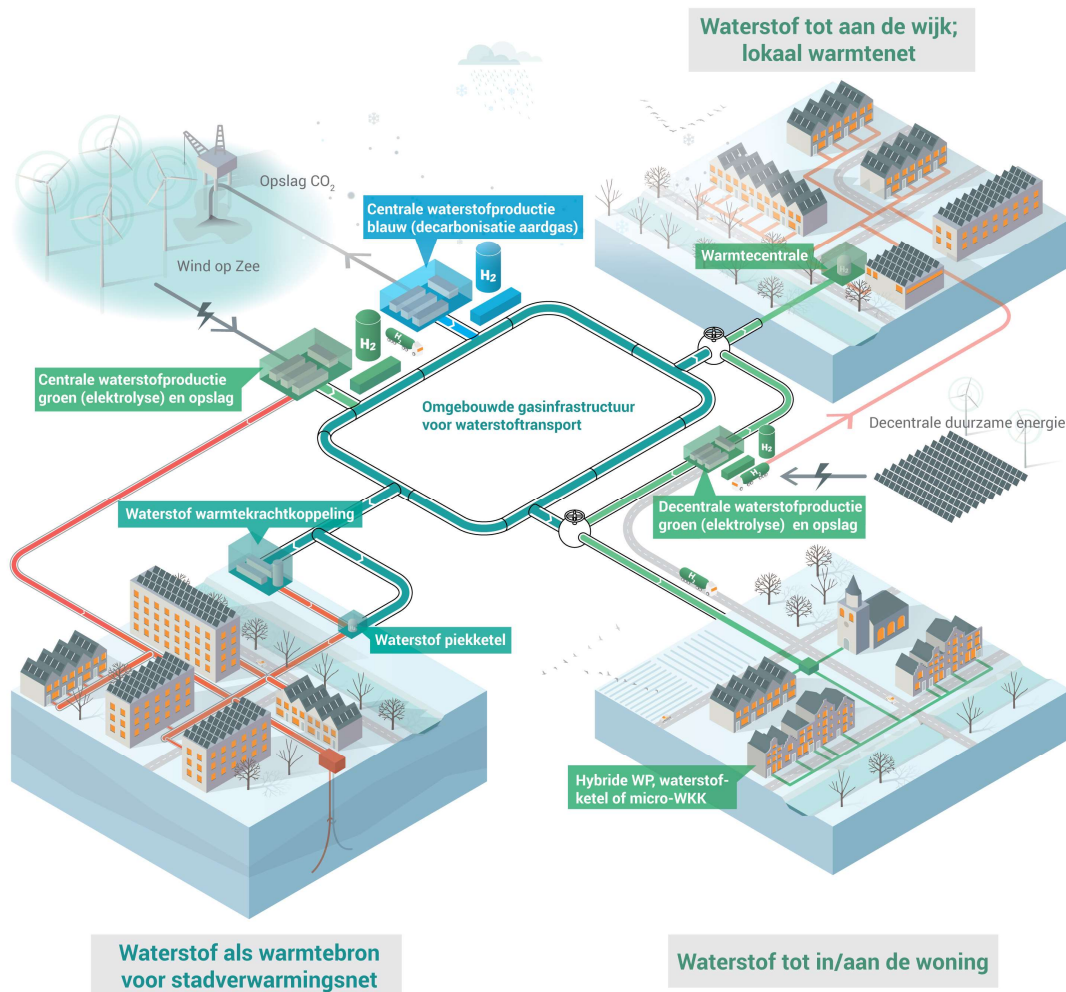


TNO-rapport

Waterstof als optie voor een klimaatneutrale warmtevoorziening in de bestaande bouw

Datum 2 maart 2020
Auteur(s) Marcel Weeda en Robin Niessink
Rapportnummer TNO 2020 M10028



Verantwoording

Dit project is uitgevoerd bij de afdeling EnergieTransitie Studies van TNO Energietransitie. Het is uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, met financiële ondersteuning van RVO. Projectleider van het project en hoofdauteur van dit document is Marcel Weeda. Het project is geregistreerd bij TNO onder de titel 'Optiedocument waterstof in de gebouwde omgeving' met projectnummer 060.42293.

Uitvoering

Het project is uitgevoerd door Marcel Weeda en Robin Niessink, Vroege versies van het document zijn intern van commentaar voorzien door Vera Rovers en Arjan Zwamborn. Figuren en visualisaties zijn verzorgd door Joost van der Waal van Studio Marco Vermeulen.

Externe klankbordgroep

Het project is begeleid door een externe klankbordgroep die een aantal versies van het onderhavige document van kritisch en constructief commentaar hebben voorzien. De auteurs spreken hierbij hun dank uit voor de bijdrage aan dit document van de klankbordgroep die bestond uit:

- Han Feenstra, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK)
- Martin Bottema, Ministerie van Binnenlandse Zaken
- Leo Brouwer, RVO / Expertise Centrum Warmte
- Albert van der Molen, Stedin
- Bert den Ouden, Berenschot.

Daarnaast waren er reviewbijdragen van Carla Robledo en Dinand Drankier (beide Ministerie van EZK) en Sanne de Boer (Stedin)

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Samenvatting

In 2050 moeten 7 miljoen woningen en 1 miljoen gebouwen van het aardgas af zijn. Er moet flink wat gebeuren. Volgens het onlangs gesloten Klimaatakkoord moeten in 2030 de eerste 1,5 miljoen bestaande woningen verduurzaamd zijn. Dat gaat buurt voor buurt en wijk voor wijk. De gemeentes werken nu aan een Transitievisie Warmte waarin een realistisch tijdspad geschetst moet worden waarop buurten en wijken van het aardgas af gaan. Deze Transitievisie Warmte moet eind 2021 gereed zijn. De gemeenten geven aan welke buurt wanneer aan de beurt is. Bovendien maakt de gemeente voor buurten die voor 2030 van het aardgas af gaan bekend wat het preferente alternatief is voor aardgas en welke energie-infrastructuur daar bij hoort.

Waterstof kan nodig zijn om 100% aardgasvrije wijken te realiseren.

Voor situaties in de bestaande gebouwde omgeving waarin het aardgasnet beschikbaar blijft voor gebruik, bevat het Klimaatakkoord de suggestie om ook de mogelijkheden voor de inzet van groen gas en klimaatneutrale waterstof te betrekken bij de opties voor verduurzaming van de warmtevoorziening. In tal van situaties in de bestaande bouw kan blijvend gebruik van het bestaande gasnet maatschappelijk gezien (voorlopig) namelijk de meest haalbare optie blijken te zijn.

Er zijn nog veel vragen rond inzet van waterstof in de gebouwde omgeving.

Met betrekking tot de toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving leven er nog vele vragen rond zaken als toepasbaarheid, veiligheid, beschikbaarheid, duurzaamheid en betaalbaarheid. Dit document gaat hier op in en beschrijft de huidige inzichten, mogelijkheden en stand van zaken rond inzet van waterstof voor verwarming in de bestaande gebouwde omgeving. De informatie is primair bedoeld ter ondersteuning van gemeenten, om een realistische inschatting te kunnen maken van de waarde van de optie voor de huidige versie van de Transitievisie Warmte.

Het gasnet is in principe geschikt voor waterstof.

Het voordeel van waterstof is dat het als gasvormige energiedrager, net als groen gas, een vrij directe vervanger kan zijn van aardgas, die gebruik kan maken van de huidige gasinfrastructuur. Uit onderzoek komt naar voren dat het gasnet qua toegepaste materialen en onderdelen in beginsel geschikt is voor waterstof. Nader onderzoek moet van geval tot geval uitwijzen of, en zo ja welke aanpassingen aan het gasnet nodig zijn.

Installaties voor productie van warmte met waterstof komen beschikbaar.

Er zijn diverse manieren waarop waterstof een rol kan spelen bij de invulling van de warmtevraag in de bestaande bouw. Waterstof kan worden geleverd op individueel woningniveau waar het kan worden ingezet in een hoogrendementsketel (HR-ketel) die geschikt is voor waterstof, of in een hybride warmtepomp. De eerste HR-ketels voor waterstof zijn reeds beschikbaar en worden op het ogenblik getest in de praktijk. Op termijn kan ook inzet in kleine warmtekrachtkoppeling (micro-WKK) installaties tot de mogelijkheden gaan behoren. Dit kan aantrekkelijk zijn vanwege de mogelijk hoge efficiency van de gecombineerde productie en benutting van warmte en elektriciteit. Ook zou productie van elektriciteit met waterstof bij de eindgebruiker kunnen bijdragen aan optimalisatie van investeringen die nodig zijn in uitbreiding van de elektriciteitsinfrastructuur als gevolg van elektrificatie. Naast inzet

op woningniveau kan inzet van waterstof ook plaatsvinden via collectieve warmtesystemen. Hierbij is onderscheid te maken tussen lokale systemen voor blokverwarming (o.a. appartementencomplexen en flats), en centrale stadsverwarmingsnetten. In dat laatste geval kan waterstof dienen als primaire brandstof in warmtecentrales, maar ook als brandstof in hulpwarmteketels die alleen bijspringen op momenten van piekvraag.

Waterstof is in principe net zo veilig te gebruiken als aardgas.

Waterstof is in principe niet gevaarlijker of minder gevaarlijk dan andere brandbare gassen. Van belang is dat wordt onderkend dat het een ander gas is dan aardgas, en dat het andere specifieke eigenschappen heeft. Deze eigenschappen zijn goed bekend waardoor passende maatregelen kunnen worden getroffen zodat het veilig kan worden gebruikt. Er zijn gunstige en minder gunstige eigenschappen ten opzichte van aardgas. Een belangrijk veiligheidspunt dat in het voordeel van waterstof spreekt is dat er bij verbranding van (pure) waterstof nooit het giftige koolmonoxide (CO) kan worden gevormd.

De beschikbaarheid van groene, duurzame waterstof is voorlopig beperkt.

Volledig duurzame waterstof op basis van elektrolyse van water vergt nog een aanzienlijke uitbouw van de capaciteit voor wind- en zonne-energie. In de tussentijd is er is ook nog veel grijze elektriciteit die kan worden verduurzaamd. Directe inzet van 'groene stroom' voor vervanging van 'grijze stroom' - indien mogelijk - leidt voorlopig tot meer CO₂-reductie dan vervanging van aardgas door groene waterstof. Projecten op het gebied van groene waterstof staan nu dan ook vooral in het teken van verdere ontwikkeling en opschaling van elektrolyse-technologie. Dit ter voorbereiding op veel grotere toepassing wanneer het einde in zicht komt van de mogelijkheden voor directe inzet van wind- en zonne-energie via elektriciteit. Zoals het er nu uitziet zal dit aan de orde zijn vanaf ongeveer 2030. Richting 2030 zal de uitbouw van duurzame energie en de productie van groene elektrolyse-waterstof dan ook steeds meer in samenhang met elkaar moeten plaatsvinden. Op termijn zal waarschijnlijk ook import van (wind- en zonne-energie in de vorm van) waterstof een rol gaan spelen.

'Klimaatneutrale inzet van aardgas' via waterstof kan een zinvolle transitie-optie vormen op weg naar volledig groene, duurzame waterstof.

Waterstof geproduceerd op basis van aardgas is niet duurzaam. Maar in combinatie met afvang en opslag van CO₂ kan het wel een significante bijdrage leveren aan reductie van CO₂-emissies. Deze koolstofarme inzet van aardgas kan vrijwel net zo klimaatneutraal zijn als duurzame waterstof, en de productie is op relatief korte termijn op grote schaal te realiseren. Ten opzichte van de geleidelijke ingroei van duurzame waterstof kan het een stevigere basis vormen om al op korte termijn een deel van de aardgasinfrastructuur aan te passen voor het transport en de opslag van waterstof. Daarmee kan het ook een beter perspectief bieden voor eindgebruikers om de overstap naar waterstof te maken. De beschikbaarheid van de optie is wel afhankelijk van de mogelijkheid om CO₂ op te slaan. Ook vereist het een centrale pijpleidinginfrastructuur voor transport van waterstof. Deze kan (ruim) voor 2030 worden gerealiseerd maar zal zich naar verwachting eerst richten op het verbinden van de grote industriële clusters in Nederland. Net als voor duurzame waterstof zal op termijn ook import van koolstofarme waterstof op basis van aardgas een rol kunnen gaan spelen.

De kosten van aanpassingen voor waterstof van het gasnet en in de woning zijn naar verwachting beperkt.

Naast beperkte meerkosten voor een HR-ketel die geschikt is voor waterstof, zullen er in de woning kosten zijn voor het controleren en het eventueel aanpassen van in pandig leidingwerk, en kosten voor eventuele waterstofsensoren. De exacte kosten zullen van geval tot geval verschillen afhankelijk van de aard en het aantal aanpassingen dat moet worden gedaan. Maar het zal naar verwachting gemiddeld geen duizenden euro's per woning worden. Ook de kosten voor aanpassing van het gasnet, inclusief vervanging van gasmeters indien nodig, lijken beperkt en worden geschat op een paar honderd euro per woning.

De productiekosten van waterstof zijn vergelijkbaar met de prijs van aardgas voor kleinverbruikers inclusief netwerkkosten en belastingen.

De productiekosten van waterstof zijn afhankelijk van de productiemethode van waterstof. Naar verwachting zullen in 2030 de kosten voor productie van groene waterstof nog significant hoger zijn dan die van waterstof op basis van aardgas met afvang en opslag van CO₂. De productiekosten voor waterstof uit aardgas met CCS blijken vergelijkbaar met de prijs van aardgas exclusief netwerkkosten en heffingen, terwijl de productiekosten voor groene waterstof vergelijkbaar zijn met de integrale prijs die kleinverbruikers betalen voor hun aardgas. Hoe deze productiekosten zich vertalen naar een prijs voor waterstof is nog niet duidelijk. Dit zal mede afhangen van de netwerkkosten en de heffingen die van toepassing gaan worden op waterstof, en van de prijsvorming in de markt als die gaat ontstaan.

Het is waarschijnlijk dat de prijs van waterstof hoger zal liggen dan die voor aardgas, maar wanneer een toename in de prijs wordt gecompenseerd door een evenredige afname in de warmtevraag door toepassing van isolatie, dan kunnen de brandstofkosten voor bewoners per saldo gelijk blijven. Ook een introductie via een bijmengscenario kan mogelijkheden bieden om stijging van brandstofkosten te beperken. Hierbij past verder de kanttekening dat een vergelijking met aardgas weliswaar inzichtelijk is, maar ook van beperkte waarde omdat aardgas voor de toekomst geen optie meer is en dus ook niet meer de referentie is. Wat betreft kosten en waarde moet waterstof zo integraal mogelijk worden vergeleken met de andere alternatieven voor aardgasvrije wijken.

Grootschalige inzet van waterstof is nog niet te verwachten op korte termijn.

Ondanks de relatief gunstige perspectieven voor een bijdrage van waterstof aan de realisatie van aardgasvrije wijken is grootschalige inzet van waterstof in de bestaande bouw nog niet te verwachten op korte termijn. Op het ogenblik is er nog amper klimaatneutrale waterstof beschikbaar, en het vooruitzicht is dat de beschikbaarheid voorlopig beperkt blijft, met name van (hernieuwbare) groene waterstof. Daarnaast is er tot nu toe vooral ervaring opgedaan met bijmengen van waterstof in aardgas, maar is er nog onvoldoende relevante ervaring met inzet van pure waterstof als warmte-optie voor de gebouwde omgeving. Als gevolg hiervan ontbreekt het nog aan allerlei normstelling en regelgeving die nodig is. Voor waterstof wordt er de komende jaren (2020-2025) dan ook vooral ingezet op een beperkt aantal pilot- en demo-projecten om de nodige ervaring op te doen over hoe waterstof maximaal veilig en efficiënt kan worden toegepast.

In het voorjaar van 2020 wordt de kabinetsvisie op waterstof gepresenteerd. Daarna zal de voorbereiding beginnen van een nationaal waterstofprogramma, zoals afgesproken in het Klimaatakkoord. De gebouwde omgeving zal onderdeel

uitmaken van dit programma. In dat kader onderzoeken de Rijksoverheid en de sector thans hoe waterstof-gerelateerde pilots en demo's in de (bestaande) gebouwde omgeving gestimuleerd kunnen worden, en hoe hiervoor ruimte te creëren in wet- en regelgeving. Figuur 1 geeft een overzicht van zaken en ontwikkelingen die van belang zijn met betrekking tot de mogelijke rol van waterstof in het realiseren van aardgasvrije wijken in de bestaande bouw.



Figuur 1 Doelen en mijlpalen voor aardgasvrije wijken en verwachtingen met betrekking tot de rol die waterstof daar in kan spelen

Waterstof moet niet apart maar in samenhang met andere maatregelen worden gezien.

Er kan een rol zijn voor waterstof (en groen gas) in verwarming van de bestaande gebouwde omgeving wanneer alternatieven als 'all-electric' en warmtenetten tekortschieten in de mate en snelheid waarin die kunnen bijdragen aan het tijdig realiseren van aardgasvrije wijken tegen acceptabele kosten. Hierbij is waterstof niet noodzakelijkerwijs het alternatief, maar kan het ook worden ingezet juist ter ondersteuning van andere opties zoals warmtenetten en warmtepompen, met name voor invulling van de piekvraag. Een behoefte aan groene waterstof vergt echter duurzame energie die wordt gewonnen via wind- en zonneparken die een aanzienlijke ruimtelijke impact hebben. Verder vergt het installaties voor elektrolyse van water en faciliteiten voor buffering en opslag van waterstof om verschillen in profielen van zon- en windaanbod en vraag naar warmte op elkaar af te kunnen stemmen. Een eventuele transitie waarin waterstof uit aardgas ook een rol speelt vergt daarnaast extra aardgas ten opzichte van directe inzet van aardgas, en infrastructuur voor transport en opslag van CO₂. In alle gevallen geldt dat hoe minder er nodig is hoe beter. Dit betekent dat, ook als er een duidelijke rol is voor waterstof bij het realiseren van 100% aardgasvrije wijken voor 2050, het belang om de warmtevraag zoveel mogelijk te reduceren door isolatie, en het zoveel mogelijk direct inzetten van elektriciteit voor verwarming, bij voorkeur via een warmtepomp, onverminderd groot is.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	3
1	Aanleiding voor inzet van waterstof in de bestaande bouw	9
2	Waarom is er zo veel aandacht voor waterstof?	10
3	Wat is waterstof precies? Enkele belangrijke basiskenmerken	11
4	Opties voor inzet van waterstof als bron voor warmte in de bestaande bouw	13
5	Concepten voor levering van waterstof	17
6	Geschiktheid van het huidige aardgasnet voor waterstof	19
7	Huidige wet- en regelgeving voor waterstof in het aardgasnet.....	21
8	Welke veiligheidsaspecten zijn van belang bij waterstof?.....	22
9	Productie en duurzaamheid van waterstof	25
10	Wat zijn de kosten van waterstof?.....	28
11	Wat betekent het voor de betrokken partijen?	31
12	Stand van zaken, en verwachtingen voor de komende jaren	34
	Referenties	37
	Bijlage(n)	
	A Indicatieve berekeningen voor een voorbeeldwijk	

1 Aanleiding voor inzet van waterstof in de bestaande bouw

In 2050 moeten 7 miljoen woningen en 1 miljoen gebouwen van het aardgas af zijn. Er moet flink wat gebeuren. Volgens het onlangs gesloten Klimaatakkoord (Rijksoverheid, 2019) moeten in 2030 de eerste 1,5 miljoen bestaande woningen verduurzaamd zijn. Dat gaat buurt voor buurt en wijk voor wijk. De gemeentes werken nu aan een Transitievisie Warmte waarin een realistisch tijdspad geschetst moet worden waarop buurten en wijken van het aardgas af gaan. Deze Transitievisie Warmte moet eind 2021 gereed zijn. De gemeenten geven aan welke buurt wanneer aan de beurt is. Bovendien maakt de gemeente voor buurten die voor 2030 van het aardgas af gaan bekend wat het preferente alternatief is voor aardgas en welke energie-infrastructuur daar bij hoort.

Dit document bevat informatie voor gemeenten over de optie 'vervanging van aardgas door waterstof voor verwarmingsdoeleinden in woningen en gebouwen'. Het geeft achtergrondinformatie met betrekking tot de mogelijkheden en de stand van zaken rond de optie ter ondersteuning van het maken van de Transitievisie Warmte.

Zoals de term 'vervanging' impliceert is dit document met name van belang voor de bestaande bouw waarin woningen en gebouwen een gasaansluiting hebben. Het aanpassen van de warmtehuishouding in de bestaande bouw is een proces dat niet in een aantal jaar zal zijn gerealiseerd. Hierbij is er veel aandacht voor isoleren en renoveren van woningen om de warmtevraag omlaag te brengen waardoor het mogelijk wordt om over te schakelen op een lage temperatuur warmtevoorziening met bijvoorbeeld elektrische warmtepompen (elektrificatie) en (lage temperatuur) warmtenetten. Daarnaast kan nu al worden ingezet op spaarzamer gebruik van aardgas (en later waterstof) door gebruik te maken van hybride warmtepompen.

Voor de situaties waarin het aardgasnet beschikbaar blijft voor gebruik, bevat het Klimaatakkoord (Rijksoverheid, 2019) de suggestie om ook de mogelijkheden voor de inzet van groen gas en van klimaatneutrale waterstof te betrekken bij de opties voor verduurzaming van de warmtevoorziening. In tal van situaties kan blijvend gebruik van het bestaande gasnet vanuit het perspectief van maatschappelijk kosten en draagvlak (voorlopig) namelijk de beste optie blijken te zijn.

Grootschalige inzet van de opties groen gas en klimaatneutrale waterstof mag op korte termijn echter nog niet worden verwacht. De beschikbaarheid van de gassen is nog beperkt, en met name voor toepassing van pure waterstof is er nog onvoldoende relevante ervaring. Voor waterstof wordt er de komende jaren dan ook vooral ingezet op projecten om de nodige ervaring op te doen over hoe waterstof maximaal veilig en efficiënt kan worden toegepast. In dit verband zullen de Rijksoverheid en de sector onderzoeken hoe waterstof-gerelateerde pilots en demo's in de gebouwde omgeving gestimuleerd kunnen worden, en hoe hiervoor ruimte te creëren in wet- en regelgeving.

2 Waarom is er zo veel aandacht voor waterstof?

In de energietransitie zal er een verschuiving optreden van de inzet van fossiele bronnen zoals steenkolen, aardolie en aardgas, naar hernieuwbare bronnen zoals zon, wind, biomassa, geothermie en waterkracht. Van deze bronnen is zonne-energie veruit de grootste. Op wereldschaal gezien volgt windenergie op ruime afstand als een na grootste bron, maar in Nederland is daar naar verhouding een relatief groot potentieel van aanwezig, met name op de Noordzee. Het potentieel aan biomassa in Nederland is beperkt. Daarnaast is er een toenemende discussie over de duurzaamheid van grootschalige inzet van biomassa als energiebron en het potentieel voor import van duurzame biomassa. Het potentieel aan waterkracht wordt al grotendeels benut, zeker in Europa. Een duurzame energievoorziening (in Nederland) zal daarom in hoge mate afhankelijk zijn van wind- en zonne-energie.

De inzet van wind- en zonne-energie verloopt op het ogenblik voornamelijk via elektriciteit. Het aandeel elektriciteitsverbruik dat direct kan worden ingevuld met elektriciteit van deze bronnen kent echter beperkingen die samenhangen met het variabele en onzekere aanbod in de tijd. Opslag op grote schaal zal nodig zijn, met name om langere periodes met weinig aanbod in de winter te kunnen overbruggen. Daarnaast zijn bij sterke uitbreiding van capaciteit aan wind en zon knelpunten en beperkingen in (uitbreiding van) transportcapaciteit van elektriciteit te verwachten.

Tegelijkertijd is niet alle energievraag te elektrificeren. Ook is het potentieel aan energie van zon en wind veel groter dan onze behoefte aan elektriciteit. Dit geldt zelfs bij een sterke toename van de elektriciteitsvraag door bijvoorbeeld elektrische auto's en warmtepompen. Om verschillende redenen is er daarom behoefte om wind- en zonne-energie ook op een andere manier beschikbaar te maken voor de energievoorziening dan via elektriciteit. Dit is waar de potentie van waterstof ligt.

Het splitsen van water in waterstof en zuurstof via elektrolyse, met behulp van duurzame elektriciteit van zon en wind, levert een mechanisme om de energie van die bronnen vast te leggen in een moleculaire vorm; het gas waterstof (TKI NG, 2018). Dit heeft een aantal pluspunten:

- In tegenstelling tot elektriciteit kan waterstof relatief eenvoudig in grote hoeveelheden worden opgeslagen. Op deze manier wordt het aanbod van hernieuwbare energie ontkoppeld van de vraag en kan de energie stuurbaar, naar behoefte worden ingezet.
- Transport van gas is daarnaast goedkoper en eenvoudiger in grote hoeveelheden te realiseren dan transport van elektriciteit. De conversie naar waterstof biedt daarmee ook een optie om noodzakelijke investeringen in de uitbreiding van de elektriciteitsinfrastructuur te optimaliseren, zeker als er al een uitgebreide gasinfrastructuur aanwezig die met beperkte middelen is aan te passen voor transport van waterstof.
- Tot slot kan met waterstof niet alleen weer elektriciteit worden geproduceerd (de opslagfunctie). Het kan ook breed worden ingezet als brandstof voor energietoepassingen die niet, of voorlopig nog niet met elektriciteit zijn in te vullen. En uiteindelijk zijn ook grote hoeveelheden waterstof nodig als grondstof voor nieuwe industriële processen waarmee ook de inzet van de koolwaterstofbronnen aardolie en aardgas vervangen kunnen worden als basis voor vloeibare brandstoffen, en als grondstof voor chemische producten en materialen.

3 Wat is waterstof precies? Enkele belangrijke basiskenmerken

Waterstof is het meest voorkomende element op aarde. Het is het eerste element in het periodiek systeem der elementen, en daarmee het lichtste element dat we kennen. Het wordt aangeduid met de letter 'H'. Waterstof is onder normale omstandigheden altijd gebonden aan een ander waterstofatoom (H_2 dus) en is dan een gas. De meeste waterstofatomen zijn in de vrije natuur gebonden aan andere elementen, vooral aan zuurstof (denk aan water, H_2O) en aan koolstof (denk aan methaan, CH_4 , het hoofdbestanddeel van aardgas).

Waterstofgas komt bijna niet vrij in de natuur voor en moet worden geproduceerd. Dit kan door het splitsen van water, of door het ontleden van koolwaterstoffen zoals methaan. Het is dus geen energiebron (primaire energiedrager), maar een (secundaire) energiedrager, net als elektriciteit. De energie-inhoud van waterstof is per eenheid volume ongeveer een derde van die van Gronings aardgas (Tabel 1). Dit betekent dat je voor dezelfde hoeveelheid energie ongeveer drie maal zo veel volume waterstof nodig hebt als van Gronings aardgas.

Tabel 1 De verbrandingswaarden van waterstof en Gronings aardgas

Type gas	Dimensie	Calorische onderwaarde, of Lower Heating Value (LHV)	Calorische bovenwaarde, of Higher Heating Value (HHV)
Waterstof	MJ/m ³	10,8	12,7
Gronings aardgas	MJ/m ³	31,7	35,2

Waterstof is in principe niet gevaarlijker of minder gevaarlijk dan andere brandbare gassen. Belangrijk is dat wordt onderkend dat het een ander gas is dan aardgas met specifieke eigenschappen zodat passende maatregelen kunnen worden getroffen om het veilig te kunnen gebruiken (zie hoofdstuk 8).

Waterstof is een kleurloos en geurloos gas. Voor inzet in woningen en gebouwen moet er, net als bij aardgas, worden nagedacht over het toevoegen van een geschikte geurstof, of een andere detectiemethode, om lekkages tijdig op te kunnen merken. Waterstof is niet giftig, en is van zichzelf geen broeikasgas. Dit laatste in tegenstelling tot methaan dat een 28 maal sterker broeikasgas is dan CO_2 .

Waterstof is een zeer brandbaar gas. De ontstekingsenergie voor waterstof ligt bijvoorbeeld ruim een factor 10 lager dan voor aardgas (Tabel 2). Tegelijk moet hierbij worden bedacht dat de hoeveelheid energie die vrijkomt bij ontlading van de meeste vormen van statische elektriciteit ook al ruimschoots voldoende is om een brandbaar mengsel van aardgas in lucht tot ontbranding te brengen.¹

Naast de hogere brandbaarheid is de bandbreedte van het aandeel waterstof in lucht dat een brandbaar mengsel oplevert (brandbaarheidsgrenzen) ook veel groter dan voor aardgas. Daar staat tegenover dat de dichtheid van waterstof veel geringer is dan van aardgas en 14 maal kleiner is dan lucht. Dit heeft tot gevolg dat waterstof snel stijgt en mengt in lucht waardoor er bij beperkte lekkages niet snel een brandbaar mengsel zal ontstaan.

¹ <https://atexevent.nl/wp-content/uploads/2017/12/5.-Statische-elektriciteit.pdf>

Tabel 2 Vergelijking van eigenschappen tussen waterstof en aardgas

Parameter	Dimensie	Waterstof	Aardgas
Brandbaarheid-/explosiegrenzen ^{a)}	Vol%	4 – 75	5 – 16
Ontstekingsenergie	mJ	0,02	0,28
Dichtheid	kg/m ³	0,09 ^{b)}	0,83

^{a)} Brandbaarheidsgrenzen, ontstekingsgrenzen, ontvlambaarheidsgrenzen en explosiegrenzen worden door elkaar heen gebruikt. Bij lage concentraties ontstaat een mengsel dat tot ontbranding kan komen. Naarmate de concentratie hoger wordt neemt de kans op explosieve ontbranding toe.

^{b)} De dichtheid van lucht is 1,29 kg/m³

4 Opties voor inzet van waterstof als bron voor warmte in de bestaande bouw

Huidige situatie voor aardgas in de bestaande bouw

Uit recente cijfers (PBL, 2019; RVO, 2019) blijkt dat ruim 93% van de woningen in Nederland direct afhankelijk is van aardgas voor de warmtevoorziening door middel van een aardgasaansluiting of via een aansluiting op een systeem van blok- of wijkverwarming (m.n. gestapelde bouw). Het gemiddeld verbruik bedraagt ongeveer 1340 kubieke meter (m³) aardgas per woning (Tabel 3). Van de aardgasvrije woningen was ongeveer 4,5% aangesloten op een stadsverwarmingsnet en 2,2% uitgerust met een elektrische warmtepomp.

Tabel 3 Huidig aantal woningen dat direct afhankelijk is van aardgas voor ruimteverwarming en gemiddeld aardgasverbruik per woning

Gegevens 2018	Dimensie	Waarde
Totaal aan woningen	miljoen	7,8
Bewoonde woningen	miljoen	7,4
Aandeel woningen afhankelijk van aardgas	%	93,3
Totale aardgasverbruik huishoudens	PJ/jaar	295
Totale aardgasverbruik huishoudens	miljard m ³ /jaar	9,3
Gemiddeld aardgasverbruik per woning	m ³ /jaar	1340

Het aandeel aardgas is dus nog zeer groot, en de afhankelijkheid is zelfs groter dan uit Tabel 3 blijkt. Dit komt omdat aardgas ook de bron vormt voor een belangrijk deel van de warmte die wordt geleverd via de stadsverwarmingsnetten. Die warmte is afkomstig van elektriciteitscentrales op aardgas, en van aardgasgestookte hulpwarmteketels.

De warmtetransitie biedt perspectief voor een rol van waterstof

De doelstelling voor de gebouwde omgeving is om in 2050 de CO₂-emissies in deze sector terug te hebben gebracht tot (bijna) nul. Gezien de huidige dominantie van aardgas is dit een enorme opgave. Alle opties die daarvoor in beeld zijn kennen de nodige uitdagingen en onzekerheden over de mate waarin ze een bijdrage kunnen leveren in de resterende tijd, binnen de randvoorwaarden van betaalbaarheid, betrouwbaarheid, acceptatie van bewoners, en praktische realiseerbaarheid. Het is daarom te vroeg om bij voorbaat opties uit te sluiten.

Naast een 'all-electric' warmtevoorziening en levering van (duurzame) warmte via warmtenetten kan ook vervanging van aardgas door klimaatneutraal gas - groen gas, waterstof of een combinatie daarvan - een belangrijke bijdrage leveren aan realisatie van de doelstelling. Hierbij is het van belang te onderkennen dat tot 2050 het primaire doel is om de CO₂-emissies tot (bijna) nul te reduceren, maar dat de energietransitie daarna nog gewoon door zal gaan.

Waterstof onderscheidt zich, net als de optie 'groen gas', van 'all-electric' opties en warmtenetten, doordat het als gasvormige energiedrager een vrij directe vervanger kan zijn van aardgas, die gebruik kan maken van de huidige gasinfrastructuur. Het vergt slechts beperkte aanpassingen en geen geheel nieuwe infrastructuur zoals in

het geval van warmtenetten. Een ander belangrijk aspect is dat waterstof (net als aardgas) geschikt is voor zowel situaties die hoge temperatuur verwarming (HTV) vereisen als situaties waar midden- en lage temperatuur verwarming (LTV) volstaat. 'All-electric' verwarming met een warmtepomp is een LTV-systeem. Dit betekent dat voor 'all-electric' verwarming met een warmtepomp een hoog isolatieniveau direct vanaf de eerste dag nodig is. Hoewel isoleren niet minder belangrijk is bij waterstof, is in dat geval een hoog isolatieniveau niet direct nodig en kan isolatie in een eigen tempo plaatsvinden. Dit kan van belang zijn voor het creëren van draagvlak voor de veranderingen die nodig zijn om van het aardgas af te komen.

Er zijn diverse manieren waarop waterstof een rol kan spelen bij de invulling van de warmtevraag in de bestaande bouw. Inzet kan plaatsvinden op individueel woningniveau en via collectieve warmtesystemen (Berenschot, 2018).

Inzet van waterstof op woningniveau

Bij inzet op individueel woningniveau wordt waterstof via het gasdistributienet tot in, of bij woningen gebracht. Daar kan het worden ingezet in een hoogrendementsketel (HR-ketel) die geschikt is voor waterstof, of in een hybride warmtepomp. In dat laatste geval wordt de basis warmtebehoefte gedekt met een elektrische warmtepomp, en wordt de piekvraag ingevuld met een HR-ketel op waterstof. Op het ogenblik wordt er in Nederland gewerkt aan diverse projecten met inzet van waterstof op woningniveau zoals bijvoorbeeld in Stad aan 't Haringvliet (Stedin, 2019), Hoogeveen en in Lochem.^{2, 3, 4}

Onlangs is op Goeree-Overflakkee het Innovathuis geopend.⁵ Dit is een zelfvoorzienende woning met een energiesysteem dat overaanbod van zonne-energie in de zomer vastlegt in de vorm van waterstof. Dit wordt in de winter dan weer gebruikt voor verwarming en (aanvullende) productie van elektriciteit. Er zijn echter nog geen praktijkervaringen beschikbaar. Ook elders is er nog geen praktijkervaring opgedaan met inzet van pure waterstof in woningen. Wel loopt er in het Verenigd Koninkrijk een uitgebreid onderzoeksprogramma om uit te zoeken hoe, en onder welke condities dit veilig, betrouwbaar en zo efficiënt mogelijk zou kunnen.⁶ De uitkomsten van het programma zullen een belangrijke basis vormen voor een besluit om al dan niet een volgende fase van praktijkprojecten in te gaan.

Waterstof kan ook worden ingezet in een kleine warmtekrachtkoppeling-installatie, zogenaamde micro-WKK installaties. Het gebruik van micro-WKK-systemen kan aantrekkelijk zijn vanwege de mogelijk hoge efficiëntie van gecombineerde benutting van warmte en elektriciteit. Ook kan productie van elektriciteit met waterstof bij de eindgebruiker bijdragen aan optimalisatie van de behoefte aan uitbreiding van infrastructuur voor transport en distributie van elektriciteit. Micro-WKK systemen kunnen gebaseerd zijn op verschillende technologieën, zoals een brandstofcel, een gasmotor of een stirlingmotor. Elke technologie produceert elektriciteit en warmte in een andere verhouding, en produceert warmte ook op een andere temperatuur. Wat optimaal is hangt af van de warmtebehoefte en de samenhang met eigen productie van elektriciteit door zonnepanelen. In Europa, met

² <https://www.stedin.net/over-stedin/pers-en-media/persberichten/gasnet-van-stad-aan-t-haringvliet-kan-over-op-groene-waterstof>

³ <https://www.hoogeveen.nl/waterstof>

⁴ <https://www.lochemsnieuws.nl/2019/09/14/pilot-waterstof-vervangt-aardgas-in-wijk-berkeloord/>

⁵ <https://paotm.nl/nl/nieuws/eerste-waterstofwoning-van-nederland/>

⁶ <https://www.hy4heat.info/>

name in Duitsland, en Japan is al wel enige ervaring opgedaan met aardgasgestookte micro-WKK systemen op basis van brandstofcellen.^{7, 8} De systemen zijn nog wel duur waarbij schattingen voor huidige systemen uiteenlopen van €6.600 - €8.000 in Japan tot €10.000 - €25.000 in Europa. Er is nog geen ervaring met systemen op waterstof, en de mogelijkheden voor optimalisatie van wijkconcepten met combinaties van bijvoorbeeld micro-WKK, warmtepompen, en zon-PV en zon-thermische systemen.

Waterstof hoeft aardgas niet direct volledig te vervangen, maar zou ook via een bijmengscenario kunnen worden geïntroduceerd. Moderne HR-ketels en gasfornuizen kunnen naar schatting tot 20% bijmenging van waterstof op volumebasis aan zonder problemen te geven of veiligheidsrisico's te veroorzaken. Dit kan echter niet zomaar bij oude apparaten zoals oude keukengeisers. Dit betekent dat er inzicht moet zijn in waar zich precies welk gasapparaat bevindt voordat bijmenging kan plaatsvinden. Over een percentage hoger dan de huidige wettelijk toegestane waarde (zie hoofdstuk 7), dat onder alle omstandigheden zonder problemen kan worden toegepast, is daarnaast nog geen eenduidigheid.

In Nederland heeft een succesvol project plaatsgevonden met bijmengen op Ameland (Kiwa, 2012). Binnen de opzet van dat project is gevonden dat bijmengen tot 20% waterstof voor de leidingen, de apparaten en de gebruikers geen enkel probleem was. Vergelijkbare resultaten zijn en worden elders gevonden. In Duitsland heeft een project gelopen voor bijmengen in distributienetten in Klanxbüll (Schleswig-Holstein).⁹ Er lopen thans projecten in het stadsdeel Mainz-Ebersheim (Energiepark Mainz, Rheinland-Palts), en in Brunsbüttel (Schleswig-Holstein), en er worden voorbereidende testen uitgevoerd voor een project in Schoppsdorf (Sachsen-Anhalt).^{10, 11, 12} In Frankrijk wordt op het ogenblik praktijkervaring opgedaan in een woonwijk in Duinkerken in het kader van het GRHYD-project.¹³ De resultaten van dit project zouden mede een basis moeten vormen om tot verruiming te komen van het (bijmeng)percentage waterstof in aardgas in de (Franse) regelgeving.

Zowel bij volledige omschakeling naar waterstof als in het geval van bijmengen zal er een uitgebreide check moeten plaatsvinden in de woningen en de gebouwen die het betreft. Om bij mensen achter de meter te kunnen kijken is aanpassing van de privacy-regelgeving nodig.

Inzet van waterstof via collectieve warmtesystemen

Bij inzet via collectieve systemen is er onderscheid te maken tussen 'lokale' systemen voor blok- en wijkverwarming, en 'centrale' stadsverwarmingsnetten. In het eerste geval betreft het voornamelijk de inzet van waterstof, puur of in bijgemengde vorm, in een grote verwarmingsketel in het centrale ketelhuis van

⁷ <https://fuelcellworks.com/news/fcw-exclusive-tokyo-fuel-cell-expo-2019-300000-ene-farms/>

⁸ <http://enefield.eu/>

⁹ <https://www.hansewerk.com/de/ueber-uns/innovationen/forschungsprojekte/wasserstoff-einspeisung.html>

¹⁰ <https://www.energiepark-mainz.de/aktuelles/>

¹¹ <https://new4-0.erneuerbare-energien-hamburg.de/de/new-40-blog/details/wasserstoff-in-brunsbuettel-tankstelle-einspeisung-und-e-mobility.html>

¹² <https://www.avacon.de/de/ueber-uns/newsroom/pressemitteilungen/erstmalig-bis-zu-20-prozent-wasserstoff-in-einem-deutschen-gasve.html>

¹³ <https://www.engie.com/en/businesses/gas/hydrogen/power-to-gas/the-grhyd-demonstration-project>

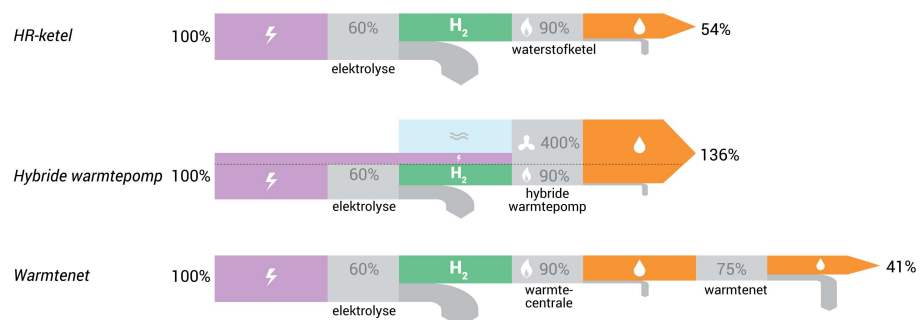
flats, appartementencomplexen en gebouwen. Hierbinnen vindt distributie van warmte plaats via een intern warmtenet. Een gezamenlijke warmteproductie zou ook op wijkniveau kunnen waarbij een wijkcentrale op waterstof een lokaal warmtenet van warmte voorziet. Dit vergt echter wel een dubbele ombouw: van aardgas naar warmtenet, en aanpassing van het aardgasnet tot de wijkcentrale. Net als bij woningen kan in het ketelhuis of de wijkcentrale ook een hybride of een gasgestookte warmtepomp worden gebruikt in plaats van een verwarmingsketel. En ook hier kan worden gedacht aan een WKK-systeem. In dit geval een mini-WKK. De capaciteit en de inzet van een dergelijke installatie zal moeten worden bekeken in samenhang met lokale productie van elektriciteit uit zon en wind.

In het tweede geval kan waterstof, in plaats van aardgas, een rol spelen als bron voor de warmte waar stadsverwarmingsnetten in moeten voorzien. Dit kan als primaire brandstof in warmtecentrales, maar ook als brandstof in hulpwarmteketels die alleen bijspringen op momenten van piekvraag. Ondanks toenemende aandacht voor de inzet van industriële restwarmte en geothermische warmte, zal er ook in de toekomst waarschijnlijk behoefte zijn aan inzet van gas in de warmtevoorziening van stadsverwarmingsnetten, zeker bij sterke uitbreiding van deze netten.

Naast directe inzet van aardgas, vormt aardgas op het ogenblik ook indirect nog een bron voor stadsverwarmingsnetten via inzet van restwarmte van aardgas gestookte elektriciteitscentrales. Er zal een behoefte aan stuurbaar inzetbare centrales blijven om altijd in de vraag naar elektriciteit te kunnen voorzien, ook in periodes van weinig aanbod van zon en wind. Hierbij is vervanging van aardgas door waterstof een serieuze optie om nul-emissie elektriciteitscentrales te realiseren, zodat er ook via deze weg nog een rol voor waterstof kan zijn.

Bepalen van de gunstigste warmte-optie vereist een integrale afweging

Er zijn dus vele manieren waarop waterstof een rol kan spelen. Een belangrijk punt daarbij is het soms beperkte rendement van de inzet van duurzame energie via waterstof zoals Figuur 2 illustreert. Niettemin kan het gelet op alle randvoorwaarden die er zijn (draagvlak), in samenhang met andere opties (zoals hybride en gebruik restwarmte), en vanuit een perspectief op het totale energiesysteem (maximale inpassing wind- en zonne-energie, ook via import, en beschikbare infrastructuur), in diverse situaties vooralsnog toch de meest haalbare optie blijken te zijn.



Figuur 2 Indicatie van het ketenrendement van inzet van waterstof die is geproduceerd met duurzame energie, in een HR-ketel, een hybride warmtepomp en een warmtenet. (Bij LT- en MT-netten kan het rendement hoger zijn door lagere transportverliezen. Het rendement ligt ook hoger als de restwarmte van elektrolyse (60 à 70 °C) kan worden gebruikt. Als waterstof alleen wordt inzet voor pieklast is efficiency minder van belang)

5 Concepten voor levering van waterstof

Bij inzet van waterstof voor de warmtevoorziening van woningen en gebouwen is leveringszekerheid, naast veiligheid, een eerste vereiste. Dit aspect is vooral een aandachtspunt bij eerste geïsoleerde projecten en in de opstartfase van een eventuele uitrol van waterstof als energiedrager in een aanzienlijk deel van de bestaande bouw. Waar wordt de waterstof geproduceerd, en hoe wordt die op de locatie geleverd? Grofweg kan levering plaatsvinden vanuit centrale productie op grote schaal, en vanuit kleine(re) decentrale productie-eenheden. Figuur 3 geeft een visualisatie van de mogelijkheden die hieronder nader worden beschreven.

Levering vanuit centrale productie van waterstof

Bij centrale productie van waterstof is een centrale infrastructuur nodig om de waterstof op locatie te krijgen. Dat kan wanneer er een zogenaamde waterstof 'backbone' in Nederland wordt gerealiseerd en het afnamegebied zich bevindt in de buurt van de 'backbone'.^{14, 15} Gasunie ontwikkelt op het ogenblik een plan voor aanpassing van een deel van de centrale aardgastransportinfrastructuur tot een grote ringleiding voor pure waterstof door Nederland die alle grote industriële complexen met elkaar verbindt. Doel is om dit in 2030, of zoveel eerder als mogelijk, gerealiseerd te hebben. Van deze ringleiding kunnen dan aftakkingen worden gemaakt naar gebieden waar men waterstof in de gebouwde omgeving zou willen toepassen.

Als duidelijk wordt dat de leiding er gaat komen en waar die gaat komen, dan zou in de aanloop daar naar toe waterstof voorlopig ook per vrachtwagen naar locaties kunnen worden vervoerd. Transport per vrachtwagen is echter wel duurder dan per pijpleiding. Daarnaast zal aanvoer per vrachtwagen tot extra transportbewegingen leiden.

Levering vanuit decentrale productie van waterstof

Vanwege de schaalgrootte en het ontbreken van mogelijkheden voor opslag van CO₂ is water-elektrolyse de aangewezen technologie voor levering van waterstof uit decentrale productie-eenheden. Distributie loopt via een lokaal deel van het aardgasnet dat is aangepast voor waterstof, en dat is afgesloten van de rest van het aardgasnet. Dit lokale net kan op een later moment worden aangesloten op een centrale infrastructuur.

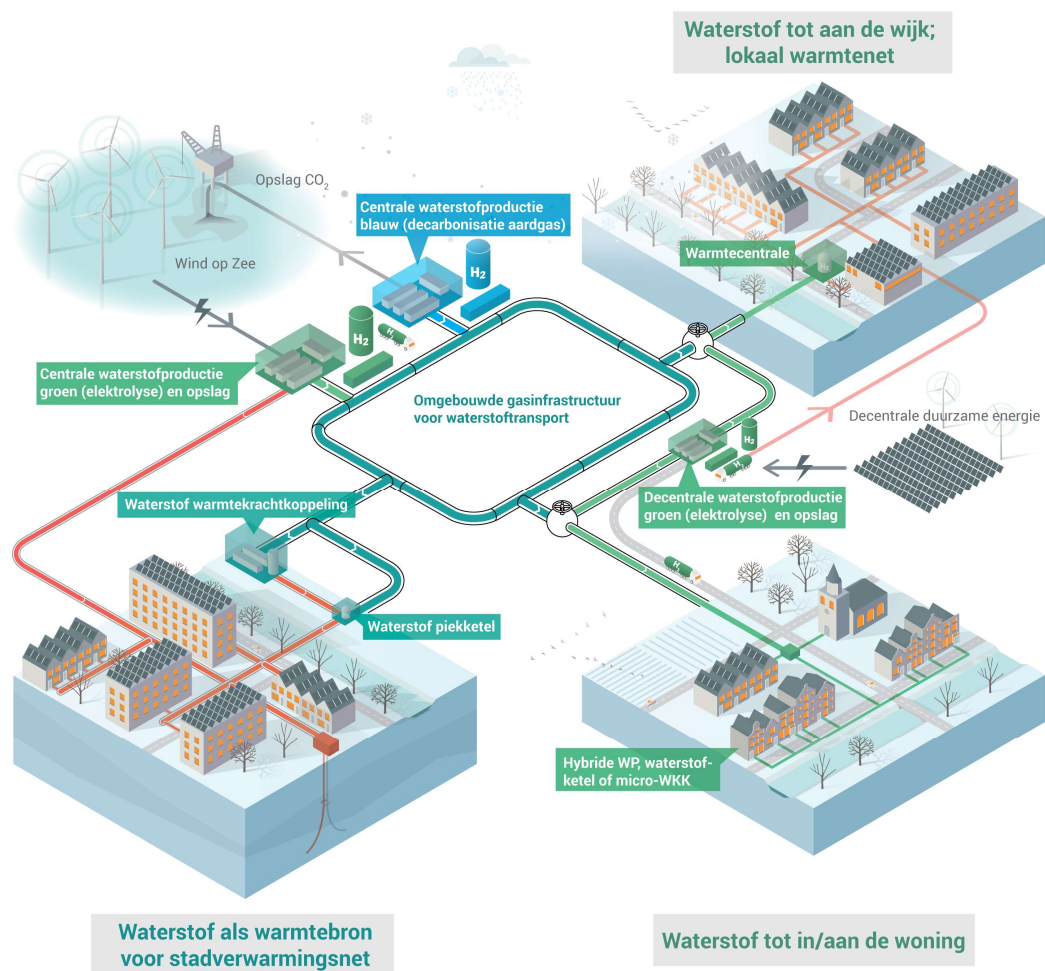
Bij decentrale productie via water-elektrolyse is koppeling met lokale productie van duurzame elektriciteit van zon en wind veelal het uitgangspunt. Vanwege de ongelijktijdigheid in het aanbod van, en de vraag naar energie, leidt een één op één koppeling echter tot een aanzienlijke behoefte aan opslag om leveringszekerheid van waterstof gedurende het hele jaar te kunnen garanderen. Daarnaast leidt het beperkte aantal vollasturen van zon en wind tot een relatief grote installatie voor productie van waterstof met een grote mate van onderbenutting. Dit werkt kostenverhogend. Het optimaal dimensioneren van installaties is daarom van belang om enerzijds decentraal leveringszekerheid te kunnen garanderen en

¹⁴ <https://www.gasunie.nl/nieuws/waterstof-coalitie-concrete-plannen-voor-een-vliegende-start-van-de-waterstofeconomie>

¹⁵ <https://www.gasunie.nl/energietransitie/waterstof>

anderzijds de kosten te beperken. Naast directe benutting van lokale duurzame energie zal gebruik van elektriciteit van het openbare net hier ook een rol bij spelen. Verder kan voor het dekken van piekvraag in de winter, en voor 'back-up', extra waterstof worden aangevoerd per vrachtauto vanuit centrale productielocaties.

Om een indruk te kunnen krijgen van wat de inzet van groene waterstof voor verwarming in de gebouwde omgeving betekent voor de behoefte aan duurzame energie, de capaciteit van een lokale elektrolyse-installatie en de benodigde opslag van waterstof, of de levering van waterstof vanuit centrale productie zijn in Bijlage A resultaten gegeven van indicatieve berekeningen voor een model van een gemiddelde buurt met alleen woningen. De behoefte aan duurzame energie kan aanzienlijk zijn evenals de benodigde opslag bij lokale productie, of de levering van waterstof per vrachtauto bij centrale productie. Voor details wordt verwezen naar Bijlage A. In het algemeen geven de resultaten duidelijk aan dat, ook indien alternatieve warmte-opties tekortschieten, en er een rol is voor verwarming met waterstof in de gebouwde omgeving, het belang van reductie van de warmtevraag door isolatie, en het zoveel mogelijk direct inzetten van elektriciteit voor verwarming, bij voorkeur met een warmtepomp, onverminderd groot is.



Figuur 3 Overzicht van manieren waarop waterstof een rol kan spelen in de warmtevoorziening van aardgasrijke wijken

6 Geschiktheid van het huidige aardgasnet voor waterstof

Het rapport 'Toekomstbestendige gasdistributienetten' (Kiwa, 2018) besteedt veel aandacht aan de rol die het bestaande gasdistributienet kan spelen bij het distribueren van waterstof en bio-methaan ('groen gas'). De hoofdboodschap van het rapport is dat het gasnet qua toegepaste materialen en onderdelen in beginsel geschikt is voor waterstof. Nader onderzoek moet van geval tot geval uitwijzen of, en zo ja welke aanpassingen aan het gasnet nodig zijn.

De energie-inhoud van een kubieke meter waterstof bedraagt een derde van de energie-inhoud van een kubieke meter Gronings aardgas. Als meer kubieke meters gas geleverd moeten worden per tijdseenheid dan zal de snelheid van het gas in de leidingen toenemen. De huidige regelgeving beperkt de gassnelheid die is toegestaan tot 30 meter per seconde in verband met mogelijke hinder door geluid. Deze limitering speelt vooralsnog met name een rol bij leidingen in de buurt van een gasstation, maar kan bij waterstof ook elders een rol gaan spelen.

Bij gelijkblijvende vraag naar energie is bij gebruik van dezelfde leiding de gassnelheid van waterstof drie maal hoger dan in het geval van aardgas. De dichtheid van waterstof is echter tien maal lager. Door deze tegengestelde effecten is het nog niet duidelijk of het geluid van gas dat door de leiding stroomt merkbaar toeneemt. Dit moet nader worden onderzocht. De volumestroom kan bijvoorbeeld worden beperkt door, daar waar het kan, de druk in het netwerk iets te verhogen. Verder zijn de effecten van een toename van de gassnelheid ook afhankelijk van de maatregelen die worden getroffen op woningniveau om de warmtevraag terug te dringen. Naarmate meer maatregelen worden getroffen zal de toename van de volumestroom beperkter zijn, en daarmee ook de kans dat er knelpunten ontstaan.

Een ander aandachtspunt zijn de gasmeters. Het komt er op neer dat de meters niet zijn gecertificeerd voor waterstof en daardoor niet zijn gelabeld als 'comptabel voor waterstof'. Dit betekent in de praktijk dat er geen rekening kan worden verstuurd voor een hoeveelheid waterstof die is gemeten met dit apparaat. Of de meters moeten worden vervangen hangt er van af of ze alsnog als comptabel voor waterstof gelabeld kunnen worden. Sommige meters zullen sowieso vervangen moeten worden omdat de volumestroom waterstof buiten het meetbereik van de meters kan komen.

De kosten van de mogelijk noodzakelijke aanpassingen aan het aardgasnet voor een overgang naar waterstof (exclusief aanpassingen in woningen) worden geschat op ongeveer 700 miljoen euro. Dit is een aardig bedrag, maar de kosten zijn gering in vergelijking met het aanleggen van een totaal nieuwe infrastructuur. Met gegevens uit de rapporten 'Net voor de Toekomst' (Netbeheer Nederland, 2017; CE Delft, 2017) en 'Toekomstbestendige gasdistributienetten' (Kiwa, 2018) is af te leiden dat de kosten voor aanpassing van het aardgasnet per woning in de orde van een paar honderd euro ligt (Tabel 4).

Tabel 4 Indicatie voor specifieke aanpassingskosten van het aardgasnet voor distributie van waterstof

Parameter	Dimensie	Waarde
Totaal aantal woningen in 2050	miljoen	9,0
Aantal woningen op waterstof in 2050 in scenario 'Nationaal' (Net van de Toekomst)	miljoen	3,3
Eenmalige kosten aanpassing aardgasnet voor waterstof	miljoen euro	678
Totale lengte aardgasnet in Nederland (2019)	x 1000 km	137
Lengte aardgasnet dat aangepast moet worden	x 1000 km	50
Kosten aanpassing aardgasnet per eenheid aardgasnet	€/km	13.500
Kosten aanpassing aardgasnet per woning	€/woning	200

7 Huidige wet- en regelgeving voor waterstof in het aardgasnet

Volgens de huidige wet- en regelgeving zijn de mogelijkheden voor transport en distributie van waterstof door het aardgasnet nog beperkt. Tot april 2016 lag de eis voor het maximale percentage waterstof in de landelijke netten op 0,02%. Per april 2016 is een nieuwe regeling Gaskwaliteit in werking getreden waarin het maximale percentage waterstof is vastgesteld op 0,5% voor de laagcalorische netten van de regionale netbeheerders (RNB-net). Met de wijziging van de 'Regeling Gaskwaliteit' per 12 september 2018 geldt dit percentage ook voor de regionale transport leidingen (RTL-net).¹⁶ In het hogedruknet (HTL-net) voor het laagcalorische gas en in het hoogcalorisch gasnet is de lagere eis van 0,02% nog van toepassing. Door de noodzaak om te verduurzamen, wordt nu echter ook gekeken naar de mogelijkheden om het percentage te verhogen voor de andere netten.

Met de aanpassing van de Gaswet per 1 juli 2018 is de verplichting voor aansluiting van nieuwbouwwoningen op het aardgasnet vervallen.¹⁷ Ook zijn met de aanpassing de taken van netbeheerders beter afgebakend waardoor meer duidelijkheid is verkregen over wat zij mogen doen en wat aan de markt overgelaten moet worden, zoals rond laadpalen en het geven van energieadvies. De wet is strikt maar er is ruimte voor flexibiliteit die nodig is omdat niemand nog weet hoe de energietransitie precies gaat verlopen.

Vooralsnog wordt waterstof niet gezien als gas in het kader van de gaswet, en is transport en distributie van waterstof niet mogelijk binnen het gereguleerde domein van de netbeheerders. De Gaswet biedt al wel de ruimte aan het netwerkbedrijf om infrastructuur voor waterstof aan te leggen en te beheren. Daarnaast biedt de Gaswet mogelijkheden voor 'experimenteerterruimte' buiten het gereguleerde kader. Hiervoor is ontheffing nodig van bepalingen uit de Gaswet. Maar omdat waterstof geen gas is in de zin van de Gaswet kan er voor 'experimenten' met (pure) waterstof geen ontheffing worden aangevraagd. In het Klimaatakkoord is daarom afgesproken dat onderzocht zal worden hoe ruimte kan worden gecreëerd in wet- en regelgeving voor 'experimenten' om regionale en landelijke netbeheerders ervaring op te laten doen op het gebied van transport en distributie van waterstof. Hiertoe is een traject gestart om dit op grond van de huidige Gaswet via de Algemene Maatregel van Bestuur 'tijdelijke taken' mogelijk te maken.

¹⁶ <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2018-52806.html>

¹⁷ <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stb-2018-197.html>

8 Welke veiligheidsaspecten zijn van belang bij waterstof?

Zowel aardgas als waterstof zijn brandbare gassen. Veiligheid is daarom een belangrijk punt van aandacht. Dit betreft zowel de veiligheid van het transport en de distributie van waterstof door leidingen, als de veiligheid van het gebruik van waterstof als brandstof. Tabel 5 geeft een overzicht van eigenschappen van waterstof en de veiligheidsaspecten die daarmee samenhangen.

Uit de tabel wordt duidelijk dat vrijwel ieder aspect zowel een nadeel als een voordeel heeft. Waterstof is in principe niet gevaarlijker of minder gevaarlijk dan andere brandbare gassen. Belangrijk is dat wordt onderkend dat het een ander gas is dan aardgas met specifieke eigenschappen. Als die eigenschappen bekend zijn dan kunnen specifieke maatregelen worden getroffen om eventuele risico's te vermijden of te minimaliseren.

Tabel 5 Overzicht van waterstofeigenschappen die een relatie hebben met veiligheidsaspecten

Eigenschap	Aandachtspunten	Pluspunten
Klein molecuul	Lekdichtheid van het gasnet vormt een uitdaging	Ontsnaapt makkelijk door kieren en openingen, wat de kans op ophoping tot een brandbaar mengsel verkleint
Veel lichter dan lucht	'Drijft' op lucht waardoor kans op ophoping in afgesloten en niet goed geventileerde ruimtes	Hoge stijgsnelheid waardoor snelle verdunning in lucht optreedt in open ruimtes
Vormt brandbaar mengsel in lucht over breed concentratiegebied	Met name aandachtspunt in afgesloten en slecht geventileerde ruimtes	Bij kleine lekkages in open en goed geventileerde ruimtes wordt zelfs de onderste grens niet snel bereikt door neiging tot snelle verdunning in lucht
Lage ontstekingsenergie	Blijft aandachtspunt, net als voor andere brandbare gassen en dampen.	
Hoge verbrandingssnelheid	Hoge vlamtemperatuur, en kans op vlamterugslag bij een beperkte uitstroomsnelheid van waterstof.	Beperkt vlamfront wat de kans op brandoverslag beperkt
Bevat geen koolstof waardoor het brandt met een kleurloze vlam	Door lagere stralingswarmte en niet of minder zichtbaar zijn van een waterstofvlam is de kans om er ongemerkt mee in aanraking te komen groter	<ul style="list-style-type: none"> Een waterstofvlam produceert minder stralingswarmte waardoor de kans op brandoverslag geringer is.

Eigenschap	Aandachtspunten	Pluspunten
		<ul style="list-style-type: none"> • Door het ontbreken van koolstof kan het giftige koolmonoxide (CO) niet worden geproduceerd
Waterstof is geurloos (net als aardgas overigens)	Odorisatie en/of detectie-sensoren nodig. Als een geurstof wordt toegevoegd die zwavel bevat (zoals bij aardgas) dan is dat weer een aandachtspunt voor brandstofcellen. Gebruik van die technologie vereist dan een reinigungsstap. Er wordt daarom ook gezocht naar een goede zwavelvrije odorant.	

Veiligheidsaspecten in het gebruik van waterstof

De verbrandingseigenschappen van waterstof verschillen van die van aardgas. De verbrandingssnelheid is hoger wat bij toepassing in huidige HR-ketels en vooral oudere ketels en geisers kan leiden tot vlamterugslag, of vlaminslag, waardoor de brander beschadigd raakt. Verder is een waterstofvlam niet of slecht zichtbaar wat gevaar oplevert bij gebruik van open vlammen zoals bij gasfornuizen. Bij een overgang naar waterstof ligt het dan ook voor de hand om over te schakelen op elektrisch koken. Daarnaast zullen verwarmingstoestellen moeten worden vervangen, of ten minste moeten worden voorzien van een andere regeling, al dan niet in combinatie met een andere brander. Inmiddels zijn er fabrikanten die een CV-ketel voor 100% waterstof beschikbaar hebben. Een deel daarvan is in bedrijf in een project in Rozenburg.

Naast alle aspecten die extra aandacht vragen is er een veiligheidsaspect dat een duidelijk pluspunt vormt voor waterstof ten opzichte van aardgas. Dit is dat er bij verbranding van (pure) waterstof nooit het giftige koolmonoxide (CO) kan worden gevormd; waterstof bevat immers geen koolstof. Koolmonoxidevergiftiging is nog steeds een belangrijkste oorzaak van ongevallen 'na de meter' bij gebruik van aardgas (Kiwa, 2019).

Veiligheidsaspecten bij transport en distributie door leidingen

De eerste prioriteit is om de leidingen gasdicht te houden. Door diverse verschillen in gaseigenschappen is lekdichtheid van het gasnet bij waterstof echter een grotere uitdaging dan bij aardgas. De veiligheid van het aardgasnet is geborgd door te werken volgens diverse normen en voorschriften. Aangezien waterstof andere eigenschappen heeft dan aardgas is het noodzakelijk dat deze normen en voorschriften worden aangepast of vervangen. Het uitgangspunt hierbij is dat het gebruik van waterstof minstens zo veilig moet kunnen plaatsvinden als het gebruik van aardgas.

Omdat waterstofmoleculen veel kleiner zijn dan aardgasmoleculen gaan ze een factor vijf makkelijker door kunststof dan aardgas. De totale hoeveelheid die op deze wijze verloren gaat is echter klein ten opzichte van de verliezen door kleine

lekkages. Maar er zijn specifieke situaties denkbaar waaronder deze kleine verliezen tot een brandbaar mengsel van waterstof in lucht kunnen leiden, en dus een risico kunnen vormen. De specifieke situaties spelen naar verwachting niet bij woningen. Of de situaties in de praktijk voorkomen en een probleem vormen, en welke maatregelen dan moeten worden genomen, moet nader worden onderzocht.

Bij kleine lekkages uit verbindingen lekt er, bij eenzelfde druk en grootte van de opening, ongeveer anderhalf tot drie keer zoveel waterstof als bij aardgas. Dit komt door de lagere dichtheid en lagere viscositeit van waterstof ten opzichte van aardgas. Qua hoeveelheid energie is dat echter maar de helft tot ongeveer evenveel als bij aardgas of groen gas. De lagere ontstekingsenergie blijft een punt van aandacht, evenals het grotere concentratiegebied waarin waterstof in lucht een brandbaar mengsel vormt. Maar bij kleine lekkages wordt het risico (kans maal effect), net als bij aardgas, vooralsnog verwaarloosbaar geacht. Nader onderzoek en praktijksimulaties moeten definitief uitsluitsel geven.

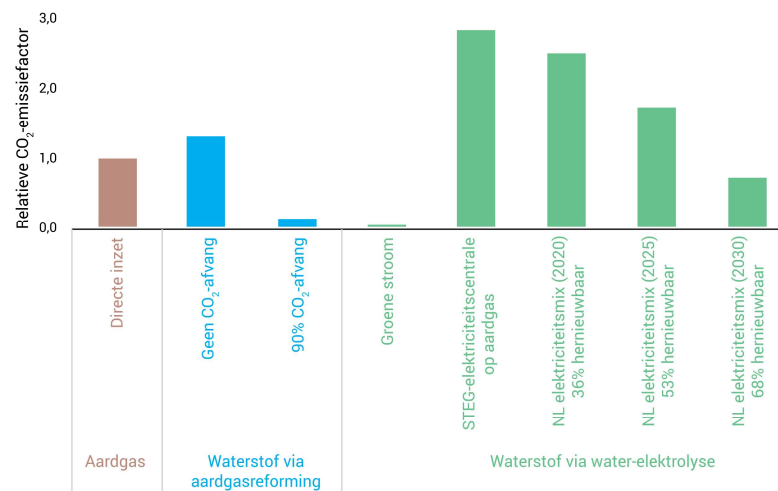
Als er sprake is van een groot lek, dan neemt het risico van waterstof toe ten opzichte van aardgas. Dit kan zich vooral voordoen bij graafschade. De kans dat een brandbaar mengsel ontstaat is groter, en het ontsteekt makkelijker. Hierbij is de vlam niet of slecht zichtbaar waardoor de kans toeneemt dat een brand niet snel genoeg wordt opgemerkt. Anderzijds produceert het daarbij minder warmtestraling en is daarom de kans op brandoverslag geringer.

Het plaatsen van sensoren kan helpen om eventuele lekkages tijdig te detecteren en het ontstaan van ongewenste situaties te voorkomen, met name binnenshuis. Nader onderzoek en praktijksimulaties zijn nodig om uit te vinden of sensoren voor bijvoorbeeld gasdetectie, of warmtedetectie kunnen bijdragen aan verdere verbetering van de veilige inzet van waterstof, en waar die idealiter geplaatst moeten worden.

Indien in de praktijk mocht blijken dat binnenshuis situaties met een te hoog risico niet afdoende zijn uit te sluiten, dan kan als uiterste maatregel worden overwogen waterstof slechts tot aan de woning te brengen en niet tot in de woning te brengen. Verwarmingstoestellen worden dan buiten de woning in een aanbouw of stookruimte geplaatst, zoals in andere landen ook nu al gebeurt met aardgasketels.

9 Productie en duurzaamheid van waterstof

Waterstof leidt niet automatisch tot reductie van CO₂-emissies en is niet automatisch duurzaam. Dit is, net als bij elektriciteit, afhankelijk van de bronnen die worden gebruikt om het te produceren. Figuur 4 geeft relatieve CO₂-emissiefactoren voor een aantal typen waterstof ten opzichte van aardgas. Waterstof kan op verschillende manieren worden geproduceerd. Daarbij wordt in het algemeen onderscheid gemaakt tussen grijze, blauwe en groene waterstof. De eerste twee soorten hangen samen met de productie van waterstof op basis van aardgas. Groene waterstof wordt meestal gebruikt voor waterstof geproduceerd door splitsing van water met groene stroom (water-elektrolyse).



Figuur 4 Vergelijking van emissiefactoren voor aardgas, en voor waterstof dat op verschillende manieren is geproduceerd (emissiefactor elektriciteitsmix volgens integrale methode, KEV2019)

Grijze waterstof

Grijze waterstof wordt geproduceerd op basis van aardgas of andere fossiele brandstoffen. Daarbij komt CO₂ vrij en dit leidt niet tot een reductie van de CO₂ uitstoot. Sterker nog, het leidt tot een toename van CO₂-uitstoot ten opzichte van directe inzet van aardgas indien de productie niet wordt gecombineerd met afvang en opslag van CO₂. Op het ogenblik worden grote hoeveelheden waterstof geproduceerd voor gebruik als industrieel gas, dat wil zeggen voor niet-energetische toepassingen. Productie op basis van aardgas zonder afvang en opslag van CO₂ is momenteel verreweg de meest toegepaste manier om waterstof te maken. In Nederland wordt op deze wijze jaarlijks in de orde van tien miljard kubieke meter waterstof geproduceerd. De grootste toepassingen zijn voor de productie van ammoniak, dat weer de basis vormt voor kunstmest en een aantal kunststoffen, en voor het ontzwellen van aardolieproducten en het opbreken van zware oliefracties bij de raffinage van aardolie.

Blauwe waterstof

Als bij het productieproces uit fossiele brandstoffen de vrijkomende CO₂ wordt afgevangen, en deze permanent wordt opgeslagen in bijvoorbeeld lege gasvelden, dan noemen we het koolstofarme of blauwe waterstof. Dit leidt tot reductie van CO₂-uitstoot. Overigens is er nog geen eenduidige definitie van het begrip. Er zijn verschillende type productieprocessen en meerdere procesconfiguraties mogelijk waarbij in meer of mindere mate CO₂ kan worden afgevangen. Het percentage afvang kan variëren van 55% tot 90%. Meestal wordt bij afvang alle waterstof 'blauw' genoemd ongeacht het afvangpercentage. Maar soms wordt alleen die waterstof 'blauw' genoemd waarvoor ook daadwerkelijk CO₂-afvang heeft plaatsgevonden, en de uitstoot dus nul is.

In het Europese project 'CertifHy' wordt gewerkt aan een Europees systeem voor Garanties van Oorsprong voor waterstof.¹⁸ In dit systeem wordt onderscheid gemaakt tussen koolstofarme ('low-carbon') en groene ('green') waterstof. Koolstofarm is alle waterstof waarbij de CO₂-uitstoot 60% lager ligt dan bij productie van waterstof op basis van aardgas met het standaard productieproces voor waterstof. 'Groen' is de waterstof als het daarnaast ook nog is geproduceerd met energie van hernieuwbare bronnen.

Een alternatief voor permanente opslag is hergebruik van de CO₂. Bij inzet van de CO₂ in de glastuinbouw worden alle emissies vermeden die anders zouden ontstaan bij productie van CO₂ met behulp van aardgas. De CO₂-emissiereductie is dan gelijk aan de hoeveelheid CO₂ die is afgevangen. Bij verwerking van CO₂ in producten is de CO₂-reductie minder duidelijk. Het netto effect is sterk afhankelijk van de energie die het kost om op basis van CO₂ een product te maken en het emissie-effect van die energie. Het netto effect kan zelfs negatief zijn.

Groene waterstof

Waterstof kan ook worden geproduceerd uit hernieuwbare bronnen, en met behulp van energie van hernieuwbare bronnen. Een belangrijke methode is productie uit water met elektriciteit (water-elektrolyse). Als de elektriciteit is opgewekt met energie van hernieuwbare bronnen, zoals wind en zon, dan levert dit groene waterstof. Bij inzet van elektriciteit voor splitsing van water wordt op het ogenblik 60% tot 65% (op LHV basis) van de elektrische energie vastgelegd in waterstof, dat wil zeggen dat het rendement 60% tot 65% bedraagt. Naar verwachting is verbetering van het rendement richting 70% mogelijk. Het resterende deel van de energie komt vrij als warmte op een temperatuur van rond de zestig à zeventig graden Celsius. Mogelijk kan dit op termijn als restwarmte worden benut in warmtenetten.

Wanneer een elektrolyser is aangesloten op het openbare net dan is niet alle elektriciteit van hernieuwbare bronnen. Voor het deel dat niet hernieuwbaar is moeten dan Garanties van Oorsprong van hernieuwbare elektriciteit worden gekocht om de waterstof 'groen' te mogen noemen. Dit is vergelijkbaar met de manier waarop klanten die op het openbare net zijn aangesloten toch groene stroom geleverd kunnen krijgen.

¹⁸ <https://www.certifhy.eu/>

Groene waterstof kan ook uit (duurzame) biomassa gemaakt worden. Gezien de waarschijnlijk hoge vraag naar duurzame biomassa voor biobrandstoffen, als grondstof voor de chemische industrie, of als rechtstreekse energiedrager, is specifieke inzet van (duurzame) biomassa voor productie van waterstof mogelijk minder waarschijnlijk. Een andere biomassaroute is om Garanties van Oorsprong van Groen Gas (biogas dat is opgewerkt tot aardgaskwaliteit) te gebruiken om (een deel van de) waterstof dat is geproduceerd op basis van aardgas te vergroenen.

Transitieperspectieven voor groene en blauwe waterstof

Volledig groene waterstof, of beter gezegd volledig hernieuwbare waterstof, vergt nog een aanzienlijke uitbouw van de capaciteit voor wind- en zonne-energie. Maar de snelheid waarmee dit kan is beperkt, en in de tussentijd is er is ook nog veel grijze elektriciteit die duurzaam gemaakt kan worden. Directe inzet van 'groene stroom' voor vervanging van 'grijze stroom', indien mogelijk, leidt voorlopig tot meer CO₂-reductie dan vervanging van aardgas door groene waterstof. Projecten op het gebied van groene waterstof staan nu dan ook vooral in het teken van verdere ontwikkeling en opschaling van elektrolyse-technologie ter voorbereiding op veel grotere toepassing wanneer het einde in zicht komt van de mogelijkheden voor directe inzet van wind- en zonne-energie via elektriciteit. Zoals het er nu uitziet zal dit aan de orde zijn vanaf ongeveer 2030. Richting 2030 zal de uitbouw van duurzame energie en de productie van groene elektrolyse-waterstof dan ook steeds meer in samenhang met elkaar moeten worden gezien. Op termijn zal waarschijnlijk ook import van (wind- en zonne-energie in de vorm van) waterstof een rol gaan spelen.

Hoe de transitie naar groene waterstof precies vorm te geven is onderwerp van discussie. Enerzijds zijn er partijen die betogen dat alle nieuwe waterstof direct groen moet zijn. Zij vinden dat investeringen in blauwe waterstof kunnen leiden tot uitstel van het moment dat groene elektrolyse-waterstof concurrerend wordt, en dus tot verlenging van onze afhankelijkheid van fossiele energie. Anderzijds zijn er partijen die aangeven dat het uiteindelijke doel weliswaar volledig groene waterstof is, maar dat op korte termijn het probleem vooral CO₂ is en koolstofarme blauwe waterstof vrijwel net zo klimaatneutraal kan zijn als groene waterstof. Bovendien is de productie van blauwe waterstof sneller op grote schaal te realiseren waardoor een grotere bijdrage aan reductie van CO₂-emissies mogelijk is voor 2030. Het is voorlopig ook nog goedkoper. Dit levert een beter perspectief voor eindverbruikers om de overstap naar waterstof te maken, en een stevigere basis om al op korte termijn een deel van het aardgasnet aan te passen voor het transport van waterstof. Volgens deze visie zit blauwe waterstof de ontwikkeling van groene waterstof niet in de weg, maar vormt het juist een aanjager voor de transitie daar naar toe. Ook voor deze vorm van waterstof kan import een rol gaan spelen (decarbonisatie van aardgas zo dicht mogelijk bij de bron), waardoor het mogelijk ook op dit gebied een wegbereider kan zijn voor duurzame waterstof.

10 Wat zijn de kosten van waterstof?

Bij de kosten van waterstof kan onderscheid worden gemaakt tussen de kosten van aanpassingen in de woning, de kosten voor aanpassing van het gasnet, en de kosten van waterstof zelf. De huidige inzichten worden hieronder achtereenvolgens behandeld.

Kosten van aanpassingen in de woning

De kosten van aanpassingen in de woning betreffen voornamelijk de meerkosten van een HR-ketel die geschikt is voor waterstof ten opzichte van de huidige HR-ketel. In het kader van het 'Leeds City Gate h21'project zijn de kosten van aanschaf en installatie van een 100% waterstofketel ingeschat op ca. €4000 per huishouden (Northern Gas Networks, 2016).^{19, 20} Dat is ongeveer twee keer zo duur als een HR-ketel op aardgas waarvan de prijzen variëren van ca. €1500 tot €3000 afhankelijk van de capaciteit van de ketel. Stedin gaat voor de korte termijn voorlopig nog uit van meerkosten van €1500, maar verwacht dat de totale meerkosten bij toenemende aantallen dalen naar €300 per woning. Dit komt overeen met een recente analyse rond waterstof in de gebouwde omgeving in Engeland waarin verkoopprijzen van waterstofketels worden verwacht die 10-20% hoger liggen dan aardgasketels (Frazer-Nash Consultancy, 2018).

Naast de kosten voor de HR-ketel zijn er kosten voor het controleren en het eventueel aanpassen van in pandig leidingwerk, en kosten voor eventuele waterstofsensoren. De kosten voor het controleren en voor sensoren zijn beperkt. Die voor eventueel noodzakelijke aanpassingen zullen van geval tot geval verschillen afhankelijk van de aard en het aantal tekortkomingen, en de specifieke situatie. Op het ogenblik is hier geen goede indicatie van te geven. Als alles goed is dan blijven de kosten beperkt tot de controle. Maar ook als er aanpassingen nodig zijn verwacht Stedin dat het geen duizenden euro's worden. Door projecten als Stad aan 't Haringvliet zal hier meer inzicht in worden verkregen.

Er zijn ook kosten verbonden aan een overstap naar elektrisch koken, maar die overstap zal ook gemaakt moeten worden bij een overgang naar 'all-electric' of een warmtenet. Alleen bij een overgang naar groen gas, of een mengsel van groen gas en waterstof waarbij het aandeel waterstof voorlopig beperkt blijft tot ordegrootte 20%, kan er zonder verdere aanpassingen op gas gekookt blijven worden. De kosten voor eventuele aanpassing van de gasmeter worden gerekend tot kosten van aanpassingen van het gasnet.

Kosten van aanpassingen van het gasnet

De rapporten 'Net voor de Toekomst' (Netbeheer Nederland, 2017) en 'Toekomstbestendige gasdistributienetten' (Kiwa, 2018) bevatten veel informatie over de werkzaamheden rond de ombouw naar waterstof van het gasnet, en de kosten daarvan. Samengevat komt het neer op dat er eenmalige kosten zijn voor aanpassing, en jaarlijks terugkerende meerkosten die samenhangen met te

¹⁹ <https://www.northerngasnetworks.co.uk/wp-content/uploads/2017/04/H21-Report-Interactive-PDF-July-2016.compressed.pdf>

²⁰ <https://www.h21.green/>

verwachten aanpassingen in het inspectieregime rond waterstof. Tabel 6 geeft een overzicht van de kosten.

Tabel 6 Kosten voor aanpassing van het aardgasnet aan waterstof

Kostenpost	Eenheid	Waarde
Eenmalige kosten aanpassing	€/woning	200
Jaarlijkse meerkosten	€/jaar/woning	5-10 (waarschijnlijk) 50-75 (maximaal)

Kosten van waterstof

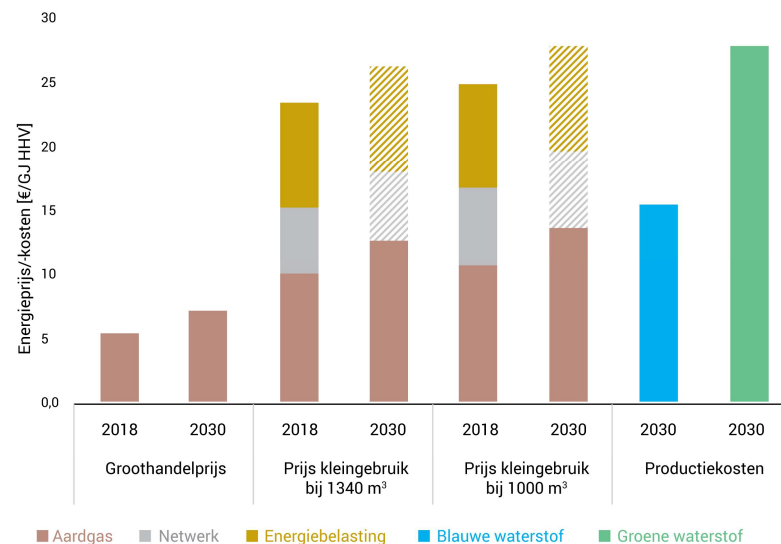
Conversie van aardgas in combinatie met afvang en opslag van CO₂, en elektrolyse van water met groene stroom zijn de meest voor de hand liggende methoden voor productie van bijna en volledig klimaatneutrale waterstof. De energiebronnen voor productie van waterstof, te weten aardgas, wind en zon zijn de meest beschikbare bronnen. Dat is overigens nog geen garantie dat de waterstof ook geproduceerd zal worden en dus beschikbaar zal zijn. Dit hangt af van de mogelijkheden die worden gecreëerd voor de opslag van CO₂ en de realisatie van duurzame energie ten behoeve van waterstof. Beide hoeven echter niet alleen nationaal te worden gerealiseerd maar kunnen ook elders plaatsvinden. Ook nu vindt import van energie op grote schaal plaats. Algemeen wordt daarom verwacht dat op termijn ook de import van beide vormen van waterstof een rol zal gaan spelen in aanvulling op, en ter vervanging van de import van aardgas en aardolieproducten.

De productiekosten voor waterstof op basis van aardgas zijn sterk afhankelijk van de aardgasprijs en de kosten voor afvang en opslag. De productiekosten met elektrolyse zijn sterk afhankelijk van de elektriciteitsprijs. In 'The Future of Hydrogen' (IEA, 2019) verwacht de IEA dat in 2030 de productiekosten in Europa voor elektrolyse rond €5 à €6 per kilogram (kg) waterstof zullen liggen afhankelijk van de elektriciteitsprijs en het aantal bedrijfsuren. Voor waterstof geproduceerd op basis van aardgas met afvang en opslag van CO₂ verwacht de IEA kosten variërend van €1,7 tot €2,2 per kg afhankelijk van de mate van CO₂-afvang en de bijbehorende investeringskosten. De Hydrogen Council (Hydrogen Council, 2020) is optimistischer en verwacht dat in 2030 al lagere kosten mogelijk zijn indien voldoende grote volumes gerealiseerd kunnen worden. De Council komt tot €1 à €2 euro per kg voor koolstofarme waterstof op basis van aardgas en €2 à €3 euro per kg voor duurzame waterstof onder ideale condities. In alle gevallen betreft het zogenaamde 'levelized costs' waarin alle investeringskosten, onderhoudskosten en kosten voor energie gedurende de levensduur van de installaties zijn meegenomen.

Meer specifieke waarden voor Nederland kunnen worden geschat op basis van prijzen voor aardgas, CO₂ en elektriciteit in 2030, zoals gehanteerd in de recente 'Klimaat en Energieverkenning 2019' (PBL, 2019), in combinatie met technologiegegevens uit diverse IEA rapporten (IEA-GHG, 2017; IEA 2019). Zoals getoond in Figuur 5, komen de kosten voor productie van waterstof op basis van aardgas met 90% afvang en opslag van CO₂ dan uit op bijna 16 €/GJ. Voor elektrolyse komen de kosten op ruim 25 tot 28 €/GJ (hoogste waarde getoond). De overkoepelende bandbreedte van bijna 16 tot 28 €/GJ waterstof vertaalt zich grofweg naar 55 – 100 €/MWh, of naar ruim 2 tot ongeveer 4 €/kg, gebaseerd op de 'higher heating value' (calorische bovenwaarde) van waterstof.

Ter vergelijking: in 2018 bedroeg de aardgasprijs voor kleinverbruikers inclusief netwerkkosten en energiebelasting bij een gemiddeld verbruik van 1340 m³ per woning bijna 24 €/GJ.²¹ Bij gelijkblijvende belasting en netwerkkosten zou dit oplopen naar ruim 26 €/GJ met de projectie van de aardgasprijs voor 2030 uit de KEV2019 (PBL, 2019).²² Bij een verbruik van 1000 m³/woning ligt de prijs met 28 €/GJ zelfs iets hoger omdat de hogere prijs in de eerste staffel van 600 m³ aardgas zwaarder weegt in de gemiddelde prijs. De projectie van productiekosten voor waterstof in 2030 is daarmee van dezelfde orde van grootte als de aardgasprijs voor kleinverbruikers in de bestaande bouw.

Hoe de productiekosten van waterstof zich vertalen naar een prijs voor waterstof is nog niet duidelijk. Dit zal mede afhangen van de netwerkkosten en de heffingen die van toepassing gaan worden op waterstof, en de prijsvorming in de markt als die gaat ontstaan. Het is waarschijnlijk dat de prijs van waterstof hoger zal liggen dan die voor aardgas, maar wanneer een toename in de prijs wordt gecompenseerd door een evenredige afname in de warmtevraag door toepassing van isolatie, dan kunnen de brandstofkosten voor bewoners per saldo gelijk blijven. Hierbij past verder de kanttekening dat een vergelijking met aardgas weliswaar inzichtelijk is, maar ook van beperkte waarde omdat aardgas voor de toekomst geen optie meer is en dus ook niet meer de referentie is. Wat betreft kosten en waarde moet waterstof zo integraal mogelijk worden vergeleken met de andere alternatieven voor aardgasvrije wijken.



Figuur 5 Vergelijking van aardgasprijzen voor gemiddelde kleinverbruikers in de bestaande bouw met een indicatieve inschatting van productiekosten van waterstof in 2030 in Nederland.

²¹ <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/81309NED/table?fromstatweb>

²² Ondertussen is op 1 januari 2020 het belastingtarief van de eerste schijf voor aardgas gestegen met 3,99 ct/m³. In de 6 jaren daarna komt hier nog 1 ct/3 per jaar bij. In totaal leidt dit tot een toename van 1,2 €/GJ bij een verbruik van 1340 m³ en van 1,6 €/GJ bij 1000 m³. <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/belastingplan/belastingwijzigingen-voor-ons-allemaal/energiebelasting>

11 Wat betekent het voor de betrokken partijen?

Gemeente

De gemeente heeft een centrale rol in de warmtetransitie in de bestaande bouw. Zij zal immers bepalen (onder de kaders van de nieuwe Omgevingswet) óf, en wanneer in welke buurt een omschakeling naar waterstof zal plaatsvinden. Voorafgaand hieraan zal de gemeente overleg hebben met alle belanghebbers om wensen en mogelijkheden te inventariseren, en de nodige onderzoeken laten uitvoeren om tot een afgewogen besluit te kunnen komen. Uiteindelijk zal de gemeente de nodige vergunningen moeten verlenen voor het uitvoeren van de werkzaamheden, en het realiseren van eventuele installaties voor decentrale productie en opslag van waterstof.

Een omschakeling naar waterstof zal geen geleidelijk proces zijn, maar zal per ruimtelijke eenheid - een buurt, wijk of gebied - moeten gebeuren indien het distributienetwerk niet dubbel wordt uitgevoerd. De bepaling van het tijdstip en de planning van de omschakeling zal in nauw overleg met de netbeheerder moeten plaatsvinden.

Bewoners

De installaties binnenshuis moeten gecontroleerd en eventueel aangepast worden. Per woning is een inventarisatie nodig en zal enig maatwerk moeten worden geleverd. De meeste woningen zullen met een combi-ketel de centrale verwarming voeden en warm water leveren. Maar sommigen hebben wellicht een aparte boiler of misschien meerdere toestellen. Ook voor de keukens met een gasfornuis is een oplossing nodig. Koken op waterstof is mogelijk, maar een overstap naar elektrisch koken ligt hier het meest voor de hand. Soms zal dit aanpassingen vergen in de meterkast. Bovendien moet worden gekeken of de gasmeter geschikt is voor de hogere volumestroom, zowel qua capaciteit als nauwkeurigheid.

Hoewel de kosten voor aanpassingen aan het aardgasnetwerk en binnenshuis per woning beperkt zijn, is waterstof als brandstof wel duurder dan aardgas. Dit is zeker het geval als direct vanaf het begin dezelfde netwerkkosten en belastingen op waterstof van toepassing zijn als voor aardgas. Het effect van de hogere brandstofkosten kan worden gereduceerd en zelfs meer dan volledig worden gecompenseerd door zo efficiënt mogelijk gebruik te maken van de brandstof. Dit kan door de warmtevraag zoveel mogelijk terug te dringen en door een zo efficiënt mogelijke installatie voor verwarming in te zetten:

- De voornaamste maatregel om de warmtevraag te reduceren is door een woning beter te isoleren. Het grote voordeel van een blijvende inzet van een gasvormige brandstof, of dat nu waterstof of groen gas is, is dat de mate van isolatie niet gekoppeld is aan de aanpassing en verduurzaming van de warmtevoorziening zoals dat bijvoorbeeld wel het geval is bij een volledige overgang naar lage temperatuurverwarming met behulp van een elektrische warmtepomp. Bij een overgang van aardgas naar waterstof of groen gas kan voorlopig nog gebruik worden gemaakt van het huidige systeem van hoge-temperatuurverwarming. De eindgebruiker kan in z'n eigen (investerings)tempo isolatiemaatregelen doorvoeren om de warmtevraag te beperken. Hierbij is het van belang dat er wel een prikkel blijft bestaan voor verdere isolatie zodat uitstel niet tot afstel leidt. De meest duurzame energie blijft uiteindelijk niet gebruikte energie.

- Na het doorvoeren van de meest effectieve isolatiemaatregelen kan op het gebied van de verwarmingsinstallatie worden gekozen voor gedeeltelijke elektrificatie door over te stappen van een HR-ketel naar een hybride warmtepomp. Hiermee kan een groot deel van de warmtevraag worden gedekt door omgevingswarmte op te waarderen met een elektrische warmtepomp, terwijl op momenten van piekvraag een HR-ketel op waterstof bijspringt. De verdeling warmtepomp / ketel zal van geval tot geval kunnen verschillen. Die verhouding is afhankelijk van het isolatieniveau van een woning in combinatie met het vermogen van de warmtepomp, de mate waarin koude pieken optreden in het stookseizoen, en de warmtevraag voor tapwater.²³ Verder wordt in de huidige situatie de economische aantrekkelijkheid van inzet van een hybride warmtepomp beïnvloed door de prijsverhouding tussen elektriciteit en aardgas. Bij waterstof zal die verhouding vanzelfsprekend wijzigen in de verhouding tussen de prijs van elektriciteit en waterstof.

Naast het nemen van vraagbeperkende maatregelen, die in eigen tempo kunnen worden doorgevoerd, hoeven bewoners hun huis in principe 'slechts' waterstof-ready te (laten) maken. Dit betekent dat, naast controle en eventuele aanpassing van leidingwerk en verwarmingsinstallaties, mogelijk voorzorgsmaatregelen genomen moeten worden voor afgesloten ruimtes, zoals bijvoorbeeld het ophangen van waterstofmelders. Daarnaast ligt het voor de hand om een overstap naar elektrisch koken te maken wat soms ook een aanpassing in de meterkast vergt. Verder zullen bewoners weinig merken van de overgang. De werkzaamheden in en rond de woning kunnen in korte tijd worden uitgevoerd.

Netbeheerder

De netbeheerders zullen het netwerk aan moeten passen om het geschikt te maken voor waterstof. Vanwege de tijd die nodig is voor ombouw of vervanging van de toestellen en de bijbehorende controlewerkzaamheden van de meter en de installatie zal het niet lukken een heel gebied in een keer binnen een acceptabele tijd aan te passen. De ombouw zal daarom worden opgesplitst in een aantal stappen waarbij de scheiding tussen het gasnet met waterstof en het gasnet met aardgas per dag steeds opschuift. De ombouwwerkzaamheden zullen zich dan als een treintje door het gebied heen verplaatsen. De details moeten nog worden uitgewerkt, en de exacte procedure kan van buurt tot buurt iets anders verlopen als gevolg van lokale verschillen in het netwerk. Het uitgangspunt is echter om de overlast voor bewoners zo veel mogelijk te beperken en er voor te zorgen dat ze niet te lang, bij voorkeur niet langer dan een dag, zonder verwarming en warm water zitten. Ombouw buiten het stookseizoen zal de overlast het kleinst zijn, zeker als ondertussen is overgeschakeld op elektrisch koken.

Rijksoverheid

De rijksoverheid zal duidelijke kaders moet scheppen en bevoegdheden en verplichtingen van gemeenten en netbeheerders duidelijk moeten definiëren en mogelijk maken. Voorlopig wordt voor de periode tot 2030 ingezet op een aantal grotere projecten op buurtniveau. Doel is om daarin voldoende praktijkervaring op te doen voor het mogelijk maken van een grotere uitrol in de periode daarna, als dat nodig mocht blijken om de doelstelling voor de gebouwde omgeving in 2050 te

²³ <https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/energiezuinig-huis/energiezuinig-verwarmen-en-warm-water/hybride-warmtepomp/>

kunnen realiseren. De Rijksoverheid en de sector zullen daartoe in eerste instantie moeten onderzoeken hoe die waterstof gerelateerde pilots en demo's in de gebouwde omgeving gestimuleerd kunnen worden en hoe daarvoor ruimte te creëren in wet- en regelgeving. Ook moet worden nagedacht hoe binnen die pilots en demo's te komen tot een acceptabele integrale prijsstelling van de waterstof voor de bewoners.

12 Stand van zaken, en verwachtingen voor de komende jaren

In tal van situaties kan blijvend gebruik van het bestaande gasnet voor transport en distributie van koolstofarme en hernieuwbare gassen, zoals waterstof en groen gas, (voorlopig) de beste optie blijken te zijn voor verwarmingsdoeleinden in de bestaande bouw vanuit het perspectief van maatschappelijk kosten en draagvlak. In de basis lijkt een overgang van aardgas naar waterstof voor ruimteverwarming en warm tapwater prima te kunnen, zowel wat betreft eindgebruik, transport en distributie, als wat betreft productie:

- Een HR-ketel op waterstof verschilt niet veel van een ketel op aardgas en zal naar verwachting niet veel duurder zijn dan de huidige ketels. Ketels voor 100% waterstof worden al in de praktijk gedemonstreerd. Ook een hybride warmtepomp is mogelijk omdat dit niets anders is dan een combinatie van een elektrische warmtepomp en een HR-ketel.
- Uit al het onderzoek dat tot nu toe is gedaan naar de geschiktheid van het aardgasnet voor transport en distributie van waterstof komt naar voren dat het gasnet qua toegepaste materialen en onderdelen in beginsel geschikt is. Er zal vooraf goede controle op lekdichtheid moeten plaatvinden, maar de noodzakelijke aanpassingen kunnen tegen beperkte kosten worden doorgevoerd. Met de ombouw van aardgas naar waterstof moet nog de nodige ervaring worden opgedaan, maar helemaal nieuw is dat niet. Het is bijvoorbeeld nog maar iets meer dan 50 jaar geleden dat het gassysteem is omgebouwd van stadsgas naar aardgas. Daarbij kan worden opgemerkt dat het stadsgas destijds ook voor minimaal 50% uit waterstof bestond.
- Het produceren van waterstof is technisch gezien ook niet een probleem. De productie op basis van aardgas met afvang van CO₂ is een bewezen industrieel proces, en wereldwijd zijn er al diverse projecten voor opslag van CO₂ in de ondergrond. Ook in Nederland is hier al ervaring mee opgedaan in een proefproject op de Noordzee.²⁴ Het zou nu wel op grotere schaal uitgevoerd moeten worden. Naast conversie van aardgas is ook elektrolyse van water een bekend proces. Dit was wereldwijd zelfs de voornaamste manier om industrieel zuivere waterstof te produceren voordat aardgas z'n intrede deed in de energievoorziening. Tot voor kort heeft de ontwikkeling van de technologie echter vrijwel stil gestaan omdat er weinig vraag naar was. Met de wereldwijd toegenomen aandacht voor waterstof als energiedrager is dit echter veranderd en wordt de technologie nu snel beter en dalen de kosten.

De grote uitdagingen zijn meer van organisatorische en financieel-economische aard. Hoe te beginnen en de hele keten stapsgewijs te ontwikkelen met alle partijen die daar op de een of andere manier voor nodig zijn, of invloed op uitoefenen? En hoe kunnen de nodige investeringen tot stand komen en kan de onrendabele top van de investeringen op een voor ieder acceptabele wijze worden afgedekt. Want hoewel de kosten van waterstof zich redelijk gunstig lijken te verhouden tot de alternatieven voor een aardgasvrije warmtevoorziening in de bestaande bouw, zullen de kosten zeker in de eerste fase hoger zijn dan we die nu kennen.

²⁴ <https://www.co2-cato.org/cato/locations/regions/western-netherlands/gdf-k12-b-offshore-co2-injection-project>

Ook sociaal-maatschappelijke aspecten verdienen de nodig aandacht. Een goede balans tussen kosten en baten (zoals verbetering wooncomfort en leefomgeving) is van belang. Om draagvlak te creëren voor veranderingen zal het verder helpen als deze met zo min mogelijk gedoe gepaard gaan voor bewoners, bijvoorbeeld door ze te ontzorgen, en overlast tot een minimum beperkt kan blijven. Specifiek voor waterstof kunnen verschillen in feitelijke en publieke perceptie van veiligheid ook een belangrijk punt zijn waar zorgvuldig aandacht aan moet worden besteed.

Tegelijkertijd liggen er ook nog tal van vragen op diverse thema's die eerst moeten worden beantwoord alvorens kan worden gedacht aan uitrol op grotere schaal. In het Verenigd Koninkrijk wordt een uitgebreid onderzoeksprogramma uitgevoerd om uit te zoeken hoe, en onder welke condities inzet van waterstof in de bestaande gebouwde omgeving zo veilig, betrouwbaar en efficiënt mogelijk zou kunnen plaatsvinden.²⁵ Ook in Nederland wordt er gewerkt aan een onderzoeksprogramma. Een overzicht van de inhoud is te vinden in het rapport 'Waterstof voor de Energietransitie (TKI Nieuw Gas, 2020). De vragen concentreren zich rond de volgende thema's:

- Gashoeveelheidsmeting, energiebepaling en verrekening;
- De kwaliteit van waterstof en mengsels van aardgas en waterstof;
- Omgevingsveiligheid;
- Normalisatie van odorisatie van waterstof in de energiedistributie;
- Protocol voor omzetting van aardgas naar waterstof.

Voor de periode 2020 - 2025 wordt daarom nu eerst ingezet op een beperkt aantal pilots voor diverse configuraties. Dit kan in de periode 2025 - 2030 leiden tot meer en grotere projecten. De bedoeling is dat in die praktijkprojecten voldoende ervaring wordt opgedaan om in de periode na 2030 een grotere uitrol mogelijk te maken indien dat nodig is. De eerste projecten zullen variëren in omvang en zullen richting 2025-2030 naar verwachting toenemen in omvang, maar er moet eerder worden gedacht aan straten, buurten en wijken, dan aan stadsdelen en volledige gemeentes en steden.

De Rijksoverheid en de sector zijn nu begonnen om te onderzoeken hoe die waterstof gerelateerde pilots en demo's in de gebouwde omgeving gestimuleerd kunnen worden en hoe daarvoor ruimte te creëren in wet en regelgeving. Tegelijkertijd zijn er al diverse initiatieven in ontwikkeling. Voorbeelden zijn: The Green Village op de TU Delft; Innovathuis van HyLife Innovations op Goeree Overflakkee; Hoogeveen; Stad aan 't Haringvliet; en Lochem.^{26, 27, 28, 29, 30}

In het voorjaar van 2020 wordt de kabinetsvisie op waterstof gepresenteerd. Daarna zal de voorbereiding beginnen voor een nationaal waterstofprogramma, zoals afgesproken in het Klimaatakkoord. Nader onderzoek naar de mogelijkheden en de mate waarin waterstof - gelet op alternatieven en (maatschappelijke) randvoorwaarden - kan bijdragen aan het aardgasvrij maken van de bestaande gebouwde omgeving voor 2050 zal onderdeel uitmaken van dit programma.

²⁵ <https://www.hy4heat.info/>

²⁶ <https://www.thegreenvillage.org/news/eerste-schop-de-grond-voor-waterstofnet>

²⁷ <https://paotm.nl/nl/nieuws/eerste-waterstofwoning-van-nederland/>

²⁸ <https://www.hoogeveen.nl/waterstof>

²⁹ <https://www.stedin.net/over-stedin/pers-en-media/persberichten/gasnet-van-stad-aan-t-haringvliet-kan-over-op-groene-waterstof>

³⁰ <https://www.lochemsnieuws.nl/2019/09/14/pilot-waterstof-vervangt-aardgas-in-wijk-berkeloord/>

Referenties

- Berenschot (2018). *Waterstof voor Warmtenetten*.
- CE Delft (2017). *Net voor de Toekomst, Achtergrondrapport*.
- ECN (2016). *Kosten Wind op Zee*, ECN-N--16-017.
- ECN (2017). *Advies verbeterd VKO*, ECN-E--17-061.
- Frazer-Nash Consultancy (2018). *Appraisal of Domestic Hydrogen Appliances*.
- Hydrogen Council (2020). *Path to hydrogen competitiveness; A cost perspective*.
- IEA-GHG (2017). *Techno-Economic Evaluation of SMR Based Standalone (Merchant) Hydrogen Plant with CCS*.
- IEA (2019). *The Future of Hydrogen (including Assumptions Annex)*.
- Kiwa (2012). *Waterstof in aardgas op Ameland*.
- Kiwa (2018). *Toekomstbestendige gasdistributienetten*.
- Kiwa (2019). *Registratie van gasinstallatieongevallen achter de meter, jaaroverzicht 2018*.
- Netbeheer Nederland (2017). *Net voor de Toekomst*.
- Northern Gas Networks (2016). *Leeds City Gate h21*.
- PBL (2018). *Eindadvies Basisbedragen SDE+ 2019*.
- PBL (2019). *Klimaat- en Energieverkenning 2019*.
- Rijksoverheid (2019). *Klimaatakkoord*.
- RVO (2019). *Monitoring Energiebesparing Gebouwde Omgeving 2018*.
- Stedin (2019). *Van Aardgas naar Waterstof*.
- TKI Nieuw Gas (2018). *Contouren voor een routekaart waterstof*.
- TKI Nieuw Gas (2020). *Waterstof voor de energietransitie, Een programmatische aanpak voor innovaties op het thema waterstof in Nederland voor de periode 2020-2030*.

A Indicatieve berekeningen voor een voorbeeldwijk

Benodigde hoeveelheid duurzame energie voor een wijk

Om een indruk te kunnen krijgen van wat de inzet van groene waterstof voor verwarmingsdoeleinden in de gebouwde omgeving betekent voor de behoefte aan duurzame energie is er gekeken naar een model voor een gemiddelde buurt. In 2018 telde Nederland 13.305 buurten. Bij 7,8 miljoen woningen is dat gemiddeld bijna 590 woningen per buurt. Hiervan waren er circa 560 bewoond gedurende het jaar (Tabel 3). De aardgasvraag was gemiddeld 1340 m³/jaar per bewoonde woning. Volgens Milieu Centraal is hiervan gemiddeld 80% voor verwarming en 20% voor warm water.³¹

Voor de warmtevoorziening zijn twee varianten beschouwd, te weten HR-ketels op 100% waterstof, en hybride warmtepompen waarbij is aangenomen dat 70% van de warmtevraag wordt gedekt via het deel elektrische warmtepomp, en 30% via het deel HR-ketel op 100% waterstof.³² Deze varianten zijn ook gecombineerd met een situatie waarin na-isolatie is verondersteld met reductie van de warmtevraag tot een aardgasequivalent van 1000 m³/jaar. Tabel 7 laat zien wat er aan vermogen van óf zon-PV, óf wind op land, óf wind op zee geïnstalleerd moet worden voor deze vier varianten om jaargemiddeld de benodigde hoeveelheid energie te kunnen leveren.

De resultaten voor geïnstalleerd vermogen zijn inclusief de vraag naar elektriciteit voor warmtepompen. De overige vraag naar elektriciteit in een buurt (verlichting, apparaten, elektrische auto's etc.) is hier buiten beschouwing gelaten. De cijfers in Tabel 7 laten een duidelijk daling in het benodigde vermogen zien gaande van de huidige warmtevraag ingevuld met 100% waterstof in HR-ketels naar invulling van de lagere vraag na isolatie met een hybride warmtepomp. Dit toont het belang van reductie van de warmtevraag door isolatie, en het zoveel mogelijk direct inzetten van elektriciteit voor verwarmingsdoeleinden. Directe inzet via een warmtepomp heeft daarbij als voordeel dat het grootste deel van de warmte uit omgevingswarmte wordt gehaald waardoor het rendement op elektriciteit ruim boven de 100% uitkomt.

Een vergelijking van de geïnstalleerde vermogens laat zien dat het vermogen aan windturbines aanzienlijk lager ligt dan dat van zonnepanelen. Dit komt door het verschil in aanbod van energie van de verschillende bronnen wat resulteert in een verschil in effectieve (jaar)opbrengst uitgedrukt in vollasturen.³³ Vanwege betere windcondities op zee met meer vollasturen is het benodigde vermogen daar kleiner dan dat van wind op land.

Zon-PV en wind op land zijn opties die kunnen passen bij een decentrale of lokale voorziening van wijken van elektriciteit en waterstof. Naast het benodigde vermogen kan dan ook de ruimtelijke impact een belangrijk aspect zijn. Die kan

³¹ <https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/snel-besparen/grip-op-je-energierekening/gemiddeld-energieverbruik/>

³² Dit is voor een situatie waarin al een zekere mate van isolatie is toegepast. Op het ogenblik wordt de verhouding voor een gemiddelde eengezinwoning ingeschat op 50% warmtepomp en 50% HR-ketel. <https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/energiezuinig-huis/energiezuinig-verwarmen-en-warm-water/hybride-warmtepomp/>

³³ Het aantal vollasturen kan worden gezien als de tijdsduur waarin een installatie effectief op vol vermogen heeft geproduceerd. Delen van het aantal vollasturen door het totaal aantal uren in een tijdsperiode (bijv. 8760 uur/jaar) levert de capaciteitsfactor.

aanzienlijk zijn. De cijfers in Tabel 7 geven aan dat voor alle varianten maximaal een grote windturbine volstaat. Het ruimtebeslag van een dergelijke turbine kan van geval tot geval verschillen afhankelijk van de lokale situatie (veiligheidsafstanden, geluidshinder, bestemmingsplan etc.). Voor zon-PV is het iets duidelijker.

Uitgaande van de maximale afmetingen van een voetbalveld (120 bij 75 meter) is er minimaal 1 à 1,5 voetbalveld nodig per MW zon-PV. Op basis van de resultaten zijn er dus minimaal 3,5 à 5 grote voetbalvelden nodig wat kan oplopen tot ruim 17 voetbalvelden (bijna 16 hectare of 0,16 km²).³⁴

Tabel 7 Geïnstalleerd vermogen aan windturbines en zon-PV om jaargemiddeld de benodigde hoeveelheid energie te kunnen leveren voor verwarming van een gemiddelde buurt in Nederland met HR-ketels en hybride warmtepompen op waterstof.

Casus: Woonwijk met 590 woningen, waarvan gemiddeld 560 bewoond.				
Situatie	Type verwarming ^a	Geïnstalleerd vermogen [MW] ^b duurzame energie voor jaarlijkse energiebehoefte t.b.v. verwarming		
		Zon-PV ^c	Wind op Land ^c	Wind op Zee ^c
Huidige vraag naar aardgas 1.340 m ³ /jaar	100% H ₂ -ketel	11,7	4,0	2,6
	Hybride WP - 70% elektriciteit - 30% waterstof	4,6	1,6	1,0
Isolatie tot een aardgasvraag 1.000 m ³ /jaar	100% H ₂ -ketel	8,7	3,0	1,9
	Hybride WP - 70% elektriciteit - 30% waterstof	3,4	1,2	0,8

^a Gemiddeld rendement ketel 90%. Bij hybride warmtepomp wordt in dit voorbeeld 70% van de warmtevraag ingevuld met een elektrische warmtepomp met een jaargemiddelde COP van 4. De resterende 30% (piekvraag) wordt voorzien via een waterstofketel met gemiddeld 90% rendement.

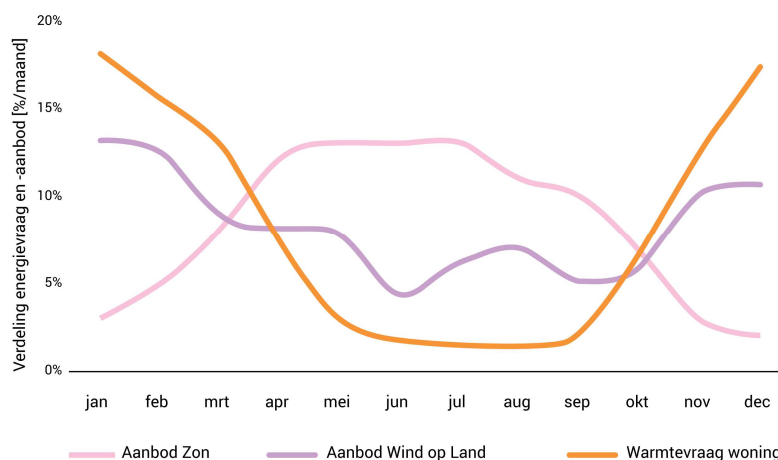
^b Geïnstalleerd vermogen dat op jaarbasis voldoende energie levert voor de energievraag van de varianten. Voor elektrolyse is een elektriciteitsverbruik aangehouden van 56 kWh/kg. Dit betekent een efficiency van 60% op basis van 120 MJ/kg waterstof (LHV). Er is geen rekening gehouden met aanbod en vraagprofielen. Momenten van overaanbod en tekorten moeten worden vereffend via buffering en opslag.

^c Zon-PV 950 vollasturen/jaar en Wind op Land 2.750 vollasturen/jaar (PBL, 2018); Wind op Zee 4.300 vollasturen per jaar (ECN, 2016)

³⁴ Grote zonneparken hebben een vermogensdichtheid van 70-100 MW/km² met in Nederland een productiedichtheid van ongeveer 50-100 GWh/jaar/km² (https://nl.wikipedia.org/wiki/Zonne-energie_in_Nederland). De vermogensdichtheid voor wind op land bedraagt circa 3-4 MW/km² met een productiedichtheid in de orde van 9-11 GWh/jaar/km². Maar door beperkingen in ruimtelijke inpassing liggen cijfers in de praktijk lager. Zo bedraagt de vermogensdichtheid voor het nieuwe windpark in de Wieringermeer circa 1,2 MW/km² (<https://windparkwieringermeer.nl/>). Het ruimtebeslag van de fundatie en de veiligheidsruimte om een windturbine heen is vele malen kleiner. De ruimte onder en rond een windturbine blijft beschikbaar voor andere doeleinden. De capaciteit van windturbines op land is typisch 3-4 MW. Tot nu toe gold dit ook voor windturbines op zee, maar naar verwachting zullen alle parken vanaf nu worden uitgerust met windmolens met een vermogen van 10 MW of meer. De vermogensdichtheid op zee is 4-6 MW/km² met een productiedichtheid van 15-25 GWh/km² (Posad, 2018, *Ruimtelijke Verkenning Energie en Klimaat*)

Elektrolyse- en opslagcapaciteit bij lokale productie van waterstof

Bij lokale productie (zon-PV en wind op land) en directe koppeling van elektrolyse met het geïnstalleerde vermogen aan duurzame energie, zonder tussenkomst van het openbare elektriciteitsnet, moet in principe hetzelfde vermogen aan elektrolyse worden geïnstalleerd om de benodigde hoeveelheid waterstof te kunnen leveren. Vanwege de ongelijktijdigheid in aanbod van energie en vraag naar verwarming zullen dan lokaal de verschillen tussen aanbod en vraag moeten worden vereffend via opslag. De ongelijktijdigheid wordt geïllustreerd in Figuur 6 waarin de vraag- en aanbodprofielen (ECN, 2017) zijn weergegeven die voor de indicatieve berekeningen aan de voorbeeldwijk zijn gebruikt.^{35, 36}



Figuur 6 Jaarprofielen met verdeling in maanden voor de warmtevraag in een gemiddelde tussenwoning, en het aanbod van energie van zon en wind op land

De cijfers in Tabel 8 geven aan dat in het geval van directe koppeling er lokaal ook een grote opslagbehoefte is naast het relatief grote vermogen aan elektrolyse. Voor een systeem op basis van zon is de capaciteit die nodig is voor opslag van waterstof indicatief circa 50 à 60 procent van de totale jaarlijkse behoefte aan waterstof. Voor de buurt die is beschouwd betekent dat een opslag variërend van 25 tot 110 ton waterstof voor de diverse varianten. Vanwege een gelijkmatiger aanbod is de behoefte aan opslagcapaciteit bij wind op land kleiner. De behoefte varieert daar grofweg van 10% tot 25% van de totale jaarlijkse behoefte aan waterstof wat neerkomt op circa 5 tot 45 ton waterstof voor de verschillende varianten. De bandbreedte in opslagcapaciteit bij de hybride-varianten is het gevolg van verschillende aannames over de bijdrage van de piekkel in de ruimteverwarming en de verwarming van tapwater: a) tapwater vrijwel alleen door de ketel, of b) evenredige verdeling volgens aanname 70%/30%. Dit leidt tot verschillende vraagprofielen voor waterstof, en daarmee tot een verschillende behoefte aan opslag.

³⁵ <https://www.essent.nl/kennisbank/zonnepanelen/hoe-werken-zonnepanelen/opbrengst-zonnepanelen-per-maand>

³⁶ CBS: <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/70802NED/table?fromstatweb> (jaar 2016)

Tabel 8 Indicaties voor benodigd vermogen aan elektrolyse en lokale opslagcapaciteit voor waterstof bij directe koppeling van elektrolyse met lokale duurzame energie.

Casus: Woonwijk met 590 woningen, waarvan gemiddeld 560 bewoond.					
Situatie	Type verwarming	Zon-PV		Wind op Land	
		Elektrolyse [MW]	Opslag-capaciteit [ton H ₂]	Elektrolyse [MW]	Opslag-capaciteit [ton H ₂]
Huidige vraag naar aardgas 1.340 m ³ /jaar	100% H ₂ -ketel	11,7	110	4,0	45
	Hybride WP - 70% elektriciteit - 30% waterstof	4,6	35 - 45	1,6	10 - 15
Isolatie tot een aardgasvraag 1.000 m ³ /jaar	100% H ₂ -ketel	8,7	80	3,0	30
	Hybride WP - 70% elektriciteit - 30% waterstof	3,4	25 - 30	1,2	5 - 15

Bij lokale productie kan de elektrolyse installatie ook worden gedimensioneerd op de piekvraag naar waterstof in plaats van het piekaanbod van duurzame energie. De installatie is dan kleiner dan bij directe koppeling aan het wind- of zonnepark. Ook nu zal de installatie nog steeds voor een groot deel van het jaar een te grote capaciteit hebben, maar in dit geval is er in principe geen opslag nodig anders dan voor bijvoorbeeld een back-up voorziening. In deze opzet moet de installatie wel zijn gekoppeld aan het openbare net en vindt uitwisseling van overaanbod en tekorten van elektriciteit voor productie van waterstof plaats via het net. Uitgaande van een maandprofiel, blijkt voor de maand met de hoogste vraag naar warmte in de variant 'huidige vraag - 100% H₂-ketel', een installatie van 2,7 MW te volstaan in plaats van 11,7 MW en 4,0 MW bij directe koppeling met respectievelijk zon en wind. In de overige varianten is er een vergelijkbare afname van de vereiste capaciteit van de elektrolyse-installatie (zie Tabel 9).

Een derde optie voor lokale productie is om de elektrolyse-installatie af te stemmen op de gemiddelde waterstofvraag gedurende het jaar en de installatie volcontinu te laten draaien. In de situatie met de hoogste vraag volstaat dan een installatie van 1,3 MW. Ook in deze optie is de installatie gekoppeld aan het openbare net. Daar vindt uitwisseling van overaanbod en tekorten van elektriciteit plaats. Overaanbod (in de zomer) en tekorten (in de winter) van waterstof moeten worden vereffend via een lokale opslag. De behoefte aan opslagcapaciteit is in deze opzet kleiner dan bij het direct gekoppelde zon-PV/elektrolyse systeem. Maar met een bandbreedte van 8 tot 70 ton waterstof voor de verschillende varianten is de behoefte nog aanzienlijk, en zelfs groter dan voor het direct gekoppelde wind op land/elektrolyse systeem (vergelijk Tabel 8 en Tabel 9).

Tabel 9 Indicaties voor benodigd vermogen aan elektrolyse en lokale opslagcapaciteit voor waterstof bij dimensionering van elektrolyse op basis van de maand met de hoogste warmtevraag (productie volgt de vraag) en op basis van de gemiddelde jaarvraag (continue productie op vol vermogen)

Casus: Woonwijk met 590 woningen, waarvan gemiddeld 560 bewoond.					
Situatie	Type verwarming	Capaciteit elektrolyse o.b.v. de gemiddelde vraag in maand met hoogste warmtevraag		Capaciteit elektrolyse o.b.v. de gemiddelde jaarvraag naar warmte met continue productie	
		Elektrolyse [MW]	Opslagcapaciteit [ton H ₂]	Elektrolyse [MW]	Opslagcapaciteit [ton H ₂]
Huidige vraag naar aardgas 1.340 m ³ /jaar	100% H ₂ -ketel	2,7	-	1,3	70
	Hybride WP - 70% elektriciteit - 30% waterstof	0,6 - 0,8	-	0,4	10 - 20
Isolatie tot een aardgasvraag 1.000 m ³ /jaar	100% H ₂ -ketel	2,0	-	0,9	50
	Hybride WP - 70% elektriciteit - 30% waterstof	0,5 - 0,6	-	0,3	10 - 15

Een alternatief is om de installatie niet volcontinu te laten draaien, maar met het kleinere systeem de vraag naar waterstof te volgen. In de maanden dat de waterstofvraag hoger is dan de installatie kan leveren zal het aanbod dan moeten worden aangevuld met levering per vrachtauto zolang er geen verbinding is met een centrale pijpleidinginfrastructuur. Voor de voorbeeldwijk blijkt bij het gehanteerde maandprofiel levering noodzakelijk in de periode november tot en met maart. Bij levering van 1000 kg waterstof per keer varieert de leveringsfrequentie in die periode van 1 vrachtauto per 3,5 dagen in november en maart tot 1 vrachtauto per 1,5 dagen in januari.³⁷

Levering per vrachtauto bij centrale productie

Indien er geen lokale productie is, zal alle waterstof moeten worden aangevoerd per vrachtauto zolang er geen verbinding is met een centrale pijpleidinginfrastructuur. In de variant met de hoogste vraag, te weten 'huidige vraag - 100% H₂-ketel', zou dit neerkomen op 198 vrachtauto's met 1000 kg waterstof. Gemiddeld is dat bijna 1 vrachtauto per 2 dagen. De frequentie varieert echter door het jaar heen als gevolg van het profiel in de warmtevraag. Voor de voorbeeldwijk loopt bij het gehanteerde profiel op maandbasis de leveringsfrequentie in de wintermaanden op tot iets meer dan 1 vrachtauto per dag, terwijl in de zomermaanden kan worden volstaan met 1 levering per 10 dagen. Naarmate de vraag naar waterstof afneemt loopt ook het aantal leveringen en de leveringsfrequentie terug. Afhankelijk van de aanname over de bijdrage van de piekketel in de ruimteverwarming en de verwarming van

³⁷ Standaard tube trailers met stalen tanks bevatten 300 kilo waterstof op een druk van 200 bar. Er zijn echter ook al opleggers met composiet tanks die levering van 1000 kg op 500 bar mogelijk maken. 1000 kg waterstof is het equivalent van bijna 3800 m³ aardgas. Tot slot is levering van vloeibaar waterstof mogelijk. Dan kan in een keer 4000 kg geleverd worden.

tapwater loopt het aantal leveringen in de variant met de laagste vraag terug tot 44 à 51 vrachtwagens per jaar. De gemiddelde frequentie komt dan op 1 levering per 7 à 8 dagen, met een variatie van 1 levering per 4 à 5 dagen in de maand met de hoogste vraag, en 1 levering per 11 tot 46 dagen in de maanden dat er alleen een warmtevraag is voor tapwater.

Tabel 10 Indicaties voor het aantal dagen dat de vraag naar waterstof kan worden gedekt met levering van een batch van 1000 kg waterstof per vrachtauto bij volledige voorziening per vrachtauto, en bij aanvulling van tekorten als elektrolyse is gedimensioneerd op de gemiddelde jaarvraag en vraagvolgend wordt bedreven (productie volgt de vraag).

Casus: Woonwijk met 590 woningen, waarvan gemiddeld 560 bewoond.					
Situatie	Type verwarming	Alleen levering van waterstof uit centrale productie per vrachtauto (1000 kg waterstof, ca. 3800 m ³ aardgas equivalent per keer)		Capaciteit elektrolyse o.b.v. de gemiddelde jaarvraag naar warmte met afregeling als de vraag lager is dan de capaciteit; aanvulling uit centrale productie als de vraag groter is dan productiecapaciteit	
		Elektrolyse [MW]	# dagen voorziening per truck van 1000 kg	Elektrolyse [MW]	# dagen voorziening per truck van 1000 kg
Huidige vraag naar aardgas 1.340 m ³ /jaar	100% H ₂ -ketel	-	<1 - 10	1,3	1,5 – 3,5
	Hybride WP - 70% elektriciteit - 30% waterstof	-	3 - 34 / 4 - 11	0,4	10 - 22
Isolatie tot een aardgasvraag 1.000 m ³ /jaar	100% H ₂ -ketel	-	>1 - 14	0,9	2 - 5
	Hybride WP - 70% elektriciteit - 30% waterstof	-	4 – 46 / 5 - 11	0,3	14 - 31

Het aantal vervoersbewegingen met behorende risico's in de variant met de hoogste vraag kan lokaal tot een niet acceptabele belasting leiden, ook als het een overgangssituatie zou betreffen. Dit lijkt niet, of is in ieder geval veel minder aan de orde bij het aantal vervoersbewegingen in de situatie met de laagste vraag. Deze beschouwing levert daarmee hetzelfde beeld als de resultaten voor het benodigd vermogen aan zon-PV en windturbines, en de capaciteit van elektrolyse-installaties en bijbehorende opslag; het belang van reductie van de warmtevraag door isolatie, en het zoveel mogelijk direct inzetten van elektriciteit voor verwarming door een warmtepomp is onverminderd groot, ook indien er door het tekortschieten van alternatieven een rol voor waterstof is in de verwarming in de bestaande bouw.

