

WATERSTOF: DUURZAME ENERGIE VAN DE TOEKOMST

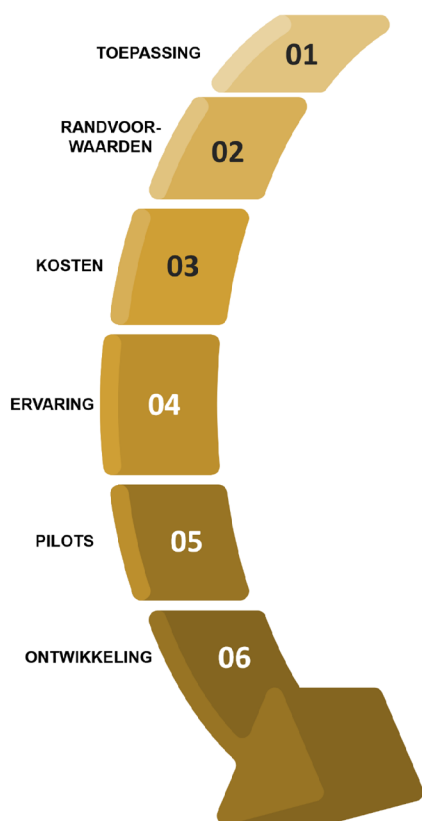


TNO innovation
for life

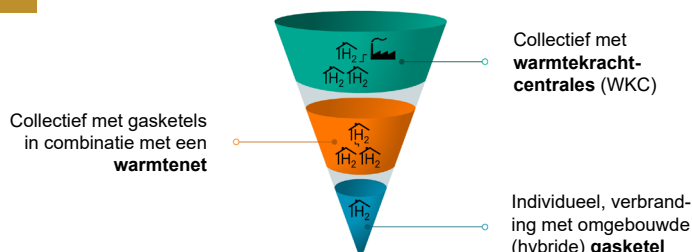
TNO
informatieblad
Mei 2020

SAMENVATTING

Belangrijke onderwerpen in de route naar waterstof in de gebouwde omgeving



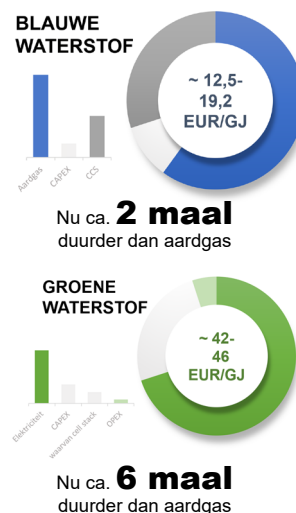
1 Toepassingen in de gebouwde omgeving



2 Randvoorwaarden voor toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving

- ✓ **Vraag naar waterstof**
Toename in gebruik van waterstof in aanpalende sectoren - e.g. mobiliteit, industrie
- ✓ **Beschikbaarheid**
Voldoende (duurzaam opgewekte) elektriciteit, aardgas en/of CO₂ opslag.
- ✓ **Infrastructuur**
Aanpassingen aan bestaande of aanleggen van nieuwe gasinfrastructuur
- ✓ **Wet & regelgeving**
Juridisch kader & veiligheidsnormen voor waterstof
- ✓ **Sociale acceptatie**
Perceptie bewoners t.a.v. waterstof

3 Kostenopbouw en -referentiekader voor (groene) waterstof



4 Andere aspecten waarop ervaring op gedaan dient te worden

- **Wet- en regelgeving:** het huidige juridische kader en veiligheidsnormen rondom het gebruik van gas is ingericht op aardgas. Ervaring met implementatie van waterstof is momenteel zeer beperkt. Nieuwe kaders vanuit de Rijksoverheid zijn nodig voor de grootschalige implementatie van waterstof.
- **Infrastructuur:** het Nederlandse gasinfrastructuur netwerk heeft op verschillende plaatsen aanpassingen nodig om 'waterstof-klaar' gemaakt te worden.

5 Praktijkervaring door toepassing via pilots

In het aankomend decennium kan in pilots ervaring worden opgedaan met normen, procedures en aanpakken voor het omzetten van wijken op waterstof. Eén voorbeeld hiervan is een appartementencomplex uit Rozenburg, welke met waterstof verwarmd wordt.



Afbeelding: Stedin, 2018

6 Verdere technologische ontwikkelingen welke de toepassing van waterstof kunnen bevorderen

- **Opschaling/ automatisering elektrolyse technologieën**, wat kan leiden tot kostenreductie 'groene' waterstof (opgewekt met duurzame elektriciteit);
- **Carbon Capture & Storage**, voor 'blauwe' waterstof (net als 'grijze' waterstof geproduceerd van aardgas, met de afvang van CO₂ uitstoot).

Het is mogelijk om waterstof in plaats van aardgas

te verbranden in (hybride) gasketels. Deze manier van gebouwverwarming kan CO₂-neutraal zijn, wanneer de waterstof wordt geproduceerd met hernieuwbare elektriciteit via elektrolyse ('groen') of met aardgas waarbij de CO₂-uitstoot grotendeels wordt afgevangen en opgeslagen ('blauw'). Verschillende factoren kunnen de toekomstige grootschalige toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving faciliteren, waaronder:

(1) meer ervaring door pilots, voor opschaling, (2) kostenontwikkeling in het voordeel van waterstof, (3) voldoende beschikbaarheid van waterstof, (4) aanpassing van aanleg van benodigde infrastructuur, (5) ontwikkeling van juridisch kader en veiligheidsnormen en (6) inzicht in sociale acceptatie rondom waterstof in de gebouwde omgeving.

Vanwege al deze factoren is de verwachting dat er in de periode 2020-2030 voorlopig vooral wordt ingezet op een aantal praktijkprojecten waarin onder diverse omstandigheden voldoende ervaring wordt opgedaan om in de periode na 2030 een grotere uitrol mogelijk te maken.

Conclusies uit informatieblad Technology Insights: Waterstof

INLEIDING

Waterstof is één van de veelgenoemde opties voor het kunnen realiseren van een CO₂-neutrale energievoorziening. Zo wordt in het Klimaatakkoord 'waterstof' maar liefst 182 keer genoemd¹. Het doel van dit informatieblad is het uiteenzetten van de factoren die van belang zijn voor de toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving, evenals de verwachtingen rond de ontwikkelingen van deze factoren, gebaseerd op feitelijke kennis en aangevuld met inzichten van TNO-experts. Ook poogt dit document verder te kijken dan alleen de technisch-economische aspecten, door de toepassing van waterstof in een bredere context te plaatsen, zoals duurzaamheid en veiligheid.

LEESWIJZER

Het informatieblad bouwt op van minder technische naar meer technische onderwerpen. Allereerst worden algemene aspecten van waterstof en mogelijke toepassingen in de gebouwde omgeving bediscussieerd, terwijl dit informatieblad eindigt met 'technologische ontwikkelingen in de elektrolyse'.

EIGENSCHAPPEN VAN WATERSTOF

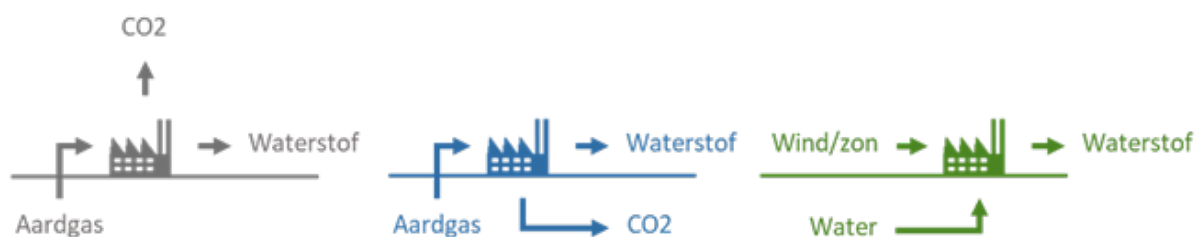
Waterstof is onder normale omstandigheden een gas met de chemische formule H₂ – niet te verwarren met water of waterdamp, wat aangeduid wordt met H₂O. Waterstof kan dienen als een brandstof dat, net als bijvoorbeeld aardgas, veel warmte oplevert bij verbranding. Waterstof komt echter op aarde niet in pure vorm voor en moet dus worden geproduceerd. Daarvoor is energie nodig, bijvoorbeeld in de vorm van elektriciteit of warmte. Waterstof is dus geen energiebron zoals aardolie of wind, maar een energiedrager zoals elektriciteit. Bij een energiedrager komt een waardeketen kijken van productie, transport en conversie en dit is bij waterstof niet anders.

De verbrandingswaarde van waterstof onder standaardcondities (een temperatuur van 273 K of 0 °C en atmosferische druk) is 10,8 megajoule per kubieke meter (MJ/m³). Ter vergelijking: Gronings aardgas bevat ongeveer 31,65

MJ/m³ (calorische onderwaarde). Dit betekent dat de 'energie(volume) dichtheid' van waterstof circa 3 maal lager is dan dat van aardgas. Vanwege de beperkte energiedichtheid per eenheid volume moet waterstof voor mobiliteitstoepassingen op hoge druk worden gebracht om voldoende energie aan boord van een voertuig mee te kunnen nemen. Bij transport via leidingen voor toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving speelt deze kwestie van hoge druk overigens niet; hier kan bijvoorbeeld de stroomsnelheid van waterstof verhoogd worden om het transportvermogen toe te laten nemen.

In tegenstelling tot aardgas komt er bij de verbranding van waterstof geen CO₂ vrij, maar enkel waterdamp (H₂O). Omdat waterstof echter eerst geproduceerd moet worden, moet er naar de hele waardeketen gekeken worden om vast te kunnen stellen of waterstof duurzaam is of niet. Zo is 'grijze' waterstof geproduceerd uit aardgas niet CO₂ neutraal, terwijl 'groene' waterstof opgewekt door elektrolyse met elektriciteit uit zon en wind dat wel is (zie 'Productietechnieken'). Door 'carbon capture and storage' (CCS) toe te passen op grijze waterstof kan tot ongeveer 90% van de CO₂-uitstoot worden voorkomen, de zogenaamde 'blauwe' waterstof.

1. NOS, Nieuwsuur (2019). 'Van verwarming tot rijden op waterstof - hoe realistisch is dat?' NOS Website.



SCHEMATISCH OVERZICHT WATERSTOFPRODUCTIE: 'GRIJS' (LINKS), 'BLAUW' (MIDDEN) EN 'GROEN'

TOEPASSINGEN IN DE GEBOUWDE OMGEVING

Waterstof wordt al decennialang in de industrie toegepast, maar de toepassing van pure waterstof in de gebouwde omgeving is nieuw. In het Klimaatakkoord² wordt waterstof voornamelijk voorgesteld als optie “voor gebouwen en wijken die om verschillende redenen moeilijk op andere wijzen te verduurzamen zijn”. Door het relatief hoge piekvermogen dat waterstof kan leveren kan de stimulans om gebouwen beter te isoleren namelijk verminderen.

Berenschot geeft in de studie “Waterstof voor warmtenetten”³ drie opties voor de toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving, hieronder weergegeven.

INDIVIDUEEL MET OMGEBOUWDE (HYBRIDE) GASKETEL

Indien waterstof zou worden toegepast als alternatief gas in het gasnet, kan waterstof worden gebruikt voor de verwarming van huishoudens en warmtapwater door verbranding in een aangepaste gasketel. Dit vergt slechts een kleine ingreep in bestaande ketels. Aangepaste hybride ketels zouden met de warmtepomp op elektriciteit in de basis warmtebehoefte kunnen voorzien, waarbij de installatie overschakelt naar waterstofverbranding om in de piekvraag te kunnen voorzien.

COLLECTIEF MET GASKETELS IN COMBINATIE MET EEN WARMTENET

Waterstof zou ook centraal ingezet kunnen worden in combinatie met warmtenetten. Een centrale waterstofketel levert dan warmte aan individuele woningen en gebouwen via een warmtenet. Deze opstelling zou ook kunnen worden ingezet om een (bestaand) warmtenet te ondersteunen tijdens pieken in de warmtevraag (zoals in de winter).

COLLECTIEF MET WARMTEKRACHTCENTRALES

In een conventionele warmtekrachtcentrale wordt met aardgas elektriciteit opgewekt, waarbij de vrijkomende (laagwaardige) restwarmte gebruikt kan worden in een warmtenet. Een warmtekrachtcentrale (WKC) met een brandstofcel of een omgebouwde ketel zou dezelfde rol kunnen vervullen, maar dan met waterstof.

Naast deze specifieke toepassingen kan waterstof ook bijgemengd worden in het gasnetwerk. Tot midden jaren '60 van de vorige eeuw werd er nog stadsgas gebruikt dat voor 50-60% uit waterstof kon bestaan. Op een paar oude gasketels en fornuizen na, zou waterstof tot 20% kunnen worden bijgemengd zonder aanpassingen. Voor hogere percentages zou beter onderzocht moeten worden wat de effecten zouden zijn en welke beperkingen technische instal-

laties hebben die het gas gebruiken.⁴

PRAKTIJKVOORBEELDEN

Er is op het moment van ontwikkeling van dit informatieblad één voorbeeld te noemen in Nederland waarbij waterstof in de gebouwde omgeving naar de praktijk wordt gebracht⁵. In Rozenburg zijn sinds de zomer van 2019 drie waterstofketels in een appartementencomplex bijgeplaatst. De bedoeling is dat waterstof de komende jaren een bijdrage gaat leveren aan ruimteverwarming en warm tapwater. De waterstof wordt in de nabijheid van het complex geproduceerd met behulp van een elektrolyse-installatie.

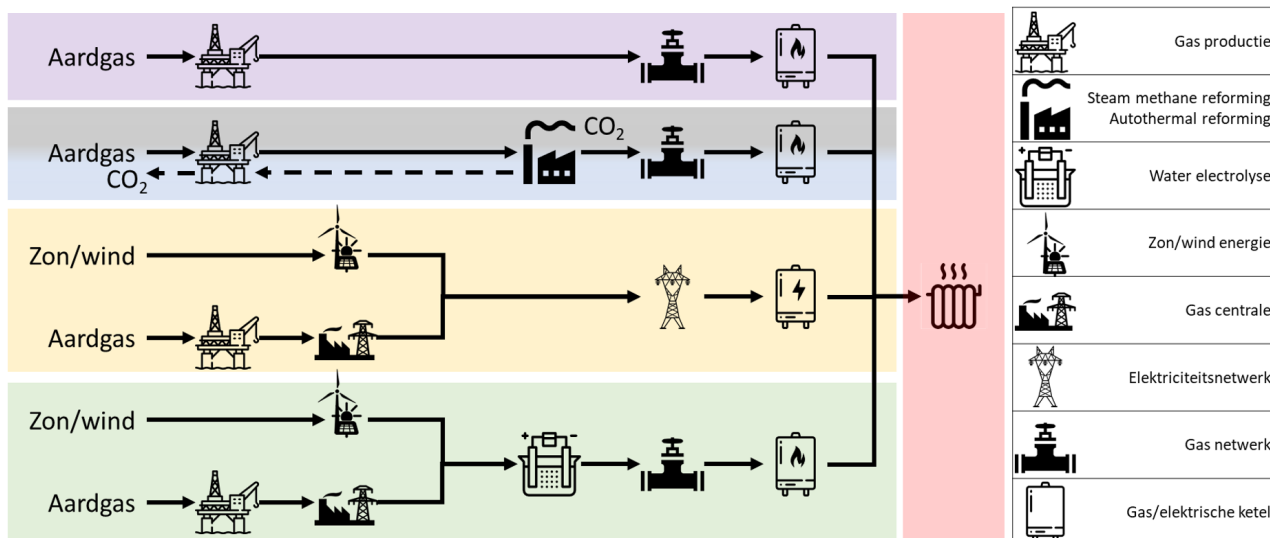
Tijdens de Bouwbeurs in februari 2019 presenteerde Remeha de eerste CV-ketel die waterstof kan omzetten naar warmte waarbij een aantal aanpassingen noodzakelijk zijn ten opzichte van een ketel op aardgas. Voor deze ‘wereldprimeur’ heeft Remeha jarenlang samen aan de voorbereiding gewerkt met Stedin en corporatie Ressor in ‘Power2gas’⁶. Pilots zijn nodig om normen te ontwikkelen en procedures voor het controleren van in pandig leidingwerk: hoe kunnen we waterstof zo veilig en betrouwbaar mogelijk inpassen tegen de laagste kosten? Daarnaast is er ook ervaring nodig met aanpakken hoe een wijk het beste over kan worden gezet op waterstof.



LOCATIE WATERSTOF-GEDREVEN CV-KETEL VAN REMEHA. BRON: OPENSTREETMAP, 2019

WAARDEKETENS VAN WATERSTOFPRODUCTIE

Waterstof in de gebouwde omgeving wordt hoofdzakelijk gezien als mogelijke vervanger van aardgas in de warmtevoorziening. Om inzicht te krijgen wat dit inhoudt en hoe



PAARSE (HUIDIGE) ROUTE: Aardgas wordt geproduceerd uit gasvelden en naar de GO getransporteerd, alwaar het verbrand wordt in een CV-ketel;

GRIJZE / BLAUWE ROUTE: Aardgas wordt geproduceerd uit gasvelden, waarna het wordt omgevormd tot waterstof; hierbij komt CO₂ vrij, wat in de atmosfeer losgelaten wordt losgelaten (grijs), of deels afgevangen en opgeslagen wordt in de gasvelden waar het aardgas uit gewonnen is;

GELE ROUTE: Elektriciteit wordt geproduceerd uit zon, wind en/of gascentrales en gaat gemixt het elektriciteitsnet op; in de woning wordt het middels een elektrische ketel of warmtepomp omgezet in warmte;

GROENE ROUTE: Elektriciteit wordt geproduceerd uit zon, wind en/of gascentrales en wordt gebruikt om met elektrolyse waterstof te produceren; dit wordt door gasleidingen getransporteerd, waarna het met een gasketel omgezet kan worden in warmte.

waterstof de gebouwde omgeving kan verduurzamen, helpt het om naar de hele keten te kijken van het voorzien van warmte met gas in de gebouwde omgeving (zie volgende pagina).

In de bovenstaande infographic worden verschillende routes voor de energievoorziening van de gebouwde omgeving geschetst, waarbij gangbare routes (aardgas, elektriciteit) naast routes voor waterstof worden weergegeven. Uiteraard zijn er ook combinaties van routes mogelijk, zoals van geel en blauw voor een hybride warmtepomp op waterstof. Tevens kan de laatste stap zowel op wijk- als op woning-niveau plaats vinden. Wat uit dit overzicht opvalt is dat in alle routes aardgas nog een rol zal blijven spelen. Alleen als alle elektriciteit uit duurzame bronnen wordt opgewekt, kunnen de gele en groene routes volledig verduurzamen. Nu is dit de lange termijn ambitie.

BREDE IMPACTS VAN WATERSTOF

De omzetting van elektriciteit in groene waterstof gaat gepaard met conversieverliezen. Het heeft dan ook de voorkeur om elektriciteit direct in te zetten wanneer dat kan en om niet meer (groene) waterstof te produceren dan er elektriciteitsoverschot is uit hernieuwbare bronnen. Door waterstof alleen te produceren tijdens piekproductie van elektriciteit wordt voorkomen dat er meer opwekcapaciteit van elektriciteit geplaatst moet worden, wat weer een impact heeft op materiaal en milieu. Omdat dit laatste een complex systeem is, is het totaaleffect hiervan nog niet bekend, maar het verdient de aanbeveling om rekening te houden met het effect op materiaal en milieu bij de inpassing van 'groene' waterstof in het energiesysteem.

Als we op dit moment waterstof op grote schaal zouden produceren via water-elektrolyse, met de huidige elektriciteitsmix uit het net, dan zou het gebruik van waterstof leiden tot 4 maal zoveel CO₂-uitstoot per kWh warmte ten opzichte van direct aardgasgebruik voor verwarming - uitgaande van een elektrolyse efficiëntie van 60% en de emissies van de huidige elektriciteitsmix (453 g/kWh in 2017²). Dit komt doordat een groot deel van de elektriciteit nog wordt opgewekt met kolen- en gascentrales. Als gevolg van de conversieverliezen in bijvoorbeeld de gascentrale zelf en tijdens de elektrolyse, zou de inzet van waterstof dus leiden tot meer gasverbruik dan direct verwarmen met aardgas. Dit begint te kantelen als de elektriciteit voor meer dan 60% wordt opgewekt uit CO₂-vrije bronnen. Op basis van vastgesteld

2. Klimaatakkoord (2018). Sectie C5.7: Waterstof.

3. Berenschot (2018). 'Waterstof uit warmtenetten.'

4. RVO (2017). 'The effects of hydrogen injection in natural gas networks for the Dutch underground storages.'

5. Ad Tissink (2019). 'Wereldprimeur in Rozenburg: waterstofketel verwarmt appartementencomplex. Cobouw website.'

6. Stedin (2018). 'Waterstof in Rozenburg: Elektriciteit omzetten door Power2Gas. Stedin website.'

en voorgenomen beleid is de verwachting dat de hernieuwbare elektriciteitsproductie tot en met 2030 sterk groeit, van 15% in 2018 naar circa 75% in 2030⁸. Opschaling van water-elektrolyse zal tot die tijd geleidelijk plaatsvinden waarbij het de bedoeling is om de productie zoveel mogelijk te beperken tot de momenten dat er veel duurzame elektriciteit op het net is, en verder zoveel mogelijk te combineren met additionele uitbouw van capaciteit aan duurzame energie.

Een ander effect van waterstofproductie door elektrolyse is het watergebruik. Voor elke kilogram waterstof is zo'n 9 liter zoet water nodig⁹. Momenteel zou voor de gehele vervanging van het nationale aardgasgebruik door waterstof (1250 PJ, dus niet alleen GO) zo'n 90 miljoen m³ water nodig zijn. Dat is 0,5% van het totale jaarlijkse watergebruik in Nederland¹⁰. Normaliter zullen deze hoeveelheden geen probleem zijn. Echter, in tijden van droogte, typisch in een zomerperiode wanneer veel elektriciteit uit zonne-energie beschikbaar is, zou dit mogelijk een belemmering kunnen vormen. Er wordt nog onderzocht of zeewater direct gebruikt kan worden in elektrolyse^{10 11}.

De inzet van waterstof (groen of blauw) biedt de mogelijkheid om de bestaande gasinfrastructuur te hergebruiken voor transport van andere gasvormige energiedragers. Ook zijn de aangesloten woningen wat apparatuur betreft al ingericht op gas als energiedrager. Dit beperkt de opgave van het weghalen van bestaande gasleidingen en gasapparatuur binnenshuis enerzijds, en het aanleggen van nieuwe kabels en installeren van elektrische apparatuur anderzijds. Bij het inpassen van waterstof moeten het gasnet en de gasketel wel nog worden aangepast, evenals de veiligheidsnormen voor de installaties¹².

Een neveneffect van blauwe waterstof is dat er bij transport

en distributie van aardgas methaan vrij komt¹³. Methaan is een sterker broeikasgas dan CO₂. Voor Nederland was de lekkage in 2016 7,93 miljoen m³ aardgas, gelijk aan 120 miljoen kg CO₂ equivalenten (0,06% van de totale uitstoot in Nederland)¹⁴. Deze emissies nemen af, onder andere door vervanging van oude leidingen, maar daar staat tegenover dat een (steeds groter) deel van het aardgas dat in Nederland gebruikt wordt uit het buitenland komt. The Hague Centre for Strategic Studies¹⁵ schat dat de 'upstream' emissies van geïmporteerd gas 30% hoger liggen dan voor Nederlands gas. Hierdoor lijkt in de huidige situatie blauwe waterstof, in de gebouwde omgeving, niet 'netto' CO₂ neutraal te kunnen zijn. Initiatieven om methaanlekages te detecteren middels satellieten zouden hier op den duur verandering in kunnen gaan brengen.

7. CBS (2017). *Huidige elektriciteitsmix*. Website CBS.

8. Planbureau voor de Leefomgeving (2019). *Klimaat- en Energieverkenning 2019*. Online publicatie.

9. IEA (2019). *The Future of Hydrogen – Seizing Today's opportunities*. Report prepared by the IEA for the G20, Japan.

10. CBS (2016). *Watergebruik bedrijven en particuliere huishoudens; nationale rekeningen*. Online publicatie.

11. Leiden University (2018). *'A step closer to sustainable energy from seawater'*. Publication on phys.org.

12. ECW (2019). *Factsheet waterstof*. Website ECW.

13. Frédéric Simon, EURACTIV (2020). *EU working on plans to expose climate impact of natural gas*. Website euractiv.com.

14. KIWA (2017). *Methaanemissie door Gasdistributie. Rapportage over 2016 volgens het Monitoringsprotocol Methaanemissie Gasdistributie*

15. Jilles van den Beukel & Lucia van Geuns (2020). *The deteriorating outlook for Dutch small natural gas fields*. HCSS Geo-economic



VEILIGHEIDS- EN GEZONDHEIDSAPECTEN

- Veel van de Nederlandse gasnetten zijn aangelegd in de jaren '60 met daarbij ook de veiligheidsnormen uit die tijd en toegepast op aardgas. De normen zullen moeten worden toegesneden op het transport van waterstof¹⁶ en zullen de gasnetten waar nodig daarop moeten worden aangepast.

- Waterstof is evenals aardgas geurloos en onzichtbaar voor het menselijk oog. Ook de ultraviolette vlam van waterstof is onder normale omstandigheden niet met het blote oog zichtbaar. Om de veiligheid te verbeteren kan een kleur en odorisatie aan waterstof worden gegeven.

- Waterstof is zeer licht ontvlambaar wat de gevolgen op brand of een explosie doen toenemen ten opzichte van aardgas. De zeer lage dichtheid van waterstof (14 maal zo licht als lucht) zorgt er daarentegen wel weer voor dat bij een open lek het gas snel opstijgt en verdunt raakt, wat de kans op een explosie vermindert.

- Er komt bij waterstof – in tegenstelling tot aardgas – geen koolstofmonoxide als verbrandingsproduct vrij bij onvollledige verbranding. Daardoor zijn er geen CO-vergiftigingen meer mogelijk in afgesloten ruimtes. Dit alles betekent dat er nieuwe normen en speciale regelgeving moet worden ontwikkeld voor het gebruik van waterstof in de gebouwde omgeving. Om deze reden wordt in het rapport "Waterstof voor de energietransitie" door TKI Nieuw Gas geadviseerd om vóór 2025 3 tot 5 demonstratieprojecten in de gebouwde omgeving uitgevoerd te hebben¹⁷.

16. KIWA (2018). *Toekomstige gasdistributienetten*. In opdracht van Netbeheer Nederland.

17. TKI Nieuw Gas (2020). *Waterstof voor de energietransitie*. Online publicatie.

RANDVOORWAARDEN

De uitrol van groene waterstof in de gebouwde omgeving is afhankelijk van een aantal factoren. Deze worden in het huidige hoofdstuk zo goed mogelijk toegelicht.

VRAAG NAAR WATERSTOF

De gebouwde omgeving ondergaat een transitie waarbij de energievraag wordt teruggebracht en gebouwen worden aangesloten op andere warmtevoorzieningen dan aardgas. Gasloze alternatieven (die de voorkeur hebben, zie 'Toepassingen in de gebouwde omgeving') zijn niet overal praktisch uitvoerbaar en kunnen integraal gezien nog relatief duur zijn, waardoor er behoefte kan zijn aan een CO₂-neutrale gasvormige energiedrager voor verwarming van gebouwen. Wat de vraag naar waterstof in de gebouwde omgeving zal worden is dan ook nog onbekend.

AANBOD VAN WATERSTOF

Zoals te lezen is onder 'Productietechnieken', is er geen directe technische beperking voor de productie van waterstof, maar voor bredere toepassing is nog wel schaalvergroting in elektrolyse en ervaring met CCS en in pilot-projecten nodig.

Het aanbod van groene waterstof is afhankelijk van een complexe onderlinge relatie tussen de beschikbaarheid van hernieuwbare elektriciteit (zie ook 'Brede impacts'), de kosten van groene waterstof en de uiteindelijke prijs. Gezien de doelstellingen zoals geformuleerd in het Klimaatakkoord is in 2030 een opwek van 306PJ uit duurzame bronnen te verwachten, waarmee 70% van de totale elektriciteitsvraag bediend moet worden. Indien er in Nederland niet voldoende hernieuwbare elektriciteit is, zou er ook elektriciteit kunnen worden geïmporteerd uit het buitenland. In hoeverre dit mogelijk is, hangt ook af van de interconnectiviteit van het elektriciteitsnetwerk met andere landen. Hetzelfde geldt voor waterstof: als de productie in Nederland om verschillende redenen niet voldoende van de grond komt, zou waterstof ook uit het buitenland geïmporteerd kunnen worden. Noorwegen werkt bijvoorbeeld aan meerdere waterstofprojecten.

De kosten van waterstofproductie worden verder toegelicht onder 'Productiekosten' en zullen naar verwachting nog dalen. De prijs van waterstof wordt in dit informatieblad niet verder onderzocht.

Bij de productie van blauwe waterstof speelt naast kosten ook de afhankelijkheid van aardgas een rol. Naar verwachting zal de gaswinning in Nederland verder afnemen, door het afbouwen van de gaswinning zoals in het Klimaatakkoord staat en mogelijk nog meer door het onaantrekkelijke investeringsklimaat in kleinere gasvelden¹⁸. Nederland zal dan steeds meer afhankelijk worden van de import van aard-

gas uit het buitenland.

Tot slot is de beschikbaarheid van waterstof voor de gebouwde omgeving ook gerelateerd aan de vraag naar waterstof in andere sectoren zoals mobiliteit en industrie.

INFRASTRUCTUUR

De bestaande gasinfrastructuur kan gebruikt worden voor waterstof als deze geschikt gemaakt wordt. Gasunie¹⁹ heeft aangegeven een deel van het nationale laagcalorisch transportnetwerk voor aardgas in 2030 geschikt te kunnen hebben gemaakt voor waterstof.

VEILIGHEID

Veiligheid is een belangrijke voorwaarde voor de toepassing van technologieën. Om dit te kunnen garanderen voor de toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving zijn er nieuwe, op waterstof afgestemde veiligheidsnormen nodig, zoals besproken onder 'veiligheid en gezondheidssaspecten'.

SOCIALE ACCEPTATIE

Momenteel is er nog weinig bekend wat betreft de perceptie van inwoners op de toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving en op de opslag van CO₂ in de ondergrond of zeebodem. Zoals geïllustreerd bij de implementatie van wind turbines in sommige plaatsen in Nederland, kunnen de negatieve effecten van lage acceptatie door bewoners grote consequenties hebben. Wanneer de toepassing van waterstof opgeschaald gaat worden, zal hier dan ook veel meer inzicht over vergaard moeten worden.



18. HCSS (2020). *The deteriorating outlook for Dutch small natural gas fields*. Online publication

19. Gasunie (2019). *Gasinfrastructuur helpt energietransitie te versnellen*. Website Gasunie.



PRODUCTIE-TECHNIEKEN

Momenteel worden de volgende methoden het meest gebruikt om waterstof te produceren:

STEAM METHANE REFORMING (SMR)

Door samenvoeging van methaangas (CH_4 ; de hoofdcomponent van aardgas) en waterdamp (H_2O ; stoom) op hoge temperaturen wordt waterstof (H_2) en koolmonoxide (CO) geproduceerd. In een tweede stap wordt tijdens een zogenaamde water-gas shift reaction nogmaals waterdamp (H_2O) toegevoegd om additionele H_2 te produceren, waarin de CO reageert naar CO_2 . De CO_2 die wordt gevormd kan worden afgevangen en worden opgeslagen in bijvoorbeeld lege gasvelden (pre-combustion Carbon Capture & Storage; CCS), waarmee tot circa 90% van de uitstoot van broeikasgassen kan worden vermeden. Deze waterstof wordt ook wel 'blauwe' waterstof genoemd. Het rendement van SMR ligt rond de 76% voor grootschalige productie⁹. Wanneer CCS wordt toegepast daalt het rendement van grootschalige productie naar 69%⁹. Op dit moment wordt er in Nederland zo'n 800 kton waterstof per jaar geproduceerd voor industriële toepassingen, waarvan 80% grijze waterstof op basis van aardgas met SMR (zie 'Productietechnieken') en 20% als bijproduct uit de chemie²⁰. Het produceren van waterstof met SMR is dus al bekend terrein. Er is echter nog geen ervaring in Nederland (en heel beperkt daarbuiten) met de integrale keten van het afvangen, transporteren en ondergronds opslaan van CO_2 voor blauwe waterstof. Volgens Berenschot & TNO²⁰ zou SMR met CCS wel op kortere termijn gerealiseerd kunnen worden.

AUTOTHERMAL REFORMING (ATR)

In tegenstelling tot SMR wordt bij ATR in de basisreactie naast waterdamp een kleine hoeveelheid zuurstof aan het methaan toegevoegd, waardoor het gedeeltelijk ontbrandt en zo de warmte levert voor het reforming proces. Hierdoor ontstaat in eerste instantie CO en H_2 . Met een water-gas shift reaction wordt door toevoeging van waterdamp additionele waterstof en CO_2 gevormd. Het voordeel van dit proces is dat er geen methaanverbranding buiten het hoofdproces plaats vindt, waardoor meer dan 90% van de CO_2 afgevangen kan worden. Op basis van technische performance wordt ATR beschouwd als een veelbelovende productiemethode voor blauwe waterstof²⁰.

ELEKTROLYSE

Met behulp van elektronen wordt in een elektrochemische cel water (H_2O) gesplitst in waterstof (H_2) en zuurstof (O_2). Het hart van een elektrolyse systeem is de 'cell stack', een opeenstapeling (stack) van een reeks elektrolytische cellen waar water middels elektriciteit gescheiden wordt in waterstof en zuurstof. Er kunnen drie elektrolysetechnieken worden onderscheiden: Alkaline, Proton Exchange Membrane (PEM) en Solid Oxide Electrolysis Cell (SOEC), allen met een eigen cel ontwerp en operationele condities, zoals druk en temperatuur.

De efficiëntie van elektrolyse is variabel. Getallen die in literatuur genoemd worden zijn dan ook meestal bedoeld als gemiddelde efficiëntie voor een technologie. Het rendement van alle drie de technieken ligt momenteel tussen de 56% en 81%⁹.

20. Berenschot en TNO (2017). 'CO₂-vrije waterstofproductie uit gas.' Eindrapportage.

KOSTEN VAN WATERSTOF

PRODUCTIEKOSTEN

De kosten van productie zal niet hetzelfde zijn als de prijs van waterstof: de markt bepaalt de prijs en afhankelijk van de kosten voor productie kan een installatie winstgevend of verliesmakend zijn. Zo kan voor waterstof in de mobiliteit een andere prijs gelden dan voor de industrie. Lage productiekosten zijn wel een voorwaarde om waterstof tegen een goede prijs te kunnen aanbieden. Dit informatieblad beperkt zich tot de productiekosten.

Bij een maximaal aantal draaiuren per jaar en gerekend met elektriciteitskosten van 70-80 EUR/MWh bedragen de productiekosten van waterstof met de huidige Alkaline technologie (momenteel de goedkoopste elektrolyse technologie) nu rond de 5,0 - 5,5 EUR/kgH₂²¹, ofwel 42-46 EUR/GJ (op basis van LHV). Dit bedrag per GJ bestaat uit elektriciteitskosten (circa 60-80%), investeringskosten (CAPEX; circa 20-30%) en periodieke kosten (OPEX; circa 3-6%). De elektriciteitskosten zijn daarmee de grootste factor in de kosten. Binnen de CAPEX kosten is 50-60% toe te schrijven aan de 'cell stack'. Andere bepalende factoren voor de kosten zijn de conversie efficiëntie en de jaarlijkse vollasturen.

Voor waterstof uit aardgas met SMR zijn de aardgaskosten een belangrijke factor en deze bepaalt voor 70-80% de productiekosten. Bij grootschalige productie met SMR bedragen de kosten op dit moment ongeveer 1 - 1,5 EUR/kgH₂. De huidige gemiddelde productiekosten komen daarmee op 8,3 - 12,5 EUR/GJ. De kosten voor carbon-capture en

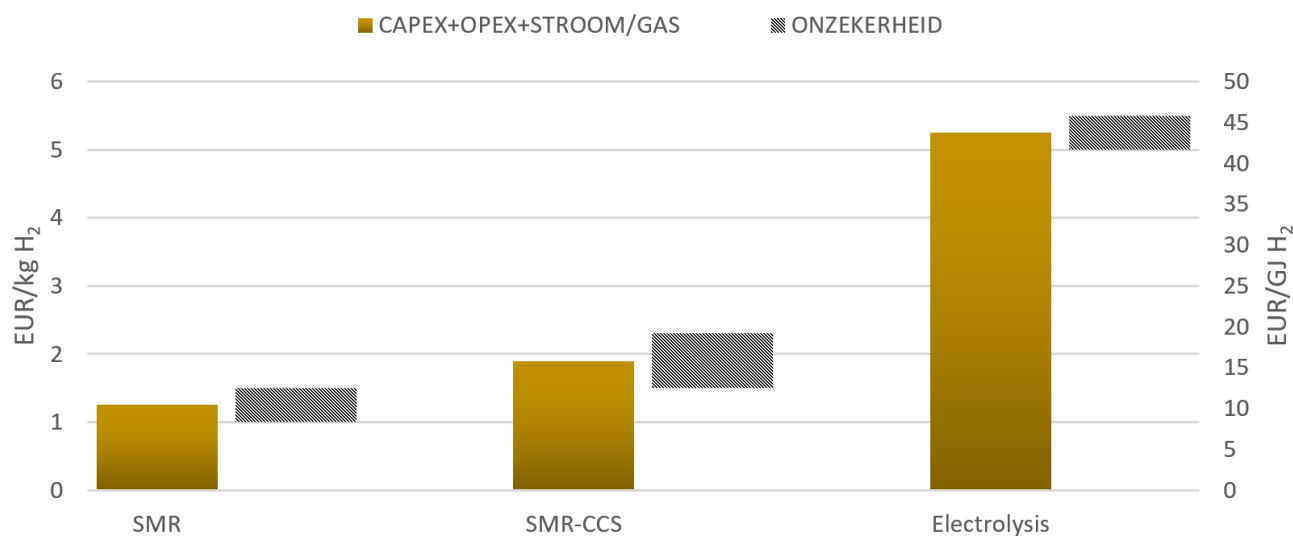
storage (CCS) zijn hierin echter nog niet meegenomen. Het toevoegen van CCS voor het verduurzamen van de productie van grijze waterstof (wat het 'blauwe' waterstof maakt) kan leiden tot een toename van 50% van de CAPEX, 10% van de aardgaskosten en een verdubbeling van de OPEX²². Dit geeft ongeveer 1,5-2,3 EUR/kg H₂, ofwel 12,5 - 19,2 EUR/GJ. Dit is nog steeds veel lager dan voor waterstof met elektrolyse.

In de TNO²³ studie 'Alle bestaande woningen aardgasvrij in 2050. Wie moet wat, wanneer en hoe doen?' wordt een vergelijking gemaakt van de kosten en prijzen van verschillende energiedragers. Hierdoor wordt meteen inzichtelijk dat de productiekosten van waterstof met Alkaline elektrolyse veel hoger liggen dan de productiekosten van andere energiedragers. De productiekosten van 'conventioneel' aardgas (8,3 EUR/GJ), hernieuwbare elektriciteit (21,8 EUR/GJ) of hernieuwbare warmte (19,7 EUR/GJ) liggen allen aanzienlijk lager. De waterstofkosten komen in deze studie uit op 47,9 EUR/GJ vanwege de net iets andere elektriciteitskosten voor een mix van wind en zon-PV waarmee is gerekend²³.

KOSTENONTWIKKELING

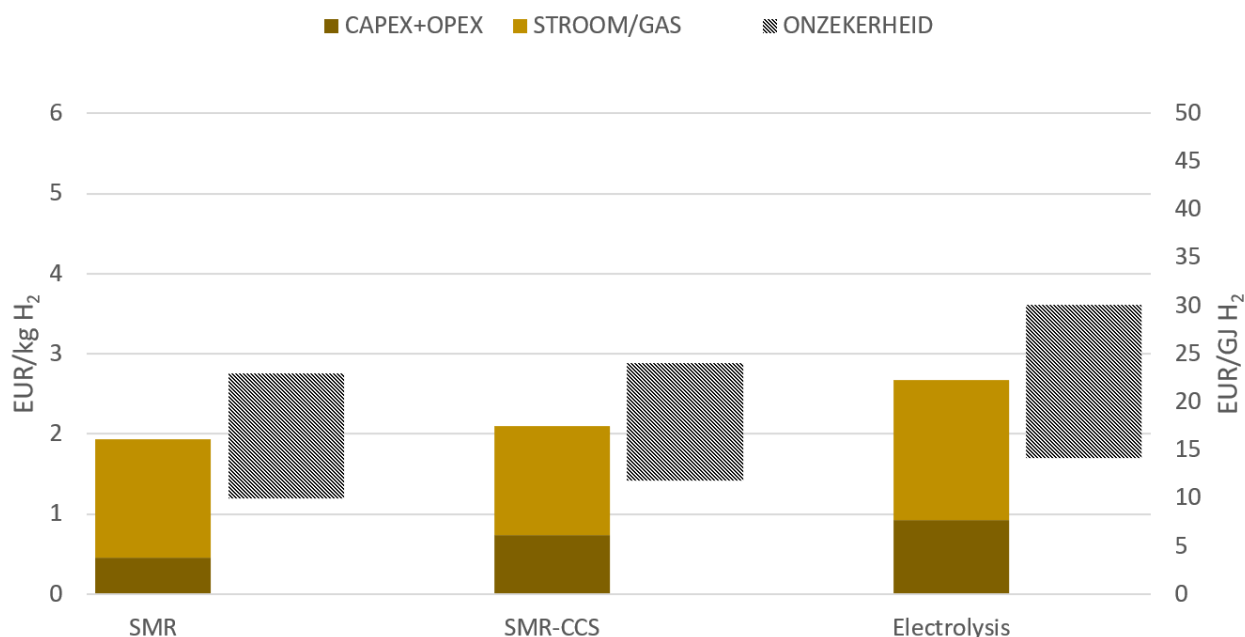
Onderstaande figuur geeft weer hoe de IEA²² verwacht dat de kosten voor waterstof productie zich zullen verhouden in 2030. Hoewel de analyse van het IEA zich moeilijk kwantitatief (één op één) laat vergelijken met die van TKI door verschillende aannames en basisgetallen, kan er wel iets gezegd worden over de onderlinge verhoudingen van kosten. Zo is bijvoorbeeld te zien dat de kosten van elektrolyse verwacht worden sterk te zullen dalen: kostte groene water-

Waterstof productiekosten per technologie in 2017 (TKI, 2018)



PRODUCTIEKOSTEN VAN WATERSTOF MET VERSCHILLENDE TECHNIKEN IN 2017. BRON: TKI, 2018

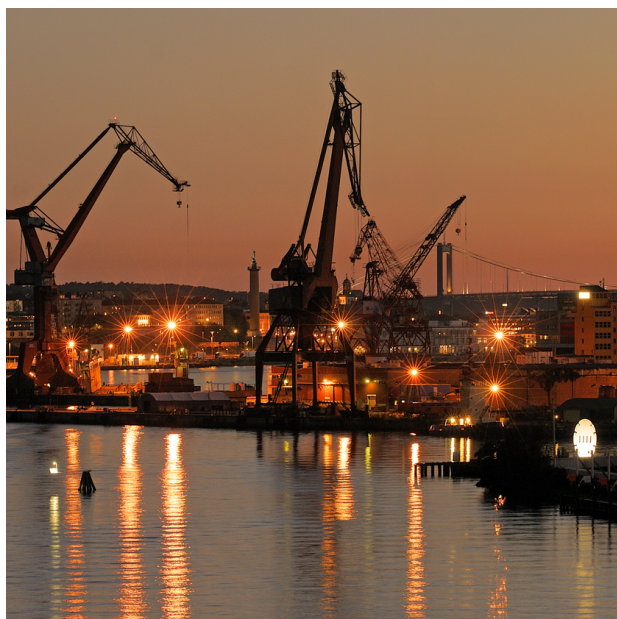
Waterstof productiekosten per technologie in 2030 (IEA, 2019)



PRODUCTIEKOSTEN VAN WATERSTOF MET VERSCHILLENDE TECHNIKEN IN 2030. BRON: IEA, 2019

stof uit elektrolyse in 2017 nog 2,5 tot 3 keer zoveel als grijze en blauwe waterstof uit SMR, is dat in 2030 terug gebracht naar een factor 1,25 voor de gemiddelde kostenverwachting. Belangrijke factoren voor deze kostendaling zijn de 'economy of scale' die optreedt bij opschaling en automatisering van de productie van de stacks.

Als de onzekerheden uit de analyse meegenomen worden, is het niet zo zeker meer te zeggen dat elektrolyse in 2030 nog de duurdere productiemethode zal zijn. Verder zal het verschil in kosten voor SMR en SMR-CCS steeds kleiner worden door een toenemende CO₂-prijs, ondanks de hogere CAPEX en OPEX voor de CO₂ afvang en opslag.



SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE KOSTENOPBOUW VAN WATERSTOFPRODUCTIE

21. International Energy Agency (2019). 'Hydrogen: Tracking Clean Energy Progress.' IEA website.

22. TNO (2019). 'Alle bestaande woningen aardgasvrij in 2050. Wie moet wat, wanneer en hoe doen?'. Online publicatie.

EDITED BY

Arjan Zwamborn

Vera Rovers

Floris van de Beek

Robin Niessink

Marleen Spiekman

WITH CONTRIBUTIONS FROM

Marcel Weeda

Frits Verheij

MORE INFORMATION

energy.nl

TNO innovation
for life

› **TNO.NL**