



Waterstof voor de gebouwde omgeving

Kennisdocument voor de gemeente
Nijmegen



CE Delft

Committed to the Environment

Waterstof voor de gebouwde omgeving

Kennisdocument voor de gemeente Nijmegen

Dit rapport is geschreven door:
Chris Jongsma, Reinier van der Veen, Joeri Vendrik

Delft, CE Delft, februari 2020

Publicatienummer: 20.190307.001

Waterstof / Productie / Producten / Gebruik / Gebouwde omgeving / Toekomst

Opdrachtgever: Gemeente Nijmegen

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Reinier van der Veen (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

Over dit kennisdocument	3
Wat is waterstof en wat doen we er al mee?	4
Welke rol kan waterstof spelen in de toekomst?	10
Hoe kan waterstof toegepast worden in de gebouwde omgeving?	18
Op welke termijn zou waterstof kunnen worden toegepast in de gebouwde omgeving van Nijmegen?	24
Conclusie	28
Bronvermelding	29



Over dit kennisdocument

In 2018 heeft de gemeente Nijmegen een warmtevisie vastgesteld, waarin verscheidene warmtetechnieken zijn benoemd om Nijmegen aardgasvrij te maken. In discussies met burgers en andere stakeholders wordt de toepassing van waterstof geopperd als één van de opties. Er is in Nederland een toenemende aandacht voor de mogelijke rol van waterstof als duurzame energiedrager in de energietransitie. Waterstof kan gebruikt worden in vele sectoren. De toepassing van waterstof voor de verwarming van gebouwen (huishoudens en utiliteit) is een nieuw onderwerp. Bij overheden, bedrijven en burgers leven er veel vragen over dit onderwerp. Dit kennisdocument beantwoordt deze vragen op een toegankelijke manier.



Wat is waterstof en wat doen we er al mee?

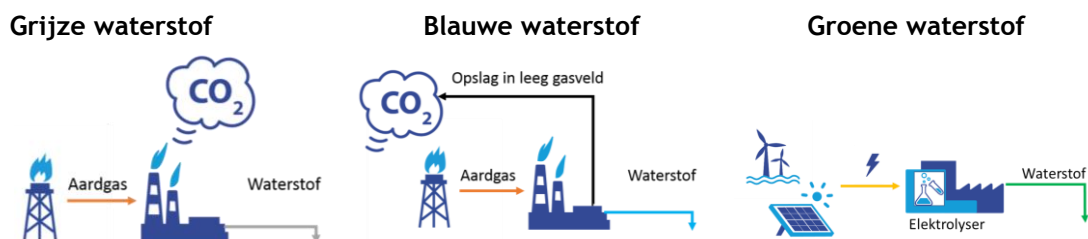
Waterstof is een licht gas, waarvan de moleculen bestaan uit twee waterstofatomen (de scheikundige aanduiding is H_2). Omdat waterstof geen koolstof bevat, zoals aardgas of benzine, komt er bij de verbranding van waterstof geen CO_2 vrij, alleen water. Toch is waterstof niet per definitie een CO_2 -vrije energiebron: bij de productie van waterstof kan wel degelijk CO_2 vrijkomen.

Waar komt waterstof vandaan?

Waterstof komt niet als molecuul in de natuur voor. In tegenstelling tot aardolie en aardgas kan het dus niet gewonnen worden uit de bodem, maar moet het gemaakt worden uit andere stoffen. Het is dan ook geen energiebron, maar enkel een energiedrager.

Er zijn drie manieren waarop waterstof op grote schaal gemaakt kan worden: de grijze route, de blauwe route en de groene route. Hoewel de producten een verschillende naam hebben, slaat dit enkel op de manier van produceren. Net als bij groene en grijze stroom is het eindproduct steeds hetzelfde¹.

Productieroutes waterstof



Grijze waterstof wordt gemaakt uit fossiele bronnen. In Nederland wordt op dit moment zo'n 9,2 miljard m^3 (ca. 830 kton) waterstof per jaar geproduceerd, iets meer dan een miljoen m^3 per uur (Berenschot, TNO, 2017). Deze hoeveelheid wordt vrijwel geheel in de Nederlandse industrie gebruikt en bestaat voornamelijk uit grijze waterstof. De meeste van deze grijze waterstof (80%) wordt uit aardgas gemaakt in een proces dat stoomreforming heet. Daarin reageert aardgas op hoge temperatuur met stoom tot CO_2 en waterstof. De CO_2 komt in de atmosfeer terecht, zo'n 12,5 miljoen ton per jaar (Berenschot, TNO, 2017). De overige 20% grijze waterstof is een restproduct van chemische processen die niet als hoofddoel hebben om waterstof te produceren. Zo komt waterstof vrij bij het kraken van koolwaterstoffen om bouwstenen voor plastics te maken en bij de productie van chloor.

¹ Er kan wel verschil zitten in de zuiverheid van de waterstof. Dit is relevant voor het gebruik van waterstof in brandstofcellen, omdat deze erg pure waterstof nodig hebben.

De waterstof wordt ‘blauw’ genoemd als de CO₂ die vrijkomt bij de productie van grijze waterstof wordt afgevangen en opgeslagen. Deze afvang wordt aangeduid met carbon capture and storage (CCS). De afvang en opslag kost extra energie. In Nederland wordt momenteel nog geen blauwe waterstof geproduceerd, onder andere omdat er nog geen locatie voor CO₂-opslag is gerealiseerd. In zowel de Rotterdamse haven als de Amsterdamse haven is een grootschalig afvangproject in voorbereiding, waarbij ook grote waterstofproducenten betrokken zijn. Deze projecten zouden tegen 2025 operationeel kunnen zijn, waarmee blauwe waterstofproductie in Nederland op grote schaal mogelijk wordt. Omdat dit de toevoeging van CO₂-afvang bij bestaande fabrieken betreft, leidt dit niet tot de beschikbaarheid van extra waterstof voor nieuwe afnemers.

Een grootschalige reformer met een productie van 145.000 m³ waterstof per uur, oftewel 13.000 kg/uur



Bron: Air Products (2018).

Waterstof wordt ‘groen’ genoemd als het uit hernieuwbare energiebronnen wordt gemaakt. De bekendste manier om groene waterstof te maken is door water met elektriciteit te splitsen in waterstof en zuurstof. Dit proces heet elektrolyse en heeft momenteel een rendement van 57-65%² (IRENA, 2018). Als de elektriciteit afkomstig is van een hernieuwbare bron dan kan de waterstof ‘groen’ worden genoemd. De productie van groene waterstof is momenteel nog beperkt tot testlocaties op kleine schaal, hoewel er steeds grotere projecten worden gerealiseerd. De techniek van elektrolyse is allerm minst nieuw, maar is tot nu toe voornamelijk in andere toepassingen gebruikt, bijvoorbeeld voor de productie van chloor uit water verzadigd met zout. Dit komt doordat waterstof uit elektrolyse momenteel nog zeker een factor drie duurder is dan waterstof uit aardgas (CE Delft, 2018). Zowel de kapitaalkosten van de elektrolyser zelf als de prijs van de gebruikte elektriciteit dragen bij aan de hogere kosten.

² Dit rendement is gebaseerd op de onderste verbrandingswaarde (LHV).

Een 6 megawatt proton exchange membrane (PEM) elektrolyser met een waterstofproductie van 1.300 m³/uur oftewel 117 kg/uur



Bron: Siemens (2019).

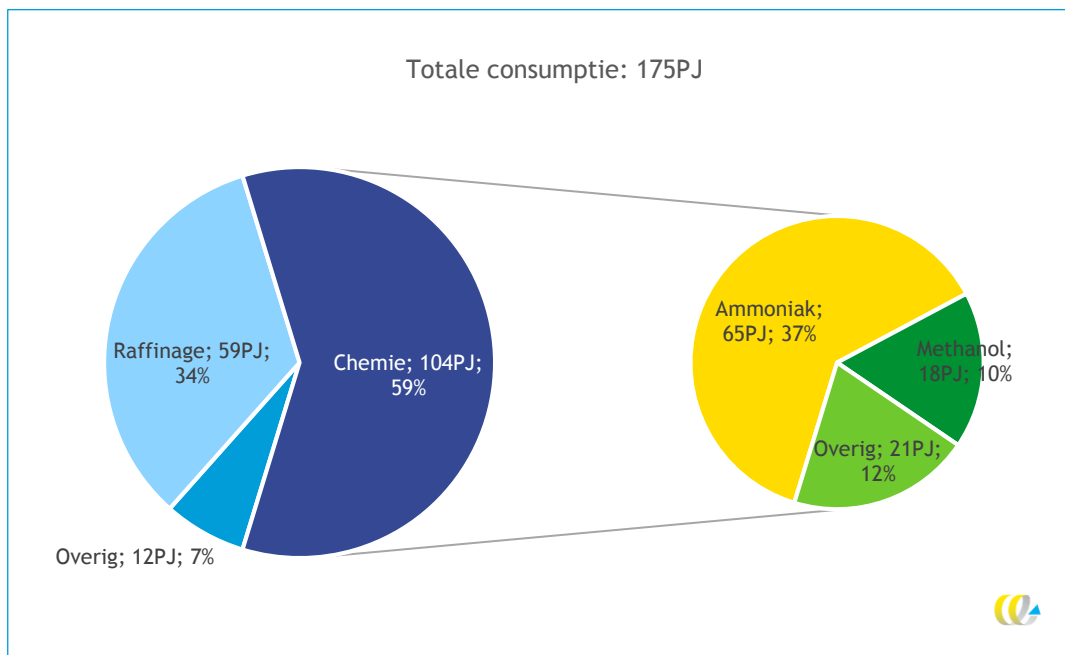
Groene waterstof kan ook worden geproduceerd uit biomassa zoals reststromen uit land- en bosbouw, gft-afval en algen. Een nieuwe conversietechniek die hiervoor kan worden ingezet is vergassing, waarbij biomassa op hoge temperatuur wordt omgezet in een combinatie van waterstof en koolstofmonoxide (synthesegas)³. Er is echter een beperkte beschikbaarheid aan duurzame biomassa.

Waar wordt waterstof nu voor gebruikt?

Waterstof is een veelzijdig gas dat op verschillende manieren gebruikt kan worden. Zo kan het worden omgezet in elektriciteit en warmte of worden gebruikt als grondstof. Door deze veelzijdigheid kan het in verschillende sectoren worden ingezet als vervanging van fossiele brandstoffen. Nu wordt waterstof echter vrijwel uitsluitend gebruikt voor toepassingen waarvoor geen alternatief is, namelijk als grondstof voor verschillende industriële processen. Dit is weergegeven in de volgende figuur.

³ Bij vergassing kan ook plastic gebruikt worden in plaats van biomassa.

Waterstofconsumptie in Nederland in 2019 (in petajoule (PJ))



Bron: Cijfers uit Gasunie (2019).

De meeste waterstof wordt gebruikt als grondstof in de chemische industrie, voor de productie van ammoniak (een tussenproduct voor kunstmest) en methanol (een basisbouwsteen in de chemische industrie). In raffinaderijen wordt waterstof gebruikt voor ontzwaveling en opwaardering van fossiele brandstoffen. Nederland heeft twee kunstmestfabrieken waar ammoniak wordt gemaakt en vijf grote raffinaderijen. Er wordt daarmee relatief veel waterstof gebruikt in dit land. Het grootste deel van deze waterstof wordt ingezet in de regio Rotterdam en in de provincie Zeeland. Hier zijn ook enkele grote producenten van waterstof gevestigd. In deze regio worden de grote hoeveelheden waterstof vervoerd via private waterstofleidingnetten, zoals te zien is in de volgende figuur. Andere Nederlandse industriële clusters hebben lokale waterstofleidingen maar zijn niet met elkaar verbonden via een onderling leidingnetwerk.

Voorbeeld van een privaat waterstofnetwerk in de Benelux



Bron: Air Liquide (2016).

Hoe duurzaam is waterstof?

Waterstof wordt vaak gezien als een schone en duurzame brandstof, aangezien geen broeikasgassen of vervuilende stoffen uitgestoten worden bij het gebruik van waterstof. Of waterstof daadwerkelijk duurzaam is hangt echter af van de productiemethode. Bij de productie wordt namelijk vaak CO₂ uitgestoten.

Zo worden grijze en blauwe waterstof gemaakt uit aardgas, een proces waarbij CO₂ vrij komt. Per energie-eenheid is de CO₂-uitstoot van grijze waterstof zelfs hoger dan bij directe verbranding van aardgas, vanwege de energieverliezen bij de waterstofproductie. Daarnaast kost het extra geld om aardgas eerst om te zetten in grijze waterstof. Het ligt daarom niet voor de hand om grijze waterstof te gebruiken in plaats van aardgas voor de productie van elektriciteit en warmte.

Bij blauwe waterstof ligt dit anders, omdat de CO₂ afgevangen en opgeslagen wordt. Dit betekent dat het gebruik van blauwe waterstof wél klimaatwinst op kan leveren ten opzichte van aardgas. Productie en gebruik van blauwe waterstof kan daarom een tussenoptie zijn op weg naar een CO₂-neutrale economie. Het afvangen en opslaan van CO₂ kost geld, maar bij een voldoende hoge CO₂-prijs kan dit worden terugverdiend. Er zitten echter ook nadelen aan blauwe waterstof. Dit wordt besproken in de paragraaf 'Welke rol kan blauwe waterstof spelen?'.

Groene waterstof geproduceerd uit wind- en zonne-energie is CO₂-neutraal. Bij gebruik van elektriciteit uit gas- of kolencentrales is dit echter niet het geval. Dan is de CO₂-uitstoot per energie-eenheid wederom groter dan bij direct gebruik van aardgas. In 2018 was 92,6% van de Nederlandse elektriciteitsmix van fossiele oorsprong. Dit betekent dat er geen klimaatwinst wordt geboekt als op dit moment waterstof wordt geproduceerd met elektriciteit van het net.

Zelfs als volledig duurzaam opgewekte elektriciteit gebruikt wordt om waterstof te produceren zijn er kanttekeningen te plaatsen. Om vast te stellen of de productie en het gebruik van waterstof 'goed is voor het milieu', moet het worden vergeleken met het alternatief. De duurzaam opgewekte elektriciteit kan namelijk ook worden ingevoed op het net, waardoor minder elektriciteit geproduceerd hoeft te worden door gas- en kolencentrales. Dit levert meer klimaatwinst op vanwege de hoge CO₂-uitstoot van deze centrales. Het voorgaande geldt niet als de productie van elektriciteit door windmolens en zonnepanelen groter is dan de vraag naar elektriciteit. In dat geval kan het produceren van waterstof wel leiden tot een lagere totale CO₂-uitstoot. Momenteel zijn deze overschotten⁴ van elektriciteit uit wind en zon er echter nog niet.

Daarnaast zijn de kapitaalkosten van een elektrolyser momenteel dusdanig hoog dat het niet rendabel is om de elektrolyser enkel in te schakelen in de schaarse uren dat er veel productie is uit hernieuwbare bronnen. In de praktijk zal de elektrolyser daarom vaker aan staan, ook wanneer het windstil is en de zon niet schijnt. In dat geval wordt de elektrolyser gevoed met grijze stroom en zorgt dus voor extra CO₂-uitstoot.

Op de korte termijn wordt dus geen CO₂ bespaard als aardgas wordt vervangen door waterstof. Dit kan echter veranderen in de toekomst, omdat het aandeel hernieuwbaar opgewekte elektriciteit in Nederland toe zal nemen. Er zullen dan wel momenten zijn waarop de totale elektriciteitsproductie van zonnepanelen en windmolens groter is dan de vraag. Daarnaast kan waterstof gebruikt worden om processen te verduurzamen waarbij geen elektriciteit gebruikt kan worden.

⁴ Zie figuur 'Illustratie van elektriciteitsoverschotten' op pagina 12 voor een visuele weergave van elektriciteitsoverschotten.



Welke rol kan waterstof spelen in de toekomst?

Momenteel wordt waterstof alleen gebruikt voor processen in de industrie, zoals in raffinaderijen of voor de productie van kunstmest. Waterstof kan echter ook nog voor vele andere toepassingen gebruikt worden in de toekomst en kan daarom een belangrijke bijdrage leveren aan de transitie naar een CO₂-vrij energiesysteem. Het is daarvoor wel noodzakelijk dat er voldoende waterstof op een duurzame manier geproduceerd wordt. In dit hoofdstuk wordt de mogelijke rol van waterstof in de toekomst besproken.

Waar kunnen we waterstof voor gebruiken in de toekomst?

Waterstof wordt op dit moment al gebruikt voor verschillende toepassingen in de industrie, zoals voor de productie van kunstmest en voor het opwaarderen en ontzwellen van olie in raffinaderijen. Er zijn geen haalbare alternatieven voor waterstof in deze processen, dus in de toekomst zal er ook nog vraag zijn naar waterstof voor deze toepassingen. Deze processen kunnen worden verduurzaamd door over te stappen van grijze waterstof op groene waterstof.

Daarnaast kan waterstof in de toekomst gebruikt worden als vervanging van fossiele brandstoffen voor verschillende toepassingen. Momenteel wordt bijna twee derde van de fossiele brandstoffen direct gebruikt en niet eerst omgezet in elektriciteit (EBN, 2018). Sommige toepassingen kunnen worden geëlektrificeerd, zoals voertuigen (elektrische auto's) en gebouwenverwarming (warmtepompen). Maar vaak is dit technisch niet mogelijk of is de technologie erg duur. In deze gevallen kan waterstof uitkomst bieden. Hieronder staat een overzicht van mogelijke toepassingen voor waterstof in de toekomst.

- **Grondstof voor de chemische industrie.** Waterstof wordt nu al gebruikt voor de productie van kunstmest en bij de raffinage van brandstoffen. In de toekomst kunnen nog meer chemische producten, die nu uit fossiele brandstoffen geproduceerd worden, gemaakt worden van waterstof. Een voorbeeld hiervan is methanol. Daarnaast kunnen petrochemische producten, zoals plastics, benzine en rubber, gemaakt worden uit waterstof en CO₂, in plaats van uit aardolie. Veel van de benodigde productieprocessen worden nog niet commercieel toegepast. Ook zijn grote hoeveelheden energie nodig.
- **Hogetemperatuurwarmte voor industriële processen.** Waterstof kan met minimale aanpassingen in huidige industriële processen verbrand worden om hogetemperatuurwarmte (> 100°C) te leveren. Ook elektriciteit zou kunnen worden omgezet in hogetemperatuurwarmte, maar deze technologie is voor veel toepassingen nog niet volledig ontwikkeld.
- **Mobiliteit.** Voertuigen kunnen rijden op waterstof door middel van brandstofcellen. In een brandstofcel wordt waterstof omgezet in elektriciteit, waarmee een elektromotor wordt aangedreven. Vanwege de omzettingsverliezen bij zowel de productie als het gebruik van waterstof is het energetisch efficiënter om direct op elektriciteit te rijden. Rijden op waterstof heeft echter ook voordelen ten opzichte van elektrisch rijden. Zo kan het snel in grote hoeveelheden getankt worden en bij grote voertuigen zijn een brandstofcel plus waterstoftank lichter en kleiner dan een batterijpakket. Daarom heeft waterstof veel potentie bij grote en zware voertuigen die lange afstanden afleggen zoals vrachtwagens, bussen, schepen en vliegtuigen.

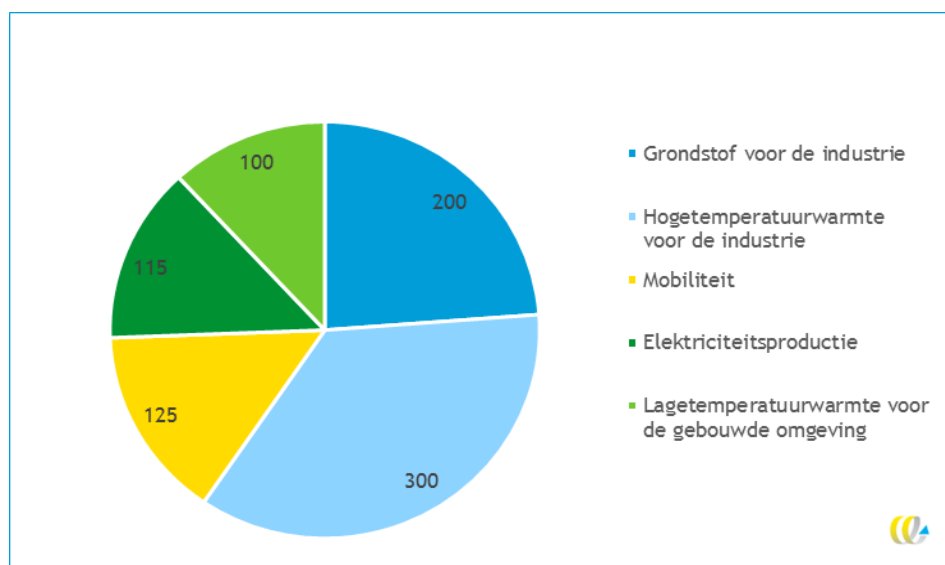


Daarnaast kan waterstof ook gebruikt worden voor de productie van synthetische brandstoffen die in conventionele verbrandingsmotoren kunnen worden gebruikt, zoals synthetische diesel.

- **Staalproductie.** Staal wordt gemaakt door de zuurstof uit ijzererts te verwijderen. Dit gebeurt nu met koolstof uit steenkool, maar dit kan ook met waterstof.
- **Elektriciteitsproductie.** Ondanks de verwachte sterke groei van het aantal windmolens en zonnepanelen zullen er in de toekomst nog steeds elektriciteitscentrales nodig zijn. Er moet namelijk ook elektriciteit geproduceerd worden als het niet waait en de zon niet schijnt. Deze centrales zouden in de toekomst kunnen draaien op waterstof.
- **Gebouwde omgeving.** Waterstof kan ook worden gebruikt voor verwarming in de gebouwde omgeving. Meer hierover staat in het deel ‘Hoe kan waterstof toegepast worden in de gebouwde omgeving?’.

Als waterstof voor al deze toepassingen gebruikt gaat worden zal dit leiden tot een aanzienlijke stijging in de vraag naar waterstof. Het is moeilijk om te voorspellen hoe groot de vraag uit verschillende sectoren precies zal zijn, aangezien dit van veel verschillende factoren afhangt. Een schatting van de potentiële Nederlandse vraag naar waterstof in 2050 gebaseerd op ECN (2017) en Gasunie (2019) is geïllustreerd in het volgende diagram. Deze bedraagt 840 PJ, wat overeenkomt met ongeveer 6.000 kiloton waterstof of 24 miljard m³ aardgasequivalent. Dit is gelijk aan circa 60% van het huidige aardgasverbruik in Nederland en is meer dan 25% van het totale huidige energieverbruik⁵.

Potentieel van de waterstofvraag in Nederland in 2050 in PJ, op basis van ECN (2017) en Gasunie (2019)



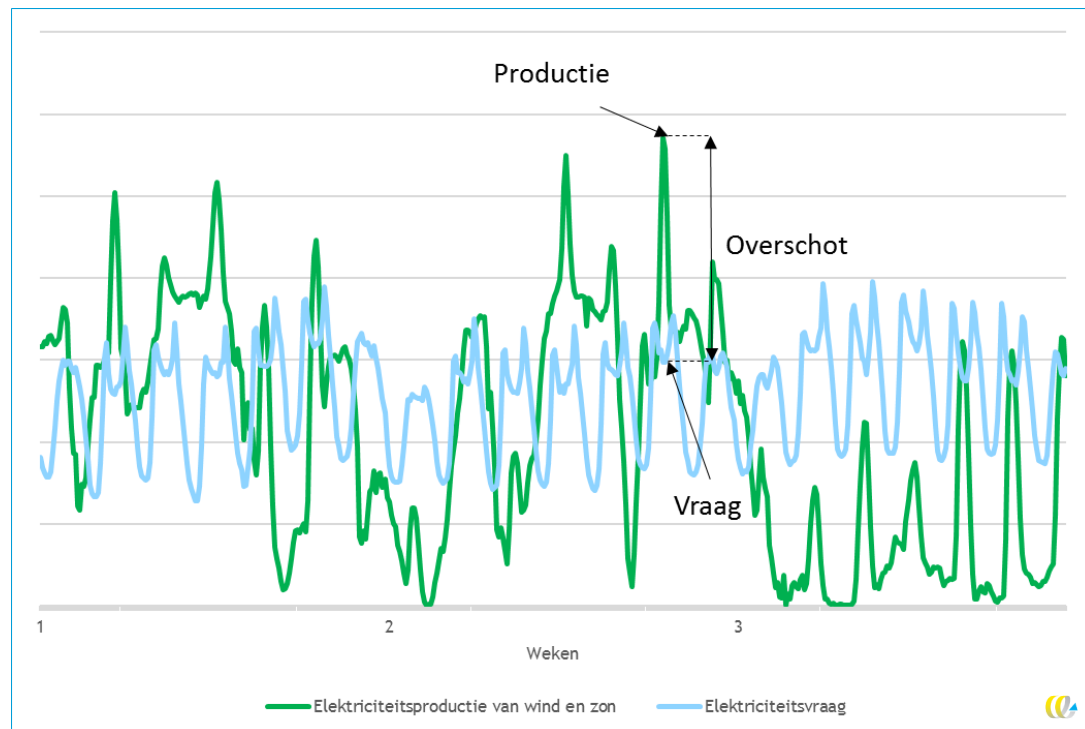
Welke rol kan waterstof spelen als energiedrager?

Waterstof kan nog een belangrijke rol in de energietransitie spelen: het kan een groot probleem oplossen in het elektriciteitssysteem. Het is namelijk een vereiste dat elektriciteitsvraag en -aanbod op ieder moment in evenwicht zijn. Momenteel is dit relatief makkelijk voor elkaar te krijgen, omdat het grootste deel van de elektriciteit wordt geproduceerd door regelbare elektriciteitscentrales. Echter, in de toekomst zal een steeds groter deel van de elektriciteit geproduceerd worden door hernieuwbare bronnen zoals

⁵ In 2018 was het totale energieverbruik in Nederland circa 3.100 PJ (CBS, 2018).

windmolens en zonnepanelen. De hoeveelheid elektriciteit die wordt opgewekt is dan afhankelijk van de weersomstandigheden: hoe hard het waait en hoe fel de zon schijnt. Dit betekent dat er pieken en dalen zullen zitten in de elektriciteitsproductie. Gedurende de pieken, als het hard waait en er geen bewolking is, zal de productie van de windmolens en zonnepanelen groter zijn dan de vraag. Dit is geïllustreerd in de volgende grafiek. Op de momenten dat het aanbod van wind en zon groter is dan de vraag is er sprake van een overschot aan elektriciteit.

Illustratie van elektriciteitsoverschotten



Er zijn verschillende manieren om dit probleem op te lossen. Het is mogelijk om windmolens en zonnepanelen af te schakelen, maar in de praktijk zal er extra vraag komen naar elektriciteit op deze momenten, omdat de elektriciteitsprijs dan lager is. Een van de opties is het produceren van waterstof door middel van elektrolyse. Op momenten van een elektriciteitstekort kan waterstof weer worden omgezet in elektriciteit, maar de waterstof kan ook voor andere toepassingen worden gebruikt.

Er zijn echter ook andere opties om vraag en aanbod van elektriciteit beter te laten aansluiten, zoals het gebruik van batterijen, directe omzetting in warmte (power-to-heat), het slim sturen van de elektriciteitsvraag (slim laden, smart grids) en het versterken van de verbinding van het elektriciteitsnet met andere landen. De productie van waterstof concurreert met al deze alternatieven. Deze kunnen echter alleen variaties binnen een aantal dagen opvangen en zijn niet geschikt voor seizoensopslag. Waterstofproductie kan daarentegen zowel voor het opvangen van dagelijkse variaties als voor seizoensopslag gebruikt worden. Zo kan bijvoorbeeld waterstof die in de zomer wordt geproduceerd uit overschotten in de winter worden benut, wanneer de stroomvraag hoger is en er minder elektriciteit wordt geproduceerd door zonnepanelen. Deze waterstof kan net als aardgas ondergronds opgeslagen worden. EnergyStock en Gasunie onderzoeken momenteel of de

aardgasbuffer in Zuidwending geschikt gemaakt kan worden voor de opslag van waterstof (Aardgasbuffer Zuidwending, 2019).

Het transporteren van waterstof is goedkoper dan het transporteren van elektriciteit. Daarom kan het in de toekomst kostenefficiënt zijn om elektriciteit bij windparken op zee direct om te zetten naar waterstof en in die vorm te transporteren. Hierdoor wordt het elektriciteitsnet ontlast, waardoor er minder netwerkinvesteringen nodig zijn om de groeiende hoeveelheid wind- en zonne-energie te kunnen transporteren. Bovendien kan lokale waterstofproductie en -gebruik leiden tot lagere investeringen in elektriciteits-distributienetten. De totale maatschappelijke kosten van een energiesysteem met een grote rol voor waterstof als energiedrager zouden daarom weleens lager kunnen zijn dan systemen waarin zoveel mogelijk elektriciteit direct wordt benut, ondanks de hogere energieconversieverliezen.

Hoeveel waterstof kunnen we produceren?

Op dit moment wordt het overgrote deel van de waterstof in Nederland geproduceerd met aardgas, maar de verwachting is dat waterstof in de toekomst geproduceerd wordt uit water met behulp van hernieuwbare elektriciteit (in ieder geval in 2050 en wellicht in beperkte hoeveelheid in 2030). Er zijn hierbij verschillende systeemconfiguraties mogelijk.

Een eerste mogelijkheid is het produceren van waterstof met elektriciteitsoverschotten. Waterstofproductie concurreert voor deze overschotten echter wel met andere toepassingen, zoals power-to-heat, waarbij elektriciteit omgezet wordt in warmte. Als de volledige elektriciteitsoverschotten gebruikt worden voor de productie van waterstof, kan in 2030 naar verwachting minder dan 20 PJ groene waterstof geproduceerd worden. Als we aannemen dat 15% van deze waterstof naar de gebouwde omgeving gaat (zoals het geval is bij de eerder gepresenteerde inschatting van de waterstofvraag in 2050), zou ca. 1% van de Nederlandse huishoudens worden voorzien.

Voor 2050 is het lastig om in te schatten hoeveel waterstof geproduceerd kan worden uit overschotten aangezien het nog onduidelijk is hoe de elektriciteitsproductie en vraag zich na 2030 gaan ontwikkelen. Echter, zelfs in het meest extreme scenario waarbij enorme hoeveelheden windturbines op zee geplaatst worden⁶, zal er niet voldoende waterstof geproduceerd worden om aan de totale potentiële vraag van 840 PJ per jaar te voldoen. Uitgaande van eenzelfde verdeling van de hoeveelheid waterstof over de sectoren als bij bovenstaande potentiële waterstofvraag zou in dit geval 20% van de huishoudens⁷ in Nederland in 2050 over kunnen stappen op waterstof. In de praktijk zal dit minder zijn aangezien een deel van de overschotten zal worden opgelost met behulp van vraagsturing of zal worden opgeslagen in bijvoorbeeld batterijen. Daarnaast is de kans reëel dat er minder waterstof geproduceerd wordt dan in het meest extreme scenario.

⁶ In dit scenario, het nationale scenario van het Net voor de Toekomst (CE Delft, 2017), staat er 53 GW aan wind op zee opgesteld in 2050 en wordt meer dan de helft van de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit gebruikt voor waterstofproductie. Dit zou leiden tot een productie van 453 PJ waterstof, wat overeenkomt met 55% van de potentiële vraag.

⁷ Dit is minder dan 20% van de energievraag van de totale gebouwde omgeving, aangezien utiliteit verantwoordelijk is voor 30% van het gasverbruik in de gebouwde omgeving.



Een andere optie is dat windparken op zee direct aangesloten worden op een elektrolyser. De geproduceerde elektriciteit wordt dan (deels) direct omgezet in waterstof. Dit kan voordelig zijn aangezien windparken soms ver van het vasteland liggen en het transporteren van waterstof goedkoper is dan het transporteren van elektriciteit. Het is echter de vraag of dit een goed idee is, aangezien deze elektriciteit dan niet gebruikt kan worden voor andere doeleinden.

Met een gemiddeld windpark op zee van 1 gigawatt (GW)⁸ kan slechts 1,3% van de 840 PJ geproduceerd worden, als alle geproduceerde elektriciteit in waterstof wordt omgezet. Dit zal uiteraard niet met alle windparken gebeuren, omdat de windparken op zee ook nodig zijn om te voldoen aan de elektriciteitsvraag.

840 PJ waterstof komt overeen met zo'n 24 miljard m³ aardgasequivalent. Ter vergelijking: in Nederland werd in 2018 ca. 40 miljard m³ aardgas verbruikt. Bij een rendement van 68% van de elektrolyser is circa 340 miljard kWh elektriciteit nodig om 840 PJ waterstof te maken. De totale elektriciteitsproductie van Nederland in 2018 was circa 113 miljard kWh (CBS, 2019a). Dit betekent dat de totale elektriciteitsproductie dus ongeveer driemaal zo groot zou moeten worden om al deze waterstof te maken.

Met grootschalige import van waterstof, geproduceerd uit wind- en zonneparken op locaties met een hoge opbrengst⁹, zou de beschikbare hoeveelheid waterstof voor Nederland substantieel kunnen toenemen. Echter, ook wereldwijd zal er tot 2050 een gelimiteerde hoeveelheid groene waterstof worden geproduceerd en een grotere vraag naar duurzame energiedragers ontstaan.

Vanwege de beperkte beschikbaarheid kan waterstof niet voor alle mogelijke toepassingen gebruikt worden. Dit betekent dat de verschillende sectoren met elkaar concurreren om de beschikbare hoeveelheid waterstof. De uiteindelijke verdeling van de waterstof over de sectoren hangt af van verschillende factoren zoals de betalingsbereidheid voor waterstof en de aanwezigheid van alternatieven voor het gebruik van waterstof¹⁰.

Hoeveel kost waterstof in de toekomst?

Uitspraken over de toekomstige prijs van waterstof zijn sterk afhankelijk van de aannames die aan de onderliggende berekeningen ten grondslag liggen.

Hoewel hier een grote onzekerheidsmarge in zit, zijn er een aantal trends die in vrijwel alle ontwikkelingsscenario's terugkomen:

- de prijs van aardgas zal in de toekomst stijgen (IEA, 2018);
- de prijs van hernieuwbare elektriciteit uit zon en wind zal verder dalen;
- de kosten van elektrolyzers zullen door leereffecten en schaalvoordelen dalen;
- de prijs voor de uitstoot van CO₂ binnen het Europees emissiehandelsstelsel zal stijgen.

⁸ Nederland heeft nu vier windparken op zee met een gezamenlijk vermogen van 0,95 GW (RVO, 2019). Tot 2030 is een uitbreiding met circa 11,5 GW gepland (Rijksoverheid, 2019).

⁹ Bijvoorbeeld waterstof geproduceerd met zonne-energie in de Sahara of het Midden-Oosten.

¹⁰ Er zijn vaak weinig duurzame alternatieven voor het gebruik van waterstof als grondstof of voor hogetemperatuurwarmte. Voor mobiliteit en laagtemperatuurwarmte voor de gebouwde omgeving is elektrificatie vaak een duurzaam alternatief.



Voor de elektrolyzers is er nog veel kostenreductie te behalen. De eerste grote elektrolyzers zijn in aanbouw. De proton exchange membrane (PEM) elektrolyzers¹¹ zijn nog duur, maar door hogere productievolumes en technologische ontwikkeling kunnen de productiekosten omlaag worden gebracht (DNV GL, ECN, 2018).

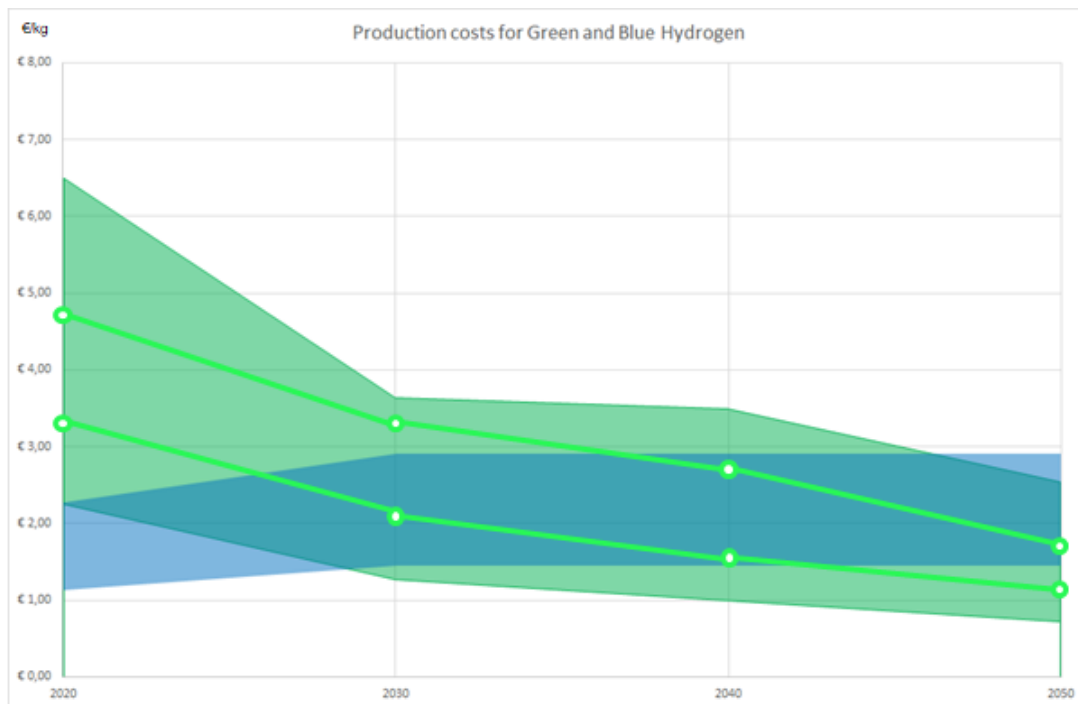
Verder zal grotere beschikbaarheid van duurzame elektriciteit in de toekomst leiden tot lage elektriciteitsprijzen op momenten dat er overschotten zijn, wat ook bijdraagt aan een lagere kostprijs voor groene waterstof. De investeringskosten voor de elektrolyser zullen wel erg hoog liggen als waterstof geproduceerd wordt uit elektriciteitsoverschotten, aangezien het aantal draaiuren laag is. Als een elektrolyser direct aangesloten wordt op een windpark zal het aantal draaiuren hoger liggen, maar in dat geval ligt de elektriciteitsprijs hoger aangezien de kostprijs voor elektriciteit op wind betaald moet worden.

Van As-Jacobsson & Hellinga (2020) hebben op basis van negen studies een bandbreedte berekend van de ontwikkeling van de productiekosten van groene waterstof tussen nu en 2050. Deze bandbreedte is weergegeven in onderstaande figuur. Deze studies gaan uit van verschillende systeemconfiguraties¹² en bedrijfsvoering van elektrolyzers en van verschillende aannames over technische ontwikkelingen en kostenreducties. Ondanks deze verschillen blijft de bandbreedte van de productiekosten van groene waterstof beperkt en lijkt deze zelfs te convergeren richting 2050. De productiekosten nemen af over de tijd, wat wordt veroorzaakt door dalende investeringskosten en een hogere energie-efficiëntie van elektrolyzers en dalende kosten van groene stroom. De gemiddelde kostprijs van groene waterstof tussen 2030 en 2050 ligt rond de 2 €/kg, met een gemiddelde bandbreedte van ca. 1,5 tot 2,5 €/kg. Dit komt overeen met een aardgasprijs van 0,40 tot 0,66 €/m³ (zonder belastingen).

¹¹ Alkaline-elektrolyzers zijn al verder ontwikkeld en momenteel goedkoper, maar reageren langzaam en passen dus minder goed in een fluctuerend elektriciteitssysteem.

¹² Verschillende systeemconfiguraties zijn de directe koppeling van een elektrolyser aan een wind- of zonnepark, de aansluiting van een elektrolyser op het stroomnet, en de productie van waterstof uit wind- en zonneparken in landen met een hoge opbrengst in combinatie met waterstoftransport per schip naar Nederland.

Ontwikkeling van de productiekosten van groene en blauwe waterstof (in €/kg). De bandbreedtes (het groene gebied voor groene waterstof en het blauwe gebied voor blauwe waterstof) geven de spreiding van inschattingen uit verschillende studies aan. De groene lijnen zijn de gemiddelden van de lage en hoge waarden voor de productiekosten van groene waterstof.



Bron: Van As-Jacobsson & Hellinga (2020).

Op korte termijn zal blauwe waterstof goedkoper zijn dan groene waterstof. De kostprijs van blauwe waterstof kan echter gaan stijgen vanwege een oplopende aardgasprijs, terwijl de kostprijs van groene waterstof zal dalen. Het is te verwachten dat groene waterstof tussen 2030 en 2050 concurrerend wordt met blauwe waterstof.

Het is afhankelijk van verschillende factoren of het gebruik van waterstof de goedkoopste manier om woningen aardgasvrij te maken in een bepaalde wijk of gemeente. Maar zelfs als het de goedkoopste optie is zullen de kosten voor verwarming een stuk hoger liggen dan op dit moment. In 2018 was de aardgasprijs voor grootgebruikers (exclusief belasting en btw) namelijk ongeveer € 0,20 per m³ (CBS, 2019a)¹³. De kostprijs (productiekosten) voor waterstof zal dus al twee tot drie keer zo hoog liggen als de huidige aardgasprijs exclusief belastingen. Hier bovenop komen nog infrastructuurkosten (opslag en transport van waterstof), kosten voor nieuwe warmtetechnieken (cv-ketel of brandstofcel) en belastingen. Dit betekent dat de kosten voor het verwarmen van een huis op waterstof een stuk hoger zullen zijn dan de huidige kosten voor het verwarmen van huizen met aardgas.

¹³ De kosten voor grootverbruikers zonder belastingen zijn een indicatie van de kostprijs van aardgas.

Welke rol kan blauwe waterstof spelen?

Op korte termijn is blauwe waterstof goedkoper en sneller in grote hoeveelheden te produceren dan groene waterstof. Daarom wordt blauwe waterstof gezien als tussenoplossing, om de weg te bereiden voor grootschalige uitrol van groene waterstof. Door nu al in te zetten op blauwe waterstof kan de benodigde infrastructuur alvast aangelegd worden, waardoor het later makkelijker is om over te schakelen op groene waterstof. Het is logisch dat blauwe waterstof in de eerste plaats de huidige vraag naar grijze waterstof van de industrie vervangt, dat wil zeggen, dat de huidige waterstofproducenten CO₂-afvangsystemen realiseren. Daarnaast kan de productie opgeschaald worden om waterstof te produceren voor andere sectoren, zoals de gebouwde omgeving.

Er kunnen echter vraagtekens geplaatst worden bij grootschalige toepassing van blauwe waterstof. Zo kan inzetten op blauwe waterstof ervoor zorgen dat er een 'lock-in' op blauwe waterstof ontstaat en er minder geïnvesteerd wordt in groene waterstof, waardoor de transitie naar groene waterstof vertraging oploopt. Daarnaast is er bij de productie van blauwe waterstof aardgas nodig. Dit moet in de toekomst geïmporteerd worden, omdat er dan geen aardgas meer gewonnen wordt in Nederland. Er kan dan een geopolitieke afhankelijkheid van aardgasproducerende landen ontstaan. Bij de import van groene waterstof speelt dit minder, omdat wind- en zonne-energie overal ter wereld kan worden geproduceerd.

CO₂-afvang en -opslag heeft een beperkt maatschappelijk draagvlak omdat het niet als écht duurzaam wordt gezien. Deze techniek wordt echter de laatste jaren steeds meer beschouwd als 'noodzakelijk kwaad', omdat het nodig is om de in Parijs afgesproken CO₂-reductiedoelen te behalen. Havenbedrijf Rotterdam, Gasunie en EBN werken aan de voorbereiding van CO₂-opslag in lege gasvelden in de Noordzeebodem, wat vanaf eind 2023 zou kunnen gaan plaatsvinden (Havenbedrijf Rotterdam, 2019).

De huidige productie van grijze waterstof is sterk gericht op het produceren van grote hoeveelheden waterstof tegen de laagst mogelijke prijs. Vanwege de lage CO₂-prijs is blauwe waterstof nu nog duurder dan grijze waterstof. De CO₂-prijs zal echter stijgen, en zodra blauwe waterstof goedkoper wordt dan grijze, zal de industrie over willen stappen. Hiervoor is het wel noodzakelijk dat er CO₂-infrastructuur wordt aangelegd en dat alle juridische kwesties rondom de langdurige opslag van CO₂ worden opgelost.

Hoe kan waterstof toegepast worden in de gebouwde omgeving?

Verwarmen op waterstof is een van de mogelijkheden om de gebouwde omgeving aardgasvrij te maken. Er zijn echter verschillende aspecten waar rekening mee gehouden moet worden zoals de productielocatie, het transport, de veiligheid en de warmtetechnieken voor waterstof. Daarnaast concurreert waterstof met andere technieken om woonwijken aardgasvrij te maken. Deze zaken worden besproken in dit hoofdstuk.

Waar wordt de waterstof geproduceerd?

Waterstof kan zowel centraal als decentraal geproduceerd worden. Bij centrale productie gaat het om grote productiefaciliteiten die invoeden op een hogedrukgasnet en vaak ver verwijderd zijn van de vraaglocaties¹⁴. Momenteel zijn dit grote fabrieken waar waterstof uit aardgas gewonnen wordt. In de toekomst kan het bijvoorbeeld gaan om grote elektrolyzers die waterstof produceren bij grote windparken op zee. Centrale waterstofproductie- en transport kan de investeringskosten in energie-infrastructuur sterk reduceren.

Bij decentrale waterstofproductie wordt de waterstof dicht bij de gebruiker geproduceerd en direct gebruikt of ingevoerd op een lagedrukgasnet. Zo zijn er op dit moment kleinschalige productie-eenheden die waterstof uit aardgas produceren bij waterstoftankstations en kleine industriële gebruikers (TKI Nieuw Gas, 2018). In de toekomst zouden elektrolyzers gebruikt kunnen worden om lokaal waterstof te produceren met lokaal opgewekte duurzame elektriciteit.

Het grote voordeel van decentrale waterstofproductie met opslag is dat lokaal opgewekte elektriciteit ook lokaal gebruikt wordt. Hierdoor is er minder transport van elektriciteit nodig en op deze manier wordt het elektriciteitsnet dus minder belast. Daarnaast kunnen elektrolyzers lokale elektriciteitsoverschotten en lokale capaciteitsproblemen op het elektriciteitsnet opvangen. Decentrale waterstof kan al geproduceerd worden voordat er een landelijk waterstofnetwerk aanwezig is en stimuleert zo de uitrol van waterstof.

Aan de andere kant is centrale waterstofproductie goedkoper, voornamelijk vanwege schaalvoordelen bij de productie. Bovendien kan waterstof centraal langdurig worden opgeslagen in zoutcavernes. Er moet dan wel een waterstofnet zijn om de waterstof te transporteren. Bij decentrale opwekking moet opslag lokaal gebeuren in opslagtanks zolang er geen landelijk dekkend waterstofnet is.

¹⁴ Dit geldt niet voor het gebruik van waterstof door grote fabrieken die in hetzelfde industrie- of havengebied als de waterstofproductiefaciliteit staan.



Kunnen we ons huidige gasnet gebruiken?

Als waterstof centraal geproduceerd wordt, moet het getransporteerd worden vanaf de productielocatie naar de buurten waar het gebruikt gaat worden. Hiervoor zou het huidige hogedruk-aardgasnetwerk gebruikt kunnen worden, omdat dit in onbruik raakt als Nederland van het aardgas af gaat.

Binnen het huidige hogedrukaardgasnetwerk kan waterstof probleemloos tot 20% bijgemengd worden bij aardgas zonder dat er aanpassingen nodig zijn aan het gasnetwerk of de verwarmingsapparatuur in de gebouwen.¹⁵ Op deze wijze kan er nu dus al een grote hoeveelheid waterstof geleverd worden aan eindconsumenten, maar niet in pure vorm. Het is technisch mogelijk om het mengsel van aardgas en waterstof weer te scheiden op het punt van levering, maar dit vergt een extra installatie en is onnodig als het gasmengsel zelf kan worden gebruikt. Bijmenging kan fysiek of met certificaten. Er gaan stemmen op binnen de EU voor een verplichte bijmenging van waterstof in het aardgasnetwerk, al zijn deze plannen nog weinig concreet (Energeia, 2019).

Op de lange termijn biedt het huidige net ook goede mogelijkheden voor het transport van 100% waterstof. De hoeveelheid energie die per uur kan worden getransporteerd is voor waterstof bijna gelijk aan die van Groningen-gas (Kiwa N.V., 2018). Bepaalde onderdelen en netdelen zullen vervangen moeten worden. Dit hangt onder andere af van het leidingmateriaal en de technische staat van de leidingen. Daarnaast moeten de gasmeters bij de aansluiting van gebruikers vervangen worden omdat waterstof een lagere energiedichtheid heeft. Dit is naar verwachting de grootste kostenpost bij de omzetting van het aardgasnet naar een waterstofnet (Kiwa N.V., 2018).

Het is mogelijk om het aardgasnet geleidelijk in een waterstofnet om te zetten, en in sommige gevallen is het technisch haalbaar om een enkele gemeente, wijk of buurt op waterstof over te zetten, als de lokale configuratie van het aardgasnet zich daartoe leent (Leeds City Gate, 2016). Omdat er veel koppelingen in gasdistributienetten zitten, is het lastig om een deel van het distributienet te isoleren voor de levering van waterstof aan een enkele wijk of buurt. Het zal in de praktijk niet rendabel zijn om enkele huizen in een wijk over te zetten. Daarnaast is het noodzakelijk dat de omzetting van aardgas naar waterstof in één keer gebeurt. Dit betekent dat alle gebruikers/aansluitingen binnen een gebied tegelijk over moeten stappen, wat organisatorisch complex is.

¹⁵ In Nederland is 20% bijmenging getest op Ameland en dit leverde geen problemen op. Volgens sommige literatuur is zelfs bijmenging tot 30% mogelijk zonder problemen (Jones, et al., 2018).



Voorgesteld hoofdleidingnet voor waterstof in 2030



Bron: Gasunie (2020).

Gasunie is van plan om tegen 2030 een waterstof-‘backbone’ te hebben gerealiseerd, een landelijk dekkend netwerk van hoofdgasleidingen. Dit voorstel is weergegeven in de figuur hierboven. Hoofdgasleidingen zijn gasleidingen op hoge druk (66-80 bar) waar industriële grootverbruikers op zijn aangesloten. Gebouwen zijn echter aangesloten op het lagedruk-gasnet. Voordat centraal geproduceerde waterstof beschikbaar is voor gebouwen, zal er eerst een hogedruknet moeten komen. Daarna kunnen delen van het midden- en lagedruk-net ook omgezet worden. Of het zinvol is om netten om te zetten, hangt sterk samen met de ontwikkeling van de vraag naar en het aanbod van waterstof. Om deze reden zullen er vóór 2035 waarschijnlijk weinig midden- en lagedruknetten zijn omgezet.

Welke warmtetechnieken zijn er mogelijk met waterstof?

Er zijn verschillende soorten technologieën die gebruikt kunnen worden om warmte te produceren uit waterstof in gebouwen. De belangrijkste technologieën worden hieronder beschreven.



Waterstof-cv-ketel Een eerste type installatie dat gebruikt kan worden in huizen om warmte uit waterstof te produceren is de waterstof-cv-ketel. Deze is vergelijkbaar met de huidige cv-ketel op aardgas, maar heeft een andere brander en warmtewisselaar nodig. Het voordeel van deze technologie ten opzichte van andere duurzame warmtetechnieken is dat er vrijwel niets verandert voor de consument. Wel moeten er nieuwe cv-ketels geplaatst worden die speciaal ontworpen zijn voor waterstof, want de huidige toestellen zijn niet geschikt om 100% waterstof te verbranden. Pure waterstof kan in deze toestellen leiden tot vlaminslag en beschadiging van de brander. Daarnaast werkt het beveiligings-principe van de huidige toestellen niet als er pure waterstof wordt gebruikt. Ook levert de verbranding van waterstof een kleurloze vlam op, wat betekent dat monteurs de werking van de ketel niet kunnen controleren door naar de vlammen te kijken (Kiwa N.V., 2018). Dit betekent dat er extra scholing van monteurs nodig is. De huidige cv-ketels kunnen op dezelfde manier gebruikt worden als er tot 20% waterstof bijgemengd is in het aardgas.

Er worden ook cv-ketels ontwikkeld die ‘waterstofklaar’ zijn. Deze ketels werken op aardgas maar kunnen na kleine aanpassingen worden overgezet op 100% waterstof. De extra aanschafkosten van een waterstofklare cv-ketel ten opzichte van een cv-ketel op aardgas wordt door ketelfabrikant Worcester Bosch op ongeveer £ 50 (€ 59) geschat (BBC, 2020). Daarnaast moeten er enkele onderdelen vervangen worden, zoals de brander. Deze aanpassingen kosten naar verwachting 20-40% van de totale prijs van de cv-ketel (Frazer-Nash, 2018).



Hybride warmtepomp

Bij een hybride warmtepomp wordt er gebruik gemaakt van een combinatie van een cv-ketel en een warmtepomp die werkt op elektriciteit. De cv-ketel wordt ingeschakeld als de warmtepomp niet genoeg warmte kan leveren, bijvoorbeeld als het extreem koud is. De cv-ketel kan een waterstofketel zijn. Daarnaast is het ook mogelijk om een warmtepomp in combinatie met een brandstofcel te gebruiken.



Brandstofcellen

Gebouwen kunnen ook met waterstof verwarmd worden middels een brandstofcel. Bij een brandstofcel wordt waterstof niet verbrand, maar wordt deze omgezet in elektriciteit door middel van een elektrochemische reactie. Hier komt ook warmte bij vrij. Brandstofcellen kunnen dus zowel in de elektriciteitsvraag als de warmtevraag van gebouwen voorzien. Echter, elektriciteit en warmte zullen niet in de juiste verhouding worden geproduceerd, dus is er ook behoefte aan energieopslag en zal er elektriciteit worden teruggeleverd aan het net.

Momenteel zijn brandstofcellen voor woningen nog veel te duur en waarschijnlijk zijn ze dat in 2030 nog steeds, maar richting 2050 zouden de aanschafkosten voldoende kunnen dalen om financieel interessant te worden voor huishoudens en bedrijven, al is dit nog onzeker.



Warmtenet

Een ander systeemontwerp bestaat uit een combinatie van waterstoflevering en een warmtenet (stadsverwarming). In dit ontwerp wordt waterstof op stadsniveau of wijkniveau omgezet in warmte en elektriciteit in een warmtekrachtcentrale, waarna de warmte wordt geïnjecteerd in een warmtenet. Zo'n systeem kan in de eerste plaats een aantrekkelijke optie zijn voor wijken die al een warmtenet hebben. De waterstof kan worden gebruikt op momenten dat andere, minder goed regelbare, warmtebronnen onvoldoende zijn om in de warmtevraag te voorzien.

Is het wel veilig?

De netbeheerders moeten rekening houden met het verschil van de eigenschappen van waterstof ten opzichte van aardgas om deze veilig te kunnen vervoeren. Het gebruik van waterstof in de gebouwde omgeving vergt aanpassingen aan de gasinfrastructuur en vervanging van cv-ketels. Ook moeten installateurs bijgeschoold worden om waterstofketels veilig te kunnen installeren en onderhouden. De veiligheidsnormen en -voorschriften voor de toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving bestaan nu nog niet en zullen verschillen voor die voor aardgas, maar zodra deze aanwezig zijn en worden nageleefd is waterstof niet minder veilig dan aardgas. Wel is aanvullend onderzoek nodig om risico's en veiligheid exact in kaart te brengen.

Waterstof heeft een lagere ontstekingswaarde en ruimere explosiegrenzen, maar stijgt tot negen keer sneller op dan aardgas, waardoor het risico op een explosie even klein lijkt als bij aardgas¹⁶. Waterstof brandt kleurloos, wat de controle van de goede werking van een ketel bemoeilijkt. Omdat waterstof geen koolstof bevat, kan er geen koolmonoxide gevormd worden tijdens de verbranding en is het risico op koolmonoxidevergiftiging dus afwezig.

Net als aardgas is waterstof geurloos, en net al bij aardgas kan een geurstof worden toegevoegd om gaslekken beter detecteerbaar te maken (Kiwa N.V., 2018).

In welke situaties is verwarmen op waterstof (on)gunstig?

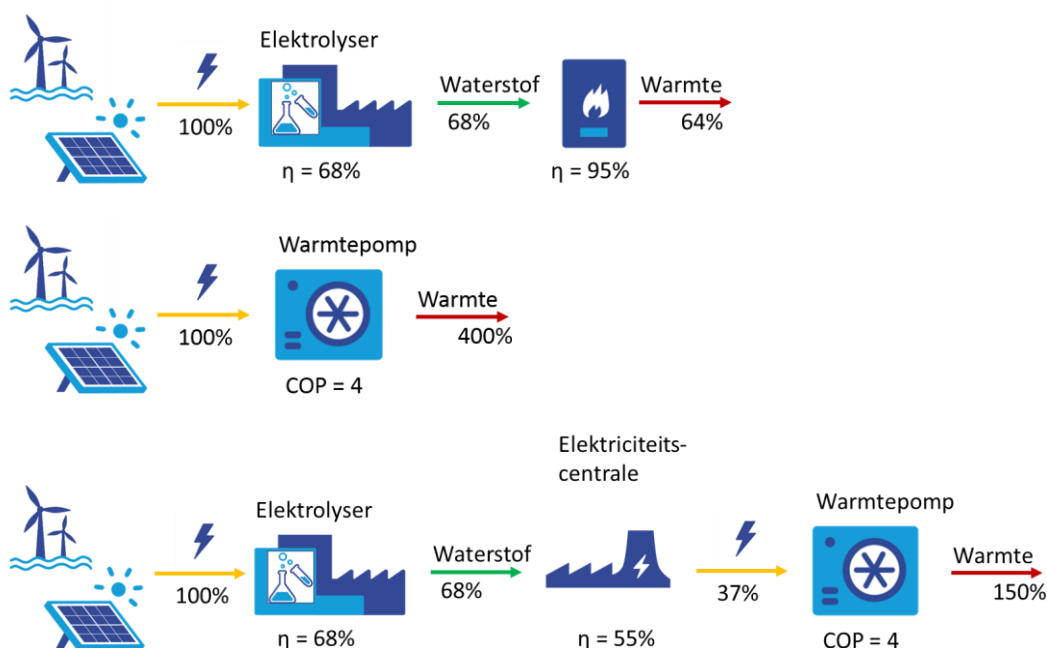
Er zijn verschillende opties voor duurzame woningverwarming: elektrische warmtepompen, duurzame biomassa, warmtenetten, groengas en waterstof. Welke warmtetechnieken voor welke steden, wijken en buurten zal worden gebruikt hangt af van de beschikbare energie en de transportcapaciteit, maar ook van transitiekosten voor netbeheerders en huishoudens. Wat voor huishoudens de goedkoopste optie is, verschilt flink per woningtype. Het bouwjaar van de woning, de reeds aangebrachte isolatie, de ligging van de woning, de reeds aanwezige infrastructuur en of een woning monumentaal is hebben alle grote invloed op de kosten. Daarnaast hebben natuurlijk ook de prijzen van elektriciteit, warmte, groengas en waterstof een groot effect op de totale kosten van verschillende warmtetechnieken voor de eindgebruiker. Het verschilt dus per wijk of gemeente wat de goedkoopste warmtetechniek is. In alle gevallen zullen de kosten hoger liggen dan in de huidige situatie met verwarming op aardgas.

¹⁶ In het Verenigd Koninkrijk is een praktijkproef gedaan om te testen hoe groot het risico op explosies bij lekkage is. Bij deze proef is het de onderzoekers niet gelukt om waterstof tot explosie te brengen bij normale omstandigheden. Er moet hier nog meer onderzoek naar gedaan worden.



Het ketenrendement van waterstof voor woningverwarming is beperkt. Dit is geïllustreerd in onderstaande figuren, waarin het ketenrendement van de cv-ketel op groene waterstof en de warmtepomp te zien is. Voor de warmtepomp is zowel het directe gebruik van elektriciteit als het gebruik van elektriciteit geproduceerd uit groene waterstof weergegeven.

Ketenrendement voor (van boven naar beneden): de waterstof-cv-ketel op groene waterstof, de warmtepomp op groene stroom en de warmtepomp op elektriciteit uit groene waterstof (exclusief transportverliezen)



COP = coefficient of performance (prestatiecoëfficiënt); η = rendement.

Als je alleen kijkt naar de energie-efficiëntie heeft het duidelijk de voorkeur om indien mogelijk de elektriciteit direct te gebruiken, zonder omzetting naar waterstof. Sterker nog, zelfs als waterstof wordt gebruikt als seizoensopslag is het veel efficiënter om de waterstof eerst weer in elektriciteit om te zetten en die elektriciteit vervolgens te gebruiken om een warmtepomp aan te drijven.

Ondanks het lage ketenrendement kan waterstof een nuttige bijdrage leveren aan een CO₂-neutrale warmtevoorziening. Het gebruik van waterstof heeft namelijk ook voordelen: de bestaande infrastructuur hoeft nauwelijks aangepast te worden en er kan warmte op hoge-temperatuur geleverd worden. Dit betekent dat ook woningen waarvoor verregaande isolatie niet mogelijk of veel te duur is, toch goed verwarmd kunnen worden met waterstof. Niet ieder huis kan dusdanig goed geïsoleerd worden dat een warmtepomp een haalbare optie is. Dit geldt bijvoorbeeld voor monumentale panden. Een andere warmteoptie op hoge temperatuur is een warmtenet, maar dit is niet overal haalbaar. In historische binnensteden is de aanleg van een warmtenet bijvoorbeeld niet altijd mogelijk door beperkte ruimte in de ondergrond, terwijl in dunbevolkte buitengebieden met verspreide bebouwing een warmtenet niet rendabel is door de grote afstanden. In deze woningen is waterstof dus is een geschikte kandidaat om de warmtevoorziening CO₂-neutraal te maken.

Op welke termijn zou waterstof kunnen worden toegepast in de gebouwde omgeving van Nijmegen?

Waterstof kan mogelijk in de toekomst een belangrijke rol spelen in de warmtevoorziening van de gebouwde omgeving, maar dat is nu nog niet het geval. Momenteel wordt waterstof nog nergens op grote schaal in de gebouwde omgeving toegepast. Toch lopen er al wat kleine proefprojecten om dit in de toekomst wel mogelijk te maken. Het zal echter nog een flinke tijd duren voordat waterstof een grote rol kan gaan spelen in de gebouwde omgeving. Deze termijn en de huidige ontwikkelingen op het gebied van waterstof worden in dit hoofdstuk besproken.

Wat gebeurt er nu al met waterstof in de gebouwde omgeving?

Hoewel er veel aandacht is voor toekomstige toepassingen van waterstof in de gebouwde omgeving, is het aantal daadwerkelijk gerealiseerde projecten beperkt tot drie testlocaties:

Ameland (2007-2011) - Bij veertien bestaande laagbouwwoningen is tot 20% waterstof bijgemengd in het aardgas. De verwarmings- en kooktoestellen zijn hiervoor niet aangepast, wel is er lokaal een speciaal stuk gasleiding aangelegd om het mengsel te leveren aan de woningen. In eerste instantie is de waterstof met buistrailers aangevoerd, later is lokaal een elektrolyser geplaatst. De uitkomst van de proef was dat tot 20% bijmenging geen probleem is zonder aanpassing aan de infrastructuur of apparaten (Kiwa, 2012).

Rozenburg (2018-2023) - Een bestaand appartementencomplex van 25 woningen is mede verwarmd met (testmodellen van) waterstofketels van drie verschillende leveranciers. De waterstof wordt lokaal opgewekt met acht elektrolyzers en door een bestaande gasleiding naar het gebouw getransporteerd (Energiea, 2019) (Stedin, 2019).

De drie waterstofketels in Rozenburg



Bron: Gawalo (2019).

Stad aan 't Haringvliet (2019) - In de nieuwbouw-demonstratiewoning 'Innovathuis' wordt zonne-energie middels een elektrolyser omgezet in waterstof en lokaal opgeslagen in hogedrukopslag tanks. Met behulp van een brandstofcel wordt waterstof omgezet in elektriciteit en warmte. Daarnaast is ook een katalytische ketel¹⁷ aanwezig waarmee warmte uit waterstof wordt geproduceerd (Alles over Waterstof, 2019). Daarnaast is onderzocht of ook de overige 600 woningen in het dorp over kunnen op waterstof (Goeree-Overflakkee Nieuws, 2019).

Naast deze testlocaties zijn er nog veel meer steden met plannen, maar deze zijn geen van allen concreet. We beschrijven enkele van de meest spraakmakende plannen.

Leeds (UK) - In 2016 heeft Northern Gas Networks, de gasdistributeur van Noord-Engeland, een grote studie gedaan naar de mogelijkheid om in het gebied rond Leeds geheel over te stappen op waterstof voor de warmtevoorziening. Binnen het 'H21'-project gaan 3,7 miljoen woningen en gebouwen over op waterstof. De waterstof wordt centraal gemaakt uit aardgas, waarbij 85% van de vrijkomende CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen in lege gasvelden voor de kust. Seizoensopslag is voorzien door opslag van waterstof in zoutcavernes in het gebied. Een waterstofprijs van 0,10 £/kWh ofwel 1,02 €/m³ aardgas-equivalent wordt genoemd in het rapport (Leeds City Gate, 2016). Hierbij dient opgemerkt te worden dat er voor de UK enkel gerekend is met 5% btw en Nederland veel hogere belastingen heft op aardgas. Er zijn geen concrete plannen om het project uit te voeren.

Hoogeveen - Circa honderd nieuwbouwwoningen in de wijk Nijstad-Oost zullen voorzien worden van waterstofketels. Ruim 80 woningen zullen groene waterstof geleverd krijgen die wordt geproduceerd met een elektrolyser van Gasunie te Zuidwending (gemeente Veendam). Daarnaast zullen zestien woningen waterstof gaan gebruiken die wordt geproduceerd met eigen zonne-energie en een kleine elektrolyser op het gemeenschappelijke woonerf. In 2023 zou de wijk gereed moeten zijn. Er is ook een plan om als volgende stap de naastgelegen bestaande wijk Erflanden (1.100 woningen) over te zetten op waterstof (Het Financieele Dagblad, 2020).

Tokyo - De organisatie van de Olympische Spelen 2020 is voornemens om het olympische dorp te voorzien van elektriciteit uit waterstof. Ook zullen er vele waterstofauto's en bussen worden ingezet. Aangezien Japan zelf nauwelijks beschikt over fossiele brandstoffen en nog onvoldoende wind- en zonne-energie heeft om de benodigde hoeveelheden groene waterstof te produceren, wordt de waterstof geïmporteerd uit Australië. Daar wordt waterstof uit bruinkool gemaakt, waarbij per kilogram waterstof 33 kilogram CO₂ in de atmosfeer terecht komt, bijna vijf keer zoveel als bij de verbranding van aardgas voor dezelfde hoeveelheid energie (Seijlhouwer, 2019).

Het is duidelijk dat waterstof nog nergens op grote schaal wordt toegepast als definitieve oplossing. Alle projecten zijn nog beperkt tot (tijdelijke) testlocaties. De realisatie van het Leeds-project is nog erg onzeker en afhankelijk van flinke subsidies. De proefprojecten zijn nuttig om kennis en ervaring op te doen met productie, transport en gebruik van waterstof in de gebouwde omgeving. Deze ontwikkelfase moet worden doorlopen, voordat aan grootschalige toepassing gedacht kan worden.

¹⁷ In een katalytisch ketel wordt waterstof niet verbrand, maar reageert het op een katalysator. De reactie is hetzelfde, maar vindt plaats op lagere temperatuur en zonder vlam.



Wanneer zou waterstoflevering aan de gebouwde omgeving van Nijmegen haalbaar zijn?

Waterstof lijkt een aantrekkelijke optie om gebouwenverwarming te verduurzamen, omdat er geen nieuwe infrastructuur hoeft te worden aangelegd in de gemeente. Voorlopig komen er echter geen grote hoeveelheden blauwe of groene waterstof beschikbaar voor de gebouwde omgeving en waterstof is nu nog erg duur.

Waterstof kan alleen een rol spelen bij de verduurzaming van gebouwenverwarming als de waterstof blauw of groen is. Beide productieprocessen zijn CO₂-vrij, maar de toepassing van blauwe waterstof in de gebouwde omgeving kan als onwenselijk worden gezien, omdat het geproduceerd wordt uit aardgas en de vrijkomende CO₂ moet worden opgeslagen (zie de paragraaf 'Welke rol kan blauwe waterstof spelen?'). Om het gebruik van groene en (eventueel) blauwe waterstof op grote schaal te introduceren in Nederland moeten twee grote beperkingen worden aangepakt: de productie van de waterstof en de distributie naar de gebruikers.

Het lijkt niet realistisch dat CO₂-vrije waterstof in 2030 in grote hoeveelheden beschikbaar zal zijn voor de gebouwde omgeving en ook in 2050 zal er naar verwachting niet genoeg waterstof geproduceerd worden om aan de potentiële vraag te voldoen. De geproduceerde waterstof zal naar verwachting in eerste instantie door de industrie gebruikt gaan worden, als grondstof en voor de productie van hogetemperatuurwarmte bij processen waarvoor geen (goedkopere) duurzame alternatieven zijn. Daarnaast zijn er vooralsnog weinig concrete plannen om nieuwe installaties te bouwen voor de productie van blauwe waterstof. Wel zijn er plannen voor het afvangen van CO₂ bij de bestaande installaties. Beperkte bijmenging van waterstof in het huidige aardgasnet kan een manier zijn om op korte termijn waterstof voor gebouwenverwarming in te zetten zonder grote aanpassingen in de infrastructuur en installaties.

Voor wat betreft de distributie moet een parallel hoofdnet voor waterstof gereed worden gemaakt. Gasunie bereidt de ontwikkeling van een waterstof-'backbone' voor die in 2030 gereed zou moeten zijn. De backbone loopt langs Nijmegen en biedt daarmee de mogelijkheid waterstof te gebruiken in plaats van aardgas als brandstof voor back-up- en pieklast-installaties voor het warmtenet. Back-up-installaties liggen meestal nabij/aan het hoofdtransportnet van aardgas, wat als voordeel heeft dat er weinig tot geen aanpassingen aan het gasnet nodig zijn. Om mogelijk te maken dat waterstof als hoofdbrandstof in woonhuizen wordt gebruikt zijn grotere en complexere aanpassingen aan het gasdistributienet nodig en zullen huishoudens hun cv-ketel op aardgas moeten vervangen door een waterstof-cv-ketel.



Kaart van het aardgasnetwerk bij Nijmegen (rood = landelijk gastransportnet van hoogcalorisch gas; blauw = landelijk gastransport van laagcalorisch gas ('Groningengas'); groen = regionaal gasnet)



Bron: Gasunie Transport Services (2015).

Samenvattend zal waterstof naar verwachting niet op de korte termijn op grote schaal beschikbaar zijn voor de gebouwde omgeving van Nijmegen. Het is lastig te voorspellen wanneer dit wel het geval zal zijn, maar vanwege de eerdergenoemde punten zal dit waarschijnlijk niet voor 2035 zijn. De hoeveelheid waterstof die na 2035 beschikbaar is voor de gebouwde omgeving hangt af van de ontwikkeling van wind- en zonne-energie, eventuele import van waterstof en de vraag naar groene waterstof voor andere toepassingen.

Conclusie

Waterstof wordt soms gezien als de CO₂-vrije energiedrager van de toekomst die al onze huizen kan verwarmen zonder dure verbouwingen. Echter, vóór 2035 zal er naar verwachting nog niet voldoende CO₂-vrije waterstof beschikbaar komen voor de gebouwde omgeving en zal het nog te duur zijn. Momenteel wordt voornamelijk grijze waterstof voor de industrie geproduceerd.

Gasunie bereidt de ontwikkeling van een waterstof-‘backbone’ voor die in 2030 zou moeten zijn gerealiseerd. Dit waterstofnet zal langs Nijmegen lopen. Dit biedt de mogelijkheid om waterstof in te zetten voor gebouwenverwarming in Nijmegen. Met het gebruik van waterstof voor het warmtenet of het bijmengen van waterstof in het aardgasnet tot ca. 20% zijn geen aanpassingen aan het gasdistributienet of vervanging van cv-ketels nodig, in tegenstelling tot de levering van 100% waterstof aan huishoudens.

Of waterstof na 2035 wel grootschalig toegepast kan worden in de gebouwde omgeving is afhankelijk van de ontwikkeling van de kosten en energie-efficiëntie van elektrolyzers, productiehoeveelheden en mogelijke import van groene waterstof, de vraag naar waterstof voor andere toepassingen, de productiekosten van groene waterstof en de ombouw van (een deel van) het aardgasnet tot een waterstofnet. Zelfs als er enorm veel windparken op de Noordzee komen, zal in 2050 naar schatting hooguit 20% van de Nederlandse huishoudens van groene waterstof kunnen worden voorzien, omdat ook andere sectoren groene waterstof zullen gaan gebruiken. Er is dus landelijk, ook voor Nijmegen, onvoldoende duurzame waterstof beschikbaar om op de langere termijn geheel op duurzame waterstof over te schakelen. Wel zou waterstof dan een interessante optie kunnen zijn bij wijken waarvoor alternatieve warmtetechnieken, zoals warmtepompen of een warmtenet, relatief duur uitvallen.

Door de hoge kapitaalkosten van elektrolyzers en het beperkte ketenrendement zal de prijs van groene waterstof zonder belasting naar verwachting in de periode 2030-2050 tussen de 1,5 en 2,5 euro per kilogram bedragen, twee tot drie keer zo hoog als de huidige aardgasprijs. De onzekerheid over de ontwikkeling van de groene waterstofprijs is groot, en het is daarom nog niet te zeggen voor welk aandeel van de woningvoorraad groene waterstof een kosteneffectieve optie zal zijn.



Bronvermelding

Aardgasbuffer Zuidwending, 2019. *Hystock*. [Online]
Available at: <https://www.agbzw.nl/over-ons/hystock>

Air Liquide, 2016. *Benelux pijpleidingen*. [Online]
Available at: https://industrie.airliquide-benelux.com/sites/industry_benelux/files/air-liquide-benelux-pijpleidingen-nl.pdf

Air Products, 2018. *Air Products Holds Ribbon-Cutting for World-Class SMR at Covestro in Texas*. [Online]
Available at: <http://www.airproducts.com/Company/news-center/2018/06/0620-air-products-holds-ribbon-cutting-for-world-class-smr-at-covestro-in-texas.aspx>

Air Products, 2018. *Photo Library*. [Online]
Available at:
<http://prphotolibrary.airproducts.com/ImageDetail.aspx?id=4118fce3cf37474fa1cb98c7def4af80>
[Geopend 9 1 2020].

Alles over Waterstof, 2019. *Waterstofwoning Innovathuis officieel geopend*. [Online]
Available at: <https://allesoverwaterstof.nl/waterstofwoning-innovathuis-officieel-geopend/>
[Geopend 7 1 2020].

BBC, 2020. *Climate change hope for hydrogen fuel*. [Online]
Available at: <https://www.bbc.com/news/science-environment-50873047>

Berenschot, TNO, 2017. *CO₂-vrije waterstofproductie uit gas*, Utrecht: Berenschot.

CBS, 2018. *Aardgas en elektriciteit, gemiddelde prijzen van eindverbruikers*, Den Haag: CBS.

CBS, 2018. *Energiebalans*, sl: CBS.

CBS, 2019a. *Elektriciteitsbalans; aanbod en verbruik 1919-2018*. [Online]
Available at: <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/00377/table?fromstatweb>

CBS, 2019b. *Hernieuwbare energie in Nederland 2018*, Den Haag: CBS.

CE Delft, 2017. *Net voor de Toekomst*, sl: Netbeheer Nederland.

CE Delft, 2018. *Waterstofroutes Nederland - Blauw, groen en import*, Delft: CE Delft.

CertifHy, 2015. *Overview of the market segmentation for hydrogen across potential customer groups, based on key application areas*, Brussel: CertifHy.

Clean Technica, 2019. *Hydrogen In, Fossil Fuel Out For Leading Steelmaker, Eventually*. [Online]
Available at: <https://cleantechnica.com/2019/11/20/hydrogen-in-fossil-fuel-out-for-leading-steelmaker-eventually/>



- DNV GL, ECN, 2018. *Technologiebeoordeling groene waterstof*, sl: Enpuls.
- DNV-GL, 2019. *Hydrogen in the electricity value chain*, Arnhem: DNV-GL.
- EBN, 2018. *Energie in Nederland 2018*, Utrecht: EBN.
- ECN, 2017. *Notitie: indicatieve potentiële vraag naar waterstof*, Petten: ECN.
- Energiea, 2019. *Stedin neemt eerste cv-ketels op waterstof in gebruik*. [Online]
Available at: <https://energiea.nl/energiea-artikel/40081611/stedin-neemt-eerste-cv-ketels-op-waterstof-in-gebruik>
[Geopend 25 6 2019].
- Energiea, 2019. *Verplicht bijmenging waterstof in gasnet om vraag te creëren*. [Online]
Available at: <https://energiea.nl/energiea-artikel/40084655/verplicht-bijmenging-waterstof-in-gasnet-om-vraag-te-creeren>
- Frazer-Nash, 2018. *Domestic hydrogen appliances*, sl: sn
- Gasunie Transport Services, 2015. [Online]
Available at: <https://www.gasunietransportservices.nl/uploads/fckconnector/6327f456-1aad-401b-b974-1c5933077cdb/2989913628/Gastransportkaart%20GTS%202015%20final.pdf?lang=nl>
- Gasunie/Tennet, 2018. *Infrastructure Outlook 2050*, sl: sn
- Gasunie, 2019. *Waterstof, vraag en aanbod nu-2030*, Groningen: Gasunie.
- Gasunie, 2020. *Voorgestelde waterstofbackbone 2030*, 2030: Gasunie, persoonlijke communicatie.
- Gasworld, 2018. *Air Products officially opens SMR*. [Online]
Available at: <https://www.gasworld.com/air-products-officially-opens-smr/2014953.article>
- Gawalo, 2019. *Eerste cv-ketel op 100% waterstof geïnstalleerd*. [Online]
Available at: https://www.gawalo.nl/klimaattechniek/nieuws/2019/06/eerste-cv-ketel-op-100-waterstof-geinstalleerd-1017507?vakmedianet-approve-cookies=1&_ga=2.91647897.266683513.1574421710-836831880.1574421710
- Goeree-Overflakkee Nieuws, 2019. *Stad aan 't Haringvliet over op groene waterstof?*. [Online]
Available at: <https://goeree-overflakkee.nieuws.nl/gemeente/15916/stad-aan-t-haringvliet-over-op-groene-waterstof/>
[Geopend 3 2 2020].
- Havenbedrijf Rotterdam, 2019. *CCS-project Porthos stap dichterbij*. [Online]
Available at: <https://www.portofrotterdam.com/nl/nieuws-en-persberichten/ccs-project-porthos-stap-dichterbij>
- Het Financieele Dagblad, 2020. *Hoogeveen bouwt eerste waterstofwijk van Nederland*. 4 februari.
- IEA, 2018. *World Energy Outlook*, sl: sn



International Fire Protection, 2019. *Hydrogen and fire safety*. [Online]
Available at: https://ifpmag.mdmpublishing.com/hydrogen-and-fire-safety-detecting-the-most-flammable-element-on-earth/ifp77_mar19_detronics_mh_2/

IRENA, 2018. *Hydrogen from Renewable Power - Technology Outlook for the Energy Transition*, Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

Jones, D., Waheed, A. & Dunnill, C., 2018. Hydrogen-enriched natural gas as a domestic fuel: an analysis based on flash-back and blow-off limits for domestic natural gas appliances within the UK. *Sustainable Energy & Fuels*, 2018(4).

Kiwa N.V., 2018. *Toekomstbestendige gasdistributienetten*, Den Haag: Netbeheer Nederland.

Kiwa, 2012. *Waterstof in aardgas op Ameland*, Apeldoorn: Kiwa.

Leeds City Gate, 2016. *H21*, Leeds: Leeds City Gate.

Rijksoverheid, 2019. *Klimaatakkoord*, Den Haag: Rijksoverheid.

RVO, 2019. *Windparken op de Noordzee*. [Online]
Available at: <https://www.rvo.nl/subsidie-en-financieringswijzer/stimulering-duurzame-energieproductie-sde/categorie%C3%ABn/windenergie-op-zee-sde/windparken-op-de-noordzee>

Seijlhouwer, M., 2019. *Duurzaam bedrijfsleven*. [Online]
Available at: <https://www.duurzaambedrijfsleven.nl/logistiek/32989/waterstof-transport-schip>

Siemens, 2019. *Media Library - World's largest electrolysis system of its kind in Mainz, Germany*. [Online]
Available at:
<https://press.assets.siemens.com/content/siemens/press/ui/en/search.html#/search/images/electrolysis/sid:838158de-02b2-4562-9f03-42b6ca98f5f6/overview>
[Geopend 14 1 2020].

Stedin, 2019. *Factsheet Power-to-gas Rozenburg 2018-2023*. [Online]
Available at: <https://www.stedin.net/over-stedin/-/media/files/stedin/projecten/factsheet-power2gas.pdf?la=nl-nl>
[Geopend 7 1 2020].

Stedin, 2019. *Hoe verloopt de installatie van de slimme meter?*. [Online]
Available at: <https://www.stedin.net/slimme-meter/ik-krijg-een-slimme-meter>

Tennet, 2019. *Annual Market Review Update 2018*, Arnhem: Tennet.

TKI Nieuw Gas, 2018. *Contouren van een Routekaart Waterstof*, sl: Topsector Energie.

van As-Jacobsson, R. & Hellinga, C., 2020. Waterstof in de gebouwde omgeving. Issue nog niet gepubliceerd.

Voestalpine, 2019. *H2FUTURE: World's largest "green" hydrogen pilot facility successfully commences operation*. [Online]



Available at: <https://www.voestalpine.com/group/en/media/press-releases/2019-11-11-h2future-worlds-largest-green-hydrogen-pilot-facility-successfully-commences-operation/>
[Geopend 2019].

Waterstof Coalitie, 2018. *Vier pijlers onder een duurzame waterstofeconomie in 2030*.
[Online]

Available at: <https://storage.googleapis.com/planet4-netherlands-stateless/2018/11/61798793-coalitie-waterstof-vier-pijlers.pdf>

