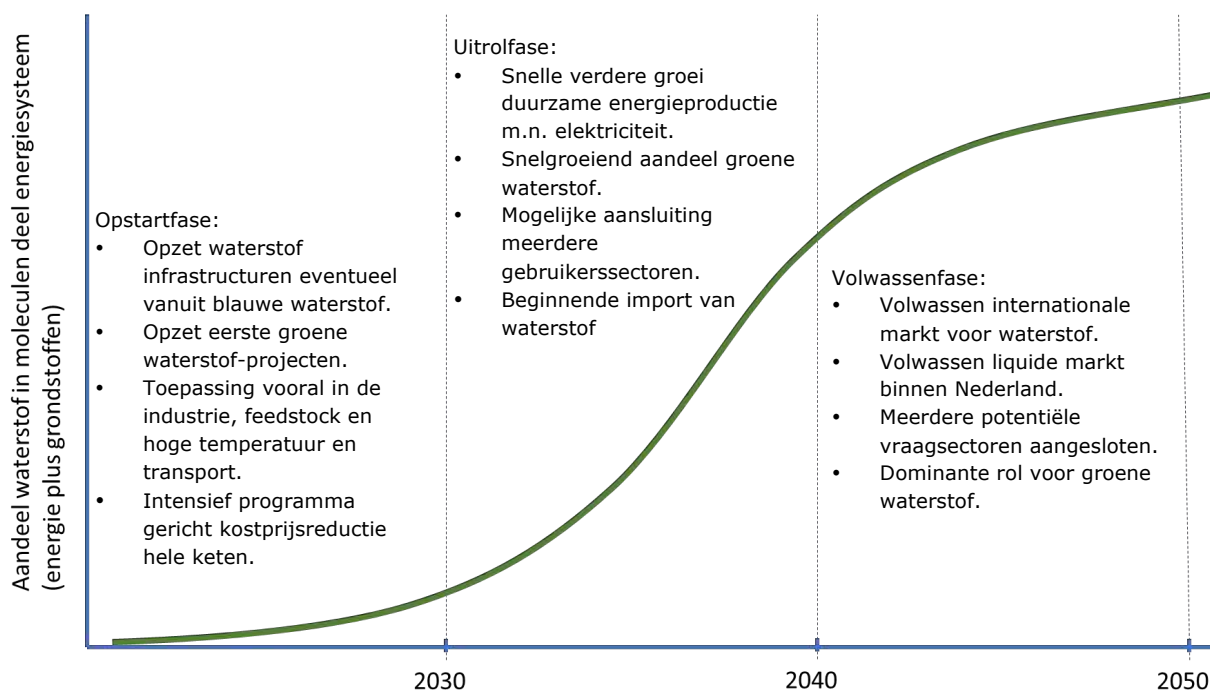
3. 2040- 2050

In deze fase zal waterstof in ieder geval de drie functies vervullen die in hoofdstuk 2 genoemd zijn, en zullen, afhankelijk van de verdere ontwikkelingen binnen verschillende vraagsectoren, ook andere sectoren in toenemende mate aangesloten worden. Financiering zal met name door hoge CO₂-kosten worden gestuwd.

In de onderstaande figuur staat deze ontwikkeling schematisch weergegeven.

⁴ De plannen van de verschillende clusters tellen nu op tot circa 800 MW, op basis van deze plannen zou dit doel dus haalbaar moeten zijn.

Vervolgens wordt in de navolgende paragraaf verder op de eerste stappen tot 2030 ingegaan, in de vorm van een nulfase van enkele jaren en de eerste fase van nu - 2030 die al met alle initiatieven en plannen begonnen is. De fasen 2 (2030-2040) en 3 (2040-2050) laten we hier onuitgewerkt.



5.3 Noodzakelijke stappen 2019-2030

Zoals in de vorige paragraaf aangegeven moet het bij de uitrol van het waterstofprogramma gaan om een adaptieve en flexibele benadering. We gaan dan ook hier met name in op de stappen die de eerstkomende tien jaar gezet zouden moeten worden. Het programma focust op de noodzakelijke stappen om te zorgen dat met name groene waterstof grootschalig beschikbaar komt, en biedt, indien voor CCS wordt gekozen, ook ruimte voor blauwe waterstof als hiermee de weg voor groene waterstof kan worden geplaveid.

In dit programma worden met name de sleutelementen benoemd die kritisch zijn voor het realiseren van de beoogde doelen in 2030 zoals beschreven in de vorige paragraaf. Dit zijn ook de elementen waarover in het kader van het klimaatakkoord besloten moet worden. Op een aantal terreinen zal een veel gedetailleerder programma moeten worden ontwikkeld, daar waar dat aan de orde is zal dat in de onderstaande paragrafen ook benoemd worden.

Het waterstofprogramma zou moeten bestaan uit een landelijke component als het gaat om de realisatie van de noodzakelijke randvoorwaarden, maar ook uit regionale deelprogramma's met een maatwerk aanpak per industriecluster en omliggend verzorgingsgebied, afgestemd met de Regionale Energiestrategieën (RES) die nu in

voorbereiding zijn. Nauwe samenwerking tussen de centrale en decentrale elementen van het programma moet structureel georganiseerd worden en in een programmatische aanpak worden geborgd.

Tot 2030 worden er in dit programma de volgende fases en doelen onderscheiden:

- 2019-2022: Nulfase: Voorbereidend programma voor de verdere uitrol van waterstof, met de vele lopende initiatieven en projecten als vertrekpunt;
- 2022-2025: Opschaling naar 500 MW geïnstalleerde elektrolysecapaciteit in combinatie met ontwikkeling van waterstofvraag en regionale infrastructuur; indien daarmee de overall systeem efficiency verbeterd wordt, wordt gewerkt aan de koppeling van de verschillende clusters;
- 2026-2030: Opschaling naar 3-4 GW geïnstalleerde elektrolysecapaciteit, koppeling aan opslaglocaties, uitbouw infrastructuur, afstemming met de extra groei van duurzame energie.

De omvang van de activiteiten in de nulfase 2019-2022 schatten we op ca. 25 miljoen per jaar. Zie tekstkader voor een reflectie op de kosten in de volgende fases.

Kosten vervolgfases

Voor de daadwerkelijke opstart na 2021 waarin de nu voorbereide businessplannen worden gerealiseerd zijn aanzienlijk hogere bedragen nodig voor kapitaalsinvesteringen en operationele kosten; deze worden via een, in de nulfase vorm te geven, instrumentarium gegenereerd. Om een gevoel te geven voor de orde van grootte: bij de huidige prijzen van electrolyzers van om en nabij € 1,5 mln. per MW nu is de investeringssom € 500 mln. voor de tussenambitie van 500 MW rond 2025. Bij snelle prijsdaling naar € 0,35 mln. per MW zou de ambitie 3-4 GW in 2030 ongeveer € 1,5 – 2 mrd. aan investeringen vergen. Daarbij komen kosten voor een waterstofinfrastructuur waarvan de kostenallocatie in de aanloopfase nader moet worden uitgewerkt: toerekening aan de gebruikers van de infrastructuur (in de startfase met beperkte volumina), aan alle gebruikers van gasinfrastructuur, en/of publieke middelen in de aanloopfase. Aan de vraagzijde zijn eveneens investeringen nodig om te zorgen dat de waterstof ook ingezet kan worden. Al deze ingrediënten (kostenramingen (Capex: investeringen, en Opex: operationele kosten), willingness to pay in verschillende vraagsectoren, kostentoerekeningen, innovatiestappen, kostenreductiestappen, detaillering van instrumentarium/steunkader, etcetera) dienen in de nulfase te worden uitgewerkt. Tijdens deze nulfase gaat de ontwikkeling van de huidige plannen en businesscases uiteraard gewoon door, deze kan niet wachten op afronding van een nulfase waarin de kaders voor de vervolgstappen worden vormgegeven. Dat betekent wel dat lopende initiatieven vooruit moeten met de huidige kaders, regelingen en middelen alsmede juridische voorwaarden, die wel mogelijkheden bieden maar niet specifiek op de ontwikkeling van een waterstofsysteem gericht zijn.

Hieronder beschrijven we meer in detail welke elementen in een programma (nulfase + 1e fase) kunnen zitten.

5.3.1 Technologie-ontwikkeling

Doel I: de kosten van elektrolyse verlagen en de capaciteit van elektrolyse-units verhogen.

- Hiertoe zal een R&D-programma moeten worden ontwikkeld geënt op wat het Nederlandse bedrijfsleven kan bijdragen aan de prijsverlaging van de productie en zuivering van waterstof.

Doel II: ontwikkelen van een transport- en opslaginfrastructuur.

- Onderzoek en ontwikkeling van systemen voor grootschalige opslag van waterstof zowel bovengronds (tanks voor opslag van gecomprimeerd of vloeibaar waterstof) als ondergronds (m.n. zoutcavernes). R&D naar noodzakelijke omvang van opslag met het oog op seizoeneffecten, en de impact van dynamisch bedrijf van deze opslagen (korte termijn balanceren van aanbod en vraag).

5.3.2 De businesscase

Doel I: Tot 2025 realiseren van circa 500 MW aan elektrolysecapaciteit.

- Opzet van een steunregeling voor de realisatie van electrolyzers tot een omvang van 100 MW.
- Stimuleringsregeling voor de toepassing van groene waterstof als grondstof en voor hogetemperatuuroepassingen.
- In samenwerking met diverse innovatie- en sectorprogramma's moet gekeken worden hoe het in het kader van het klimaatakkoord in te zetten instrumentarium, met name in de industrie, optimaal bijdraagt aan de uitrol en inzet van waterstof.
- Ontwikkeling van een waterstofcertificatiesysteem zodat de meerwaarde van groene waterstof te gelde kan worden gemaakt.
- Socialisatie van de kosten van de benodigde transport- en opslaginfrastructuur zowel de gasinfrastructuur als de elektrische infrastructuur.

Doel II: Realisatie van 3-4 GW elektrolysecapaciteit in 2030.

- Opzet van een regeling die de ontwikkeling van ketens van vraag-aanbod-infrastructuur in synchroniciteit bevordert, voor onder meer wind op zee, waterstofproductie en -vraag, en die stuurt op minimale kosten van de geproduceerde waterstof.

Doel III: In fases gereedmaken van de bestaande infrastructuur voor waterstoftransport.

- Realiseren van regionale infrastructuren rond 2025 binnen verschillende clusters.
- Realiseren van een fit for purpose basisinfrastructuur voor waterstof rond 2030 die voor zover dat efficiencywinst oplevert vraag, aanbod en opslag en de verschillende clusters met elkaar verbindt.
- Tijdig realiseren van de benodigde faciliteiten voor waterstofopslag.

5.3.3 Organisatie

Doel I: Realisatie van het benodigde organisatorische kader waarbinnen een optimale uitrol van waterstof kan worden gerealiseerd.

- Opzet van een overleg/afstemmingsstructuur waarbinnen in samenwerking tussen sleutelpartijen (overheden, marktpartijen, kennisinstellingen, netwerkbedrijven en maatschappelijke organisaties) en de activiteiten binnen de industriële clusters de ontwikkeling van een waterstofsysteem gecoördineerd vorm kan krijgen.
- Afstemming tussen nationale en regionale netbeheerders bij het in samenspraak met de industriële clusters, en regionale overheden ontwerpen en realiseren van een *fit for purpose*-transportinfrastructuur aangesloten op de benodigde opslagcapaciteit waarbij ook al rekening wordt gehouden met toekomstige in- en exportmogelijkheden.

Doel II: Zorgdragen voor voldoende gekwalificeerd personeel dat bij kan dragen aan alle aspecten van de uitrol:

- Ontwikkeling van de benodigde scholings- en opleidingsprogramma's.

5.3.4 Institutioneel juridisch

Doel I: Realiseren van het benodigde juridisch kader voor de uitrol, transport en distributie van waterstof.

- Inventarisatie van alle juridische aspecten die beperkend zijn voor de productie conversie en het transport, distributie en meten van waterstof.
- Visie op marktordening die de verhoudingen publiek en privaat bij de infrastructuur helder regelt. Vooralsnog kan met het zogeheten 'hybride model', zoals dat wordt voorgesteld door Ecorys⁵, worden gewerkt.
- Opnemen van waterstof als energiedrager in alle relevante energiewetgeving. Vastleggen van de verschillende rollen en taken die voor de waterstofketen nodig zijn.
- Aanpassing wetgeving om in de bestaande gasnetten het transport en de distributie van waterstof mogelijk te maken. Bijvoorbeeld door het opdoen van praktijkervaring met het transport, distributie en meten van waterstof (en andere hernieuwbare gassen) op te nemen als wettelijke taak onder de AMvB Tijdelijke Taken van de Gaswet voor de periode 2021-2025.
- Wettelijke en regulatorische spelregels voor regionale en landelijke netbeheerders op het gebied van waterstof om gasnetten die geschikt zijn voor waterstof aan te leggen en de bestaande gasnetten (indien geschikt) aan te passen.

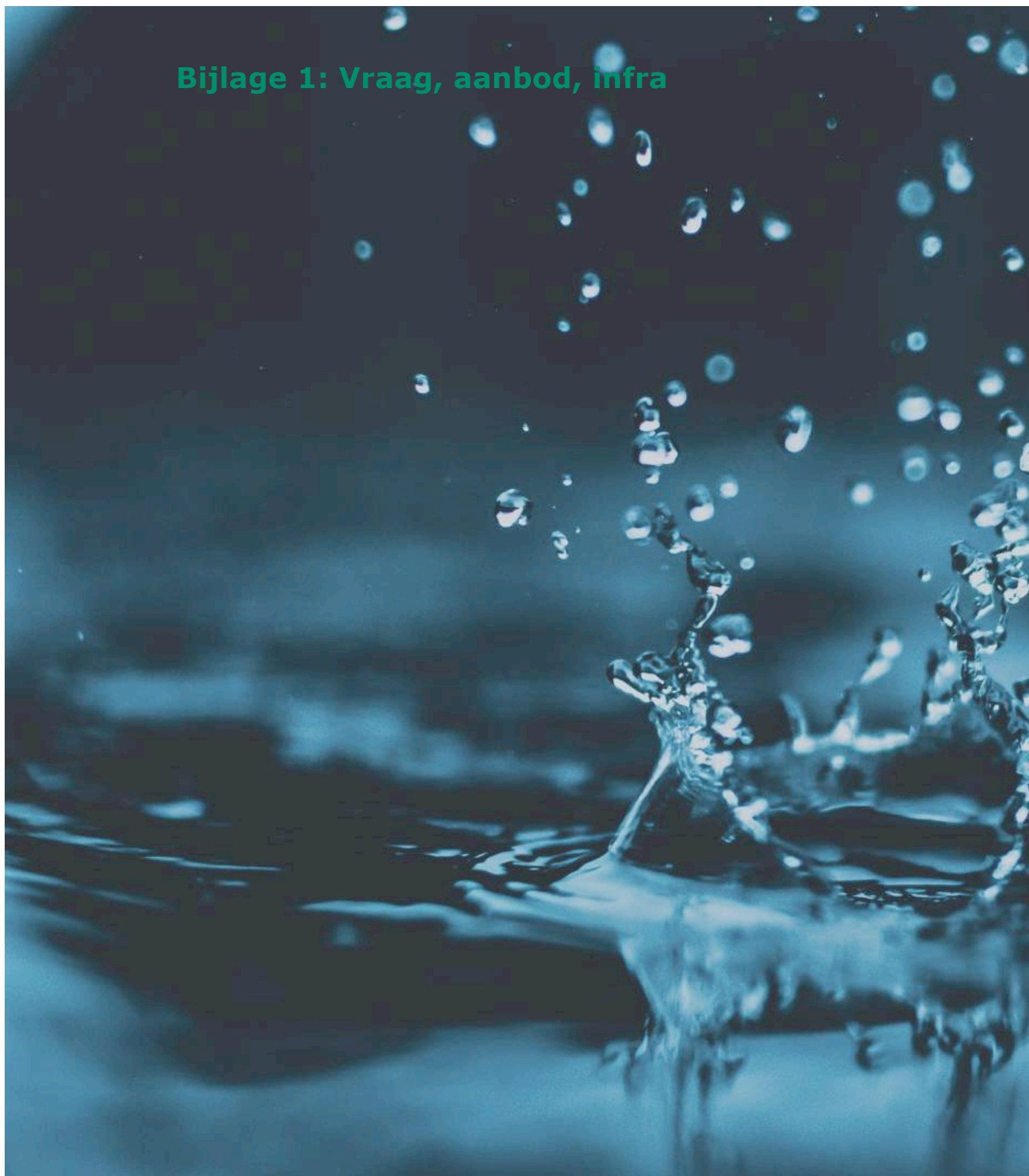
5.3.5 Maatschappelijk

Doel I: Leggen van een maatschappelijke basis voor de steeds bredere toepassing van waterstof binnen diverse maatschappelijke sectoren.

- Afspraken ('akkoord') over blauwe waterstof als optie die de ontwikkeling van een bredere waterstofinfrastructuur versnelt.
- Zoeken naar mogelijkheden om de systeemwaarde van waterstof uit te bouwen en te waarderen (waterstof als *enabler* die de bredere benutting van duurzame energie mogelijk maakt, en waarmee CO₂-reducties over ketens in plaats van alleen op een specifieke locatie (scope 1) kunnen worden bereikt).

⁵ Waterstoftransport – verkenning marktordeningsalternatieven, Ecorys 2018.

Bijlage 1: Vraag, aanbod, infra



Den Haag, 18 november 2018

Waterstof vraag en aanbod nu - 2030 – 2050 en de behoefte aan waterstof infrastructuur

Rapportage sub-werkgroep 1 van de werkgroep waterstof



Algemene werkwijze vraag en aanbod scenario's en behoefte aan infrastructuur

- Er is een inventarisatie gedaan van alle beschikbare studies voor de vraag naar waterstof in Nederland voor de verschillende marktsegmenten voor de periode 2015-2050. Studies voor Europa en de wereld zijn terugvertaald naar Nederlands equivalent. Ten aanzien van de vraag naar feedstock zijn een aantal grote industrieën benaderd om inzichten aan te vullen en te valideren.
- De hoofdaandacht ligt op 2030 met een doorkijk naar 2050 voor een onderbouwing van de benodigde uitrol in de komende 10 jaar. Voor de vraag zijn per marktsegment 3 scenario's ontwikkeld (laag, midden, hoog), terwijl voor het aanbod 5 scenario's zijn ontwikkeld. Vraag en aanbod scenario's zijn niet "strikt passend" op elkaar gemaakt.
- Voor de periode 2020-2030 is een bottom-up benadering van de vraag scenario's gemaakt op basis van beschikbare informatie over projecten, studies en andere klimaatafels. Voor de vraag in 2050 is op basis van de aanwezige studies een laag, midden en hoog scenario gemaakt. Voor alle scenario's is zichtbaar hoe ze vergelijken met de studie uitkomsten.
- Voor het aanbod in 2030 zijn 5 scenario's ontwikkeld die zijn gebaseerd op de plannen en mogelijkheden in de markt. Voor 2050 zijn geen scenario's gemaakt.
- Nog niet alle lopende projecten zijn publiek bekend gemaakt. Om deze reden wordt gewerkt met scenarios en niet met prognoses.
- Voor het bepalen van de behoefte aan transmissie infrastructuur is de vraag en aanbod in de scenario's geregionaliseerd: verdeeld over de grote industrieclusters in Nederland. Gasunie heeft een studie gedaan naar de mogelijkheid om een dedicated backbone in 2030 te realiseren op basis van beschikbare bestaande infrastructuur. Op basis van de piek- en daluren van vraag en aanbod is door Gasunie gekeken of deze backbone de transportstromen aankan.
- Voor het bepalen van de flexibiliteitsbehoefte ten gevolge van variaties in vraag en aanbod is een schatting gemaakt op basis van vuistegels. Productieflexibiliteit en bergingen kunnen deze flexibiliteit leveren.
- Tenslotte is een schatting gemaakt van de hoeveelheid CO₂ reductie die de verschillende scenario's kunnen opleveren en van de benodigde hoeveelheid duurzame energie (basislast).
- Overall is gerekend met de onderwaarde van waterstof (120 MJ/kg). Er is dus geen rekening gehouden met de energie die nog uit de condensatie kan vrijkomen in enig moment in de keten (zoals bij een HR-ketel).

Omreken hulpmiddel: 100 PJ = 833 kton/jaar = 9,2 bcm = 27,8 TWh;

Waterstof vraag



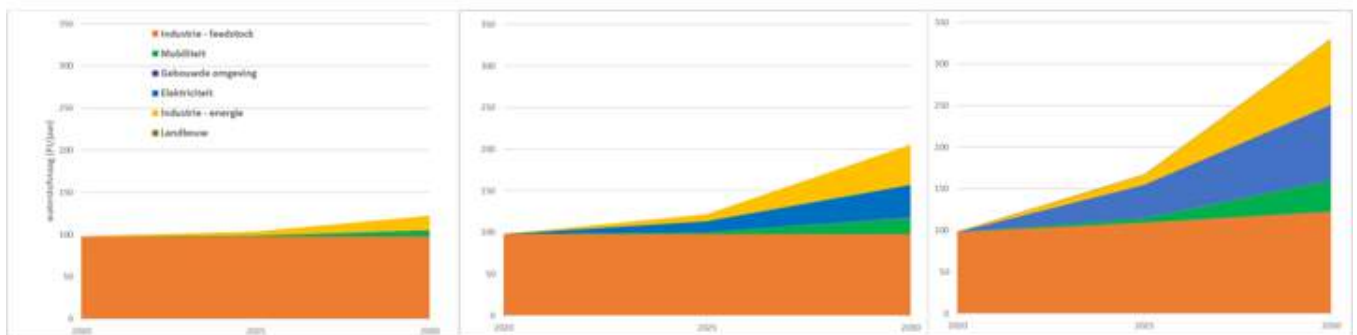
Waterstofvraag in verschillende sectoren

Drie scenario's voor 2030

Laag

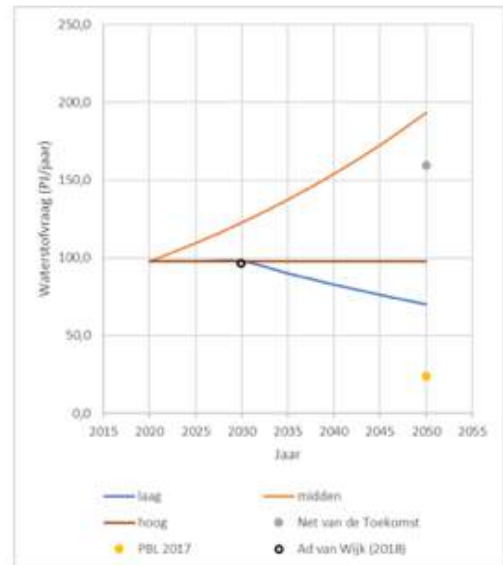
Midden

Hoog



Waterstof als feedstock voor industrie

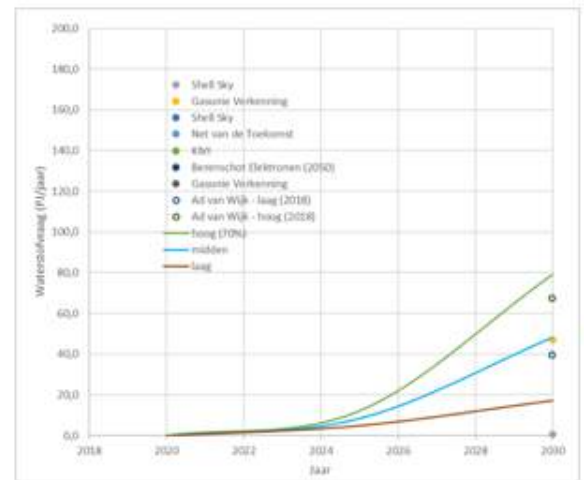
- Huidige vraag naar waterstof als grondstof is 97,8 PJ/jaar:
 - Ammonia: 45 PJ
 - Raffinage*: 16 PJ
 - Bio methanol: 13 PJ
 - Diversen**: 24 PJ
- Laag: constant tot 2030. Daarna 8% per 5 jaar afname door teruglopende vraag in o.a. raffinage
- Midden: constante vraag tot 2050; afname traditionele feedstock, kleine schaal nieuwe toepassingen.
- Hoog: Toename van 12% per 5 jaar door toenemende vraag naar raffinage, ammoniak en brandstoffen of chemicaliën (methanol, synfuels, Steel2Chem, Waste2Chem***)
- Steel2Chem en Waste2Chem hebben bijvoorbeeld een geschat maximum potentieel van 75 en 50 PJ in 2050 (30 PJ in en 15 PJ 2030)
- Ter vergelijking: TKI roadmap waterstof geeft de volgende technische potentiëlen:
 - Non-energetisch: 50 PJ
 - Duurzame chemie: 480 PJ
 - Duurzame brandstoffen: 700 PJ



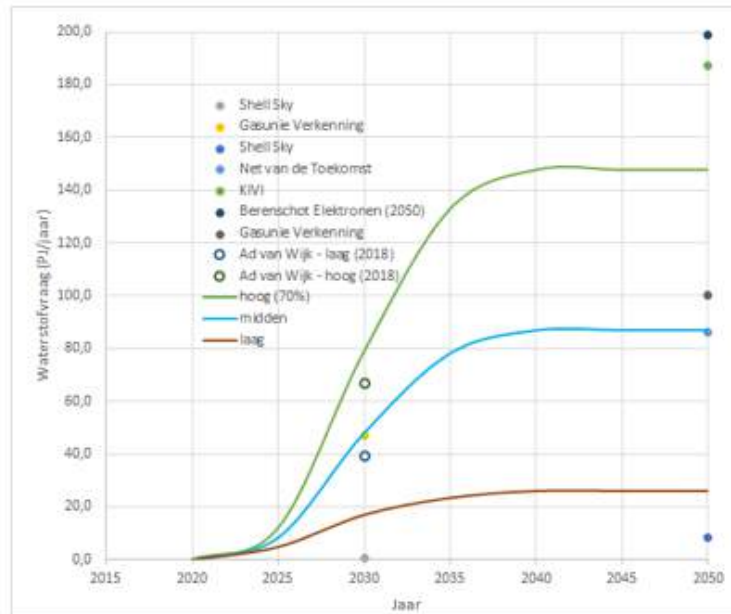
*: dit is exclusief een deel van de waterstof die on-site uit restgassen wordt geproduceerd en gebruikt
 **: aangenomen 100% hergebruik als feedstock, (deel van bijproduct wordt gebruikt voor elektriciteit/verhitting).
 ***: Onderzoek naar feedstock loopt nog. Waste-to-chem wordt nog gecheckt met AVI's

Waterstof voor verhittingsprocessen industrie

- Exclusief grondstoffen en gericht op verhittingsprocessen in de industrie, 9 deelsectoren
- Gebaseerd op technisch potentieel uit DNVGL studie voor Gasunie (zie bijlagen). Voor elk van de deelsectoren is een inschatting gemaakt voor groeitempo met verschillende startjaren: pilot (5%), marktintroductie (50%) en implementatie (100%) voor de verschillende industriële processen.
- **Laag:** vooral elektrificatie, aandeel waterstof:
 - Glas: 50%
 - Keramisch: 60%
 - Lage temperaturen: 0%
 - Drogen: 10%
 - Chemische omzetting: 10%
 - Gieterijen: 10%
 - Non-ferro: 0%
 - Smelten/gloeien staal: 0%
 - Overige hoge temperaturen: 50%
- **Hoog:** deel elektrificatie; 70% vervanging aardgas door waterstof
- **Midden:** gemiddelde van hoog en laag



Waterstof voor verhittingsprocessen – doorkijk 2050

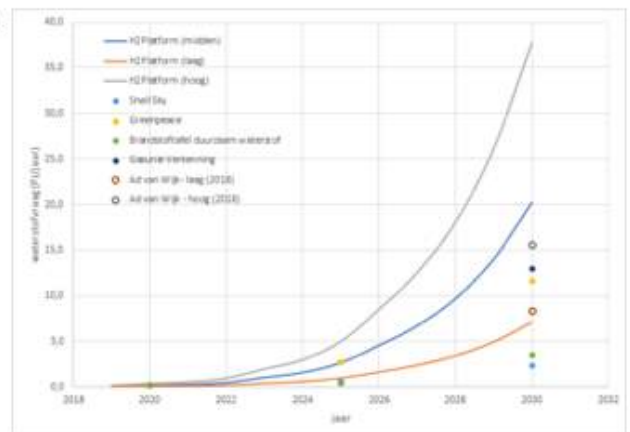


Ter vergelijking: in de TKI roadmap waterstof wordt voor proceswarmte en staalproductie een technisch potentieel van 120 PJ gegeven

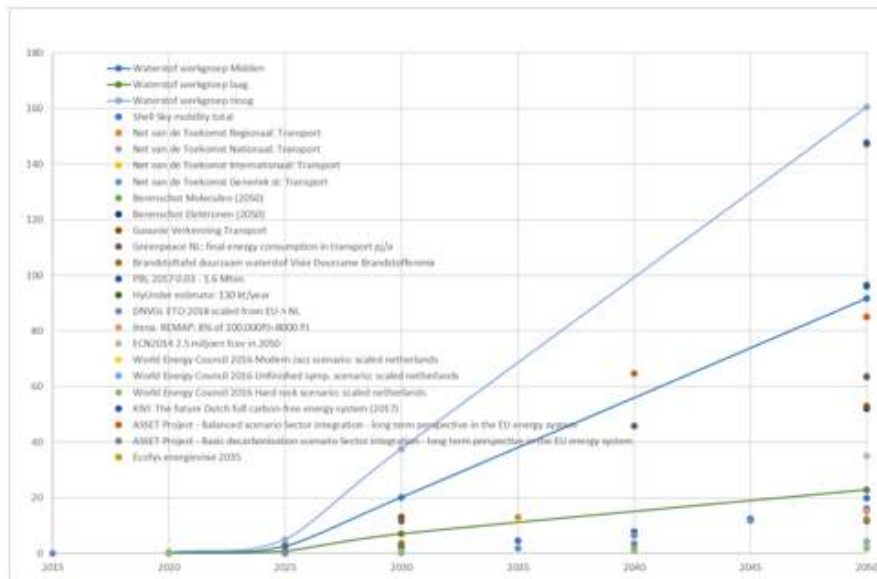
Waterstof in mobiliteit

- Op basis van prognoses die zijn ontwikkeld door het H2-Platform voor de mobiliteitstafel aantallen Fuel Cell voertuigen
- Midden: 375.000 voertuigen; 300.000 auto's, 65.000 bestelbusjes, 7700 vrachtwagens en 1700 bussen in 2030.
- Laag: totaal 132.000 voertuigen, zelfde verdeling als midden
- Hoog: totaal 696.000 voertuigen, zelfde verdeling als midden

	km/jaar	km/kg
auto	22000	95
bestelbus	35000	50
vrachtwagen	50000	9
bus	65000	10



Waterstof in mobiliteit – doorkijk 2050

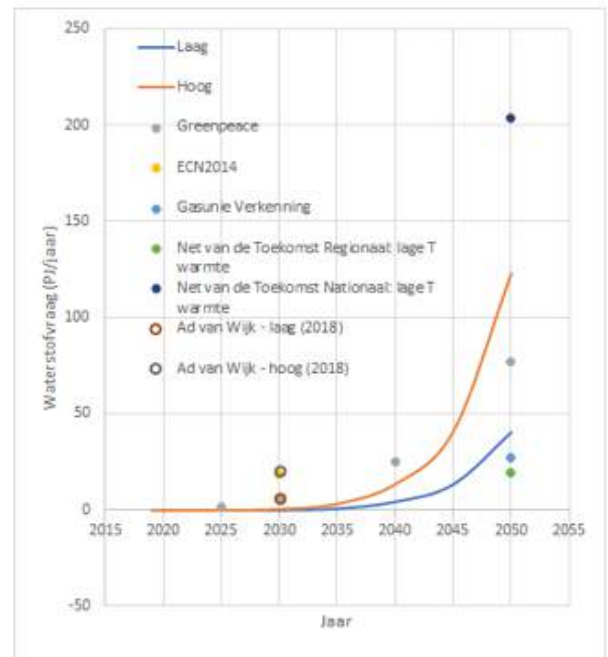


N.B. voor de tussenliggende jaren in de periode 2030-2050 zijn er geen scenario's

Ter vergelijking: in de TKI Roadmap waterstof wordt voor de mobiliteit een technisch potentieel van 125 PJ gegeven

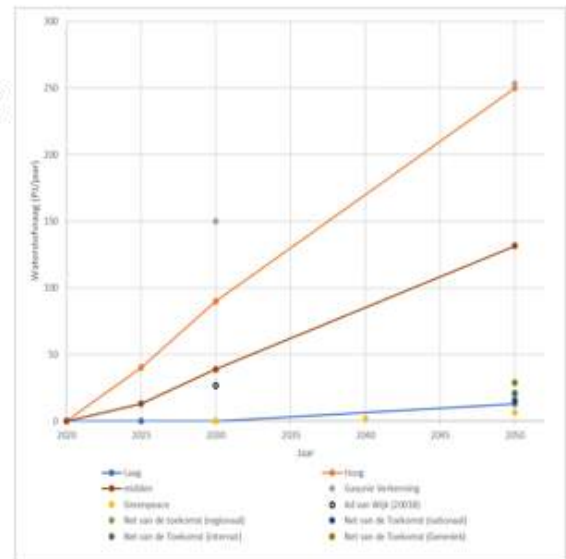
Waterstof in gebouwde omgeving

- In 2050 10% (laag) tot 30% (hoog) van het woningbestand gebruikt waterstof.
- Woningbestand groeit naar 8 miljoen
- Startpunt in 2020 45/135 huizen (laag/hoog).
- Per 5 jaar een 3 (laag)/10 (hoog)-voudiging van het aantal woning dat omschakelt.
- Waterstofverbruik equivalent aan 1500 m³ aardgas per jaar.
- In 2030 2800/11000 (laag/hoog) huizen op waterstof, die minder dan 1 PJ gebruiken. In 2035 17000/65000 huizen die 1 tot 3 PJ gebruiken.
- In 2050 zijn er 0,75 tot 2,3 miljoen huizen op waterstof, die 40 tot 120 PJ gebruiken.



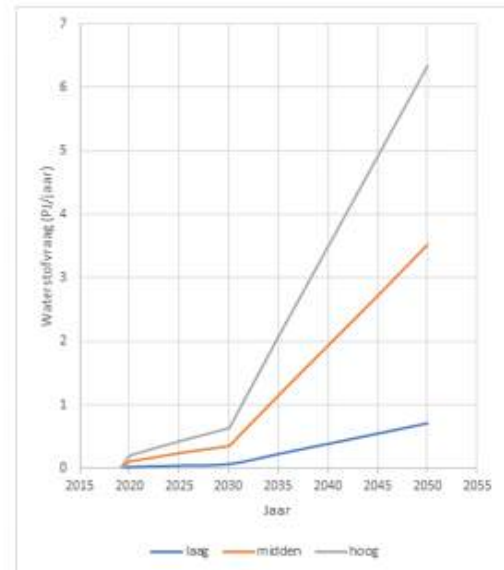
Waterstof voor CO2-vrije elektriciteitsproductie

- Gaat uit van ombouw van gascentrales naar waterstofcentrales om CO2 reductie in elektriciteitssector te behalen en tegelijkertijd voldoen aan de vraag naar elektriciteit (CO2-vrij regelbaar vermogen).
- Laag: geen ombouw van gascentrales (geen blauwe waterstof/CCS)
- Midden: Per ombouw van een 450MW centrale een waterstofvraag van 13 PJ per jaar (uitgaande van 4000 draaiuren). In 2025 1 unit omgebouwd, in 2030 3 units (12 TWh). Eerste gas-to-power project voorzien voor 2025 (Magnumcentrale).
- Hoog: groter aantal waterstofcentrales (Lelystad/Rotterdam/Eemshaven): 25 TWh (90 PJ; 7 x 450 MW eenheid) geen biomassacentrales.
- Ter vergelijking: de TKI roadmap waterstof geeft voor Kracht en Licht een technisch potentieel van 115 PJ



Waterstof in landbouw

- Aangenomen dat in eindsituatie (2050) nog 200 miljoen m³ gasvormige energie nodig is (waterstof of groen gas) = 7 PJ
- Laag/midden/hoog: 10%/50%/90% aandeel waterstof
- Groeipad: 10% van eindpotentieel in 2030, 100% in 2050

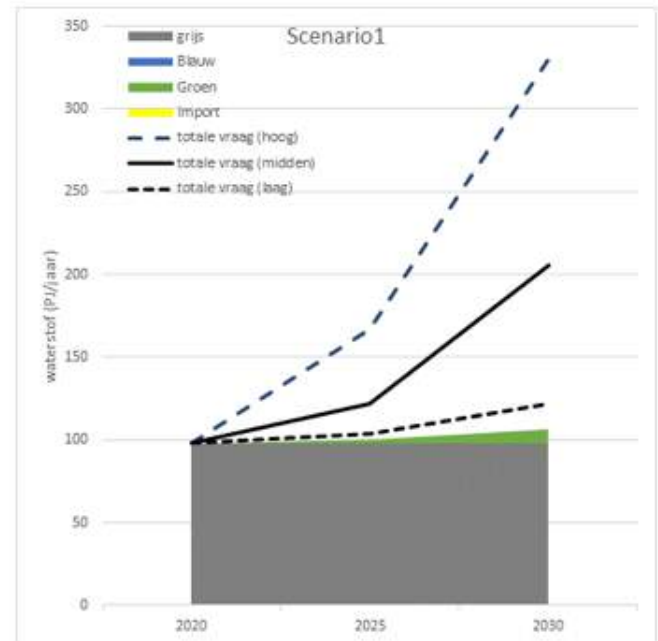


Waterstof aanbod



Scenario 1: Geen programmatische aanpak

- Geen programmatische aanpak
- Steun voor enkele pilots en demonstraties
- Wind-op-zee beperkt tot wat het elektriciteitsnetwerk aan kan
 - 1 MW Pilot in Zuidwending
 - 20 MW (Noord-Nederland)
 - 2x 100 MW (Noord-Nederland en Noord-Holland)
 - 1x 500 MW (onshore gevoed vanuit IJmuiden Ver)
- Deze 721 MW produceert 9 PJ waterstof*

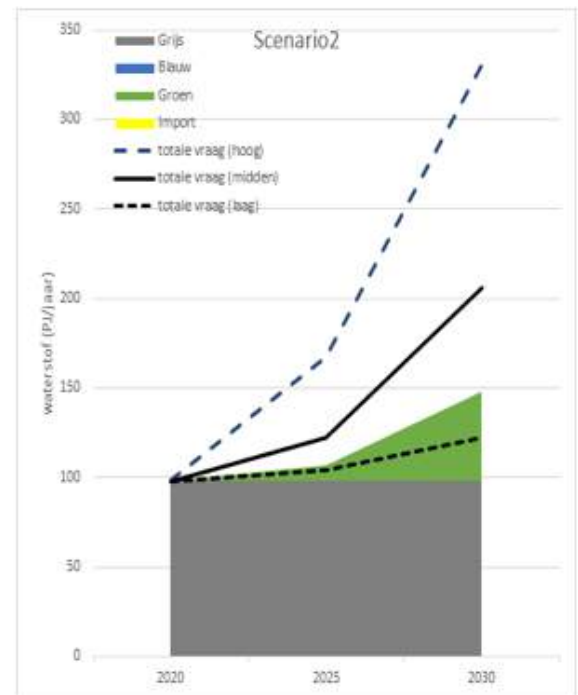


* 5000 uur bedrijfstijd, elektrolyse efficiëntie: 47 kWh/kgH₂ (70% op onderwaarde)

Scenario 2: Waterstofcoalitie

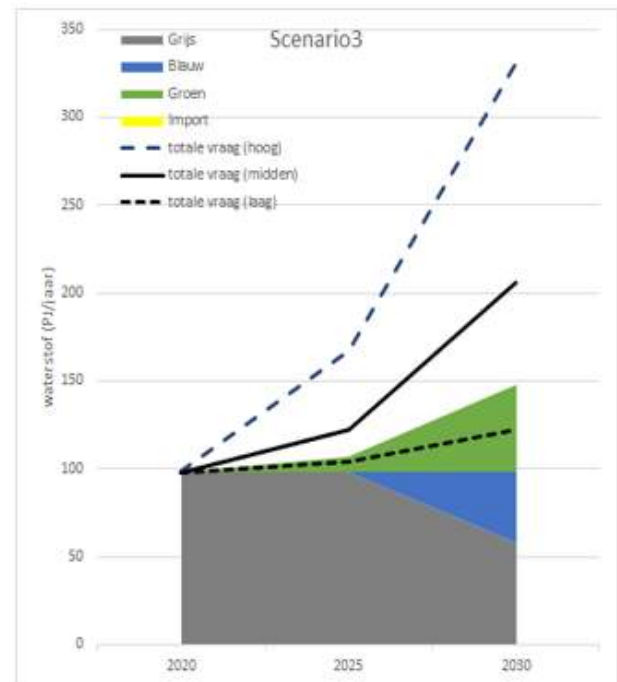
- Programmatische aanpak voor groene H2 conform voorstellen waterstofcoalitie
- Groene Waterstof:
 - 4000 MW elektrolysecapaciteit in 2030
- Geen blauwe waterstof want:
 - Geen of althans geen pre-combustion CCS in Nederland
 - Geen inzet waterstof voor CO2-vrije elektriciteitsproductie
- Benodigd offshore windvermogen:
 - Als er 4000 MW offshore wind wordt neergezet die dedicated aan de elektrolyzers leveren dan produceren deze 50 PJ aan waterstof*
 - Als alternatief kan bijvoorbeeld ook 8000 MW aan offshore wind worden neergezet. Met een 50%/50% capaciteit split tussen elektriciteit en waterstof wordt de elektriciteit dan zo veel mogelijk baseload geproduceerd wat de inpassing van de wind elektriciteit optimaliseert (>60% van de windenergie gaat naar de elektriciteit). De 4000 MW elektrolyser kan dan met de pieken van de wind 37 PJ waterstof leveren, maar heeft nog steeds een redelijk bedrijfstijd (3000-4000 uur). Om met ditzelfde concept 50 PJ aan waterstof te produceren is 10000 GW wind en 5000 MW elektrolyser nodig.

* 5000 uur bedrijfstijd windmolens, elektrolyse efficiëntie: 47 kWh/kgH2 (70% op onderwaarde)



Scenario 3: Waterstofcoalitie + CCS

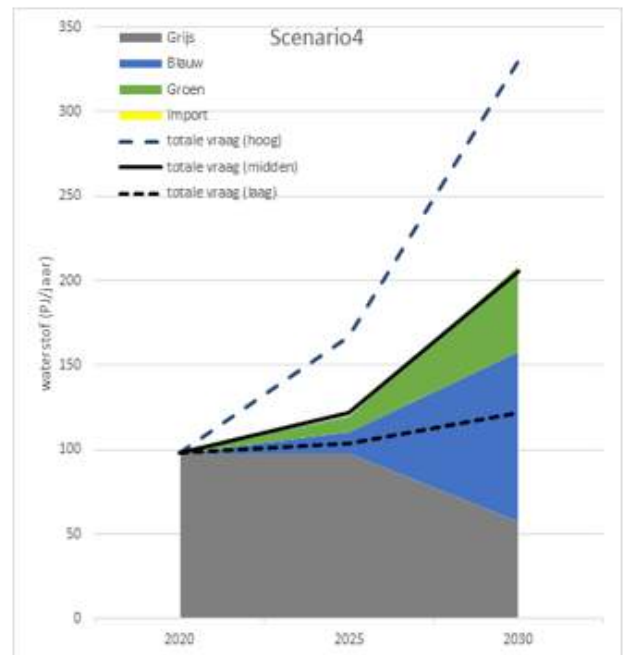
- Programmatische aanpak waterstof & uitrol CCS
- Groene Waterstof:
 - 4000 MW Elektrolyse-capaciteit in 2030
- Blauwe waterstof:
 - CCS met name in Rotterdam (pre-combustion) (40 PJ)
- De 40 PJ blauwe waterstof vertaalt zich in een CO₂ productie van 2,9 Mton per jaar*
- De blauwe waterstof kan bestaan uit nieuwe productie die grijze vervangt, óf CCS op bestaande grijze productie, óf een combinatie



* Conversierendement van 70% en CO₂-afvangrendement van 90%

Scenario 4: Waterstofcoalitie + CCS + H2M+ voor G2P+

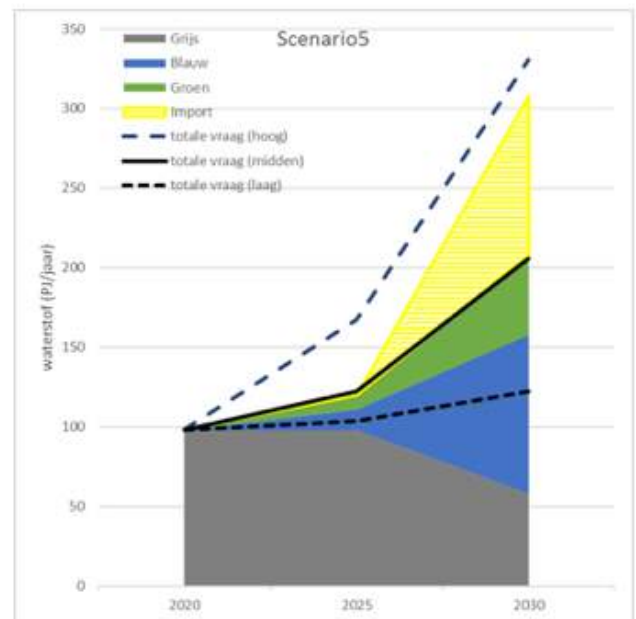
- Programmatische aanpak waterstof & uitrol CCS & G2P voor CO2-vrije waterstofproductie
- Groene Waterstof:
 - 4000 MW Elektrolysecapaciteit in 2030
- Blauwe waterstof:
 - CCS in Rotterdam (pre-combustion)
 - Blauwe waterstofproductie in Noord-Nederland voor o.a. Gas-to-power en industrie* ;
- Blauw is 100 PJ
- De 100 PJ blauwe waterstof vertaalt zich in een CO2 productie van 7,3 Mton per jaar



* De extra 60 PJ bovenop de 40 PJ uit Rotterdam kan niet alleen met de fabriek bij H2M gemaakt worden, een additionele fabriek is ergens nodig. Ook wordt de waterstof niet alleen voor de Magnum units gebruikt maar ook voor de omliggende markt

Scenario 5: Waterstofcoalitie + CCS + H2M+ + additionele import

- Programmatische aanpak waterstof & uitrol CCS & G2P voor CO₂-vrije waterstofproductie + import
- Groene Waterstof:
 - 4000 MW Elektrolysecapaciteit in 2030
- Blauwe waterstof:
 - CCS in Rotterdam(pre-combustion);
 - Blauwe waterstofproductie in Noord-Nederland voor o.a. Gas-to-power en industrie;
- Additionele import (100 PJ) "a la Japan"
- Dit betekent 73 schepen per jaar die vloeibaar waterstof lossen*
- Dit zou ook substantiële hoeveelheden zon en wind capaciteit vereisen in land van oorsprong (bijvoorbeeld 10 GW wind)
- Het lijkt overigens niet waarschijnlijk al in 2030 deze hele keten ontwikkeld te hebben



*1,4 PJ vloeibaar waterstof per schip (Kawasaki). Japan wil in 2030 commerciële waterstof transport per schip naar hun land hebben.

Waterstof infrastructuur



Den Haag, 18 november 2018

Voorgestelde waterstof infrastructuur

- Gasunie heeft tijdens de onderhandelingen voor het klimaatakkoord op hoofdlijnen het aanbod gedaan om in 2030 een waterstofbackbone te ontwikkelen.
- Met deze waterstof-basisinfrastructuur is het mogelijk om op basis van bestaande infrastructuur de verschillende industriële clusters met elkaar en met cavernes waterstof opslag verbinden.
- Gasunie heeft onderzocht welke capaciteiten in bestaande leidingen vrijgespeeld kunnen worden, welke onderdelen moeten worden aangepast en waar nieuwe leidingen nodig zijn.
- De zogenaamde backbone kent verschillende capaciteiten maar op de meeste tracé's is meer dan 10 GW beschikbaar
- In de volgende slides wordt aan deze voorgestelde waterstof -infrastructuur gerefereerd.



Samenvatting infrastructuur analyse

- *Kan de beschikbaar te maken bestaande infrastructuur (backbone) de mogelijke scenario's in 2030 aan? En hoe zit het met de flexibiliteitsbehoefte (o.a. bergingen)?*
- Aanbod scenario 5 in combinatie het hoge vraag scenario in 2030 leveren de meest zware belasting op van de infrastructuur.
- Deze combinatie levert voor het transport geen echte knelpunten op. De totale piekvraag is 12 GW. Maar op basis van de balans tussen vraag en aanbod van de verschillende clusters liggen de grootste transportstromen in de orde van 6 GW, tussen Maasvlakte, IJmond en Eemshaven.
- Voor de flexibiliteitsbehoefte is de *maximale* behoefte aan werkgas volume geschat op 16,5 PJ waarbij 13 PJ uit de vraag komt en 3,5 PJ uit de groene (fluctuerende) waterstof productie. De productieflexibiliteit kan in dit geval maximaal 14 PJ aan werkgas leveren terwijl de cavernes maximaal 21 PJ kunnen leveren. Als we veronderstellen dat de flex 50%/50% uit productie en bergingen komt dan zijn er in 2030 in het lage, midden, en hoge scenario 3, 6 of 9 cavernes nodig.

Gevolgde methodiek - regionalisatie

- Voor de regionalisatie van vraag en aanbod is een reeks van entry en exit punten gebruikt die het huidige waterstoftransportmodel aankan. Voor 2030 wordt verondersteld dat 1 aardgas leiding wordt gesepareerd en geschikt wordt gemaakt voor waterstof.
- **Regionalisatie vraag 2030:**
 - Gebouwde omgeving en mobiliteit: pro rata met inwonersaantal per provincie
 - Elektriciteit: 50% "Eemshaven", 50% "Rotterdam"
 - Industrie feedstock: verdeling conform huidige situatie (37% "Zeeuws-Vlaanderen", 22% "Maasvlakte", 18% "Zuid-Limburg", 13% "Eemshaven", 10% "IJmond")
 - Landbouw: alleen in "Maasvlakte" (Westland)
 - Industrie verhitting: verdeling conform Blueterra studie (48% "Maasvlakte", 26% "Zeeuws-Vlaanderen", 15% "Zuid-Limburg", 10% "IJmond", 1% "Eemshaven")
- **Regionalisatie aanbod 2030:**
 - Grijze waterstof: op dezelfde locaties als momenteel
 - Blauwe waterstof: 50% "Eemshaven", 50% "Maasvlakte"
 - Groene waterstof: alleen kustlocaties: 40% "Maasvlakte", 30% "Eemshaven", 30% "IJmond"
 - Gele waterstof: import alleen in "Maasvlakte" (haven van Rotterdam)

Gevolgde methodiek – bepaling piekcapaciteit

- Voor alle vraag sectoren en productie sectoren zijn de jaartotals met behulp van een bedrijfstijd omgezet naar een piek uur vraag of aanbod:
 - Vraag – elektriciteit: capaciteit geconverteerde turbines (óf 6000 uur)
 - Vraag – verhitte industrie: 8000 uur
 - Vraag – feedstock industrie: 8000 uur
 - Vraag – landbouw: 5000 uur
 - Vraag – gebouwde omgeving: 2000 uur
 - Aanbod – grijs: 8000 uur
 - Aanbod – blauw: 8000 uur
 - Aanbod – groen: elektrolyser capaciteit (70% efficiëntie)
- De drie vraag scenario's en 5 aanbod scenario's voor 2030 zijn doorgerekend. De geformuleerde vraag en aanbod scenario's zijn niet helemaal in balans met elkaar gebracht.
- Er is niet gekeken naar 2050.
- Om te toetsen of transport van waterstof wel of niet mogelijk is moeten situaties doorgerekend worden met extremen, zowel maximale vraag of aanbod als minimale vraag of aanbod. Ook de stromen naar de waterstof bergingen moeten daarbij meegenomen worden.

Gevolgde methodiek - flexibiliteitsbehoefte

- De behoefte aan flexibiliteit is in deze studie geschat vanwege tijdsbeperking. Het aanbod van flexibiliteit kan uit bergingen komen of productieflexibiliteit van waterstoffabrieken. Strikt genomen moet hier een heel jaar op uurbasis worden doorgerekend, met een reeks van windprofielen en gebruikersprofielen. De volgende vuistregels worden gebruikt voor een schatting voor de vraag en het aanbod van flexibiliteit (er wordt alleen naar werkgasvolume gekeken):
 - 1 caverne heeft typisch 240 GWh werkgasvolume
 - Waterstoffabrieken kunnen 10% variëren in hun productie en zo flexibiliteit leveren
 - Iedere GW aan wind op zee heeft ongeveer 1 caverne nodig om een baseload vraag te kunnen leveren
 - Voor het volume dat in de gebouwde omgeving wordt gebruikt is ongeveer 30% werkgasvolume nodig
 - Voor het volume dat in de industrie (energie) en landbouw wordt gebruikt is ongeveer 10% werkgasvolume nodig
 - Voor het volume dat in de elektriciteit wordt gebruikt is 5% werkgasvolume nodig
 - Mobiliteit heeft snelle fluctuaties die met linepack en bergingen opgelost wordt, maar niet een structurele behoefte aan werkgasvolume eist
 - Feedstock heeft geen behoefte aan bergingen
 - Er wordt even geen rekening gehouden met SOS aspecten, onderhoud bij vraag of aanbod installaties, windproductie fluctuaties over de jaren heen, etc.

Uitkomst – volumebalans per cluster

	2030							
	Laag			Midden			Hoog	
PJ	vraag	aanbod 1	aanbod 2	aanbod 3	vraag	aanbod 4	vraag	aanbod 5
Limburg	20	17	17	10	26	10	35	7
Eemshaven	13	15	28	42	33	72	63	70
IJmuiden	13	12	25	21	18	21	24	19
Rotterdam	32	26	42	53	71	83	118	179
Zeeland	41	36	36	22	49	22	67	15
Overig	3	0	0	0	9	0	11	0
Totaal	122	107	148	148	206	208	318	290

- Het lage vraag scenario is per cluster aardig in evenwicht met de aanbod scenario's 1/2/3. Dit is logisch omdat dit voornamelijk bepaald wordt door de huidige vraag van feedstock en aanbod van lokaal gemaakte grijze waterstof.
- Bij het midden en hoog scenario begint de volumebalans meer uiteen te lopen en ontstaat er met name vraag naar aansluiting op infrastructuur in het Zeeland en Zuid-Limburg cluster.
- In het hoog aanbod scenario wordt veel waterstof import verondersteld die in Rotterdam aankomt en daar leidt tot een overschot in aanbod.

Maximum capaciteit vraag en aanbod

MW	Mobiliteit	GO	Elektriciteit	Ind - feedstock	Landbouw	Ind - energie	totaal
Lage vraag 2030	226	21	0	3101	4	593	3945
Midden vraag 2030	642	50	1806	3101	20	1667	7286
Hoge vraag 2030	795	79	4167	3890	35	3133	12099
Lage vraag 2050	728	5581	602	2222	39	907	10078
Midden vraag 2050	2911	11296	6088	3101	195	3018	26609
Hoge vraag 2050	5094	17010	11574	6121	352	5128	45280

MW	groen	blauw	grijs	geel	totaal
Aanbod 1 2030	541	0	3396	0	3937
Aanbod 2 2030	3000	0	3396	0	6396
Aanbod 3 2030	3000	1389	2007	0	6396
Aanbod 4 2030	3000	3472	2007	0	8479
Aanbod 5 2030	3000	3472	1389	3472	11333

- Uit deze getallen blijkt dat de maximaal te verwachten capaciteiten bescheiden zijn in vergelijking met wat transport technisch mogelijk is op bepaalde tracé's. De piekvraag in 2030 is 12 GW en in 2050 45 GW.
- Ook is duidelijk welke sectoren in meer of mindere mate capaciteit behoeven.

Maximum capaciteit per cluster

	2030					2050					
	Laag				Midden		Hoog		laag	midden	hoog
MW	vraag	aanbod 1	aanbod 2	aanbod 3	vraag	aanbod 4	vraag	aanbod 5	vraag	vraag	vraag
Limburg	654	599	599	354	848	354	1223	245	941	1933	3303
Eemshaven	412	595	1333	1781	1345	2718	2654	2640	811	3965	7391
Ijmuiden	404	495	1233	1236	586	1444	840	1383	1349	2948	4758
Rotterdam	1056	982	1966	2278	2612	3215	4733	6548	3098	9483	16351
Zeeland	1314	1265	1265	748	1602	748	2278	517	1202	2251	4097
Overig	105	0	0	0	294	0	371	0	2677	6029	9380

De getallen laten de maximale capaciteit zien per cluster voor zowel vraag als aanbod. Deze tabel is gebruikt om een analyse uit te voeren of transport mogelijk is. Om voor een netwerk de meest extreme (belastende) transportsituatie te vinden moeten overigens ook situaties van een minimum vraag of aanbod bekeken worden.

Uitkomst: transport analyse

- Alle scenario's zijn geanalyseerd en het aanbodscenario 5 in combinatie met het hoge vraagscenario van 2030 is als meest strenge test voor 2030 gebruikt. Dit lijkt het meeste transport tussen de industrieclusters op te leveren, vooral tussen Maasvlakte, Noordzeekanaal en Eemshaven.
- => *Op basis van de voorgestelde mogelijke infrastructuur levert die combinatie van vraag en aanbod geen echte knelpunten op: de grootste transportstromen liggen in de orde van 6 GW.*
- Bij het hoog scenario kan niet alle vraag en aanbod lokaal opgelost worden. Daarvoor zitten er te veel verschillen tussen vraag en aanbod in de verschillende regio's. De bergingen in het noorden van Nederland kunnen een deel van de flexibiliteit leveren.
- Voor een robuuste analyse van het entry-exit systeem is meer tijd nodig

Uitkomst: schatting van flexibiliteitsbehoefte

Flexbehoefte (werkgas) obv vraag in 2030			
Scenario:	Laag	Midden	Hoog
Totale volumevraag	122	206	318 PJ
Flexvraag	1,8	6,9	12,6 PJ
Aandeel	1,4%	3,4%	4,0%

Flexbehoefte (werkgas) obv groene waterstof in 2030					
Scenario:	1	2	3	4	5
Electrolysercapaciteit	721	4000	4000	4000	4000 MW
Werkgasbehoefte	0,6	3,5	3,5	3,5	3,5 PJ

Flexleverend aanbod in 2030					
Scenario:	1	2	3	4	5
Totaal grijs aanbod	98	98	58	58	40 PJ
Totaal blauw aanbod	0	0	40	100	100 PJ
Aanname flexmogelijkheid:	10%	10%	10%	10%	10%
Alleen op blauw:	0	0	4,0	10,0	10,0 PJ
Alleen op grijs:	9,8	9,8	5,8	5,8	4,0 PJ

Potentieel flexleverend aanbod cavernes in 2030									
Aantal cavernes:	1	2	4	8	12	16	20	24	
Werkgasvolume:	0,86	1,7	3,5	6,9	10,4	13,8	17,3	20,7 PJ	

- Met de beschreven methodiek is de behoefte aan werkgasvolume in PJ vanuit zowel de vraag als het aanbod geschat (bovenste twee tabellen). Daarnaast is gekeken welke flexibiliteit geleverd kan worden door zowel de waterstoffabrieken als bergingen, ook in PJ. Eén caveerne heeft een werkgasvolume van ongeveer 0,86 PJ (240 GWh). Het hier gegeven aantal cavernes van 24 is ongeveer het maximum wat redelijkerwijs mogelijk wordt geacht gereed te kunnen hebben in Nederland in 2030 (bron TNO).
- Als we de flexbehoefte vanuit vraag en aanbod bij elkaar optellen komen we aan 1,8+3,5 PJ (laag), 6,9+3,5 PJ (midden), 12,6+3,5 PJ (hoog) in de 3 scenario's. Er is voldoende potentieel aan cavernes en productieflexibiliteit om de vraag naar werkgasvolume op te lossen. Als we een 50%/50% levering van de flex door cavernes en productieflexibiliteit veronderstellen zouden er in 2030 in het lage, midden en hoge waterstof vraag scenario respectievelijk 3, 6 of 9 cavernes nodig zijn.
- N.B. Nadere analyse op basis van het doorrekenen van een geheel jaar is noodzakelijk om deze voorlopige schatting te kunnen staven. Analyse van behoefte aan injectiecapaciteit en uitzendcapaciteit mist hier nog.

CO₂ reductie ten gevolge van waterstof



CO2 reductie – aanbod perspectief

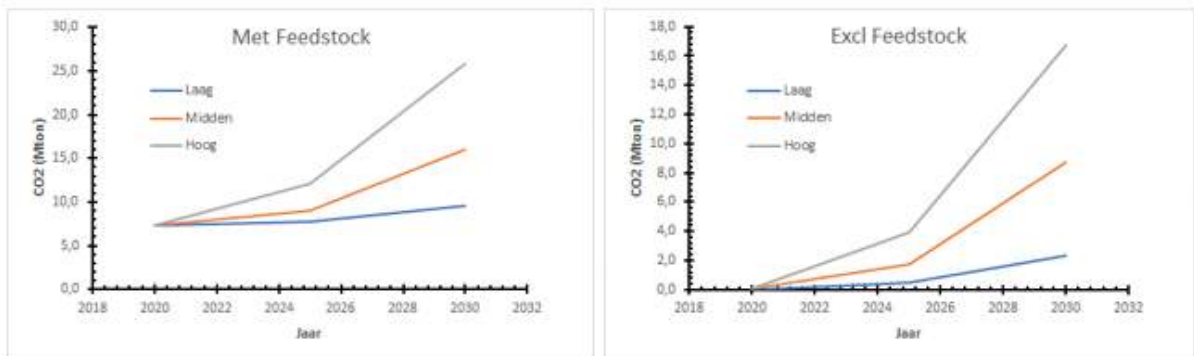
56,5	kton/PJ	emissiefactor aardgas
1	PJ	aardgas
70%		conversierendement naar waterstof
0,7	PJ	waterstof
90%		afvangrendement
5,65	kton CO2	ge-emiteerde CO2 per PJ aardgas
8,07	kton CO2	ge-emiteerde CO2 per PJ waterstof
85,7%		netto emissie reductie efficiëntie

	Productie (PJ)				kton/PJ	Emissiereductie (Mton CO2)				
	groen	blauw	grijs	geel		100%	86%	0%	100%	
H2 aanbod (2030 scenario 1)	9	0	98	0	56,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5
H2 aanbod (2030 scenario 2)	50	0	98	0	56,5	2,8	0,0	0,0	0,0	2,8
H2 aanbod (2030 scenario 3)	50	40	58	0	56,5	2,8	1,9	0,0	0,0	4,8
H2 aanbod (2030 scenario 4)	50	100	58	0	56,5	2,8	4,8	0,0	0,0	7,7
H2 aanbod (2030 scenario 5)	50	100	40	100	56,5	2,8	4,8	0,0	5,7	13,3

- Bij de productie van blauwe waterstof moet niet alleen rekening worden gehouden met het afvangrendement, maar ook met het conversierendement
- In het hier berekende voorbeeld is verondersteld dat de waterstof alleen het aardgas verdringt, en is gerekend met de emissiefactor van aardgas
- Bij de productie van grijze waterstof vind op dit moment voor een deel al afvang van CO2 plaats en hergebruik, hier is op dit moment nog niet een goed beeld bekend (urea productie, CO2 voor softdrinks). Ook is niet duidelijk in hoeverre dit aandeel kan groeien, of retrofit CCS kan plaatsvinden, en welk afvangrendement hierbij mogelijk is*.
- Voor de uiteindelijke CO2 reductie moet ook gekeken naar de overige keten efficiënties en als andere brandstoffen of grondstoffen verdrongen worden dan aardgas (andere emissiefactor!), zie volgende slide.
- Aangenomen wordt dat de elektriciteit die voor de productie van groene waterstof wordt gebruikt geen verdere Nederlandse conventionele elektriciteitsvraag kan vervangen. Hierbij lijkt de hybride inzet van wind (baseload elektriciteit produceren en met de piek waterstof) een logisch hulpmiddel, maar ook congestie van het elektriciteitsnetwerk kan hierbij een rol spelen.

*Als alleen in de tweede processtap CO2 wordt afgevangen is het afvangpercentage ongeveer 60%

CO₂ reductie – vraag perspectief



- Bij het vraag perspectief is verondersteld dat de volledige vraag ingevuld wordt met 100% CO₂-vrije waterstof.
- Qua CO₂ perspectief is er een volgorde: bij voorkeur mobiliteit (netto reductie 150-200 ktonCO₂/PJ_{H₂}, tgv emissiefactor olie en rendement FCEV/ICE), vervolgens inzet in feedstock (reductiefactor 75 ktonCO₂/PJ_{H₂}), tenslotte verdringing aardgas (emissiefactor 56,5 ktonCO₂/PJ_{H₂}).
- Bij de elektriciteit is de emissiefactor ongeveer 125 ktonCO₂/PJ_{el}. Los van andere aspecten, moet CO₂ technisch altijd overwogen waar de wind energie het beste ingezet kan worden in het elektriciteit systeem of waterstof systeem.

Verdere bijlages



DNV-GL studie industrie-energie (1)

Tabel A: Geschat aardgas-, waterstof- en elektriciteitsverbruik en potentiële CO₂ besparing (100% conversie)

Temperatuur °C	Energieverbruik PJ	Aardgas bcm	H ₂ bcm	Elektriciteit TWh	Potentiele CO ₂ reductie Mton
0-100	25	0.7	2	6.9	1.4
100-600	140	4	11	38.9	7.9
>600	46	1.3	3.6	12.8	2.6
Totaal	211	6	16.6	58.6	11.8

Tabel 3: Totaal verbruik onderverdeeld naar industriële processen

	Totaal (fossiele) brandstoffen PJ	0-100 °C		100-600 °C		>600°C	
		Warm water	Droogprocessen	Chemische omzettingprocessen	Destillatieprocessen	Smelten, gloeien, bakken	
Chemie en farmaceutische industrie	169.1						
Kaffinaderijen	99.9						
Vedings- en grootmiddelenindustrie	47.4						
IJzer- en staalindustrie	28.2						
Olief- en gaswinning	23.9						
Bouwmateriaalindustrie	21.9						
Papier- en grafische industrie	7.4						
Bouwnijverheid	22						
Metaalproducten en machine-industrie	11.3						
Onbekend	6.3						
Niet-ferrometalenindustrie	3						
Cokesfabrieken	7.8						
Deftstoffenwinning (geen olie en gas)	2.4						
Transportmiddelenindustrie	2.3						
Textiel-, leer- en lederindustrie	2.6						
Houtindustrie	0.5						

>100%
 >70%
 >50%
 <25%

Tabel 4: Totaal verbruik onderverdeeld naar temperatuursprocessen (grobe inschatting)

Temperatuur, °C	Verwarmingproces	Totaal kool en koolproducten PJ	Totaal aardoliegrondstoffen en producten PJ	Aardgas PJ	Totaal PJ
0-100	P1			25	25
100-600	P1	3	215	140	358
>600	P1	28		46	74
Totaal	P2	31	215	211	457

DNV-GL studie industrie-energie (2)

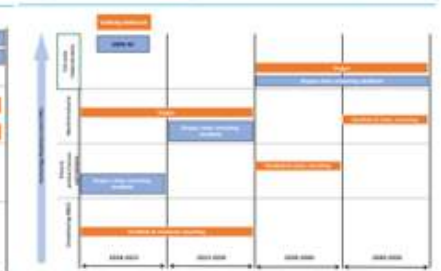
Indirecte verhittingsprocessen (0-100 °C)
Warmwater boilers, WKK (brandstofketel, turbine en generator)



Directe verhittingsprocessen (100-600 °C)
Drogen en chemische omzetting



Indirecte verhittingsprocessen (100-600 °C)
Drogen en chemische omzetting



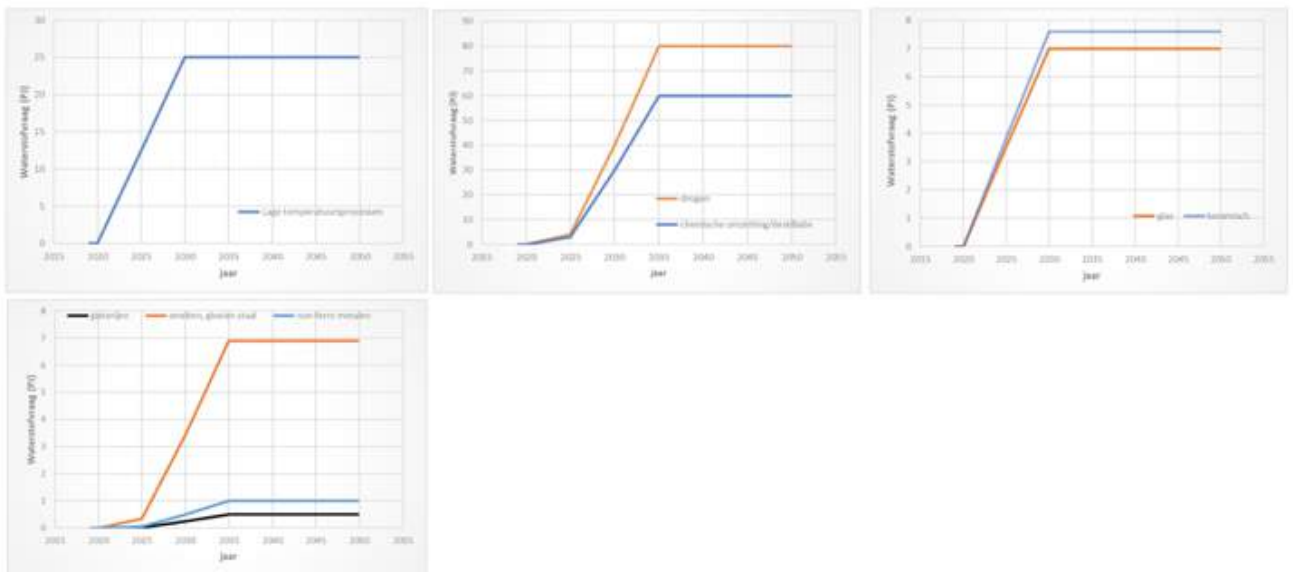
Directe verhittingsprocessen (>600 °C)
Glas en bakkerij (keramische industrie)



Directe verhittingsprocessen (>600 °C)
Niet-ferre smelting, glaserijen en metaalbewerking (smelten/walsten/glas)



DNV-GL studie industrie-energie (3)



Bijlage 2: Plannen en ontwikkelingen

In deze bijlage worden de resultaten van werkpakket twee weergegeven. De inventarisatie van activiteiten in de clusters is in het hoofdrapport opgenomen.

Het waterstofprogramma zou in de beleving van de subwerkgroepleden werkpakket 2 moeten bestaan uit een landelijke component als het gaat om de realisatie van de noodzakelijke randvoorwaarden, maar ook uit regionale deelprogramma's met een maatwerk aanpak per industriecluster en omliggend verzorgingsgebied. Daarnaast zet de overheid in op internationale samenwerking voor de ontwikkeling van waterstof en in lijn hiermee ontsluiten van fondsen via diverse EU-programma's. Een aldus gefaseerd programma behelst samenwerking tussen sleutelpartijen (overheden, marktpartijen, kennisinstellingen, netwerkbedrijven en maatschappelijke organisaties), zodat de ontwikkeling van een waterstofsysteem gecoördineerd vorm kan krijgen.

Rapporteurs Werkpakket 2:

- Barbara Huneman (Nouryon, nieuwe naam van Akzo Nobel Speciality Chemicals)
- Wouter Groenen (Provincie Zuid-Holland, mede namens IPO; w.groenen@pzh.nl, 06-18309922)

Met medewerking van leden van Werkgroep Waterstof bij het Klimaatakkoord:

- Marcel Weeda (TNO-ECN)
- Piet Nienhuis (Gasunie)
- Marco Bosman (Nuon Vattenfall)
- Martijn Kleverlaan (Shell)
- Robert Claasen (Chemelot)
- Paul Compagne (BioMCN)
- Op verzoek van Han Feenstra: Min van I&W, Dirk Schaap, 'cross-over' met sector mobiliteit

En met medewerking van IPO en vijf andere provincies met een industriecluster (via Wouter Groenen):

- Interprovinciaal Overleg: Rens Baltus
- Provincie Groningen (voor Noord-Nederland, drie provincies): Luuk Buit en Thijs van Wonderen
- Provincie Noord-Holland: Geert Haenen
- Provincie Noord-Brabant: Nicolle Lambrechts
- Provincie Zeeland: Leo Leynse
- Provincie Limburg: Paul Levels
- Provincie Zuid-Holland: Joey ten Cate

Industriecluster	Vertegenwoordiger vanuit Cross-sectorale Werkgroep Waterstof bij het Klimaatakkoord	Vertegenwoordiger van provincie	Overige betrokkenen
Eemshaven, Delfzijl en Zuidwending	Martijn Kleverlaan, Shell	Provincie Groningen: Luuk Buit of Thijs van Wonderen	Hendré Sijbring, Groningen Seaports

Haven-Industrieel Complex Amsterdam (Noordzeekanaal)	Marco Bosman, Nuon Vattenfall	Provincie Noord-Holland: Geert Haenen	
Haven-Industrieel complex Rotterdam	Wouter Groenen PZH, namens IPO	Provincie Zuid-Holland: Wouter Groenen	Gasunie, Piet Havenbedrijf Rotterdam, Randolph Weterings en Deltalinqs, Alice Krekt
Moerdijk	Wouter Groenen PZH, namens IPO	Provincie Noord-Brabant: Nicolle Lambrechts	Manon Baertmans
North Sea Ports (Vlissingen, Terneuzen, Sluiskil)	Nouryon, Barbara Huneman	Provincie Zeeland: Leo Leynse	Laurens Meijering van SDR
Chemelot	Robert Claassen	Provincie Limburg: Paul Levels	

Op donderdag 8 november 2018 hebben de zes provincies en het IPO gesproken over de regionale waterstofplannen en ambities in de vijf industrieclusters. Het was meteen een eerste gedachtewisseling over regionale deelprogramma's die vorm kunnen gaan krijgen onder het programma waterstof van het Klimaatakkoord, met ruimte voor regionaal maatwerk/ specialisatie.

1. Werkgroep Waterstof bij Klimaatakkoord

De cross-sectorale Werkgroep Waterstof heeft ter onderbouwing van het Klimaatakkoord in de periode oktober-november 2018 met drie werkpakketten invulling gegeven aan de voorbereiding van een programmatische aanpak van de rol van waterstof in de energie- en grondstoffentransitie in Nederland.

Cross-sectoraal slaat in dit verband op de verbindende rol die waterstof kan spelen tussen de verschillende sectoren in het Klimaatakkoord: Elektriciteit (systeemintegratie wind en zon; net-balancing), Industrie (waterstof als feedstock en als energiedrager), Mobiliteit, Gebouwde omgeving en Landbouw (Glastuinbouw).

2. Drie werkpakketten

Het eerste werkpakket richtte zich op de inschatting in scenario's voor de productie/ het aanbod van waterstof (grijs, blauw, groen; import) en de toepassing als grondstof en als energiedrager (industrie, mobiliteit, gebouwde omgeving, glastuinbouw en net-balans) op macro-schaal, Nederland als geheel (uitgedrukt in PetaJoules per jaar). Het tweede werkpakket had betrekking op ontwikkelingen in de vijf industrieclusters in Nederland en de ontwikkelscenario('s) die daaruit kunnen worden afgeleid (vervlechting van uitkomsten van werkpakket 1 en 2). Het derde en laatste werkpakket had betrekking op de randvoorwaarden die nodig zijn om tot verduurzaming en vergroting van de productie en toepassing van waterstof te kunnen komen en de verschillende belangen/ issues die zich daarbij voordoen. Voorliggende notitie heeft betrekking op het tweede werkpakket. Dat richt zich op ontwikkelingen en kansen in de vijf industriële clusters in Nederland.

3. Aanpak van werkpakket 2

1. Teamvorming; ook verbinden via IPO-lijn met provincies met industrieel cluster; ook verbinden

- met sector mobiliteit (via Ministerie van I&W); ook verbinden met sector gebouwde omgeving (nog aandachtspunt);
2. Focus op de vijf industriële clusters in Nederland: concrete projecten op korte termijn en doorkijk naar de langere termijn; we kijken ook naar de relatie met de industriële clusters in onze buurlanden (nog aandachtspunt); inventarisatie van plannen met behulp van tabellen in bijlagen;
 3. Verbinden met Tennet-onderzoek naar aanlandingslocaties wind op zee Routekaart tot 2030; beschikbaarheid van groene elektronen voor water-elektrolyse/groene waterstof-productie;
 4. Verbinden met Waterstof-Coalitie, vervolg op Manifest, regionale verdeling 3-4 GW aan elektrolyse-capaciteit in 2030 over industrieclusters in kustzone;
 5. Verbinden met onderzoek van werkpakket-2 ('scenario's) van de werkgroep waterstof
 6. Afleiden van rode draad van ontwikkelscenario('s); volgtijdelijkheid, mogelijkheden voor ketensamenwerking; wenkend perspectief; regio- en sectoroverstijgend; synergie tussen clusters;
 7. Wisselwerking met werkpakket 1: redeneerlijn vraag - infrastructuur - aanbod, macro-schaal, PJ;
 8. Wisselwerking met werkpakket 3: randvoorwaarden, belangen en dilemma's.

Tijdens de tweede fase hebben de teams voor de werkpakketten 1 en 2 samen opgetrokken, met het oog op wisselwerking tussen de scenario's en de praktische invulling in de regio's/ industrieclusters. Uitdaging: 'Mutual Gains Approach': samen in goede relatie tot win-win komen en daarbij boven individuele private/ publieke belangen uitstijgen voor optimalisering van 'totaalplaatje'; in nationale en uiteindelijk ook in Noord-West-Europese/ internationale context.

4. Europese/ internationale context: oproep van Europese Commissie

De Europese Commissie heeft Europese regio's opgeroepen om gebiedsgerichte strategieën te ontwikkelen voor de gehele waardeketen van productie, opslag/ transport/ distributie tot brede toepassing van waterstof en spreekt in dat verband over 'Sector Coupling'. Eurocommissaris en vice-president van de Europese Energie-unie Sefcovic heeft – onder andere tijdens het Wind Meets Gas-evenement in Groningen van 18 en 19 oktober 2018 en een waterstof-conferentie van Provincie Zuid-Holland in Brussel op 19 juni 2018 – een oproep gedaan om een initiatief uit te werken en dit uiterlijk in februari 2019 aan de Europese Commissie voor te leggen zodat de nieuwe Commissie daarop kan anticiperen. Een prima kans om het Nederlandse Waterstof-programma-invoering in te steken. Het is dan wel zaak om de verbinding te leggen met soortgelijke programma's in onze buurlanden. Er bestaan al warme contacten met onder meer Vlaanderen en Nordrhein-Westfalen.

5. Conclusies van 2e werkpakket; aanbevelingen voor Klimaatakkoord

Op basis van vele gesprekken en dito mailwisselingen over regionale ontwikkelingen en kansen kunnen de volgende conclusies worden getrokken die als aandachtspunt kunnen worden meegegeven aan de elektriciteits- en industrietafels:

1. Set van spelregels ter voorkoming van lock in 'blauw' leidt tot lock-out 'groen' in IC's

Bij het op termijn uitfasen van de productie van 'grijze' waterstof en de overbrugging met de productie van 'blauwe' waterstof (CCS) op weg naar volledig 'groene' waterstof bestaan er zorgen over de remmende werking die investeringen in CCS kunnen hebben op investeringen in grootschalige water-elektrolyse. Met een helder afsprakenkader over bijvoorbeeld combinatie-blauw/groen-uitrol en een einddatum óf beschikbaarheid bepaalde volume groene energie aan ondersteuning van 'blauw' zou deze situatie mogelijk kunnen worden voorkomen.

- We moeten de transitie naar een duurzame economie stimuleren en door middel van waterstof

toepassingen fundamentele problemen van deze transitie oplossen (transport, opslag, etc.).

2. *Open infra in/ tussen IC's voor opslag, transport en distributie als katalysator van transitie*
 Waterstof-infrastructuur voor de opslag, het transport tussen industrieclusters en de distributie naar de eindgebruikers in het verzorgingsgebied van elk industriecluster kan als katalysator fungeren in de transitie naar volledig groene waterstof. Daarbij doen zich vraagstukken voor over het wel of niet mengen van 'grijs', 'blauw' en 'groen' (Certifhy, garanties van oorsprong; RED II). Daarbij doen zich ook vraagstukken voor over publieke en private infrastructuur in relatie tot waterstof als energiedrager en waterstof als grondstof.

3. *Meer/ sneller wind op zee realiseren voor grootschalige groene waterstof-productie in IC's*
 De stroomprijs bepaalt grotendeels de prijs van groene waterstof. Als kolencentrales worden uitgefaseerd en het elektriciteitsverbruik in de industrie (bv. Power 2 heat), gebouwde omgeving (warmtepompen) en mobiliteit (elektrische voer- en vaartuigen) gaat toenemen dan worden de groene elektronen schaars en kan/ zal de prijs gaan stijgen. De businesscase voor grootschalige groene waterstof-productie komt daarmee onder druk evenals de potentiële rol van groene waterstof in de energie- en grondstoffentransitie. Meer en sneller Wind op Zee realiseren vergroot de beschikbaarheid van (betaalbare) groene elektronen voor grootschalige groene waterstof-productie.⁶

4. *Organiseren van Offshore Wind/ Waterstof-combinatie-tenders voor gehele waardeketen in IC's*
 Offshore wind op de Noordzee is een van de goedkoopste duurzame energieproductie vormen. Tot 2023 wordt 4,5 GW offshore wind gerealiseerd. Daarna wordt voorzien dat tot 2030 1 GW per jaar aan offshore wind wordt gerealiseerd. In totaal staat er dan 11,5 GW aan wind op het Nederlandse deel van de Noordzee. Het tempo van offshore wind realisatie zou, gezien de prijsontwikkeling van offshore wind, verder opgevoerd kunnen worden. Maar daarbij wordt de inpassing van offshore wind in het elektriciteitssysteem, zowel in de infrastructuur als in afstemming van vraag en aanbod, een uitdaging.

Omzetten van deze offshore wind elektriciteit in waterstof kan een oplossing bieden, waardoor grote investeringen in het elektriciteitsnet worden vermeden en goedkoper grootschalige opslag van duurzame energie kan worden gerealiseerd. De backbone waterstofinfrastructuur, omgebouwde gasinfrastructuur, die Gasunie kan realiseren, biedt daarbij de mogelijkheid om waterstof op grote schaal door Nederland te vervoeren.

De omzetting van elektriciteit naar waterstof, gebeurt middels elektrolyse van water. Alkalische elektrolyse is een volwassen technologie die al vele tientallen jaren wordt toegepast voor de productie van chloor uit zout dat is opgelost in water. Daarbij wordt als bijproduct waterstof vrij. De technologie voor water elektrolyse is hetzelfde, het verschil is dat er geen zout meer in het water zit. Door schaalvergroting kan dus ook snel de kosten per kW voor elektrolyzers dalen. Het is dus van belang dat er zo snel mogelijk op GW schaal elektrolyzers worden gerealiseerd.

Uiteindelijk gaat het echter niet om de prijs per kW voor de elektrolyser installatie, maar gaat het om de prijs per kg waterstof. De prijs per kg waterstof wordt daarbij in hoge mate bepaald door de prijs van de elektriciteit. Ruwweg 75% van de kosten per kg waterstof worden door de elektriciteitskosten bepaald. Als doelstelling in 2030 zou de prijs per kg groene waterstof uit

⁶ Is meer wind op zee voor 2030 haalbaar/mogelijk op technisch, financieel en juridisch-planologisch vlak?

offshore wind⁷ zo'n 1,5-3 Euro per kg waterstof moeten zijn.⁸

5. *Een mechanisme om een dergelijke prijs voor waterstof in 2030 te kunnen gaan realiseren*
 Zo'n mechanisme zou kunnen zijn om offshore wind waterstofproductie als geheel te gaan tenderen (keten-tender). Vanaf 2023 tot 2030 zou dan 3-4 GW aan extra wind offshore met waterstof productie in tenders kunnen worden uitgezet, waarbij het gaat om de laagste waterstofprijs per kg. Tegelijkertijd moet waterstof breder worden toegepast naast het huidige gebruik in de industrie, zoals in de mobiliteit en de gebouwde omgeving. Waterstofproductie mag nu alleen door industrie en energieproducenten plaatsvinden. De industrie zal naar verwachting geen windparken realiseren en dan blijven partijen als de energiebedrijven over. Willen we aantal stappen niet door Gasunie/netbeheerders/Tennet kunnen laten doen? Minder partijen is sowieso niet goed voor prijs.

6. *Import kan/ zal rol gaan spelen in aanbod van groene waterstof in Nederland*
 Er zijn in verschillende haven-industrie-clusters ideeën over import van waterstof per schip na 2030 en opslag in de vorm van vloeibare waterstof of waterstof gebonden aan een drager.⁹ Hiervoor moeten tijdig voorbereidingen worden gestart.

7. *'Sector-coupling': merit-order, uitrolvolgorde, marktontwikkeling, groene ketens¹⁰*
 N.B. de merit-order betreft ook de inzet van hernieuwbare elektriciteit. Uitrolvolgorde moet/kan niet voorgeschreven worden, maar is nodig om tijdig juiste infra aan te leggen en andere maatregelen en flankerend beleid in gang te zetten op moment dat het het meest effect zal sorteren.

8. *Regionale deelprogramma's voor maatwerk per industriecluster en omliggend verzorgingsgebied*

Via een programmatische aanpak zullen overheid, marktpartijen en netbeheerders samenwerken aan de ontwikkeling en schaalvergroting van zowel vraag als aanbod van waterstof. Spoor 1: Verduurzamen en vergroten van aanbod van waterstof per IC; Spoor 2: Vergroten en verbreden van de vraag naar duurzame waterstof in vier sectoren per IC en omliggend verzorgingsgebied; Spoor 3: Infrastructuur als verbindende katalysator van vraag naar en aanbod van duurzame waterstof binnen en tussen IC's; en Spoor 4: Organisatie van de publieke en private randvoorwaarden en kennis die nodig is voor realisatie van de sporen 1 t/ m 3 per IC. Zou ook nuttig zijn om te beschrijven waar welke regio zich eventueel in kan 'specialiseren' en waar actief gewerkt moet worden aan de verbinding. Aandachtspunt is de samenhang in de governance op landelijk en op regionaal/ cluster-niveau. En de balans tussen marktwerking en de publieke facilitering (PPS).

9. *Randvoorwaarden: technisch, financieel, juridisch en draagvlak*

- Regelgeving: vergunningstechnisch: eenheid creëren in vergunningenbeleid (niet op iedere

⁷ In het verleden hebben we bij wind dezelfde fout gemaakt, we gingen subsidiëren per kW windmolen capaciteit, maar het ging toen natuurlijk ook om de kWh productiecosten

⁸ Opmerking BioMCN: BioMCN produceert nu H₂ < 1 euro/kg; prijs groene waterstof 2030 dus hoger; beprijzing fossiele waterstof tot boven of op hetzelfde prijsniveau → Europa breed invoeren (level playing field)

⁹ Wat zijn die verschillende ideeën en hoe verschillen die?

Belangrijk wordt gevonden dat Gasunie groot deel netwerk (12GW) ruim voor 2030 kan vrijmaken voor waterstof

¹⁰ Zie Position Paper "Voorstel volgorde toepassing en uitrol waterstof" die in kader van de voorbereiding van de "Cross-sectorale Routekaart Waterstof Zuid-Holland" (oplevering Q1 2019) is opgesteld.

locatie het wiel opnieuw uitvinden).

- Vertaling EU-wetgeving naar NL-beleid (RED II) waarbij ook gekeken wordt naar de optimale plek van waterstof in hernieuwbare brandstof wetgeving.
- Implementatie van EU Groene waterstof-certificering- en GVO's systeem (CertifHy).
- Goede infrastructuur aanleggen en deze tegen laag of nultarief ter beschikking stellen. Dit is meer dan alleen e-aansluiting: ook H₂-backbone, CO₂-aansluiting, warmte aansluiting, ruimte voor conversieinstallaties, vergunningen, opgeleid personeel, opslagvoorzieningen. Mogelijk te verkiezen boven Capex- & Opex-subsidie.
- Capex- & Opex-subsidie.
- Wegnemen risico's zoals bijvoorbeeld de E-aansluiting of vergunningentraject (zoals uiteindelijk ook bij wind op zee gebeurde).
- Gaswet aanpassen (ook toespitsen op waterstof).
- Voorkomen van belasting op waterstof (met te hoge belasting komen business cases niet rond).
- Behoeftte aan wet- en regelgeving om marktordening voor waterstof te regelen (rollen, verantwoordelijkheden, spelregels etc.).
- Snel duidelijkheid over infrastructuur (met name een backbone); ook om kip-ei-situatie te doorbreken.
- Goed inzicht in vraagontwikkeling genereren en vraag en aanbod verder aan elkaar verbinden/samen laten werken in een vroeg stadium (project/business case ontwikkeling).
- Rijk moet mee gaan doen met discussies, lobby en uitrol van waterstof infrastructuur, productie en toepassingen.

10. Internationale samenwerking (Vlaanderen, Ruhr-gebied, ChemCologne...): kennisdelen/ verbindende infra; Europese cofinanciering?

Programmatische invulling nodig.

De inventarisatie van activiteiten in de verschillende clusters is in het hoofdrapport opgenomen.

Bijlage 3: Samenstelling Werkgroep Waterstof

Jan Paul van Soest	Voorzitter (De Gemeynt)
Hans Warmenhoven	Secretaris (De Gemeynt)
Han Feenstra	Economische Zaken en Klimaat
Ruud Peters	Unie van Waterschappen
Wouter Groenen	Interprovinciaal Overleg IPO
Marcel Weeda	TNO
René Schutte	Gasunie
Alan Croes	Tennet
Geertje van Hooijdonk	Stedin/Netbeheer Nederland
Marco Bosman	Nuon
Walter Ruijgrok	Energie Nederland
Onno Tillema	Engie
Faiza Oulahsen	Greenpeace
Coen van de Sande	FME
Steve Sol	Air Liquide, geraadpleegd expert
Barbara Huneman	Nouryon
Martijn Kleverlaan	Shell/NAM
Robert Claasen	Chemelot
Jacques van de Worp	VEMW
Paul Compagne	BioMCN

