

Waterstof:

technische, economische en maatschappelijke acceptatie

Een literatuuroverzicht

L.J.M. Heijne
Januari 2023

Inhoudsopgave

	pagina
1 Inleiding	3
2 Samenvatting en conclusies	4
3 Veiligheid en technische aspecten van waterstof	15
3.1 Inleiding	15
3.2 Gebruik en productie van waterstof	15
3.3 Vergelijking van waterstof met andere brandstoffen	18
3.4 Opslag van waterstof	19
3.5 Het transport van waterstof in bestaande gasleidingen	20
3.6 Veiligheid van waterstof	21
3.7 Samenvatting	24
4 Waterstof in een duurzame toekomst	26
4.1 Inleiding	26
4.2 Kansen voor waterstof	26
4.3 De rol van waterstof in het Nederlandse klimaatbeleid	35
4.4 Samenvatting	39
5 Kosten en beschikbaarheid van waterstof	40
5.1 Inleiding	40
5.2 Productiekosten van waterstof	40
5.3 Acceptatie van groene en blauwe waterstof	45
5.4 Omvang waterstofproductie	47
5.5 Samenvatting	49
6 Maatschappelijke acceptatie van duurzame energie	51
6.1 Inleiding	51
6.2 Dimensies van maatschappelijke acceptatie	51
6.3 Factoren die maatschappelijke acceptatie bepalen	53
6.4 Samenvatting	59
7 Maatschappelijke acceptatie van waterstof	61
7.1 Inleiding	61
7.2 Maatschappelijke acceptatie van waterstoftechnologie	61
7.3 Maatschappelijke acceptatie van waterstof in het vervoer	63
7.4 Maatschappelijke acceptatie van waterstoftankstations	64
7.5 Invloed van locatie waterstoftankstations op acceptatie	70
7.6 Waterstoftankstations in Groningen	70
7.7 Samenvatting	71
8 Elektrisch rijden op waterstof en op batterijen	73
8.1 Inleiding	73
8.2 Verschillen tussen waterstofrijden en batterijrijden	73
8.3 Ontwikkeling elektrisch rijden	80
8.4 Kosten autorijden en gevolgen voor milieu	82
8.5 Samenvatting	85
9 Waterstof in de woonomgeving	87
9.1 Inleiding	87
9.2 Waterstof als vervanging voor aardgas	87
9.3 Waterstofprijs in vergelijking met aardgasprijs	88
9.4 Kansen voor waterstof in de woonomgeving	89
9.5 Waterstofwijk in Hoogeveen	93
9.6 Draagvlak	96
9.7 Samenvatting	99
10 Bijlage	100
11 Literatuur	101

Inleiding

Dit rapport is geschreven als achtergrondinformatie voor twee projecten waarbij de Hanzehogeschool Groningen betrokken is: de bouw van een waterstoftankstation in Groningen en de ontwikkeling van een waterstofwoonwijk in Hogeveen. Het waterstoftankstation is in november 2021 feestelijk geopend en de waterstofwijk is nog volop in ontwikkeling.

Beide projecten dragen bij aan de realisatie van een klimaatneutrale toekomst. Nederland wil in 2050 klimaatneutraal zijn, met andere woorden: er mag netto geen uitstoot meer zijn van broeikasgassen. Hierdoor wordt de opwarming van de aarde beperkt en worden ongewenste klimaatveranderingen voorkomen.

Het rapport gaat over de rol die waterstof kan spelen in de transitie van fossiele energie naar duurzame energie. Het geeft een breed beeld van wat waterstof is, wat de kansen en kosten zijn én of er maatschappelijk draagvlak is. Technische, economische en sociaalpsychologische aspecten komen hierbij aan de orde, waardoor het rapport interessant is voor een breed publiek van geïnteresseerden in de energietransitie. Met de nadruk op de rol die waterstof hierin kan spelen. Toen mij een paar jaar geleden werd gevraagd om te participeren in een onderzoek naar de vestiging van een waterstoftankstation in Groningen, was waterstof voor mij een onbekend fenomeen. Ik heb lang geleden economie gestudeerd en daar stond waterstof niet op het programma. Wél heb ik nog niet zo heel lang geleden onderzoek gedaan naar wat mensen vinden van biovergisters (Wiekens c.s. 2016). Daar ligt dus een verbinding naar maatschappelijke acceptatie van waterstof.

In hoofdstuk 2 staan de samenvatting en de conclusies die ik getrokken heb uit mijn ontdekkingsreis naar waterstof. In de hoofdstukken daarna wordt een overzicht, een review gegeven van de literatuur die ik de afgelopen jaren verzameld heb. Ik geef daarin in eigen woorden de verschillende meningen en standpunten weer. Eerst ben ik gaan uitzoeken wat waterstof is, wat je ermee kunt doen, wat de gevaren zijn en hoe het gemaakt wordt. Dat staat in hoofdstuk 3.

Op YouTube zag ik een filmpje met een batterij in water waar gasbellen uitkwamen. Heel kleinschalig en het idee was duidelijk: als elektriciteit door water wordt geleid ontstaat waterstofgas. Als de elektriciteit van windmolens of zonnepanelen komt, is waterstof duurzaam zonder dat er nadelen zijn voor het milieu en het klimaat. Daarom kan waterstof een belangrijke rol spelen in het Nederlandse klimaatbeleid om te voldoen aan de klimaatafspraken die in Parijs gemaakt zijn, zoals hoofdstuk 4 aantoont. Natuurlijk wilde ik als econoom weten, hoeveel het kost om waterstof te maken. Daarover verschillen de deskundigen van mening. Maar: ze zijn het er wel over eens dat het goedkoper wordt door technologische ontwikkeling en door vergroting van de productie. In hoofdstuk 5 staat meer daarover.

De eerste stap naar de ontwikkeling van nieuwe duurzame, groene waterstof is haalbaarheid: kan het technisch en is het veilig? De tweede stap is betaalbaarheid: kan het financieel? Na haalbaar en betaalbaar is de volgende stap: willen we het? Het verhaal over de maatschappelijke acceptatie staat in hoofdstuk 6. De maatschappelijke acceptatie van de waterstoftechniek en meer specifiek de acceptatie van waterstofauto's en waterstoftankstations wordt behandeld in hoofdstuk 7. Om duurzaam auto te rijden kun je op waterstof rijden maar je kunt ook op batterijen (accu's) rijden. Deze twee manieren van elektrisch rijden worden met elkaar vergeleken in hoofdstuk 8.

Een paar jaar geleden raakte ik betrokken bij een waterstofproject in Hogeveen waar onderzocht wordt of waterstof gebruikt kan worden in de woonomgeving om de huizen mee te verwarmen, om erop te koken en te zorgen voor warm (tap)water. Deze ervaringen zijn te vinden in hoofdstuk 9.

De oorlog in Oekraïne heeft grote invloed op de wereldeconomie en daarmee op de energietransitie. Het is nog niet duidelijk of de energietransitie hierdoor minder prioriteit krijgt of toch juist urgenter wordt.

Leo Heijne

Groningen, januari 2023.

2 Samenvatting en conclusies

Samenvatting

De internationale klimaatafspraken van Parijs 2015 zijn het uitgangspunt van het Nederlandse energiebeleid waardoor er per saldo geen uitstoot meer is van CO₂ in 2050. De klimaatoppen in Glasgow (2021) en in Egypte (2022) hebben de urgentie bevestigd om de temperatuurstijging te beperken tot 1,5/2 graden. In het nationaal klimaatakkoord van 2019 staat het centrale doel: het terugdringen van de uitstoot van broeikasgassen in Nederland in 2030 met 49% ten opzichte van 1990 en daarnaast het streven naar klimaatneutraliteit, een nulmissie-economie, in 2050. Er wordt dan geen fossiele energie meer gebruikt, zoals aardgas, aardolie en steenkool. Een deel van de energievraag wordt dan gedekt door duurzame elektriciteit en een ander deel door duurzame gassen, zoals groene waterstof.

Waterstof wordt al meer dan 100 jaar geproduceerd en gebruikt in de industrie als grondstof en voor hogetemperatuurwarmte. Het kan ook worden ingezet als brandstof in het vervoer en voor opwekking van lagetemperatuurwarmte en elektriciteit. Waterstof is geen primaire energiebron, maar wordt net als elektriciteit uit een primaire energiebron gemaakt. In Nederland wordt vooral uit aardgas, via stoommethaanreforming, waterstof geproduceerd. Doordat bij het productieproces CO₂ vrijkomt is er voor deze zogenaamde grijze waterstof na 2050 geen plaats meer.

Productie, distributie en opslag van waterstofhoudende gassen is niet nieuw in Nederland. Voor de komst van aardgas waren veel Nederlandse huishoudens aangesloten op stadsgas dat voor het grootste deel bestond uit waterstof.

Groene waterstof is een duurzaam alternatief. Het wordt gemaakt van duurzaam opgewekte elektriciteit. Met elektrolyse-technieken splitst groene elektriciteit water in waterstof en zuurstof. Op dit moment wordt vooral alkaline elektrolyse (AEL) gebruikt. De proton-exchange membraan elektrolyse (PEM) is duurder maar flexibeler en reageert beter op wisselende input van zonne- en windelectriciteit. De verwachting is dat beide technieken in de toekomst ingezet worden. Een belangrijk aandachtspunt is de schaarste aan grondstoffen die nodig zijn bij de elektrolyse en de omzetting van waterstof in energie. Er is nationaal en internationaal nog nauwelijks groene waterstof beschikbaar. De grootste installaties hebben een zeer beperkte capaciteit: Alkaline 165 MW (Megawatt) en PEM 6 MW.

Vergeleken met aardgas is de energetische waarde van waterstofgas drie keer lager. Waterstof geeft geen koolmonoxidevergiftiging, heeft brede explosiegrenzen, een lage ontbrandingstemperatuur en stijgt snel op in de lucht. Ook in vergelijking met benzine heeft waterstof een hoge energetische waarde, een breed ontvlambaarheidsbereik en een lage dichtheid ten opzichte van lucht.

Waterstof kan worden opgeslagen via compressie, liquefactie en opslag in hydriden. Compressie is de meest gebruikte methode. Waterstof wordt dan samengeperst en onder druk opgeslagen.

Waterstof kan grootschalig worden opgeslagen in lege zoutcavernes in Noordoost-Nederland: de techniek is bekend en wordt al toegepast. Maar er is dringend onderzoek nodig naar de precieze mogelijkheden en naar alternatieven, zoals opslag in lege gasvelden.

Het huidige aardgasnet is geschikt voor transport van waterstof. De Gasunie mag van de regering het Nederlands aardgasnet gaan ombouwen voor het transport van waterstof naar de industriële clusters. Gebruik van het bestaande gasnetwerk is goedkoper dan de aanleg van een nieuw waterstofnetwerk. Er zijn wel aanpassingen nodig bij compressoren en meetstations. Ook moet de regelgeving worden aangepast. Om onnodige kosten te voorkomen, kan deze ombouw het beste stapsgewijs plaatsvinden in samenhang met de ontwikkeling van de waterstofmarkt.

Waterstof is een gevaarlijk gas, maar nationaal en internationaal is het uitgangspunt, dat door het toepassen van strenge veiligheidsnormen waterstof geen grotere risico's geeft dan andere brandstoffen. De risico's zijn wel anders: waterstof is niet te ruiken, zien en proeven, heeft een lagere

ontstekingsenergie en grotere ontvlambaarheidsbereik, zendt minder stralingswarmte uit en brandt overdag in een schone omgeving met een vrijwel onzichtbare vlam. Bij opslag onder druk in tanks bestaat het gevaar van ontploffing en van 'jet flames' (lange vlammen met hoge temperaturen). Nederland heeft een innovatieprogramma waterstofveiligheid met als doel te komen tot landelijk uniform beleid en wet- en regelgeving voor veiligheidsaspecten en risico's in de gehele waterstofketen. Ondanks strenge (inter)nationale richtlijnen zijn er toch ernstige incidenten geweest met waterstof in het transport. Het is daarom nodig dat er blijvend aandacht is voor wetgeving, standaarden en werkwijzen om ook buiten de industrie veilig te werken met waterstof.

De belangstelling voor waterstof is in het afgelopen decennium sterk toegenomen. Groene waterstof is onmisbaar in de toekomstige duurzame energievoorziening, omdat daarmee energie uit wind en zon grootschalig kan worden opgeslagen. Kleinschalig zijn hiervoor batterijen geschikt. Waterstof en batterijen zorgen ervoor dat duurzame energie net als fossiele energie plaats- en tijd-onafhankelijk wordt: het kan op een andere plek en op een ander moment worden gebruikt dan het wordt geproduceerd. Als wind en zon een belangrijke rol spelen in de toekomst, zijn centrales nodig met hetzelfde vermogen als de huidige centrales om tijdens 'Dunkelflaute' (als de wind niet waait en de zon niet schijnt) in de energievraag te voorzien. In de toekomst is er behoefte aan een nieuw geïntegreerd energiesysteem, waarbij een evenwichtige uitbouw en verzwaring van het elektriciteitsnetwerk samengaat met optimale benutting van de bestaande gasinfrastructuur. Energietransport door leidingen is goedkoper dan door elektriciteitskabels en als bestaande gasleidingen hergebruikt worden, dan wordt kapitaalvernietiging voorkomen.

Waterstof heeft veel potentie om een belangrijk rol te gaan spelen in het duurzame energiesysteem, maar er zijn nationaal en internationaal ook nog veel uitdagingen. De kostprijs van groene waterstof moet door opschaling nog fors dalen om te kunnen concurreren met de fossiele alternatieven. Daarnaast zijn financiering, wet- en regelgeving, marktontwikkeling, veiligheid, het beschikbaar krijgen van de benodigde arbeidskrachten en maatschappelijke acceptatie van groot belang voor een succesvolle ontwikkeling van waterstof.

In de regeringsvisie vindt de energietransitie naar 2050 plaats door energiebesparing en opschaling, kostenreductie en innovatie van de productie van duurzame gassen. Het gebruik van aardgas wordt teruggebracht. Er zal meer elektriciteit gebruikt worden, maar gassen blijven nodig. Blauwe waterstof, waarbij CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen, is in de energietransitie tot 2050 noodzakelijk. De overheid wil de regie nemen en de noodzakelijke randvoorwaarden vervullen door te stimuleren, ondersteunen, subsidiëren, onderzoeken en regelgeving aan te passen. Bedrijven moeten investeren in schaalbare toepassingen en innovatie. Er is een strategisch visie op aardgas, groen gas en waterstof. Waterstof past in de Nederlandse en Europese groeistrategie op de lange termijn. Nederland wil een voortrekkersrol spelen in de ontwikkeling van waterstof in Europa en een hubfunctie blijven vervullen, door naast de waterstof uit de offshore windenergieproductie in de Noordzee ook aanzienlijke hoeveelheden waterstof te importeren. Waterstof biedt kansen voor een schoner milieu, groeiende werkgelegenheid en minder afhankelijkheid van leveranciers van olie en aardgas, zoals de oliestaten in het Midden-Oosten en Rusland.

Voor opschaling van groene waterstof zijn veel meer windmolens nodig zijn en grotere elektrolysefabrieken waar zonne- en windenergie wordt omgezet in waterstof.

De overheid moet bij de subsidiëring van waterstof het algemeen belang in het oog houden, afstand houden van het bedrijfsleven en de gevolgen van subsidies op de waterstofprijzen zowel nationaal als internationaal kritisch evalueren.

Door schaalvergroting en research & development gaan de kosten van groene waterstof naar verwachting sterk dalen. De productiekosten worden bepaald door factoren als kosten en bedrijfstijd van elektrolyzers en prijzen van groene elektriciteit. De schattingen voor de productiekosten van

groene waterstof lopen uiteen, doordat er nog nauwelijks productie is van groene waterstof. De uitkomsten zijn dus gebaseerd op experimenteel onderzoek en modelberekeningen, die afhankelijk zijn van allerlei gemaakte veronderstellingen. Ook lopen de kosten internationaal voor verschillende landen uiteen. Het gaat dus niet zozeer om de precieze getallen, maar om de trend dat elektrolyse goedkoper wordt door schaalvergroting en technologische ontwikkeling.

Ruwweg zullen de productiekosten voor groene waterstof in 2030 tussen de € 2 en € 6 per kg liggen. Ze dalen dus tussen 2020 en 2030 met de helft. Toch is groene waterstof dan nog altijd twee tot drie keer duurder dan grijze waterstof. Pas in de verdere toekomst richting 2050 zou de productieprijs van groene waterstof in de buurt kunnen komen van de prijs van grijze waterstof. Uiteindelijk gaat het niet om de kostprijs, maar om de marktprijs van waterstof. Echter, de markt met vraag en aanbod moet zich nog ontwikkelen.

Blauwe waterstof is een mogelijkheid om sneller de uitstoot van CO₂ te reduceren. Als de kosten van afvang en opslag van CO₂ lager worden dan de belasting die betaald wordt om CO₂ uit te stoten, wordt blauwe waterstof financieel aantrekkelijker dan grijze waterstof. Over het omslagpunt in de tijd lopen de prognoses uiteen. In sommige modellen ligt het omslagpunt van grijs naar blauw al eerder dan 2030 en de omslag van blauw naar groen tussen 2030 en 2050. In andere modellen vindt de omslag naar groene waterstof pas na 2050 plaats vinden.

Voor de industrie is blauwe waterstof een belangrijke tussenstap naar een fossielvrije toekomst. De milieubeweging en de Europese Commissie willen echter geen blauwe tussenstap, maar meteen groene waterstof. Zij vinden dat blauwe waterstof geen oplossing is voor de lange termijn. Hierdoor wordt de energietransitie wel duurder.

Kerncentrales kunnen ook regelbaar vermogen leveren. Waterstof gemaakt van elektriciteit van kerncentrales wordt paarse waterstof genoemd.

De belangrijkste aanjager van de ontwikkeling van waterstof is de industrie, waar mogelijkheden zijn voor schaalvergroting en ontwikkeling van een waterstoftransportnetwerk. Schaalvergroting en marktzekerheid zijn noodzakelijk. De productie moet verduizendvoudigen. Nederland en Noordwest-Europa moeten ruwweg de helft van hun duurzame energie invoeren en blijven dus afhankelijk van andere regio's. Door de oorlog in Oekraïne is een discussie ontstaan over deze afhankelijkheid. Het beleid in Nederland en Europa zal er de komende jaren sterk op gericht zijn deze afhankelijkheid te verminderen.

Maatschappelijke acceptatie van duurzame energie gaat over sociaal-politieke acceptatie, over lokaal draagvlak en over succes in de markt. Het betreft beleidskaders, gericht op het stimuleren van hernieuwbare energiebronnen en op de algemene acceptatie van nieuwe technologieën. Lokaal draagvlak is de acceptatie door bewoners en lokale autoriteiten. Het gaat daarbij over rechtvaardigheid van procedures, verdeling van baten en lasten en onderlinge vertrouwen. Bij de acceptatie door de markt moeten bedrijven en consumenten het aantrekkelijk genoeg vinden om duurzame energie te gaan maken en te gaan gebruiken.

Het maatschappelijk draagvlak kan bij voor- en tegenstanders actief of passief zijn.

De acceptatie wordt bepaald door objectieve en subjectieve factoren. De objectieve factoren betreffen alle gevolgen van de invoering van waterstof voor de samenleving en de individuen én de manier waarop de gevolgen worden verdeeld. Deze factoren zijn technisch, financieel-economisch, juridisch en maatschappelijk van aard. Subjectieve, individuele, psychologische factoren bepalen hoe mensen objectieve factoren ervaren. Daarbij gaat het om waarden: levensdoelen of idealen die mensen belangrijk vinden en willen nastreven. Zelf-overstijgende waarden gaan primair uit van collectieve uitkomsten, gericht op het welbevinden van andere mensen en de maatschappij of op de kwaliteit van de omgeving. Zelf-verheffende waarden gaan uit van individuele baten en lasten. Bij de acceptatie van energiealternatieven gaat het niet alleen om financiële argumenten: mensen

accepteren duurdere duurzame energie als er andere aantrekkelijke gevolgen voor het milieu of klimaat tegenover staan. Vertrouwen is een belangrijke factor voor maatschappelijke acceptatie. Mensen hebben de neiging om meer vertrouwen te hebben in partijen met waarden die aansluiten bij hun eigen waarden. Gedrag wordt bepaald door bewuste en onbewuste processen. Bij bewuste processen worden beslissingen weloverwogen genomen aan de hand van factoren als de eigen effectiviteit, het verantwoordelijkheidsgevoel en de verwachte voor- en nadelen. Bij onbewuste processen gebeurt dat niet.

Gedrag kan op allerlei manieren beïnvloed worden, waarbij rekening wordt gehouden met bewuste en onbewuste processen. Meer kennis leidt niet altijd tot gedragsverandering en gedragsintenties, net zomin als goede voornemens. Woorden zijn nog geen daden.

Hoewel de kennis van waterstof beperkt is, is de algemene opinie in Nederland en Europa over de waterstoftechnologie positief vanwege het vertrouwen in de technologie en de zorgen om het milieu en de planeet voor de komende generatie. Maar al staan consumenten positief tegenover waterstof, dan hoeft dat niet te betekenen dat ze waterstof gaan gebruiken. Dat hangt ook af van de kosten, de technologische volwassenheid, de beschikbaarheid en de aantrekkelijkheid van alternatieven.

Rijden in waterstofauto's wordt vanuit economisch perspectief verklaard door de preferenties, kennis en beschikbaar budget van de consument. Kosten spelen een belangrijke rol bij de aankoopbeslissing. Daarnaast zijn prestaties en gebruiksgemak van belang en zijn milieufactoren minder belangrijk. Waterstofauto's zijn duur, het aantal modellen is beperkt en er zijn maar weinig tankstations. Toch kunnen consumenten kiezen voor een waterstofauto, omdat zo'n auto zelfidentiteit laat zien: interesses, overtuigingen, waarden en sociale status. Groene waterstof geeft de mogelijkheid om te rijden zonder het milieu te schaden.

Acceptatie van waterstof in het vervoer wordt door deskundigen vaak gezien als een veiligheidsprobleem. Maar het woord 'waterstof' wordt zelden of nooit gekoppeld aan termen als gevaar of risico.

Waterstoftankstations worden niet als gevaarlijker gezien dan conventionele tankstations. Positieve communicatie is belangrijk en de aandacht moet zich op een breed publiek richten. Acceptatie van waterstof tanken en rijden kan ook bevorderd worden door mensen op proef zelf te laten tanken en te rijden.

Bij de psychologische verklaring voor de acceptatie van een waterstoftankstation blijken morele overwegingen belangrijker te zijn dan kosten-baten afwegingen. Meer informatie leidt niet altijd tot meer draagvlak. Het draagvlak kan vergroot worden door strenge veiligheidsnormen, door eisen te stellen aan de herkomst van waterstof en door een zorgvuldige locatiekeuze van een waterstoftankstation. Voor draagvlak is vertrouwen nodig op basis van open, eerlijke en vroegtijdige communicatie met alle betrokkenen. Belangrijk is ook wie communiceert. Het vertrouwen in de milieubeweging is groter dan in de overheid en het bedrijfsleven.

Het draagvlak voor een waterstoftankstation wordt sterker beïnvloed door psychologische factoren, zoals positieve (vreugde, trots) en negatieve (boosheid, angst) emoties, dan door objectieve factoren, zoals sociaal-demografische variabelen, baten voor het milieu en energiezekerheid. Er is weinig weerstand te verwachten tegen de komst van een waterstoftankstation, maar er is ook weinig positieve steun. Het verzet van enkelen kan echter wel negatieve invloed hebben.

In de communicatie is een evenwichtige balans belangrijk tussen de positieve en negatieve gevolgen van de vestiging van een waterstoftankstation. Acties die het positieve gevoel versterken en het negatieve gevoel verminderen leiden tot meer draagvlak en minder weerstand. Mensen die bij een waterstoftankstation wonen zijn na implementatie positiever dan ervoor. De weerstand tegen tankstations is in zijn algemeenheid laag in Nederland.

Acceptatie van waterstofrijden wordt gestimuleerd door aan te sluiten bij het tankgedrag van

automobilisten. Omdat de meeste mensen tanken in een vertrouwde omgeving, wordt de hoogste acceptatie bereikt door bestaande tankstations -verspreid over het hele land- uit te breiden met een waterstofpomp. Als er meer waterstoffaciliteiten zijn in binnen- en buitenland kan dat ook gezien worden als een succesindicator waardoor vooral innovatieve automobilisten worden gestimuleerd om te rijden op waterstof.

Waterstofauto's en batterijauto's zijn twee manieren om emissieloos elektrisch te rijden. Het voordeel van de batterijauto boven de waterstofauto is de hogere efficiëntie. Bij een batterijauto is geen omzetting nodig van elektriciteit naar waterstof en omgekeerd, waardoor er bij batterijauto's voor het afleggen van dezelfde afstand 2 tot 3 keer minder elektriciteit nodig is. Ook is er in Nederland een snelle uitbouw van snelle elektrische laadstations, terwijl er nog maar weinig waterstoftankstations zijn. Daarnaast kunnen mensen thuis, bij het werk en bij winkelcentra laden. De voordelen van batterijauto's zijn verder de lagere aanschafprijs, meer keuzemogelijkheden en de lagere brandstofprijs. Daar tegenover staan voordelen van waterstof: sneller tanken, het afleggen van langere afstanden met een volle tank, het lagere gewicht, de ongevoeligheid voor koud weer en het gebruik van minder schaarse materialen.

Ook zijn er op langere termijn kansen voor waterstofauto's wanneer bij kostenberekeningen de uitbreidingskosten van het elektriciteitsnet worden meegenomen. De totale investeringskosten voor de ontwikkeling van een waterstofinfrastructuur zouden wel eens veel lager kunnen uitvallen dan voor uitbreiding van het elektriciteitsnetwerk. Ook worden waterstofauto's kosteneffectiever door innovatie en schaalvergroting. Waterstofauto's en batterijauto's zijn eerder complementair dan concurrerend. Batterijauto's zijn een goed alternatief voor benzineauto's en waterstof is interessant voor dieselveertuigen. Er zijn vooral kansen voor waterstof in het niet-personenvervoer: bestelauto's, vrachtwagens, hefvoerwerktuigen, vuilnis- en veegwagens, scheepvaart en het openbaar vervoer.

Waterstof gaat belangrijk worden in de energietransitie. De sectoren die niet geëlektrificeerd kunnen worden, moeten daarbij het eerst aan bod komen. Personenauto's kunnen dan beter op batterijen rijden dan op waterstof. Bovendien is dat efficiënter.

Een stilstaande elektrische auto kan ingezet worden als powerplant en elektriciteit leveren aan het net, een woning of een bedrijfsgebouw en kan daardoor bijdragen aan stabilisatie van het elektriciteitsnetwerk.

Als in de logistieke sector wagens continu op weg moeten kunnen zijn, is het nadelig dat het laden van batterijen veel tijd kost. Waterstof is dan een interessante optie.

Het overheidsbeleid gaat tot 2030 uit van beperkte inzet van waterstof in personenauto's. Het accent ligt voor de overheid op het verduurzamen van de eigen vloot en het OV-busvervoer. De regering houdt zo de opties voor waterstof voor de langere termijn open, met als gevaar dat investeren in waterstof de overgang naar batterijrijden wordt belemmerd. Nederland kan de ambitie uit het klimaatakkoord halen dat in 2030 alle nieuw verkochte auto's elektrisch zijn; dat zijn voornamelijk batterijauto's.

Het aantal laadstations voor batterij- en waterstofauto's groeit in Nederland en het buitenland. Steeds meer Nederlanders rijden elektrisch. Toch is nog maar een half procent van de Nederlandse auto's elektrisch en hiervan is het aantal waterstofauto's nog geen half procent. Meer dan driekwart van de Nederlanders is ervan overtuigd dat er in de toekomst alleen nog elektrisch gereden wordt. De belangrijkste reden om elektrisch te rijden is het milieu en de reden dat automobilisten niet elektrisch rijden zijn de hoge (aanschaf)kosten en de beperkte actieradius. Subsidies hebben een positief effect op het kopen van elektrische auto's. Elektrisch rijden is vooral aantrekkelijk voor mensen die thuis kunnen laden.

Personenauto's, stadsbussen en lichte vrachtwagens gaan vooral batterijelektrisch rijden. Waterstof

gaat een waardevolle rol spelen bij het vergroenen van lange-afstandsvrachtwagens met een zware lading. Autofabrikanten gaan hierop inspelen. In verschillende Europese landen zijn plannen voor de aanleg van netwerken van waterstoftankstations. Holthausen is in 2021 in Nederland gestart met de productie van waterstoftrucks.

Wetenschappelijk onderzoek laat zien dat elektrisch batterijrijden gunstig is voor klimaatverandering en grondstofuitputting; zelfs als de elektriciteit met fossiele energie wordt opgewekt. Door lagere onderhoudskosten en belastingvrijstelling zijn, ondanks hogere aanschafprijzen, de totale kosten van batterijrijden lager dan die van benzinerijden. Waterstofrijden blijft voorlopig nog wel duurder dan benzinerijden en ook de gevolgen voor klimaat en grondstofuitputting zijn gunstiger voor batterijrijden dan voor rijden op waterstof.

In de gebouwde omgeving kan waterstof aardgas vervangen bij verwarmen, koken en voorzien in warm water. Met beperkte kosten is het huidige aardgasnet geschikt te maken voor waterstof. Waterstof geeft geen grotere risico's dan aardgas. Opslag van elektriciteit in waterstof is veel goedkoper en vraagt veel minder ruimte dan opslag in batterijen.

De beschikbaarheid en de prijs van groene waterstof zijn belemmeringen voor de inzet ervan in de woonomgeving. Waterstof blijft de komende jaren veel duurder dan aardgas. Dat geldt voor zowel de directe productiekosten als voor de nationale kosten van waterstof. Maar in een CO₂-loze toekomst is een vergelijking met aardgas niet meer van belang; waterstof moet vergeleken worden met andere duurzame opties. Inherent aan waterstof zijn de efficiency-verliezen: net als in het vervoer is het daarom in de woonomgeving beter om elektriciteit direct, zonder de waterstof-omweg, in te zetten.

De noodzaak voor waterstof en andere duurzame gassen is groter in andere sectoren (met name de industrie) dan in de gebouwde omgeving. In de gebouwde omgeving zijn er alternatieven, zoals warmtepompen, zonnecollectoren, warmtenetten met restwarmte, warmte- en koudeopslag en geothermie. Maar als deze alternatieven niet mogelijk zijn of wanneer er opslag nodig is, komt waterstof toch weer in beeld. Voorlopig is de rol van waterstof in de gebouwde omgeving voor de periode tot 2030 beperkt tot experimenten en voor de langer termijn (2030-2050) is de rol nog onduidelijk.

Een groot deel van de Nederlandse bevolking vindt de klimaatverandering problematisch, maar tegelijkertijd is de steun voor specifieke maatregelen -zoals het aardgasvrij maken van woningen- beperkt. Dat heeft te maken met financiën en onzekerheid over de verschillende technieken om aardgas te vervangen. Het financiële draagvlak is groter bij hogere-inkomensgroepen dan bij lagere. In principe zijn mensen niet negatief, maar er is nog veel onduidelijkheid over de techniek, de toepasbaarheid, de veiligheid en de kosten. Hierdoor zijn mensen vooral afwachtend en is er geen actieve betrokkenheid. Deze onduidelijkheid kwam ook naar voor bij onderzoek naar draagvlak onder bewoners van een mogelijke waterstofwijk in Hoogeveen.

Door isolatiemaatregelen daalt het energiegebruik, waardoor hogere prijzen voor duurzame energie gecompenseerd kunnen worden en de totale energierekening gelijk kan blijven. Investerings in isolatie blijken echter meer te kosten dan ze opleveren. De energietransitie in de woonomgeving is zonder subsidie voorlopig niet woonlastenneutraal.

Conclusies

Het uitgangspunt van dit rapport is dat Nederland in 2050 klimaatneutraal wil zijn om ongewenste klimaatveranderingen te voorkomen. Nederland volgt daarin het Europese beleid. Natuurlijk is het nodig dat hierover ook op wereldniveau afspraken worden gemaakt, maar dit rapport gaat verder niet in op de vraag of en hoe dat mondiaal gerealiseerd gaat worden. Op wereldniveau leidt de groei van opkomende economieën tot een grotere energievraag en als de rijke landen hun energievraag niet verlagen, blijft de totale wereldvraag naar energie toenemen met daarbij de negatieve gevolgen

voor het klimaat.

Voor Nederland zijn er scenario's waarbij door energiebesparing de totale vraag gaat dalen, maar er zijn ook ontwikkelingen die meer energie vragen, zoals datacentra en airco's in de zomer. De vervanging van fossiele energie door duurzame energie leidt tot meer elektrificatie. Onduidelijk is nog, wat naast elektriciteit (elektronen) de rol wordt van duurzame gas (moleculen). De noodzaak van groene waterstof in het toekomstige energiesysteem wordt breed gedeeld, maar er is verschil van inzicht over de omvang, het tijdpad en de importantie.

In de toekomst verdwijnt (goedkoop) Nederlands aardgas, maar wat gebeurt er met de economische activiteiten die hiermee samenhangen: de productie van staal, kunstmest, aluminium en kassentuinbouw? Hier kan waterstof een belangrijke rol spelen, maar wel is de vraag of er andere plaatsen zijn in de wereld waar het logischer, economischer en duurzamer is om deze activiteiten te ontplooiën. Een interessante volgende vraag is dan welke economische activiteiten Nederland gaat ondernemen in 2050: waarmee gaat Nederland dan geld verdienen?

Voor een succesvolle introductie van groene waterstof moeten technische, financiële en maatschappelijke barrières overwonnen worden.

Allereerst moet de waterstoftechnologie (alkaline- en/ of PEM-elektrolyzers) verder ontwikkeld worden. Er zijn alternatieven nodig voor schaarse essentiële grondstoffen. De productie van waterstof moet sterk toenemen: van megawatt naar gigawatt. Dit betekent meer windmolens, zonnepanelen en grote oppervlaktes voor elektrolysefabrieken. Vakmensen moeten worden opgeleid. Bij het gebruik van waterstof in het vervoer moeten er waterstofauto's ontwikkeld en geproduceerd worden. En zijn er waterstoftankstations nodig. Als waterstof gebruikt wordt om huizen te verwarmen, moeten er waterstofverwarmingsketels gemaakt en geïnstalleerd worden. Als de technologie beschikbaar is, wordt meteen de volgende vraag wat de financiële¹ aspecten zijn: hoe duur wordt waterstof in de toekomst? Er is nog geen markt voor waterstof waar via vraag en aanbod een 'echte' prijs tot stand komt. Wel zijn er allerlei ramingen met als uitkomsten dat in 2030 groene waterstof tussen € 2 en € 6 per kg gaat kosten en in 2050 rond € 1. Maar als er veel vraag is en weinig aanbod, blijft de prijs hoog. Ook de overheid heeft invloed op de prijs. Als de overheid geen inkomsten meer heeft uit heffingen op fossiele energie, moet ook op duurzame energie belastingen geheven worden, tenzij de overheid op andere uitgaven bezuinigt. Ook heeft het geen zin om prijzen van duurzame energie te blijven vergelijken met die van fossiel energie, als fossiele energie geen optie meer is.

Als de technische en financiële barrières overwonnen zijn, komt de vraag van de maatschappelijke acceptatie. Wat willen we met elkaar? Hoe staat de maatschappij tegenover waterstof? De maatschappelijke acceptatie van waterstof kent een macro- en een microniveau:

-Bij het macroniveau gaat het om het totale maatschappelijke kader op internationaal en nationaal niveau. Op beleidsniveau heeft de Nederlandse regering een duidelijke visie op waterstof en ook voor Europa is waterstof noodzaak in een duurzame toekomst. Er is een actieve waterstoflobby en op regionaal niveau zijn er stevige waterstofambities. Obstakels voor maatschappelijke acceptatie van waterstof zijn naast de hoge kosten, het verzet tegen windmolens en zonneparken, de grootschalige opslag van waterstof in lege zoutcavernes en de opslag van CO₂ in lege gasvelden bij blauwe waterstof. Er zijn waarschijnlijk te weinig zoutcavernes in Nederland en de beschikbare cavernes liggen in Noord-Nederland, een gebied waar al veel weerstand is door aardgasbevingen, windparken en zoutwinning. De hoop is dat waterstof in lege aardgasvelden op zee kan worden

¹ Het gaat om financiële, geldelijke barrières en niet om economische barrières. Economische barrières omvatten niet alleen geldelijke barrières maar ook externe effecten die niet door het prijsmechanisme worden meegenomen, zoals negatieve gevolgen voor het milieu.

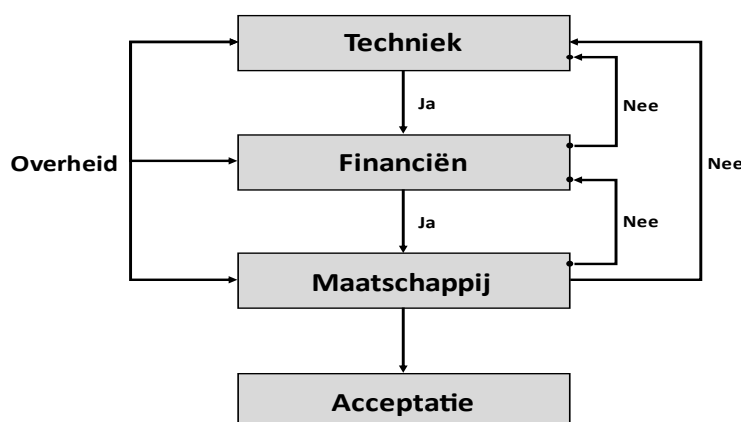
opgeslagen. Verder is er verschil van mening of blauwe waterstof als tussenstap gezet moet worden of dat meteen naar groene waterstof overgestapt moet worden, met daarbij in eerste instantie extra kosten. Het maatschappelijk draagvlak wordt ook beïnvloed door het bedrijfsleven. Het bedrijfsleven moet ook in investeringsgedrag echt kiezen voor een emissieloze toekomst. De acceptatie door de markt betreft de houding van consumenten, producenten en investeerders. Doordat er nog weinig vraag en aanbod is staat de waterstofmarkt nog in de kinderschoenen.

-Het microniveau betreft de manier waarop individuen in hun gedrag reageren op waterstof. Het microniveau is de invloed van het individu als consument, kiezer en bewoner. De acceptatie op lokaal niveau speelt bij waterstof een rol bij de productie- en opslaglocaties van waterstof, bij het waterstofrijden, bij waterstoftankstations en bij vervanging van aardgas in de woonomgeving. De kennis over waterstof is beperkt maar toch staat men er in het algemeen positief tegenover. Ook al staan consumenten positief tegenover waterstof, dan hoeft dat niet te betekenen dat ze waterstof gaan gebruiken. Dat hangt ook af van de kosten, de technologische volwassenheid, de beschikbaarheid en de aantrekkelijkheid van alternatieven. De vestiging van nieuwe waterstoftankstations in Nederland heeft nauwelijks weerstand opgeroepen. Waterstof wordt door nieuwe tankstations, waterstofbussen en -auto's zichtbaarder en bekender. Ook de regionale waterstofplannen geven positieve impulsen aan de regionale economie: innovatie, werkgelegenheid, scholing en duurzaamheid.

Uiteindelijk moeten de technische, economische en maatschappelijke barrières samen overwonnen worden. Als de maatschappij het echt wil kan ook technologie worden ingezet die verliesgevend is, doordat de overheid subsidies verstrekt. Bepaalde technologie kan ook verboden worden, zoals autobussen die CO₂ uitstoten. De overheid kan fossiele energie duurder maken door belastingen en heffingen, zoals een CO₂-belasting. De overheid kan zelf gaan investeren, nationaal en internationaal beleid ontwikkelen en onderzoeksprojecten initiëren. Tenslotte kan de overheid het gedrag van burgers beïnvloeden met voorlichtingscampagnes en informatievoorziening om minder energie te gebruiken en/of duurzame energie in plaats van fossiele energie.

De overheid heeft dus een uitgebreide gereedschapskist met instrumenten om de techniek, de kosten en de maatschappelijke acceptatie in de gewenste richting te sturen. De instrumenten kunnen in meer of mindere mate dwingend zijn. Zachte maatregelen gebaseerd op vrijwilligheid en hardere, dwingendere maatregelen, zoals geboden en verboden.

In een plaatje het maatschappelijk acceptatieproces:



Het uitgangspunt van het Nederlandse energiebeleid is haalbaar, nationaal (voorzieningszekerheid) en betaalbaar.

Haalbaarheid heeft vooral met technologische ontwikkeling te maken. Waterstof is noodzakelijk om de industrie te vergroenen. Dit heeft prioriteit boven het gebruik van waterstof in transport en woonomgeving. Waterstof kan ook nodig worden om vraag en aanbod van elektriciteit op elkaar af te stemmen. Met name wanneer de wind niet waait, de zon niet schijnt en we toch energie willen gebruiken. Personenauto's gaan vooral op batterijen rijden en voor waterstof zijn er kansen bij vrachtauto's, heftrucks, bussen, treinen, schepen en vliegtuigen. Bij de verwarming van gebouwen zijn warmtepompen, warmtenetten, warmte-koude opslag en geothermie mogelijkheden.

Nederland is te dichtbevolkt om in zijn eigen energiebehoeften te voorzien en zal meer energie invoeren naarmate er minder Gronings aardgas beschikbaar is. Nederland moet ook duurzame energie als waterstof invoeren. De schattingen over de omvang van de invoer lopen uiteen, maar liggen met ruime marges rond de 50%. De voorzieningszekerheid wordt minder naarmate de invoer stijgt en de energievoorziening afhankelijker wordt van de weersomstandigheden.

De sterke stijging van de gasprijzen sinds eind 2021 laat de gevolgen zien van de afhankelijkheid van het buitenland en de consequenties voor de energierekening van de burgers.

De invloed van de coronacrisis op de energietransitie gaat via de ontwikkeling van de wereldhandel. Corona heeft een negatieve invloed op de groei en de omvang van de wereldhandel. Als de groei stagneert, wordt er minder fossiele energie verbruikt en minder CO₂ uitgestoten. Corona leidt ook tot grotere onzekerheid en instabiliteit met als gevolg sterke prijsschommelingen, maar dit lijkt nog niet tot ander gedrag te leiden, zoals minder consumeren en minder vliegen. De coronacrisis heeft wel de noodzaak voor de overheid versterkt om in te grijpen en minder afhankelijk te worden van het buitenland, waarbij er wel zorgen zijn over de aflossing van de op grote schaal verstrekte staatsschuld.

De oorlog in Oekraïne heeft geleid tot een Europese en Nederlandse boycot van Russische energie. Zoeken naar alternatieven leidt tot hogere energieprijzen en meer gebruik van schadelijke fossiele energie, zoals steenkool en LNG (liquid natural gas), maar het kan ook leiden tot hogere productie van duurzame energie. Het Europese en Nederlandse beleid is erop gericht om de productie van duurzame energie te stimuleren en daardoor een grote stap te zetten naar een fossielvrije toekomst in 2050. Vooral een sterke groei van windenergie op de Noordzee speelt hierbij een prominente rol. De energiekosten nemen toe door de overgang naar duurzame energie. Daarbij kunnen de kosten veeleer toenemen. Dat past alleen binnen het politieke uitgangspunt van het Klimaatakkoord dat de energiekosten voor de burgers niet mogen toenemen, wanneer de bedrijven een groter deel voor hun rekening nemen of wanneer de overheid dit betaalt uit de overheidsbegroting. Dat laatste leidt dan tot hogere belastingen of tot bezuinigingen op andere uitgaven. De verdeling van deze lasten over de burgers onderling is ook een belangrijk aandachtspunt. Hogere-inkomensgroepen kunnen gemakkelijker energie besparen dan lagere. En er is energiearmoede bij lagere inkomensgroepen als zij moeite hebben om de energierekening te betalen. In de energiewetgeving is naast generiek beleid specifiek beleid nodig, dat gericht is op lagere inkomensgroepen. Overigens nemen de maatschappelijke kosten ook toe als er niet overgeschakeld wordt naar duurzame energie. Er moeten dan kosten worden gemaakt om de nadelige gevolgen van klimaatverandering te compenseren. Kortom: ook niets doen kost geld!

Er zijn stappen nodig in de energietransitie. Allereerst moet er meer groene elektriciteit komen. In Nederland is daarvoor de ontwikkeling van wind op zee van belang. De plannen voor schaalvergroting van megawatt naar gigawatt moeten concreet worden. Bedrijven moeten daarbij niet alleen op de overheid wachten, maar ook zelf financiële initiatieven nemen.

Groene stroom kan het beste direct worden gebruikt zonder er eerst waterstof van te maken. Dit argument speelt in het vervoer. Als groene stroom beschikbaar is, kunnen daarmee batterijauto's meteen worden opgeladen. Om van groene stroom eerst waterstof te maken is dan een inefficiënte,

overbodige omweg. Toch is waterstof interessant voor vrachtauto's, omdat batterijen zwaar zijn en ruimte vragen en daarnaast voor auto's waarbij stilstaan geld kost, omdat het laden van de batterij veel langer duurt dan waterstof tanken. Ook moeten op nationaal niveau de kosten van verzwaring van het elektriciteitsnetwerk worden afgewogen tegen het transport van energie via waterstof in pijpleidingen. Verder is er het probleem van opslag van grote hoeveelheden elektriciteit: daarvoor schiet de capaciteit van batterijen tekort en is waterstof een geschikt alternatief.

Ondanks het maatschappelijke verzet moeten er beslissingen genomen worden. Het is dus verstandig om de voor- en nadelen van alle opties zo goed mogelijk uit te zoeken en daarna een verantwoorde keuze te maken. Verzet speelt niet alleen bij wind- en zonne-energie, maar ook bij alternatieven als biomassa, kernenergie, warmtenetten en geothermie. Dit vraagt om een krachtige, standvastige overheid die heldere, weloverwogen keuzes maakt. De weg naar een fossielvrij 2050 is geen gemakkelijke.

De sfeer van het klimaatdebat is tobberig: het klimaatbeleid kost geld, geeft overlast en er is veel onduidelijk en onzeker. In Nederland is de sfeer bij dijkverzwaring heel anders. Dijkverzwaring kost ook geld, geeft overlast en er is veel onzeker. Nederland is kwetsbaar voor overstromingen. Zestig procent van ons land zou regelmatig onder water lopen zonder onze dijken en duinen. Daarom werken de waterschappen en Rijkswaterstaat samen in het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP 2021) aan sterke dijken. Het doel van dit programma is dat in 2050 alle primaire keringen op een sobere en doelmatige wijze zijn versterkt. Deze voldoen dan aan de wettelijke normen, zoals die zijn vastgelegd in de Waterwet. Hiermee wordt de waterveiligheid van Nederland gewaarborgd. Het gaat om 1.300 km aan dijken en bijna 500 sluizen en gemalen die versterkt moeten worden.

Dijkverzwaring is onderdeel van het Deltaprogramma. Wettelijk is vastgelegd dat er jaarlijks een programma komt dat wordt opgesteld onder leiding van de Deltacommissaris en op Prinsjesdag aan de Tweede Kamer wordt aangeboden. Het programma wordt gefinancierd uit het hiervoor ingestelde Deltafonds. Op deze manier is het beleid verankerd, waardoor inwoners en economie beschermd zijn tegen overstroming (Nationaal Deltaprogramma 2021). De kennis die Nederland opdoet in het Deltaprogramma is een interessant exportproduct en biedt kansen op mondiaal niveau.

De sfeer bij het Deltaprogramma is: samen de schouders eronder en aan het werk! In de jaarberichten staan de resultaten en gezamenlijke thema's als samenwerking, innovatie, duurzaamheid, communicatie en de ontwikkeling van de lerende alliantie van Rijkswaterstaat en de waterschappen. Er wordt hard gewerkt aan dijkverzwaring en er worden meters gemaakt.

Wat zou het mooi zijn als de tobberige, gelaten sfeer van het klimaatdebat zou veranderen in het enthousiasme van de dijkverzwaring. Ter nuancering blijkt dat ook plannen voor dijkverzwaring langs de Waal op verzet stuiten (Volkskrant 2021b). De overstromingen van juli 2021 in Limburg, België en Duitsland kunnen dan wel weer leiden tot meer acceptatie. Er zijn directe gevaren maar ook duidelijke actieplannen om de problemen op te lossen.

In de klimaatdiscussie krijgen de scenario's van het klimaatpanel van de Verenigde Naties (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC 2021, 2022) veel aandacht: wetenschappers zijn helder en duidelijk in wat de oorzaken en gevolgen zijn van de klimaatveranderingen en wat er nodig is om de klimaatdoelen van Parijs te halen. De vraag is echter of mensen, bedrijven en overheden hun gedrag willen aanpassen om ongewenste temperatuurstijgingen te voorkomen.

In Nederland gaat de energietransitie stapje voor stapje. Terugkijkend zijn er belangrijke stappen gezet. Er is een Klimaatwet met duidelijke doelen voor 2050. In 2021 is een visie op waterstof gepresenteerd. Tot 2030 is er een Klimaatplan, waarbij jaarlijks over de voortgang wordt gerapporteerd en als daarvoor aanleiding is worden de plannen aangepast. Met aandacht voor maatschappelijk draagvlak. We zien ook een groeiende bewustwording van de klimaatproblematiek, kostendalingen en sterke groei van windenergie op zee, toename van zonnepanelen, populariteit van

elektrisch koken, nieuwbouwwijken zonder aardgas aansluiting, minder CO₂-uitstoot, kostendaling en toename van elektrische auto's met de daarbij horende groei van elektrische laadpalen en laadstations.

Vooruitkijkend ligt er nog een enorme maatschappelijke opgave om de energietransitie tot een succes te maken op technisch, financieel en maatschappelijk terrein. Maar het kan: de wereldbevolking is fors gegroeid van 1,9 miljard mensen in 1921 naar 7,8 miljard in 2021 en deze groei gepaard is gegaan met een onvoorstelbare vooruitgang (Bodelier2021). Grote problemen werden teruggedrongen: in 1921 stierven wereldwijd nog meer dan drie op de tien kinderen voor hun vijfde jaar, in 2021 zijn het er vier op de honderd. In 1921 leefden zeven op de tien mensen in extreme armoede, in 2021 zijn dat er minder dan een op de tien. Het aantal oorlogsdoden verminderde van twintig op de honderdduizend tot minder dan één op de honderdduizend. Ook het aantal klimaatdoden nam sterk af. Een eeuw geleden stierven er jaarlijks rond de 500 duizend mensen aan stormen, droogte, overstromingen en hittegolven. Het afgelopen decennium waren het er minder dan 20 duizend per jaar. Rekening houdend met de groei van de wereldbevolking met bijna zes miljard mensen, is dat een daling van 98 procent. Mensen zijn heel wat meer dan alleen rovers en klimaatvernietigers. Ze zijn ook creatief, intelligent, welwillend en hebben het vermogen om samen te werken aan 'een goed leven voor ons, onze kinderen en kleinkinderen, wereldwijd, in een schoon milieu en een biodiverse natuur.'

In 2021 zijn in Nederland de klimaatdoelen verder aangescherpt: volledig klimaatneutraal in 2050 en in 2030 minimaal 55% CO₂-uitstoot reductie en streven naar 60%. De ambities worden verhoogd. Nederland wil koploper worden in Europa. Hierbij zijn pijnlijke keuzes onvermijdelijk en is de tijd van polderen voorbij.

De oorlog in Oekraïne in 2022 kan een echte 'gamechanger' worden. De oorlog heeft duidelijk gemaakt hoe afhankelijk Nederland en Europa zijn van Russische energie. Als Nederland en Europa dat niet meer willen ontstaat een echt breed maatschappelijk draagvlak om zelf meer energie te produceren en dat ook meteen duurzaam te doen. De energietransitie wordt dan net zo onvermijdelijk en acceptabel als de bewaking en verzwaring van de dijken.

3 Technische aspecten en veiligheid van waterstof

3.1 Inleiding

Waterstof is een veelzijdig gas dat op veel terreinen gebruikt kan worden en dat al meer dan 100 jaar gebruikt wordt in de industrie. Net als elektriciteit moet waterstof het worden geproduceerd. Dat kan met verschillende technieken. Ook er zijn verschillende energiebronnen om waterstof van te maken. Al deze zaken komen in dit hoofdstuk aan de orde.

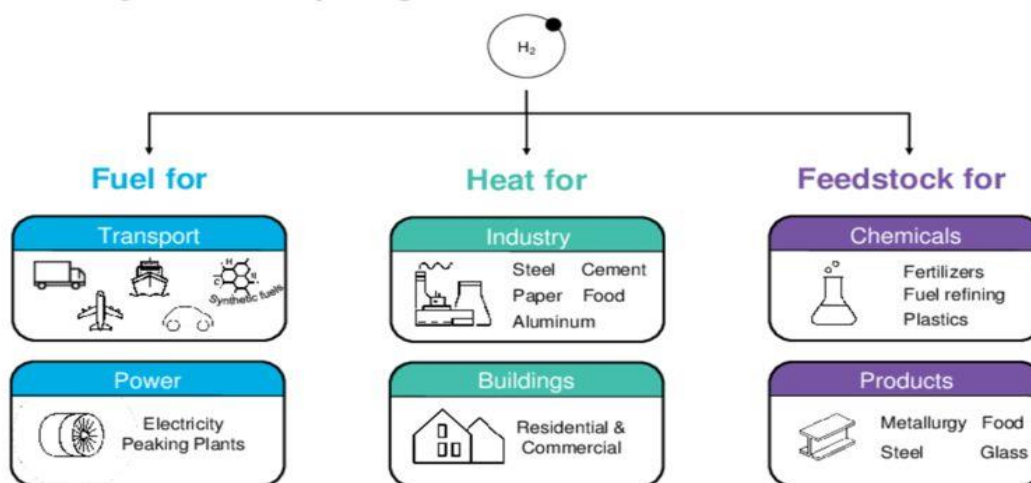
Daarnaast kijken we naar de eigenschappen en risico's van waterstof bij gebruik in transport en gebouwde omgeving, en vergelijken dat met fossiele brandstoffen als benzine en aardgas.

Na productie moet waterstof worden opgeslagen en vervoerd naar de eindgebruiker; dat kan op verschillende manieren. Omdat waterstof een gas is, kan het ontploffen en in brand vliegen. Daarom gelden er strenge veiligheidsvoorschriften voor de hele cyclus; van productie tot eindgebruik.

3.2 Gebruik en productie van waterstof

Waterstof (H_2 = Hydrogen) is een kleurloos, reukloos, smaakloos, niet giftig, niet zelf ontbrandend, zeer ontvlambaar gas, dat als grondstof (feedstock) gebruikt wordt in productieprocessen van kunstmest, raffinage, plastics, metallurgie, staal, voedsel en glas. Ook kan waterstof dienen als brandstof (fuel) voor vervoer of voor opwekking van warmte (heat) van hoge temperaturen (bij de productie van staal, cement, papier, voedsel en aluminium) of lage temperaturen voor de verwarming van gebouwen; en voor de productie van elektriciteit (PGS 35, 2020; KIWA 2011; Shell 2017; BloombergNEF 2020). Onderstaand plaatje vat de veelzijdigheid van waterstof mooi samen:

The many uses of hydrogen



Source: BloombergNEF

Waterstof wordt al meer dan 100 jaar gebruikt in de industrie (Alazemi & Andrews 2015; IRENE 2017). Maar waterstof kan óók gebruikt worden voor het verwarmen van gebouwen en als brandstof voor auto's, schepen, treinen en vliegtuigen. Verder kan uit waterstof elektriciteit worden gemaakt. De toepassingen van waterstof buiten de industrie zijn vrij recent. Soms verkeren ze in de experimenteerfase. Zo worden er in Nederland nog maar op een paar plekken plannen gemaakt om voor het verwarmen van huizen aardgas te vervangen door waterstof. In hoofdstuk 8 wordt daar meer over verteld. Ook zijn er nog maar weinig auto's, bussen en treinen die op waterstof rijden. En de toepassing van waterstof in vliegtuigen is toekomstmuziek. Overigens waren voor de komst van aardgas veel Nederlandse huishoudingen aangesloten op stadsgas dat voor meer dan de helft uit waterstof bestond.

Waterstof is geen primaire energiebron, zoals aardgas, aardolie of steenkool. Net als elektriciteit wordt waterstof geproduceerd uit primaire bronnen. Duurzame waterstof kan fossiele energie vervangen in allerlei toepassingen.

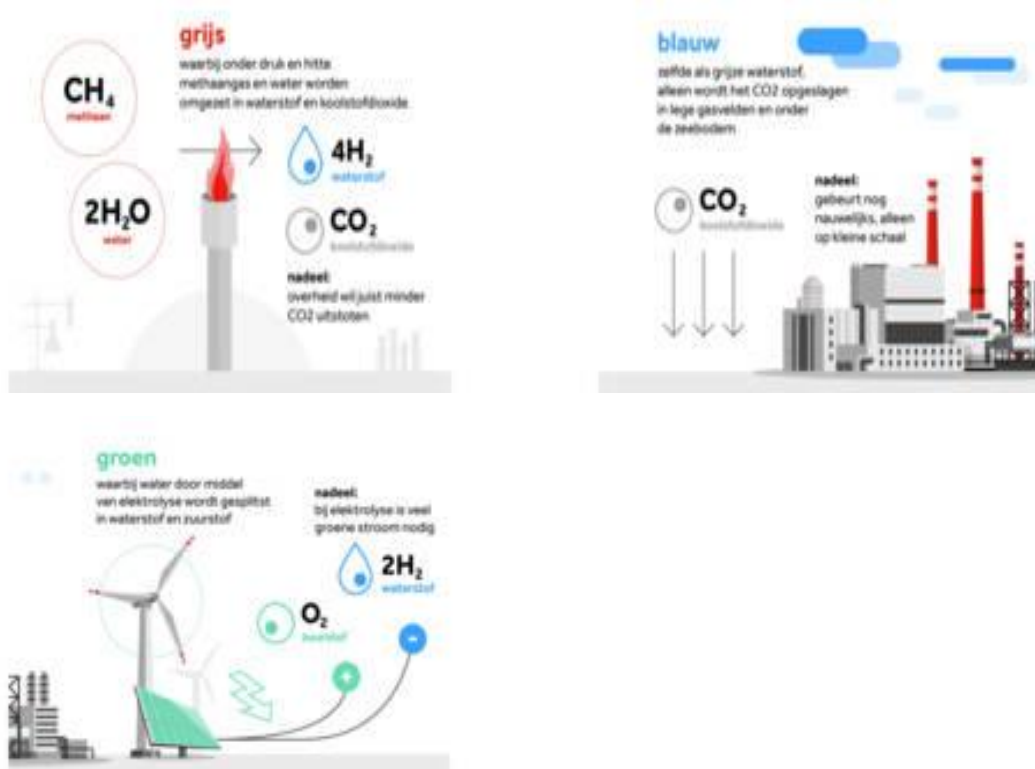
Steenkoolvergassing is in de wereld een veel gebruikt en goedkoop productieproces voor waterstof. Zo'n 90%-95% van de wereldwaterstofproductie komt uit fossiele bron (Alazemi & Andrews 2015; Shell 2017). In Nederland wordt waterstof vooral uit aardgas gemaakt. Dit gebeurt met het stoommethaanreforming (SMR) proces. (TNO, Berenschot 2017). De verschillende technieken om waterstof te produceren staan in de bijlage (10.1).

Waterstof is een grondstof en bouwsteen voor de chemische en petrochemische industrie bijvoorbeeld voor de productie van ammoniak en bij de raffinage van ruwe olie. Ongeveer 20% van de waterstof in Nederland komt vrij als reststroom uit raffinageprocessen en de (petro-) chemische sector.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen grijze, blauwe en groene waterstof (CE Delft 2018a). De uit aardgas geproduceerde waterstof wordt grijs genoemd, omdat het gemaakt wordt uit een fossiele bron. Als waterstof geproduceerd wordt uit aardgas waarbij CO₂-uitstoot wordt afgevangen, is er sprake van blauwe waterstof (CCS: Carbon Capture and Storage). CO₂ kan daarbij gedeeltelijk (55-90%) worden afgevangen of volledig. Dit onderscheid wordt koolstofarm (gedeeltelijk) of koolstofvrij (volledig) genoemd. Als de CO₂ wordt hergebruikt is sprake van CCU (Carbon Capture and Usage). Dit gebeurt bijvoorbeeld in tuinbouwkassen waardoor de plantengroei wordt gestimuleerd.

Waterstof kan ook met behulp van elektriciteit uit water worden gemaakt; dit technisch proces heet elektrolyse. Als de gebruikte elektriciteit uit hernieuwbare bron komt, dan is er sprake van groene waterstof.

Op onderstaande grafische weergave van de verschillende kleuren waterstof is duidelijk het verschil te zien:



Bron: NOS, 2019.

De meest gebruikte elektrolyse technieken om groene waterstof te maken zijn: alkaline elektrolyse (AEL) en proton-exchange membraan elektrolyse (PEM). Daarnaast is er Solid-Oxide elektrolyse. Deze technologie wordt nog niet op industriële schaal toegepast.

“Bij AEL wordt gebruik gemaakt van een vloeibaar alkalisch elektrolyt. Hydroxide-ionen migreren van de kathode – waar waterstof wordt gevormd – door een micro-poreuze scheidingslaag naar de anode, waar zuurstof wordt gevormd. Bij PEM wordt geen gebruik gemaakt van een vloeibaar elektrolyt en migreren protonen door een polymermembraan van de anode naar de kathode. AEL wordt momenteel het meeste toegepast, met name in China. In Aswan staat de grootste AEL-fabriek met een capaciteit van 165 MW en in Mainz de grootste PEM-fabriek van 6 MW” (PBL 2019).

Naar verwachting is PEM dat nu nog kleinschalig wordt toegepast, in de toekomst grootschalig toepasbaar. Daardoor komen door kostendalingen de investeringskosten van PEM onder die van alkaline te liggen (Alazemi & Andrews 2015; CE Delft 2018b).

Welke technologie in de toekomst het meest zal worden toegepast wordt grotendeels bepaald door de kostenreductie die de technologieën weten te realiseren. Nouryon en Engie hebben plannen om in Nederland AEL-installaties van respectievelijk 20 en 100 MW te bouwen. Op de Tweede Maasvlakte bij Rotterdam gaat **Shell** de grootste groene elektrolyser ter wereld bouwen met een vermogen van 200 MW (Shell 2022). Shell is van plan om in 2023 met de productie van waterstof te starten.

AEL-elektrolyzers zijn minder flexibel dan PEM-elektrolyzers die sneller kunnen sneller reageren op wisselende omstandigheden die inherent zijn aan wind- en zonenergie. Het **International Renewable Energy Agency** (IRENE 2018) ziet nog veel uitdagingen om schaalvergroting en kostenreducties te bereiken voor beide technieken. Hiervoor is nog veel onderzoek en ontwikkeling nodig. Het Institute of Sustainable Process Technology (ISPT 2019) beschrijft uitvoerig de kansen en bedreigingen van de verschillende elektrolysetechnieken met betrekking tot technische-, economische- en milieuaspecten. Een nadeel van de meeste PEM-ontwerpen is de sterke afhankelijkheid van platina, waarbij de mijnbouw een grote negatieve impact heeft op het milieu.

TNO (2021b) ziet als belangrijkste voordelen van AEL dat de technologie haar waarde heeft bewezen, dat het relatief goedkoop is, dat het productievolume gemakkelijk kan worden verhoogd, en dat zij minder essentiële grondstoffen bevatten dan PEM. Daar tegenover staan als nadelen van AEL de lagere stroomdichtheid, het lagere rendement en het gebruik van corrosieve vloeistof. TNO verwacht dat in 2050 de helft van de elektrolyzers AEL en de helft PEM zal zijn. TNO wijst op de schaarste aan essentiële grondstoffen (critical raw materials: CRM) voor groene waterstof en voor de hele energietransitie. Bij AEL gaat het om nikkel, kobalt en platina; bij PEM om iridium en kobalt. TNO ziet dat de hele wereld (en met name China, Japan, VS en Canada) bezig is met de opbouw van voorzieningen voor duurzame energie en pleit daarom voor een actieve Europese politiek op het gebied van technologische ontwikkeling en marktregulering waarbij het gaat om het reguleren van de keuze voor welke toepassingen essentiële grondstoffen mogen worden gebruikt.

Waterstof kan ook duurzaam worden geproduceerd uit biomassa. Maar er is in Nederland maar weinig biomassa beschikbaar is en de vraag is of hoe duurzaam biomassa is.

De omzetting van waterstof in elektriciteit en warmte gebeurt in een brandstofcel. Er zijn verschillende soorten brandstofcellen. Voor mobiliteitsdoeleinden wordt de wereldmarkt voor brandstofcellen momenteel gedomineerd door de lage temperatuur Proton-Exchange Membrane brandstofcel (PEMFC). Deze cel heeft een hoge energiedichtheid, klein volume en relatief lage werktemperatuur. Het nadeel is dat de kosten hoog zijn door het gebruik van platina, maar er zijn ontwikkelingen om platina te vervangen door andere grondstoffen.

Voor energieopslag in woningen en energiecentrales zijn Solid-Oxide brandstofcellen (SOFC) meer geschikt vanwege gunstige investeringskosten, lange levensduur, hoge efficiëntie en het feit dat niet de meest pure waterstof nodig is. Brandstofcellen laten de afgelopen jaren enorme technische

voortgang zien (Shell 2017).

Groene waterstof wordt via elektrolyse gemaakt uit groene elektriciteit, maar het kan ook omgekeerd: uit groene waterstof kan groene elektriciteit worden gemaakt. In een brandstofcel vindt zo'n omgekeerde elektrolyse plaats: door waterstof en zuurstof samen te voegen krijg je elektriciteit. Dit is een belangrijke rol die waterstof in een duurzame toekomst kan vervullen. Als er door veel wind en zon meer elektriciteit wordt geproduceerd dan wordt gebruikt dan kan dit overschot worden omgezet in waterstof dat weer gebruikt kan worden als de vraag groter is dan het aanbod. Op deze manier vormt waterstof een duurzame buffer die dagelijkse- en seizoenverschillen tussen vraag en aanbod kan overbruggen. De omzetting van elektriciteit naar waterstof en weer terug leidt wel tot een hoog energieverlies. De bufferfunctie wordt nu nog vervuld door fossiele gascentrales flexibel te laten draaien. Ook kunnen opslag in batterijen, vraagsturing en invoer uit het buitenland hierbij een rol spelen.

3.3 Vergelijking van waterstof met andere brandstoffen

In de Nederlandse energievoorziening kan waterstof aardgas vervangen. Het grote voordeel van waterstof boven aardgas is dat er bij gebruik niet het broeikasgas koolstofdioxide (CO₂) vrijkomt. Tenminste: als waterstof gemaakt is van groene elektriciteit, dus elektriciteit uit wind en zon. Een verschil met aardgas is verder dat waterstof een lagere energiedichtheid (energetische waarde) heeft: voor dezelfde hoeveelheid energie is drie keer meer waterstof nodig dan aardgas.

In Nederland vallen er jaarlijks doden door gasexplosies en koolmonoxide (CO)-vergiftiging. Een overzicht van incidenten bij de gasdistributie staat in het jaaroverzicht 2018 (Kiwa 2019).

Bij waterstof is geen sprake van koolmonoxidevergiftiging, maar de bredere explosiegrenzen en lage ontbrandingstemperatuur zijn wel risico verhogend. Waterstof is een brandbaar gas. En als brandbare gassen vrijkomen, kunnen ze explosieve mengsels vormen met lucht. Als er dan een ontsteking bij komt, krijg je een ontploffing. Maar waterstof stijgt ook weer snel op in de lucht en de vlam is bij 100% verbranding niet zichtbaar.

Waterstof is net als aardgas, CNG (Compressed Natural Gas) en LPG (Liquefied Petroleum Gas) reukloos. Er is dus toevoeging van een geurstof nodig om het te kunnen ruiken. De explosies van waterstof zijn krachtiger dan van andere brandstoffen. Omdat waterstofmoleculen erg klein zijn kunnen ze gemakkelijk ontsnappen. Er zijn specifieke coatings nodig om gebruikte materialen te beschermen tegen waterstofdifusie en materiaalverbrossing. (IFV 2018; Shell 2017).

In onderstaande tabel wordt waterstof vergeleken met andere autobrandstoffen. CNG is aardgas dat onder druk wordt gebracht en vooral uit methaan bestaat. LPG is een mengsel van propaan en butaan. Hierbij zijn voor waterstof de opvallende eigenschappen: lage dichtheid ten opzichte van lucht, brede ontvlambaarheidsbereik en hoge energetische waarde. Dus een hoge energiedichtheid qua gewicht en een lage energiedichtheid qua volume.

Eigenschappen brandstoffen (IFV 2018)

	Waterstof (gas)	CNG (gas)	LPG (gas)	Benzine (vloeibaar)	Diesel (vloeibaar)
Kleur	Kleurloos	Kleurloos	Kleurloos	Kleurloos of gekleurd	Kleurloos of gekleurd
Geur	Geurloos	Geurend	Geurend	Geurend	Geurend
Dichtheid gas/damp t.o.v. lucht (1 atm, 20°C)	Lichter (0,07)	Lichter (0,60)	Zwaarder (1,7)	Zwaarder (1,15)	Gelijk (1,00)
Ontvlambaarheidsrange (% in lucht)	4-77	5-16	1,5-10	0,6-8	0,6-6,5
Ontstekings-energie gas/damp (mJ)	0,011	0,28	0,25	> 0,6	Niet bekend
Temperatuur zelfontbranding gas/damp (°C)	500	670	400	>220	>225
Energetische waarde (MJ/kg)	120-142	38-39	49	44-46	45

3.4 Opslag van waterstof

Waterstof wordt uit verschillende energiebronnen en met verschillende technieken geproduceerd. Deze productie kan op verschillende manieren worden opgeslagen. De twee kenmerken die belangrijk zijn voor de toepassing van waterstof als brandstof zijn de hoge energiedichtheid en de lage volumedichtheid, zoals we in de vorige paragraaf ook al zagen. Dit is de grootste moeilijkheid voor opslag en transport van waterstof. Om waterstof als brandstof te gebruiken, moet de fysieke toestand ervan worden gewijzigd om de volumedichtheid ervan te verbeteren. Dat kan door compressie, liquefactie en opslag in hydriden (**Sinigaglia c.s.** 2017).

Waterstofcompressie is tegenwoordig de meest gebruikte opslagmethode. In dit proces wordt waterstof gecompriëerd in tanks, met vergelijkbare technologieën als die worden gebruikt bij de aardgascompressie. Bij liquefactie wordt waterstof vloeibaar gemaakt en bij opslag in hydriden wordt waterstof omgezet in metalen of in chemische stoffen als mierenzuur, koolhydraten en ammoniak. Ammoniak is minder explosief dan waterstof waardoor het veiliger getransporteerd kan worden. Ammoniak is dan een waterstofdrager. In het Engels wordt dat LOHC genoemd: Liquid Organic Hydrogen Carrier. In Rotterdam zijn plannen voor een ammoniakterminal waardoor ammoniak uit de Verenigde Staten geïmporteerd kan worden (Energeia 2022b).

In Zuidwending (Groningen) onderzoekt **Gasunie** de mogelijkheden voor opslag van waterstof in lege zoutcavernes (Gasunienewenergy 2019). Zoutcavernes zijn volgens **PwC/Strategy&** in het rapport **Hyway27** (2021) geschikt om waterstof in op te slaan, omdat het een volwassen en al bestaande technologie is, relatief lage investeringskosten vereist, een hoge efficiency heeft met weinig verliezen door lekkage, hoge in- en uitvoercapaciteit biedt, minimale risico's heeft op vervuiling, en er slechts beperkte hoeveelheden kussengas benodigd zijn. **PwC/Strategy&** volgt de conclusies van **TNO** (2020) dat er voldoende capaciteit is in Nederlandse zoutcavernes om er waterstof in op te slaan, zodat waterstof ook beschikbaar is als er te weinig productie is om aan de vraag te voldoen. Tot 2030 zijn voor de benodigde seizoens- en weersafhankelijke opslag van 3-6 PJ waterstof ongeveer 3-12 zoutcavernes nodig. Na 2030 lopen de inschattingen sterk uiteen van 20-169 PJ (exclusief strategische opslag). Deze hoeveelheid kan worden opgeslagen in de 320 onshore cavernes die vooral in de Noord-Nederlandse ondergrond aanwezig zijn. Verder zijn er misschien ook nog mogelijkheden in offshore cavernes en/of zijn lege gasvelden. Een grootschalige opslag in

zoutcavernes is technisch mogelijk en veilig, en het gebeurt al in Engeland en de Verenigde Staten. Om grootschalige opslag van energie in de ondergrond succesvol te realiseren, moeten volgens TNO technische en economische vragen worden opgelost, maar moeten ook juridische en maatschappelijke factoren van meet af aan worden meegenomen. Nieuwe opslaginitiatieven moeten voldoende worden ondersteund door duidelijke wetten en beleid, vergunningsprocedures en contracten. Ook moeten belanghebbenden (met name de lokale omgeving) er ruim voor, tijdens en na het besluitvormingsproces bij betrokken worden.

In lijn met **Hyway27** schatten **TNO en EBN** (2021c) de benodigde waterstofopslagcapaciteit in op 1-4 zoutcavernes tot 2030. Zij gaan ervan uit dat, gelet op technische en praktische beperkingen, maximaal 60 nieuwe zoutcavernes kunnen worden aangelegd tussen 2030 en 2050. In tegenstelling tot Hyway27 geven TNO en EBN aan dat er dus niet voldoende zoutcavernes onshore (op land) zijn om te voorzien in de te verwachten grootschalige behoefte. TNO en EBN adviseren dan ook dat vóór 2030 duidelijk moet zijn hoeveel zoutcavernes nodig zijn én of waterstofopslag in gasvelden technisch, economisch en praktisch haalbaar is. Zo niet, dan moet er duidelijkheid zijn over mogelijke alternatieven, zoals offshore opslag en opslag in grensoverschrijdende regio's. Verder adviseren TNO en EBN om door veldtesten de opslagtechnologie naar een hoger niveau te tillen.

De **Staatssecretaris van Economische Zaken en Klimaat** geeft gehoor aan deze adviezen en wil samen met andere landen onderzoek doen naar de genoemde aspecten. Er moet daarbij ook aandacht besteed worden aan mogelijke hergebruik van de bestaande aardgasopslaglocaties, de risico's van waterstofopslag en de mogelijke interferenties van waterstofopslag met het winnen van delfstoffen en andere vormen van ondergrondse opslag (zoals CO₂ en perslucht). De zoutcavernes bevinden zich vooral in Noordoost-Nederland waar al veel activiteiten plaatsvinden op het gebied van energie- en grondstofwinning in de ondergrond. Daarom vindt de staatssecretaris het belangrijk om samen met de betrokken regio's een zorgvuldige afweging te maken over de mogelijk nieuwe opslaglocaties (**Ministerie van Economische Zaken en Klimaat** (2021c)).

In een vervolghaikbaarheidsstudie uit 2022 stellen **TNO en EBN** (2022b) dat het technisch haalbaar is om waterstof op te slaan in zoutcavernes en lege gasvelden offshore (onder de Noordzee). Er zijn theoretisch meer dan voldoende zoutcavernes offshore, maar er moet nog verder onderzocht worden wat de werkelijke opslagcapaciteit is. Ook is nog niet definitief bewezen dat opslag van waterstof in lege gasvelden mogelijk is. Er is dus vervolgonderzoek nodig. Wel geven TNO en EBN aan dat opslag onder zee anderhalf tot tweeënhalve keer duurder is dan opslag onder land maar het voorkomt wel problemen met maatschappelijk acceptatie.

Het **Verwey-Jonker Instituut** (2022) ziet groeiende maatschappelijke onrust in Noord-Nederland door gas- en zoutwinning, windmolens, aardbevingen, zonneparken en hoogspanningsleidingen. Om te voorkomen dat protest escaleert doordat bewoners onrecht ervaren, protesteren en geen gehoor vinden, moet er al, vóórdat een vergunning wordt verleend, een succesvolle samenwerking zijn tussen de overheid, burgers en bedrijfsleven. Als er onrust ontstaat moet escalatie voorkomen worden door de samenwerking alsnog te verbeteren. 'Dat kan door de dialoog aan te gaan, bewoners in staat te stellen tegenmacht uit te oefenen en hen betekenisvolle invloed te gunnen, of door samen te werken aan een overkoepelend doel.'

De lage dichtheid van waterstof maakt het volgens **BloombergNEF** (2020) aanzienlijk moeilijker op te slaan dan fossiele brandstoffen: het opslaan van waterstof in grote hoeveelheden wordt een van de belangrijkste uitdagingen voor een toekomst met waterstof. Als waterstof aardgas zou vervangen moet er 3 tot 4 keer meer opslaginfrastructuur worden gebouwd, tegen een kostprijs van \$ 637 miljard in 2050, om dezelfde leveringszekerheid te bieden.

Als waterstof is opgeslagen, kan het verder worden getransporteerd in pijpleidingen, in vrachtwagens (tube trailers) of in schepen. Omdat waterstof een lage volumedichtheid heeft wordt het onder druk opgeslagen en vervoerd. De kosten van energieopslag en transport via

waterstofpijpleidingen zijn veel lager dan energieopslag met batterijen en transport van elektriciteit door kabels (Taskforce Infrastructuur Klimaatakkoord Industrie 2020).

3.5 Het transport van waterstof in bestaande gasleidingen

De **Gasunie** is verantwoordelijke voor de hogedrukgasinfrastructuur in Nederland, die bestaat uit duizenden kilometers aan pijpleidingen en honderden stations, en zorgt voor de werking, het onderhoud en de ontwikkeling van het gasnet. Daarnaast is de Gasunie verantwoordelijk voor de capaciteit en balans van het net en de verbindingen met andere landen. Via hogedrukpijpleidingen wordt gas naar zo'n duizend gasontvangststations in heel Nederland getransporteerd. Deze gasontvangststations zijn de schakel tussen het transportnet van Gasunie en het transportnet van lagedrukleidingen van de regionale netbeheerders, zoals Enexis, Liander en Stedin.

De hogedrukgasinfrastructuur biedt goede mogelijkheden voor het transport van waterstof. Er zijn nog wel aandachtspunten, omdat de energie-inhoud van waterstof lager is dan van aardgas (**Ministerie van Economische Zaken** 2017). Zo moeten de bestaande compressorstations, de meetstations en de gashoeveelheidsmeters worden aangepast. Ook moet gemonitord worden of drukwisselingen scheurgroei veroorzaken in aardgasleidingen. Met de inzet van waterstof verandert de externe veiligheid niet significant. Omdat waterstof onder een strengere regelgeving valt dan aardgas zal de regelgeving moeten worden aangepast.

De **Gasunie** (2019) kan al in 2030 een nationale hoofdtransportleiding (backbone) klaar hebben voor waterstof als vervanger voor fossiele energie. De grote industriële clusters, zoals Europoort en Eemshaven, worden dan verbonden met een waterstofnetwerk waarbij zoveel mogelijk gebruik gemaakt wordt van de bestaande gasinfrastructuur. Op termijn kunnen ook kleinere bedrijven, de mobiliteitssector en regionale netbeheerders aansluitingen krijgen op dit landelijke netwerk.

Volgens **PwC/Strategy&** (2021) is hergebruik van aardgasnetten goedkoper dan de aanleg van nieuwe leidingen. Een transportnet waarin alle industriële clusters zijn verbonden met producenten en opslaglocaties vergt een investering van ongeveer € 1,5 mld. Het kabinet wil dat de Gasunie het landelijk netwerk voor het transport van waterstof gaat ontwikkelen (**Ministerie van Economische Zaken en Klimaat** 2021b). PwC/Strategy& geeft aandachtspunten voor de ombouw van het aardgasnet naar een veilig waterstofnet, zoals de grotere lekgevoeligheid van waterstof, de verontreiniging van de aardgasleidingen, de invloed van hogere stroomsnelheid van waterstof op de huidige meetapparatuur, de gevolgen van veelvuldige drukwisselingen op de defectgroei en de hogere kans op ontsteking als waterstof vrijkomt.

De **Autoriteit Consument & Markt** (2021) pleit voor een stapsgewijze uitrol van waterstofinfrastructuur. Pijpleidingen moeten pas worden aangelegd als ze ook gebruikt gaan worden. Dit voorkomt onnodige risico's op overinvestering, 'stranded assets' en kosten voor de gebruikers. Het beste kan begonnen worden met aanleg van waterstofpijpleidingen binnen de industriële clusters. Als de waterstofmarkt zich verder ontwikkelt kunnen de industriële clusters nationaal en internationaal met elkaar en met productiebronnen worden verbonden waarbij optimaal gebruik gemaakt moet worden van het bestaande transportnetwerk. Op langere termijn kan zo'n netwerk ook gebruikt worden voor waterstof in de gebouwde omgeving.

De bestaande gasdistributienetten van de regionale netbeheerders kunnen prima worden ingezet om waterstof te distribueren (**KIWA** 2018). De netbeheerders moeten wel de gasmeters vervangen en waterstof een herkenbare geur geven. Een belangrijk aandachtspunt is de veiligheid bij ongewenste uitstroom van gas, zoals bij graafschades. De eindgebruiker moet de toestellen geschikt maken voor waterstof. De veiligheid bij het in pandig gebruik van waterstof verdient extra aandacht.

De totale kosten voor het omschakelen en aanpassen van de netwerken kunnen oplopen tot € 700 miljoen. De netwerkcosten stijgen grofweg met 10 tot 50% per woning per jaar. Deze aanvullende

netbeheerderskosten zijn overigens beperkt ten opzichte van de verwachte aanpassingskosten van toestellen bij de eindgebruikers.

3.6 Veiligheid van waterstof

Waterstof wordt nu vooral gebruikt in een gecontroleerde industriële omgeving met strenge veiligheidsvoorschriften. Als waterstof in de woonomgeving en in het transport wordt ingezet, dan wordt veiligheid voor een veel groter publiek een belangrijk aandachtspunt.

De gevolgen van een significante brand of explosie in een woonhuis zijn voor de bewoners bij grote waterstoflekken vergelijkbaar met grote aardgaslekken. Bij kleine lekkages is de schade bij waterstof kleiner dan bij aardgas. Waterstof geeft dus geen grotere risico's dan andere brandbare gassen, zoals aardgas en LPG (Kiwa 2015). Volgens **DNV GL** (2020) is waterstof een ander gas met andere eigenschappen dan aardgas. "De risico's bij lekkages in de woonomgeving zijn voor een groot vergelijkbaar of zelfs kleiner dan die bij aardgas. In specifieke gevallen waarbij een concentratie hoger dan 10% in een gesloten ruimte kunnen de risico's groter zijn."

Ook wordt al veel gedaan om veilig in waterstofauto's te rijden. Iedere brandstof heeft zijn eigen specifieke eigenschappen en brengt bij onjuist gebruik risico's met zich mee (H₂Platform 2020). Net als andere auto's worden waterstofauto's niet zomaar toegelaten op de openbare weg. Bij fabrikanten, keuringsinstanties en wegverkeersdiensten (zoals RDW) hebben ze alle noodzakelijke keuringen voor veilig gebruik doorlopen. Het risico op incidenten met waterstofvoertuigen is beperkt. Ze hebben een brandstofcel en een tank die langer standhoudt in een brand dan een diesel- of benzinetank. Waterstof is bovendien lichter dan lucht, waardoor het snel opstijgt en verdunt, in tegenstelling tot bijvoorbeeld LPG. Waterstofauto's worden ook niet opgeladen in garages, waardoor er dus geen vonkvorming of kortsluiting kan ontstaan door energie-uitwisseling.

Kiwa heeft al in 2011 voor waterstof in het vervoer een inventarisatie gemaakt van de risico's en de te nemen maatregelen om deze risico's te verlagen en de gevolgen te beperken (Kiwa 2011). Daarbij werden vier fasen van gebruik onderscheiden: tanken, rijden, stallen en onderhoud/repairatie van het voertuig. Uitgangspunt was dat als er adequaat met waterstof wordt omgegaan, het in principe niet veiliger of onveiliger is dan andere brandstoffen. Sindsdien heeft het Kiwa de kennis over waterstof verder ontwikkeld en verspreid, en zijn de veiligheidsvoorschriften aangepast.

In de **Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen** wordt op basis van de actuele stand van de techniek een overzicht gegeven van voorschriften, eisen, criteria en voorwaarden met betrekking tot gevaarlijke stoffen. Door naleving hiervan moet een aanvaardbaar beschermingsniveau worden gerealiseerd voor mens en milieu, waarbij rekening wordt gehouden met relevante en voorzienbare risico's. Het is een handreiking voor bedrijven die gevaarlijke stoffen produceren, transporteren, opslaan of gebruiken en voor overheden die belast zijn met de vergunningverlening en het toezicht op deze bedrijven. Het geeft overzicht in de relevante wet- en regelgeving en van de betrokken overheidsinstanties voor vergunningverlening en toezicht. Er worden constructie-eisen en veiligheidsaspecten beschreven van de waterstofafleverinstallatie en de aflevering aan de consument. Verder komen keuringen, onderhoud, registratie, inspectie en handhaving aan de orde. Evenals veiligheidsmaatregelen, incidenten en calamiteiten. Voor waterstof is **PGS-35 Waterstof: Afleverinstallaties van waterstof voor wegvoertuigen** (2015, 2020) van toepassing.

Verschillende partijen maken gebruik van PGS-35:

- Bevoegde gezagen en omgevingsdiensten gebruiken de PGS-35 bij vergunningverlening en als uitvoeringskader. De gemeente is meestal het bevoegde gezag voor de Wabo (Wet algemene bepalingen omgevingsrecht), zoals de provincies dat zijn voor grotere of risicvollere bedrijven of bedrijven met een zwaardere milieubelasting. Incidenteel is het Rijk bevoegd gezag, zoals bij defensierterreinen of olie- en gaswinning. Het bevoegd gezag kan gebruik maken van regionale omgevingsdiensten bij de uitvoering van taken.

- Veiligheidsregio's hanteren PGS-richtlijnen bij de advisering over brandveiligheid in omgevingsvergunningen en bij de voorbereiding op de brand- en rampenbestrijding.
- Voor de toezichthouder van het bevoegd gezag, zoals de Inspectie Sociale Zaken en Werkgelegenheid (voor veilige arbeidsomstandigheden) en de Inspectie Leefomgeving en Transport (voor veiligheid van transport, infrastructuur, milieu en wonen), zijn de PGS-richtlijnen een belangrijk referentiekader bij het toezicht op de naleving van wettelijke verplichtingen.
- Het bedrijfsleven gebruikt PGS-35 bij de bouw van waterstoftankstations voor het treffen van de juiste voorzieningen.

Om in te kunnen spelen op de bouw van zogenoemde 'multifuel' tankstations, met zowel fossiele als alternatieve brandstoffen, zullen in de toekomst PGS-35, PGS-25 (aardgastankstation) en PGS-33 (LNG-tankstation) een addendum krijgen.

Aandachtspunt is ook het parkeren van een waterstofauto. In de Publicatierreeks Gevaarlijke Stoffen is **PSG 26** een richtlijn voor het veilig bedrijfsmatig stallen, onderhouden en repareren van motorvoertuigen. Deze richtlijn geldt voor het gebruik van aardgas en de gecomprieeerde aardgasvormen CNG en LNG. Waterstof moet hieraan worden toegevoegd. Daarnaast wordt een nieuwe NEN-norm opgesteld voor de volledige brandveiligheid van parkeergarages, waarbij rekening wordt gehouden met batterijauto's en waterstofauto's.

De risico's van waterstoftankstations voor de omgeving worden in kaart gebracht door middel van een kwantitatieve risico analyse (QRA). Aan de hand van berekeningen en scenario's worden voor waterstoftankstations risicoafstanden (de zogenaamde veiligheidscontour) voor de omgevingsveiligheid en maximale effectafstanden bepaald. Er mogen geen gebouwen staan binnen deze contour waar individuele slachtoffers kunnen vallen (**RIVM 2016**). Voor een multifuel tankstation zijn er complexere risico's dan voor een tankstation met alleen fossiele brandstoffen (**RIVM 2020**). Door optreden van domino-effecten kunnen branden en incidenten leiden tot een niet te controleren situatie met grote gevolgen voor de omgeving. De bestaande wet- en regelgeving voor veiligheidsafstanden, maatregelen en voorzieningen, moet dus worden aangepast.

Voor de brandweer zijn bij waterstof incidentbestrijding een aantal veiligheid-gerelateerde aandachtspunten van belang (**Instituut voor Fysieke Veiligheid 2018**). Waterstof kent andere gevaren dan traditionele brandstoffen, omdat waterstof niet te ruiken, te zien en te proeven is; een lagere ontstekingsenergie en grotere ontvlambaarheidsrange heeft; minder stralingswarmte uitzendt en overdag in een schone omgeving brandt met een vrijwel onzichtbare vlam. In de transportsector wordt gasvormige waterstof in stevige tanks op 350 of 700 bar gebruikt. Waterstof heeft andere gevaaraspecten, zoals "jet flames" van meer dan 10 meter lengte en hoge temperaturen van 1500-2000 graden Celsius. Ook kan de tank ontploffen als de overdrukbeveiliging niet werkt.

De regelgeving op het gebied van veiligheid is momenteel nog gebaseerd op het grootschalig gebruik van waterstof als industrieel gas en als grondstof in de chemie. Als waterstof ook op andere terreinen wordt ingezet zijn deze regels mogelijk relatief zwaar of niet voldoende (**Instituut Fysieke Veiligheid, 2019**). Daarom is het Waterstof Veiligheid Innovatie Programma (2018) opgezet om systematisch na te lopen of alle veiligheidsaspecten in beeld zijn en eenduidig in regelgeving zijn afgedekt. Het doel van het programma is om te komen tot landelijk uniform beleid en wet- en regelgeving voor veiligheidsaspecten en risico's. Het gaat daarbij om veiligheid in de gehele keten: productie, op- en overslag, transport/distributie en eindgebruik (voertuigen, tankstations en woon/werkomgeving). Niet alleen nationaal maar ook internationaal gelden voor gassen als waterstof en aardgas strenge veiligheidsnormen. Veiligheid-gerelateerde informatie over stoffen en mengsels is samengevat in veiligheidsinformatiebladen. ISO Technical Report 15916 bevat internationale richtlijnen voor het veilig hanteren en opslaan van gasvormige en vloeibare waterstof. Veiligheidseisen voor specifieke toepassingen zijn vastgelegd in andere ISO-normen, zoals ISO 19880, dat veiligheids- en prestatie-eisen beschrijft van tankstations voor gecomprieeerde waterstof voor personenauto's en andere

motorvoertuigen (**Shell** 2017). Ook zijn in het kader van de Europese afspraken op NEN/EN/ISO niveau normen voor waterstoftankstations, connectoren en waterstofzuiverheid ontwikkeld en in ontwikkeling (Waterstof veiligheid innovatieprogramma 2020).

Een gevolg van het feit dat een waterstoftankstation aan strenge veiligheidsnormen moet voldoen is dat het hele vergunningstraject voor waterstoftankstations veel tijd kost. In de praktijk blijkt dat het meer dan twee jaar duurt vanaf de aanvraag tot de toestemming (Ekinetix 2020).

Er zijn weinig incidenten met waterstof in Nederland. Meestal blijft het bij 'bijna incidenten' (Handreiking voor optreden tijdens incidenten met waterstoftoepassingen). Er is een Europese database voor waterstofongelukken (**HIAD Hydrogen Incidents and Accidents Database** 2019) waarin incidenten staan gerangschikt. Het risico van waterstof als autobrandstof in Europa is tot nu toe klein. Toch waren er in 2019 twee ernstige incidenten in Noorwegen en de Verenigde Staten (NT Nieuwsblad Transport 2019). Ook was er een explosie in Korea met twee doden (The Korea Harold 2019). Volgens de fabrikant lag de oorzaak in Noorwegen bij een assemblagefout in de afsluiting van de waterstofopslagtank en zijn er gepaste maatregelen genomen (Nel ASA 2019).

Het **NIPV** (2022) houdt data bij over incidenten (ongevallen en branden) van alternatief aangedreven voertuigen (vooral volledig elektrische en (plug-in)hybride). In 2021 waren er 221 incidenten waarbij 243 voertuigen betrokken waren, waarvan 3 waterstofbussen.

Volgens de **Raad voor Leefomgeving en Infrastructuur** (2021) is veiligheid niet vanzelfsprekend. De vastlegging van standaarden en werkwijzen voor het veilig werken met waterstof in de industrie betekent niet dat waterstoftoepassingen zonder meer door particulieren en in de publieke ruimte kunnen worden gebruikt. Er moet nog veel gebeuren voordat dit op een verantwoorde manier mogelijk is. Zo moeten professionals geschoold worden, moet duidelijk worden of de huidige wet- en regelgeving rond het gebruik van aardgas voldoende is voor het gebruik van waterstof in het publieke domein en in thuissituaties. Ook moet er duidelijkheid komen over welke protocollen gelden bij incidentenbestrijding. Voorkomen moet worden dat een situatie ontstaat waarbij risico's worden afgeschoven op hulpdiensten. Volgens de Raad is het beter om veiligheid in te bouwen in het ontwerp en in de aanleg van waterstoftoepassingen. Op korte termijn moet daarom, bij voorkeur in Europees verband, geïnvesteerd worden in het testen van waterstoftoepassingen. De kennis die hierbij wordt opgedaan moet vervolgens worden verwerkt in richtlijnen, regels en principes.

Derempouka c.s. (2021) hebben onderzoek gedaan naar de rol van veiligheid in de waterstof strategieën van verschillende landen waaronder Nederland en ontdekten dat hierin vooral de voordelen van de waterstofeconomie worden benoemd en dat er veel minder aandacht is voor de bekende gevaren van waterstof, zoals de lage energiedichtheid, het lage kookpunt, de hoge ontstekingsgevoeligheid, de felle explosiviteit en opvlambaarheid, en de onvoorspelbaarheid waterstofexplosies. Zij vinden dat er meer aandacht moet zijn voor de beperkte kennis van risicobeoordelingen van waterstofsyste men.

3.7 Samenvatting

Waterstof is een kleurloos, reukloos, niet giftig, zeer ontvlambaar gas. Het is een veelzijdig gas dat al meer dan 100 jaar wordt geproduceerd en gebruikt in de industrie als grondstof en voor warmte. Het kan ook worden gebruikt als brandstof in het transport en voor de productie van elektriciteit.

Waterstof is geen primaire energiebron maar moet uit een primaire energiebron gemaakt worden. In Nederland wordt vooral uit aardgas via stoommethaanreforming waterstof geproduceerd. De waterstof gemaakt uit fossiele bronnen wordt grijze waterstof genoemd. Bij blauwe waterstof wordt bij de productie de CO₂-uitstoot afgevangen en opgeslagen.

Waterstof is groen als het uit hernieuwbare bronnen wordt gemaakt. Door elektrolyse wordt met water en elektriciteit waterstof gemaakt. Op dit moment wordt vooral de alkaline elektrolyse (AEL) gebruikt, maar de proton-exchange membraan elektrolyse (PEM) is flexibeler en kan beter reageren

op wisselende input van zon- en windelektriciteit. De verwachting is dat beide technieken in de toekomst ingezet zullen worden. Een belangrijk aandachtspunt is de schaarste aan grondstoffen die nodig zijn bij de elektrolyse en de omzetting waterstof in elektriciteit en warmte.

Waterstof kan een duurzame buffer worden om verschillen tussen vraag en aanbod op te vangen doordat van overschotten aan groene elektriciteit waterstof kan worden gemaakt die weer gebruikt kan worden als er tekorten zijn.

De energetische waarde van waterstofgas is drie keer lager dan van aardgas. Waterstof geeft geen koolmonoxidevergiftiging, heeft brede explosiegrenzen, een lage ontbrandingstemperatuur en stijgt snel op in de lucht. Ten opzichte van benzine heeft waterstof een hoge energetische waarde, een breed ontvlambaarheidsbereik en een lage dichtheid t.o.v. lucht.

Waterstof kan worden opgeslagen via compressie, liquefactie en opslag in hydriden. Compressie is de meest gebruikte opslagmethode. Waterstof wordt dan samengeperst en onder druk opgeslagen. Voor waterstof is in vergelijking met aardgas 3 tot 4 keer meer opslaginfrastructuur nodig. De kosten voor opslag zijn volgens BloombergNEF aanzienlijk. Maar volgens PwC/Strategy& zijn de investeringskosten relatief laag. Er zijn voldoende geschikte zoutcavernes in Noordoost-Nederland voor grootschalige opslag van waterstof: de techniek is bekend en wordt al toegepast met een hoge efficiency. Maar volgens TNO en EBN is er onvoldoende capaciteit in de zoutcavernes. Er is duidelijkheid nodig over de opslag in de cavernes en in lege gasvelden.

Bij de opslag in zoutcavernes spelen niet alleen technische en financiële problemen maar zijn ook juridische en maatschappelijke factoren van belang. Het draagvlak voor opslag van waterstof in de lege zoutcavernes van Noordoost-Nederland is bij omwonenden niet vanzelfsprekend. Er is in deze regio al veel onrust door aardgas- en zoutwinning, windmolens en zonneparken.

Het huidige aardgasnet kan geschikt gemaakt worden voor transport van waterstof. Wel zijn er aanpassingen nodig bij compressoren en meetstations. Ook moeten de gasmeters vervangen worden, moet waterstof een herkenbare geur krijgen en moet de verwarmingsketel vervangen worden. De kosten hiervoor zijn te overzien. Verder voldoet de huidige regelgeving niet, omdat waterstoftransportleidingen in een andere categorie vallen dan aardgastransportleidingen.

De Gasunie mag van de regering het Nederlands aardgasnet geschikt gaan maken voor het transport van waterstof naar de industriële clusters. Gebruik van het bestaande gasnetwerk is goedkoper dan de aanleg van een nieuw waterstofnetwerk. Om onnodige kosten te voorkomen kan deze ombouw het beste stapsgewijs plaatsvinden in samenhang met de ontwikkeling van de waterstofmarkt.

In de samenleving buiten de industrie is nog weinig bekend over de veiligheid van waterstof. De risico's van waterstof in de woonomgeving zijn niet hoger die van aardgas en ook in het transport zijn de risico's en gevaren niet groter dan die van andere brandstoffen. De risico's zijn wel anders: waterstof is niet te ruiken, zien en proeven, heeft een lagere ontstekingsenergie en grotere ontvlambaarheidsbereik, zendt minder stralingswarmte uit en brandt overdag in een schone omgeving met een vrijwel onzichtbare vlam. Bij opslag onder druk in tanks bestaat het gevaar van ontploffing en van 'jet flames' (lange vlammen met hoge temperaturen).

In de Programmareeks Gevaarlijke Stoffen met daarin voorschriften, eisen, criteria en voorwaarden m.b.t. gevaarlijke stoffen heeft GS-35 betrekking op waterstofinstallaties voor het afleveren van waterstof aan voertuigen en werktuigen. Het is een belangrijke richtlijn voor het bevoegd gezag, veiligheidsregio's, toezichthouders en het bedrijfsleven bij de bouw van waterstoftankstations. Er is een nationaal innovatieprogramma waterstofveiligheid met als doel te komen tot landelijk uniform beleid en wet- en regelgeving voor veiligheidsaspecten en risico' in de gehele waterstofketen. Ondanks strenge (inter)nationale richtlijnen zijn er in 2019 drie ernstige incidenten geweest met waterstof in het transport. Daarom moet wetgeving, standaarden en werkwijzen voor het veilig werken met waterstof buiten de industrie, verder ontwikkeld wordt. Liefst in internationaal verband.

4 Waterstof in een duurzame toekomst

4.1 Inleiding

Nederland heeft de intentie om in 2050 klimaatneutraal te zijn om de aarde niet verder op te warmen en de klimaatveranderingen beheersbaar te houden. Daarom mogen er dan geen broeikasgassen, zoals koolstofdioxide (CO₂), meer worden uitgestoten. Dit betekent dat fossiele energie, zoals aardgas, aardolie en steenkool vervangen wordt door duurzame energie, zoals zon, wind, waterkracht en aardwarmte. Het decarboniseren (ontkolen) van de energie resulteert in een klimaatneutrale economie zonder vervuiling. Groene waterstof kan hierbij een belangrijke rol spelen. In dit hoofdstuk wordt aan de hand van actuele publicaties verkend hoe Nederland klimaatneutraal kan worden inclusief de ontwikkeling van duurzame elektriciteit en duurzame waterstof. Welke verwachtingen zijn er van de verschillende 'kleuren' waterstof? Hoe is de relatie tussen waterstof en elektriciteit in het energiesysteem van de toekomst? De omvang van de waterstofproductie in Nederland, de import en de kosten van waterstof worden aan de hand van verschillende scenario's besproken. In het tweede deel wordt gekeken naar de plaats van waterstof in het Nederlandse klimaatbeleid en de ontwikkeling van de rol die de overheid kan en wil spelen. De regering heeft een waterstofvisie ontwikkeld en wil nationaal en internationaal een actieve rol spelen bij de inzet van waterstof in het klimaatbeleid en de energietransitie. In welke economische sectoren gaat waterstof een prominente rol spelen en in welke sectoren is waterstof minder belangrijk? De verschillende beleidsinstrumenten worden besproken naast de kansen voor de Nederlandse economie.

4.2 Kansen voor waterstof

John Bockris (2013) beschrijft in zijn geschiedenis van waterstof dat hij in 1972 voor het eerst het begrip 'waterstofeconomie' gebruikte. In een waterstofeconomie heeft waterstof de functie van de meest belangrijke energiedrager overgenomen van fossiele energie als olie, steenkool en gas. Wetenschappers en toekomstdenkers hebben sinds de oliecrises van de jaren '70 wisselende belangstelling gehad voor de waterstofeconomie en daarbij verschillend gedacht over de sterkten en zwakten van zo'n energiesysteem. In het afgelopen decennium is de belangstelling voor waterstof sterk toegenomen; in veel scenario's voor een duurzame toekomst heeft waterstof een prominente plaats.

Aué (2018) ziet duurzaam geproduceerde waterstof als de motor voor de energietransitie (Aué, 2018). Het is geschikt voor:

- korte termijn- en seizoensopslag (zowel kleinschalig en grootschalig) van duurzaam geproduceerde elektriciteit;
- inzet als brandstof om de transport en mobiliteits-sector te decarboniseren. Waterstof maakt autorijden minder afhankelijk van fossiele brandstoffen en het is minder vervuilend, minder koolstofintensief en minder lawaaierig;
- vergroening van de industrie. De procesindustrie gebruikt veel hogetemperatuurwarmte die momenteel fossiel wordt geproduceerd;
- voorziening in de warmtevraag in de gebouwde omgeving als alternatief voor aardgas in oude binnensteden of het platteland;
- benutting van investeringen. In Nederland is een fijnmazige gasinfrastructuur die tot in vrijwel alle woningen loopt. Deze kan geschikt gemaakt worden voor waterstof.

Hoe een CO₂-neutrale energievoorziening er in 2050 uit ziet, hangt onder meer af van politieke en maatschappelijke keuzes die in de komende jaren gemaakt zullen worden. Wie neemt het initiatief en de regie voor de transitie? Is er een sterke top-down sturing door de overheid of komen de initiatieven van onderop, van burgers en bedrijven?

In **Net voor de Toekomst** (CE Delft 2017b) zijn vier maatschappijbeelden uitgewerkt voor de

energievoorziening in 2050. Met deze scenario's proberen netbeheerders grip te krijgen op mogelijke toekomstige ontwikkelingen. De maatschappijbeelden verschillen al naar gelang overheden sturing geven aan de transitie en het energiesysteem invullen. De scenario's zijn:

- Regie Nationaal. Strakke regie door de rijksoverheid. Rijk stuurt op energie-autonomie voor Nederland via een mix van centrale en decentrale energiebronnen. Veel draagvlak voor wind, zon en schaarste besef. Veel opslag nodig in de vorm van waterstof om vraag en aanbod op elkaar af te stemmen.
- Regie Regionaal. Mensen nemen lokaal regie. Provincies en gemeenten stimuleren maximaal regionale zelfvoorziening en decentrale technieken. Er is ook veel draagvlak voor wind, zon en schaarste besef.
- Regie Internationaal. Focus op internationale handel. Overheid stuurt sterk op import van hernieuwbare energie en er is geen draagvlak voor zelfvoorziening.
- Generieke sturing. Bedrijven en burgers bepalen zelf. Geen regie door de overheden maar door de markt en bindende generieke instrumenten, zoals CO₂-belasting. De transitie is een organisch veranderingsproces.

Geen van de vier maatschappijbeelden zal de uiteindelijke waarheid worden, maar ze bieden inzicht in de gevolgen van (politieke) keuzes. In alle scenario's zal het energiesysteem drastisch veranderen. De totale kosten van de energievoorziening worden in de toekomst voor alle scenario's ongeveer twee keer zo hoog als nu. De rol van elektriciteit als energiedrager wordt belangrijker.

Elektriciteitsnetten moeten verzwakt worden. De gasinfrastructuur blijft nodig.

Waterstof is onmisbaar in de toekomstige energievoorziening. Het is een goede oplossing om energie uit wind en zon in waterstof op te slaan. Ook kan waterstof worden ingezet voor vervoer, voorzien in de warmtevraag en als grondstof dienen in de chemische industrie. Als wind en zon een belangrijke rol spelen in de toekomst zijn centrales nodig met hetzelfde vermogen als de huidige kolen- en gascentrales om tijdens 'Dunkelflaute' (geen zon, geen wind) in de energievraag te voorzien. Het draagvlak voor de energietransitie is essentieel. Alle energiegebruikers moeten ingrijpende maatregelen nemen en daarbij hogere kosten dragen. Ook is belangrijk dat er maatschappelijke acceptatie is voor waterstoftechnologie. Zeker als het buiten de industrie in de leefomgeving wordt toegepast. De acceptatie kan bemoeilijkt worden doordat waterstof een goed brandbaar gas is dat geassocieerd kan worden met een groot ontploffingsgevaar. Ook is er verder onderzoek nodig om gedetailleerd inzicht te krijgen in de veiligheidsrisico's bij toepassing in huizen (met verouderde gasleidingen, lekkende kranen, e.d.).

De vier landelijke maatschappijbeelden zijn voor een aantal provincies (Groningen/Drenthe, Limburg, Zuid-Holland en Utrecht) verder uitgewerkt in de vorm van systeemstudies. Hierbij wordt een provinciale overkoepeling gemaakt van de verschillende Regionale Energiestrategieën die in een provincie van toepassing zijn. Ook andere provincies hebben zo'n systeemstudie gemaakt (Energieia 2022a).

Berenschot en TNO (2017) zien blauwe waterstof als een fundamentele stap naar een duurzaam energiesysteem. Blauwe waterstof uit aardgas is een brugtechnologie naar een schone waterstofeconomie. Waterstof wordt dan eerst gemaakt uit fossiele bron, waarbij de CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen, en later wordt waterstof geproduceerd met duurzame elektriciteit, met name door een sterke toename van windenergie.

Enpuls (2018b) geeft aan dat de productie van groene waterstof vooralsnog alleen in uitzonderlijke situaties economisch haalbaar is. Toch verwacht Enpuls dat groene waterstof in de toekomst een alternatief kan zijn voor dure netverzwaring. De door stroom aangedreven elektrolyzers kunnen namelijk worden aangezet op momenten dat er congestie op het elektriciteitsnet dreigt en vormen zodoende (in potentie) een alternatief voor dure netverzwaringen.

Volgens de Contouren van een Routekaart Waterstof (**TKI Nieuw Gas 2018**) is waterstof zeer kansrijk

is om een belangrijke rol in het toekomstige duurzame energiesysteem te vervullen. En ook in de transitie daar naartoe. Waterstof kan een systeemrol vervullen: het biedt niet alleen voordelen in de verschillende toepassingsgebieden, zoals de industrie, het vervoer en de elektriciteitsproductie, maar het kan ook opslag-intermediair zijn tussen alle productiewijzen en toepassingsmogelijkheden. Hierdoor kan een volledig duurzaam, efficiënt, flexibel en geïntegreerd energie- en grondstoffsysteem ontstaan dat betrouwbaar en betaalbaar is en de juiste mate van voorzieningszekerheid biedt. Naast deze potentie en de vele kansen ziet de Routekaart voorlopig ook nog veel uitdagingen. De technologie om waterstof te produceren en toe te passen (elektrolyse, brandstofcellen, branders) is al beschikbaar, maar de kostprijs moet nog fors dalen om te kunnen concurreren met de huidige, vaak fossiele alternatieven. Door onderzoek en ontwikkeling van nieuwe materialen, het optimaliseren van componenten en systemen, en het opschalen van systeemgrootte en productieaantallen kunnen serieuze kostprijzdalingen bereikt worden. Naast technologie zijn ook financiering, wet- en regelgeving, marktontwikkeling, veiligheid, het beschikbaar krijgen van de benodigde arbeidskrachten en maatschappelijke acceptatie van groot belang voor een succesvolle ontwikkeling van waterstof.

Als vervolg op de Contouren is Waterstof voor de energietransitie (**TKI Nieuw Gas 2019**) verschenen met een programmatische aanpak van innovaties op het thema waterstof in Nederland voor de periode 2020 – 2030. Hierin wordt aangegeven dat voor de verdere ontwikkeling van een waterstofvisie met praktijkprojecten en het creëren van randvoorwaarden een bedrag van €1,5- €2 miljard gemoeid gaat. In 2022 is een nieuwe Routekaart (**NWP 2022**) verschenen met bijgestelde concrete doelen en acties voor 2030 en een duidelijke richting voor de langere termijn richting 2050. De Routekaart laat een holistische benadering zien en verbindt alle facetten van een te wikkelen Nederlandse waterstofmarkt: aanbod, transport, opslag en randvoorwaarden, zoals beleidskader, veiligheid, maatschappelijke acceptatie en arbeidsmarkt (zie verder hst 8).

DNV GL (2018) concludeerde, in opdracht van Tennet en Gasunie, dat omzetting naar waterstof op zee technisch haalbaar is maar nog geen economisch/financieel voordeel biedt. Toch gaf de studie wel de potentie aan voor de verdere ontwikkeling waterstof. Tennet en Gasunie zien het als een belangrijke stap naar verdere ontwikkeling van grootschalige elektrolyse. Bij de verwerking van de elektriciteitsproductie door windmolens op de Noordzee zijn op dit moment de kosten van de kabel lager dan de productie van waterstof op zee en verder transport door pijpleidingen.

Volgens **Pondera Consult en Arcadis (2018)** is de productie van waterstof voor de afvoer van de opgewekte windenergie op de Noordzee op dit moment geen realistische optie. De elektrolyse-technieken op grootschalig niveau zijn nog niet voldoende ontwikkeld. Wel zijn er kansen om met de productie van waterstof uit conventionele technieken kostentechnisch te concurreren als waterstof op grote schaal en in grote hoeveelheden wordt toegepast en daarnaast een waterstofmarkt gecreëerd en gestimuleerd wordt.

Experts zijn het erover eens dat door het financieren van pilotprojecten met behulp van subsidies nu al een begin gemaakt moet worden met de ontwikkeling van grootschalige productie van groene waterstof om in 2050 transport en industrie op groen waterstof te baseren.

Het **International Renewable Energy Agency (IRENA 2018)** ziet waterstof als de ‘missing link’ in de energietransitie: met hernieuwbare elektriciteit kan waterstof worden geproduceerd. Deze waterstof kan op zijn beurt energie leveren aan sectoren die anders moeilijk koolstofvrij te maken zijn door elektrificatie. Het wereldwijde energiesysteem moet een grondige transformatie ondergaan om de doelstellingen van de Overeenkomst van Parijs te halen. Koolstofarme elektriciteit uit hernieuwbare energiebronnen kan een belangrijke energiedrager worden.

Het aandeel van elektriciteit in alle energie die eindgebruikers wereldwijd verbruiken, zou in 2050 moeten toenemen tot 40% (50% volgens **IRENA 2019b**) om CO₂-neutraal te worden; ongeveer een verdubbeling ten opzichte van 2015. Waterstof en elektriciteit zijn als energiedragers complementair

in de energietransitie. Waterstof uit hernieuwbare energiebronnen heeft het technische potentieel om grote hoeveelheden hernieuwbare elektriciteit te kanaliseren naar sectoren waarvoor het koolstofarm maken op een andere manier moeilijk is, zoals in verschillende industriële sectoren (raffinaderijen, ammoniakproductie, bulkchemicaliën) waarvan het overgrote deel wordt geproduceerd uit aardgas. Waterstof uit hernieuwbare bronnen kan in bestaande aardgasnetten worden geïnjecteerd en worden ingezet in het transport waarbij waterstofauto's complementair zijn aan batterijauto's.

Het **Internationaal Energieagentschap** (IEA 2019) vindt de tijd rijp om waterstof een belangrijke rol te laten spelen in een schone, veilige en betaalbare energietoekomst. Het constateert dat schone waterstof momenteel een ongekend politiek en zakelijk momentum beleeft, waarbij het aantal projecten over de hele wereld snel groeit. Technologieën kunnen worden opgeschaald en de kosten kunnen dalen. Waterstof geeft mogelijkheden om een aantal sectoren, zoals langeafstandstransport, ijzer, staal en chemicaliën, koolstofarm te maken. Het kan ook helpen de luchtkwaliteit en de energiezuiverheid te verbeteren. De productie van groene waterstof is te duur, de ontwikkeling van waterstof te traag en er zijn juridische belemmeringen op nationaal en internationaal niveau. Overheden en industrie moeten er nationaal en internationaal samen voor zorgen dat bestaande regelgeving geen onnodige belemmering vormt voor investeringen. Ze moeten waterstof een belangrijke rol geven in hun energiestrategieën voor de lange termijn en meer geld uitrekken voor research & development. Het IEA ziet kansen om van industriële havens zenuwcentra te maken voor opschaling van het gebruik van schone waterstof, daarbij voortbouwend op bestaande infrastructuur, zoals miljoenen kilometers aardgaspijpleidingen. Ook moet waterstof een rol gaan spelen bij het vervoer over water.

Volgens het **IEA** (2020) kent het Nederlandse energiebeleid nog veel uitdagingen, zoals de grote afhankelijkheid van fossiele energie, de uitfasering van het Gronings gas en de voortgang van de energietransitie. Als Nederland de huidige waterstofproductie wil vergroenen dan is daarvoor zo'n eenderde van de totale huidige elektriciteitsproductie nodig ofwel twee keer de totale hoeveelheid hernieuwbare elektriciteit. Ook is de kostprijs van waterstof uit elektrolyse momenteel driemaal hoger dan van waterstof uit aardgas. Alleen door het belasten van aardgas via CO₂ uitstoot kan dat op korte termijn veranderen. Op de langere termijn kunnen innovatie en opschaling de kosten verlagen, maar dan moet er wel meer geïnvesteerd worden in onderzoek. De ontwikkeling van zowel groene als blauwe waterstof moet door adequate subsidies gestimuleerd worden. In een recent rapport geeft het **IEA** (2021) aan dat de investeringen in waterstoftechnologie fors moeten worden verhoogd om de internationale klimaatdoelen te halen. Door deze investeringen wordt de productie van groene waterstof goedkoper en kan ook de vraag zich verder ontwikkelen.

Het **IEA** (2022b) ziet dat het jaar 2022 een keerpunt is in de energietransitie. Door de oorlog in Oekraïne willen landen in de hele wereld minder afhankelijk worden van Russische energie en de eigen duurzame energieproductie opvoeren. Als de duurzame investeringen tot 2030 worden verdubbeld ten opzichte van de huidige plannen is het zelfs nog mogelijk om de doelstellingen van Parijs te halen. Het **UN environment programme** (VN-Milieuprogramma 2022) constateert dat de uitstoot van broeikasgassen tot 2030 moet dalen met 30% om deze doelen te halen, maar in de lopende overheidsplannen is slechts sprake van een daling met 5-10%. Alleen met een vergaande transformatie van de samenleving kunnen steeds grotere klimaatrampen worden voorkomen: "only an urgent system-wide transformation can deliver the enormous cuts needed to limit greenhouse gas emissions by 2030."

Stern (2019) geeft aan dat de gasector de Europese Unie zal moeten overtuigen van het belang van gas in een emissieloze toekomst. Hierbij moet de gasector ook zelf zeer substantiële bedrijfsinvesteringen doen, in plaats van alleen te vertrouwen op overheidsfinanciering of regelgevende steun.

Navigant (2019) ziet een belangrijke rol voor gas in de Europese Unie om het energiesysteem in 2050 CO₂-neutraal te maken. Gas is aantrekkelijker dan steenkool of olie, omdat het een veel lagere uitstoot van broeikasgassen geeft. Om te decarboniseren zijn aanzienlijke hoeveelheden hernieuwbare elektriciteit nodig. De elektriciteitsproductie zal meer dan verdubbelen en de productie van hernieuwbare elektriciteit uit wind en zon wordt dan tien keer zo groot als vandaag. Deze sterke groei in wind- en zonne-energie vereist de productie van uitschakelbare elektriciteit met gas of vaste biomassa. Seizoensopslag in batterijen is onrealistisch, zelfs tegen sterk gereduceerde kosten. Voor volledige decarbonisatie van industriële warmte met hoge temperatuur is gas nodig. De bestaande gasnetten zorgen voor de betrouwbaarheid en flexibiliteit van het energiesysteem. Ze kunnen worden gebruikt om hernieuwbaar methaan en waterstof te transporteren en te distribueren. Het is mogelijk om de productie van duurzaam gas op te schalen tegen sterk verminderde productiekosten. Blauwe waterstof kan een schaalbare en kosteneffectieve optie zijn. Omdat groene waterstof vandaag de dag nog steeds duur is en omdat de toename ervan is gekoppeld aan de snelheid van groeiende wind- en zonnecapaciteit tot de benodigde niveaus, kan een vroege opschaling van blauwe waterstof de koolstofarme energietransitie versnellen. In een optimaal gas-scenario voor 2050 wordt gebruik gemaakt van de bestaande gasinfrastructuur. Dat is voor de samenleving voordeliger dan een grotere inzet op vaste biomassa-energie. Het toekomstige energiesysteem kan volledig hernieuwbaar worden, waarbij blauwe waterstof wordt vervangen door hernieuwbare groene waterstof tegen 2050–2060 na een grootschalige uitbreiding van wind- en zonne-energie.

Jepma (2019) laat aan de hand van drie scenario's zien dat Nederland met het gebruik van aardgas, biomassa, elektriciteit en waterstof (blauw en groen) op verschillende manieren de CO₂-reductie doelstelling van de EU in 2050 kan bereiken (mitigatie van 80-95% en elektrificatie van ongeveer 20% naar 40%).

In het eerste scenario neemt Nederland geen actieve strategische positie in bij de energietransitie, maar voldoet het aan de internationale doelstellingen. Het bereikt dit doel tegen de laagste kosten in vergelijking met de andere scenario's, maar het ontwikkelt geen strategische koppositie in de energietransitie. Er is weinig innovatie en kansen worden niet benut.

In het tweede scenario kiest Nederland voor een groen voorbeeld en bereikt het de reductie doelstelling door snel te vergroenen in het verbruik en door de afhankelijkheid van energie-import te verminderen. Kleinschalige gedecentraliseerde energiesystemen worden op grote schaal geïntroduceerd. De werkgelegenheidsimpact van deze strategie is het hoogste. Ook wordt de meeste CO₂ gereduceerd, maar het is wel het duurste scenario.

Nederland kiest in het derde scenario sterk voor een waterstofeconomie. Het blijft een energiehub voor Noordwest-Europa en importeert daarom aanzienlijke hoeveelheden waterstof naast de waterstof uit de offshore windenergieproductie in de Noordzee. Ook wordt waterstof gebruikt in de verschillende economische sectoren, maar wel het grootste deel in de industrie.

In alle scenario's worden de kosten van het energiesysteem minstens twee keer hoger dan nu: van momenteel ongeveer 5% van het totale nationale inkomen tot een verdubbeling in 2050. Ook verandert Nederland van een energie-exporteur in een energie-importeur. Nederland kan dus verschillende strategische keuzes maken afhankelijk van het perspectief: kosten, CO₂-reductie, afhankelijkheid van het buitenland en ontwikkeling van de energiehubfunctie. Noord-Nederland zet nadrukkelijk in op het derde scenario om de huidige strategische positie in het energietransport (havens, wegen, aardgas- en elektriciteitsnet) te behouden.

Weeda (2019) geeft aan dat de rol die waterstof kan spelen bij de energietransitie veranderd is. Eerder zou waterstof dienen als opslag van duurzaam opgewekte elektriciteit maar als in 2050 CO₂-uitstoot sterk gereduceerd moet worden, dan moet de industrie geen fossiele brandstoffen en grondstoffen meer gebruiken. Biomassa zou een alternatief kunnen zijn maar daarvan is niet

voldoende en bovendien is de vraag of biomassa echt duurzaam is. Waterstof moet dus een belangrijke rol gaan spelen bij vergroening van de industrie.

Soetaert (2019) ziet een revival van de waterstofeconomie als de waterstofhype 2.0. De eerste waterstofhype was vooral gericht op de mobiliteitssector. Maar eigenlijk is waterstof niet zo geschikt voor mobiliteit door lage energiedensiteit, moeizame opslag en explosiegevaar. Bovendien wordt bij de productie van waterstof op basis van aardgas veel CO₂ uitgestoten. Waterstof is vooral handig om langdurig energie mee op te slaan in lege gasvelden, het is eenvoudig te transporteren over langere afstanden en het is uiterst geschikt als grondstof in de chemie. Voorwaarde is natuurlijk wel dat de waterstof duurzaam wordt geproduceerd. Waterstof is ook de sleutelfactor om CO₂ om te zetten naar chemische bouwstenen. Bij CCU (Carbon Capture and Utilisation) wordt CO₂ gebruikt als grondstof voor de chemie en dat kan gemakkelijk met waterstof.

FME (2019) heeft in kaart gebracht welke mogelijkheden en kansen er zijn voor Nederlandse bedrijven bij de productie en gebruik van waterstof. FME pleit voor oranje waterstof: in Nederland duurzame economische groei en banen scheppen door optimaal gebruik te maken van Nederlandse technologie voor productie en toepassing van waterstof. De waterstofproductieketen biedt een nieuw perspectief voor zowel de bestaande (aard)gassector als voor andere industriële sectoren die specifieke systemen, componenten en onderdelen maken voor de waterstofketen. De studie inventariseert de mogelijkheden van Nederlandse bedrijven voor producten en diensten met betrekking tot waterstof in de energietransitie. Het geeft een overzicht van realistische kansen voor bedrijven die nu al een positie in waterstof hebben of waarvoor mogelijkheden zijn in de waterstofketen. Voor drie cases (PEM-elektrolyzers, waterstof-CV-ketels en hogedruktanks) is een verdiepingsslag uitgevoerd. FME doet aanbevelingen om kansrijke segmenten en bedrijven optimaal te faciliteren.

TenneT en Gasunie (2020) hebben in Phase II - Pathways to 2050 een doorkijk gemaakt naar de Europese energievoorziening in 2050. Om het klimaatakkoord van Parijs te halen, moeten de energievoorziening, de energievraag en de aansluitende energie-infrastructuur ingrijpend veranderen. Koppeling van energie-infrastructuur voor elektriciteit en gas wordt beschouwd als een sleutel om op grote schaal hernieuwbare energiebronnen te integreren in het energiesysteem en om de voorzieningszekerheid te waarborgen. Volledige Europese energie-onafhankelijkheid is niet haalbaar. Invoer blijft een essentieel onderdeel van de Europese energievoorziening. Wel is een verschuiving naar CO₂-neutrale energiedragers noodzakelijk.

Er is een zeer ambitieuze groei van hernieuwbare energie noodzakelijk om de CO₂-reductie van Parijs te realiseren en om tegelijkertijd de Europese energie-invoer te verminderen. Vanwege de toenemende totale vraag naar elektriciteit in combinatie met een groeiend aanbod van hernieuwbare energie, moet de infrastructuur voor elektriciteitstransmissie verder worden uitgebreid na 2030. Een groot deel van de energievraag moet worden gedekt door waterstof. Om dit mogelijk te maken, moet een EU-breed waterstofnet worden ontwikkeld. Dit kan efficiënt worden gedaan door gebruik te maken van de bestaande gas-infrastructuur.

Volgens het advies van de **Taskforce Infrastructuur Klimaatakkoord Industrie (2020)** is voor duurzame energie waterstof onontbeerlijk. Het stroomnetwerk heeft niet genoeg capaciteit om de industrie van duurzame energie te voorzien. Het kan nooit genoeg energie leveren om olie en gas te vervangen. Daarom is een nieuwe geïntegreerde energiehoofdstructuur nodig. Er moeten snel miljarden worden geïnvesteerd in leidingen voor waterstof (waterstof-backbone) en voor het transport van afgevangen CO₂. Zonder waterstof als brandstof en zonder nieuwe leidingen voor waterstof en CO₂ stappen de zes grote Nederlandse industrieclusters niet over naar duurzame energie. Er is behoefte aan een nieuwe, afgestemde energiestructuur voor elektriciteit, waterstof en CO₂, waarbij het huidige fijnmazig aardgasnetwerk geschikt gemaakt kan worden voor waterstof. Transport van energie door gasleidingen is 8 tot 15 keer goedkoper is dan via hoogspanningskabels,

waarbij onderweg grote verliezen optreden. Als een fabriek of industriegebied kan kiezen tussen elektriciteit (elektronen) of waterstof (moleculen), dan is die laatste optie te verkiezen. Hierdoor kan de druk verminderen op het elektriciteitsnet, dat op sommige plaatsen al overbelast is. De energiehoofdstructuur moet onderdeel zijn van een internationaal netwerk, en dus verbonden zijn met Duitse en Belgische netwerken.

Berenschot en Kalavasta (2020a,b,c) hebben de vier klimaatneutrale Energiescenario's uit **Net voor de Toekomst van CE Delft** (2017b) verder uitgewerkt voor waterstof en concluderen dat in alle scenario's eigen productie en import van waterstof nodig is. De jaarlijkse Nederlandse waterstofproductie is momenteel 110 – 180 PJ en zal in alle scenario's sterk toenemen. In 2050 is in de verschillende scenario's 250 – 590 PJ nodig en inclusief scheepvaart, luchtvaart en elektriciteitssector is de bandbreedte 770 – 1650 PJ. De industrie heeft van de sectoren, exclusief bunkers en kerosine, het grootste aandeel in waterstof nodig om te decarboniseren. De mobiliteit- en elektriciteitssector spelen waarschijnlijk een meer bescheiden rol. In het **Energiesysteem van de Toekomst (Netbeheer Nederland 2021)** hebben de samenwerkende netbedrijven (**TenneT, Gasunie en de regionale netbeheerders**) diepgaand inzicht gegeven in wat de consequenties zijn van de vier scenario's voor de benodigde flexibiliteit en infrastructuur. Daarnaast geven ze aan wat er concreet moet gebeuren om met een integrale aanpak de energietransitie in 2050 te realiseren: de uitbreiding van gas- en elektriciteitsnetten, warmtenetten en de aanleg van nieuwe waterstof- en CO₂-leidingen. In alle scenario's verdubbelt de vraag naar elektriciteit onder andere door elektrificatie van industrie en vervoer. De elektriciteit-infrastructuur moet daarom zeer fors worden uitgebreid. Om vraag en aanbod op elkaar af te stemmen moeten elektriciteitsoverschotten worden opgeslagen in batterijen en waterstof voor gebruik op momenten van schaarste. In alle scenario's is waterstof belangrijk als schone brand- en grondstof en als buffer. Er is een landelijk dekkend waterstoftransportnet nodig, dat de industrie van waterstof voorziet, maar misschien ook huishoudens en de vervoerssector. Een groot deel van het huidige aardgasnet kan hierop worden aangepast. Waterstofbuffers in zoutcavernes en mogelijk lege gasvelden worden de stabilisatoren van het energiesysteem. Ook is in alle scenario's CO₂-opslag nodig in lege gasvelden onder de Noordzee. Ook hierbij kunnen (deels al bestaande) buisleidingen op zee worden gebruikt.

Alle scenario's zijn aanzienlijk duurder dan het huidige systeem met een hoge CO₂-uitstoot: ruwweg een verdubbeling per megawattuur. De totale maatschappelijke kosten van de verschillende scenario's lopen niet heel ver uiteen, maar de kostenopbouw kan wel heel verschillen. Als er veel geïmporteerd wordt zijn er vooral kosten voor energie-inkoop. Als Nederland grotendeels zelfvoorzienend wil zijn, zijn er hoge kosten voor het bouwen en aansluiten van opwekinstallaties. Als Nederland zelfvoorzienend wil zijn is, de ruimtelijke impact groot. Maar een hoge import van duurzame energie leidt weer tot grotere afhankelijkheid van het buitenland. De politiek moet dus een afweging maken tussen de verschillende opties. De overheid moet de regie nemen om tot een integraal programma te komen voor het hele energiesysteem.

Energie-Nederland (2020), de branchevereniging van energiebedrijven, vindt dat Nederland in drie fases waterstof moet stimuleren. Eerst voldoende aanbodsubsidies verstrekken om industrie-breed te leren en samen te werken. Rond 2025 opschalen door gerichte vraagstimulering en rond 2030 een (inter)nationale waterstofmarkt realiseren.

DNV GL (2020) onderzocht in de regio Emmen hoe voorkomen kan worden dat een grote toename van wind- en zonne-energie tot congestieproblemen in het net gaat leiden. De goedkoopste manier is verzwaring van het lokale en regionale net. Een alternatief is om van de groene elektriciteit waterstof te maken, maar dat blijkt twee keer zo duur te zijn. Toch kan waterstof een interessante optie zijn als netverzwaring pas op lange termijn (vijf tot tien jaar) mogelijk is en waterstof sneller realiseerbaar is, omdat binnen twee jaar een elektrolyser gebouwd en geïnstalleerd kan worden. Verder kan waterstof nodig zijn als grondstof of wanneer de energiebehoefte van de afnemer niet

geëlektrificeerd kan worden.

De **Raad voor leefomgeving en infrastructuur** (2021) ziet waterstof als de cruciale schakel in de toekomstige klimaatneutrale energie- en grondstoffenvoorziening. Wind en zon worden belangrijke energiebronnen, maar elektriciteit kan voorzien in alle energiebehoeften. Transportkosten zijn voor elektriciteit hoger dan voor gasvormige energiedragers. Bovendien zijn er perioden waarin er geen wind en zon is. Waterstof biedt een oplossing voor deze problemen. Elektriciteit kan namelijk worden omgezet in waterstof, in die vorm worden opgeslagen en later weer worden omgezet in elektriciteit. Dit maakt het mogelijk om periodieke overschotten en tekorten aan elektriciteit uit zon en wind kosteneffectief op te vangen en te verhandelen.

Daarnaast gaat groene waterstof een belangrijk onderdeel worden van het Nederlandse grondstoffensysteem. Waterstof is namelijk óók bruikbaar als grondstof voor het vervaardigen van brandstoffen, materialen en producten die nu nog worden gemaakt uit fossiele bronnen én bij chemische processen, zoals het recyclen van kunststoffen. Bij sommige toepassingen is de rol van waterstof cruciaal en voor andere toepassingen is waterstof een van de mogelijke routes. Als de kosten dalen en de beschikbaarheid toeneemt, kan waterstof dus een nog veel belangrijker rol vervullen dan nu het geval is. Doordat waterstof tegelijkertijd in verschillende industrietakken nodig is, vormt het in een nieuw energie- en grondstoffensysteem een integrerend element, dat uitwisseling tussen onderdelen van dit systeem mogelijk maakt. Flexibiliteit en leveringszekerheid zijn daarmee gewaarborgd. Om dat te bereiken is volgens de Raad een actieve inzet van de overheid nodig. De overheid moet op korte termijn investeren in de totstandkoming van het hoofdtransportnet voor waterstof met import- en exportmogelijkheden. Daarnaast is het belangrijk dat de overheid zorgt voor een wettelijk kader voor productie, transport, opslag en gebruik van waterstof. Tegelijkertijd moet de overheid explicieter zorgen voor veiligheid en maatschappelijk draagvlak.

De betaalbaarheid van waterstof is een punt van aandacht in het beleid, waarbij het een optie is dat burgers en bedrijven die na de transitie meer moeten gaan betalen, gecompenseerd worden. Volgens verschillende scenario's nemen de energiekosten met 70-100% toe. Dat wordt veroorzaakt doordat enerzijds in fossiele prijzen geen negatieve externe effecten zijn meegenomen en anderzijds hoge investeringskosten nodig zijn voor de groei van duurzame energie.

De overheid moet stimuleren dat er vraag ontstaat naar klimaatneutrale waterstof en ervoor zorgen dat klimaatneutrale waterstof kan concurreren met niet-duurzame alternatieven. Dat kan in theorie het beste door CO₂-uitstoot te beprijzen. Verder is blauwe waterstof een belangrijke overgangstechnologie voor de komende vijftien tot twintig jaar en is ook import van waterstof nodig. In 2050 kan Nederland zelf voorzien in ongeveer de helft tot driekwart van de jaarlijkse energievraag. Om de groei van duurzaam opgewekte elektriciteit op land te kunnen transporteren is verzwaring van het netwerk nodig. Het huidige vraag-gestuurde en centraal gevoede elektriciteitsnet moet worden omgebouwd naar een aanbod-gestuurd en decentraal, weersafhankelijk gevoede elektriciteitsnet. De overheid moet financiële ondersteuning bieden aan (productie) technologieën die het ontstaan van een Nederlandse markt voor klimaatneutrale waterstoftechnologie bevorderen. Daarnaast is het belangrijk dat Nederland een sterkere internationale oriëntatie ontwikkelt door actief samen te werken met buurlanden en EU-partners.

Volgens de Raad heeft de coronacrisis de noodzaak voor de overheid versterkt om in te grijpen en minder afhankelijk te worden van het buitenland waarbij wel zorgen zijn over de aflossing van de op grote schaal verstrekte staatsschuld.

Clingendael International Energy Programme (2019a) heeft twee scenario's uitgewerkt voor het klimaat- en energiebeleid waarbij in het ene scenario de internationale handel en samenwerking toeneemt en het andere stagneert. Beide verhaallijnen beïnvloeden het energie- en klimaatbeleid waarbij nog onduidelijk is hoe de toekomst er in werkelijkheid komt uit te zien.

TNO (2022a) laat in twee scenario's zien hoe Nederland in 2050 klimaatneutraal kan zijn. In het ene scenario houden Nederlanders dezelfde levensstijl en in het andere scenario groeit het milieubewustzijn en veranderen mensen hun consumptiepatroon: ze vliegen minder en eten minder vlees. De totale systeemkosten nemen toe, maar voor het tweede scenario minder dan voor het eerste. De rol van waterstof is in beide opties verschillend: in het behoudende scenario wordt vooral blauwe waterstof ingezet en in het ambitieuze scenario wordt alleen groene waterstof gebruikt, als grondstof in de industrie en als brandstof in lucht- en scheepvaart. Om minder afhankelijk te zijn van het buitenland wordt in de beide scenario's geen waterstof ingevoerd. TNO geeft aan dat de studies maar een beperkte houdbaarheidsdatum hebben en regelmatig aangepast moeten worden door veranderend beleid en voortschrijdende kennis over de toe te passen technieken in het toekomstige energiesysteem.

DNV (2022a) vindt waterstof duur en inefficiënt in vergelijking met directe elektrificatie. Maar waterstof is hard nodig in sectoren die moeilijk of onmogelijk te elektrificeren zijn, zoals bij industriële processen met hoge temperaturen, de luchtvaart, scheepvaart en zwaar vrachtvervoer. Niet in personenauto's en maar in beperkt mate bij de verwarming van gebouwen. Waterstof zal waarschijnlijk slechts voor 5% voorzien in de wereldwijde vraag naar energie in 2050 en het zou 15% moeten worden om de klimaatdoelstellingen van Parijs te halen. Er is volgens DNV wereldwijd een veel sterker beleid nodig om klimaatneutraal te worden.

4.3 De rol van waterstof in het Nederlandse klimaatbeleid

In het **regeringsbeleid** wordt waterstof al een tijd gezien als één van de energiedragers die gaan bijdragen aan de energietransitie. Dit kwam al naar voren in 'Een duurzame brandstofvisie met LEF' (juni 2014), het **Energierapport** (januari 2016), de **Energie-agenda** (december 2016) en het **Ontwerp van het klimaatakkoord** (2018).

Het centrale doel van het **Klimaatakkoord** (2019) is dat Nederland in 2050 klimaatneutraal is. Dan is er netto geen uitstoot meer van broeikasgassen. Dat is nodig om de opwarming van de aarde te beperken en klimaatverandering tegen te gaan. Op de klimaatop in Parijs is in 2015 afgesproken de aarde met maximaal 2°C te laten opwarmen en te streven naar maximaal 1,5°C. Bij deze temperatuurstijging zijn de gevolgen van klimaatverandering nog beheersbaar volgens het **Intergovernmental Panel on Climate Change** (IPCC) van de Verenigde Naties.

In 2021 is de Europese Klimaatwet aangenomen. In deze wet is vastgelegd dat de Europese Unie in 2050 klimaatneutraal wil zijn met als tussendoel voor 2030 een reductie van broeikasgassen met 55 procent ten opzichte van 1990. In 'Fit for 55' heeft de **Europese Commissie** een pakket beleidsvoorstellen gepresenteerd om deze doelstellingen te halen. Volgens het **Planbureau voor de Leefomgeving** (2021c) is het nog onzeker wat het uiteindelijke Europese beleid wordt, maar zullen er wel extra aanvullende verplichtingen komen voor Nederland wat zal leiden tot aangescherpte doelen en beleidsinstrumenten.

Het belangrijkste broeikasgas dat zorgt voor temperatuurstijging is koolstofdioxide (CO₂). Daarom wordt in het Klimaatakkoord de vermindering van CO₂-uitstoot centraal gesteld maar er zijn ook nog andere schadelijke broeikasgassen, zoals methaan en lachgas.

In het Klimaatakkoord staat een waterstofprogramma met daarin de verschillende cruciale functies die waterstof op de middellange (2030) en lange (2050) termijn moet kunnen vervullen in het energie- en grondstoffensysteem, zoals:

- grondstof voor de procesindustrie. Waterstof wordt nu al veel gebruikt en door nieuwe duurzame chemische processen groeit de behoefte;
- energie voor hogetemperatuurwarmte in de procesindustrie.
- regelbaar vermogen, energieopslag voor langere perioden, en energietransport over langere afstanden;

- mobiliteit, zoals personenvervoer voor grotere afstanden en wegtransport richting 2025. Voor de wat langere termijn (richting 2030) gaat het om zwaar wegtransport over lange afstanden, schepen en treinen;

- gebouwde omgeving. Gebouwen en wijken die moeilijk op andere wijze te verduurzamen zijn. Voor de eerste drie genoemde functies is waterstof een *robuuste oplossing* in een CO₂-vrije energie- en grondstoffenhuishouding.

Nederland biedt veel kansen voor waterstof door zijn omvangrijke procesindustrie, zijn grote potentieel voor wind op de Noordzee en zijn gasinfrastructuur en -kennis. Waterstof geeft de mogelijkheid om grote hoeveelheden duurzame energie op kosteneffectieve manier in het systeem in te passen en om nieuwe circulaire processen en waardeketens in de Nederlandse economie op te bouwen. De verwachting is dat er een omvangrijke internationale waterstofmarkt ontstaat, waarin Nederland een sterke rol kan spelen.

Het streven van het Klimaatakkoord is om zoveel mogelijk in te zetten op groene waterstof. De inzet van blauwe waterstof moet optimaal bijdragen aan de ontwikkeling van een breder waterstofsysteem, zonder de groei van groene waterstof te belemmeren. Blauwe waterstof wordt dus gezien als een tijdelijke oplossing die de ontwikkeling van groene waterstof niet in de weg mag zitten.

Er wordt gestart met een substantieel waterstofprogramma, dat zich primair richt op het ontsluiten van het aanbod van groene waterstof, de ontwikkeling van de benodigde infrastructuur en het faciliteren van lopende initiatieven en projecten. Het programma richt zich op korte termijn op de stapsgewijze opschaling van de productie van groene waterstof uit duurzame elektriciteit en de ontwikkeling van een optimale waterstofinfrastructuur. De ambitie van dit programma is om in 2030 3-4 GW aan geïnstalleerd vermogen aan elektrolyzers te hebben gerealiseerd.

In het Ontwerp van het klimaatakkoord werd al als ambitie aangegeven: de realisatie van 50 waterstoftankstations, 15.000 FCEV-persoonauto's en 3.000 zware voertuigen met een brandstofcel op waterstof in 2025, als strategische basis voor versnelde groei richting 2030 en met name 2050. Het belangrijkste instrument voor de stimulering van de opwekking van hernieuwbare energie is, sinds 2011, de Stimuleringsregeling Duurzame Energietransitie (SDE+). Binnen deze regeling krijgen energieproducenten subsidie voor het opwekken van duurzame energie, omdat dit vaak duurder is dan het opwekken van energie uit fossiele brandstoffen. Het verschil tussen de marktprijs van de geleverde energie en de kostprijs van de duurzame energie wordt vergoed door de SDE+ regeling. De hoogte van de SDE+ subsidie wordt bepaald op basis van de technologie, de ontwikkelingen op de energiemarkt en de hoogte van het subsidiebudget.

In 2020 is de bestaande SDE+regeling verbreed naar de SDE++. Naast de productie van hernieuwbare energie komen ook CO₂-reducerende opties in aanmerking voor subsidie, waarbij er een rangschikking is op basis van kosten per vermeden ton CO₂-emissie. Waterstof speelt als CO₂-vrije energiedrager een belangrijke rol in het behalen van de langetermijnklimaatdoelstellingen in 2050. De ontwikkeling en het tijdige starten van de voorbereiding van infrastructuur en opschaling van waterstof is cruciaal om na 2030 te kunnen bijdragen aan verdergaande CO₂-reductie in de industrie, zwaar transport, gebouwde omgeving, elektriciteitssector (via energieopslag) en de vervanging van fossiele brandstoffen als grondstof voor de productie van materialen. Het **PBL** (2019) heeft uitgerekend dat de subsidie-intensiteit van waterstof € 1064 per ton CO₂ bedraagt. Dat is een dure optie in vergelijking met andere technieken. Toch wordt deze categorie open gesteld om marktpartijen uitzicht op de SDE++ te bieden. Voor de productie van blauwe waterstof kan de afvang en opslag van CO₂ meedingen in de SDE++. Er is nog onzekerheid over de manier waarop deze afvang en opslag gerealiseerd wordt. Dit is afhankelijk van wat verschillende partijen willen en daarnaast bestaat er vaak nog geen infrastructuur.

Op advies van het **Planbureau voor de Leefomgeving** (2021) wordt geen SDE++ subsidie verstrekt

voor de productie van waterstof samen met de afvang en opslag van CO₂. De productie van waterstof is een commerciële activiteit en de subsidiering van blauwe waterstoffabrieken geeft risico's op marktverstoringen. Bovendien is het niet de meest kostenefficiënte vorm van CO₂-reductie: CCS op de verbranding van aardgas of industriële gassen is goedkoper dan blauwe waterstof-CCS. Een probleem bij de elektrificatie van de industrie is dat elektriciteit drie keer duurder is dan aardgas. Als productieprocessen geëlektrificeerd moeten worden kan dat alleen met subsidie. Maar zolang de elektriciteit wordt opgewekt met een fossiele brandstof als aardgas levert dat nauwelijks vermindering op van CO₂-uitstoot. Meer stroom betekent dus meer CO₂-uitstoot. De Europese Commissie maakt bezwaar tegen zo'n subsidiering waardoor de vergroening van de industrie stagneert (Volkskrant 2020a).

Het **Ministerie van Economische Zaken en Klimaat** (2020a, b, c) heeft met drie brieven aan de Tweede Kamer (Rol van gas in het energiesysteem van nu en in de toekomst, Routekaart groen gas en Kabinetsvisie waterstof) de strategische visie op gassen (aardgas, groen gas en duurzame waterstof) beschreven voor nu en in de toekomst. Deze brieven sluiten aan op de ideeën uit het Klimaatakkoord, waarbij de kernwoorden voor waterstof waren: opschaling, kostenreductie en innovatie. Door de energietransitie verandert het Nederlands energiesysteem en wordt het gebruik van aardgas teruggebracht. Er zal meer elektriciteit gebruikt worden (volgens **IRENA 2019b** maximaal 50% van het finale energiegebruik) maar gassen blijven nodig in een energiesysteem dat volledig duurzaam, betaalbaar en betrouwbaar is.

De energietransitie vindt plaats langs twee wegen: energiebesparing en opschaling van de productie van duurzame gassen. De overheid wil de noodzakelijke randvoorwaarden vervullen en bedrijven moeten samen met kennisinstellingen gaan investeren in schaalbare toepassingen en innovatie. Waterstof past in de groeistrategie voor Nederland op de lange termijn. Het heeft grote prioriteit voor de industrie. Waterstof biedt internationaal kansen en vraagt een actieve internationale strategie. Nederland wil een voortrekkersrol spelen in de ontwikkeling van waterstof in Europa. Import van waterstof gaat een rol spelen als de wereldmarkt zich ontwikkelt. Nederland kan dankzij de gunstige ligging, de havens en het uitgebreide gasnet en opslagcapaciteit een hubfunctie blijven vervullen voor energie.

Aardgas voorziet in de bestaande gasbehoefte tot 2050 en wordt geleidelijk vervangen door CO₂-vrije gassen als groen gas en duurzame waterstof. In de industrie blijft gas nodig als industriële grondstof en voor hogetemperatuur proceswarmte. Hernieuwbaar gas is nodig voor de stabilisatie van de elektriciteitsproductie. In de mobiliteitssector is gas belangrijk voor de zware mobiliteit en in de gebouwde omgeving voor het leveren van piekvermogen in warmtenetten en voor de verduurzaming van buurten waar warmtenetten of elektrificatie beperkt haalbaar zijn. In de transitie tot 2050 kan ook blauwe waterstof een rol spelen.

Het kabinet wil de regie nemen bij de introductie van waterstof. Allereerst is het van belang om de kosten van de productie van duurzame waterstof te verlagen door opschaling van de productie-installaties in de bestaande industriële clusters, waar al vraag naar waterstof is. In een latere fase van ontwikkeling gaat het om de ontwikkeling van een transportnet en om (seizoens)opslag in zoutcavernes of lege gasvelden.

Het kabinet faciliteert de ambitieuze waterstofplannen met een beleidsagenda waarin vier hoofdlijnen worden onderscheiden: wet- en regelgeving, kostenreductie en opschaling van groene waterstof, verduurzaming eindgebruik en de elektriciteitssector. De maatregelen betreffen stimuleren, ondersteunen, subsidiëren, onderzoeken en aanpassen van regelgeving.

De **Gasunie** speelt in de waterstofplannen niet alleen een belangrijke rol bij de productie, opslag en distributie van groene waterstof, maar mogelijk ook bij de vorming van een markt ervoor.

Bijvoorbeeld door een verplichting om aan aardgas een percentage groene waterstof toe te voegen. In december 2020 heeft de **Minister van Economische Zaken en Klimaat** de Tweede Kamer

geïnformeerd over de Voortgang van de beleidsagenda kabinetsvisie waterstof (2020d). Hierin wordt aangegeven dat er te weinig geld gereserveerd is voor de beoogde opschaling van de opgestelde capaciteit van elektrolyzers. Ook zijn er mogelijk nog extra windparken op zee voor 2030 nodig om de Klimaatakkoordstelling voor wind op zee te halen. Verder moet er geleerd kunnen worden van pilots en demonstraties. Op veel terreinen is nog fundamenteel onderzoek en innovatie nodig. Toepassingen gaan zichtbaarder worden in de omgeving en dit vereist het creëren van maatschappelijk draagvlak en het borgen van veiligheid. De lopende activiteiten worden beschouwd als voorbereidingen op een nationaal waterstofprogramma dat in 2022 van start gaat. In 2022-2025 zal opschaling van groene energie echt van de grond moeten komen.

De strategische waterstofvisie van het kabinet past binnen de waterstofstrategie voor een klimaatneutraal Europa van de **Europese Commissie** (2020). Volgens de Commissie kan hernieuwbare en koolstofarme waterstof bijdragen aan het verminderen van de uitstoot van broeikasgassen vóór 2030 en aan herstel van de EU-economie. Het is een belangrijke bouwsteen voor een klimaatneutrale economie zonder vervuiling in 2050, door fossiele brandstoffen en grondstoffen in 2050 te vervangen in moeilijk te decarboniseren sectoren. Hernieuwbare waterstof biedt ook een unieke kans voor onderzoek en innovatie, waarbij het Europese technologische leiderschap wordt behouden en uitgebouwd én economische groei en banen worden gecreëerd in de hele Europese Unie. De **Europese Commissie** denkt in 'Fit for 55' aan een verplichting om ten minste de helft van het waterstofverbruik in de industrie te vergroenen Volgens het **Planbureau voor de Leefomgeving** (2021c) betekent dat een 'enorme' toename van de elektrolysecapaciteit en van de daarbij horende hernieuwbare elektriciteitsproductie: de ambities uit het Klimaatakkoord (3-4 GW elektrolyse) moeten dan ruwweg worden verdubbeld.

Op basis van een analyse van de overheidssteuning bij transitie in andere sectoren (aardgas, landbouw, aardgas en elektriciteit) trekken **Hulshof c.s.** (2021) lessen voor de subsidiering van waterstof. In de Europese landbouw zijn de gevolgen van overheidssubsidies ook overproductie en meer milieubelasting. Subsidies voor hernieuwbare stroom hebben in de elektriciteitssector geleid tot overwinsten. De hypotheekrenteaftrek leidde in Nederland tot hogere woningprijzen en niet per sé tot meer aanbod. In het gasbeleid was te weinig oog voor negatieve effecten, zoals de aardbevingen in Groningen.

De geleerde lessen zijn dat de overheid het algemeen belang (reductie van CO₂) in het oog houdt en op afstand blijft van het bedrijfsleven. Het geven van financiële ondersteuning moet leiden tot meer aanbod van groene waterstof en niet tot hogere prijzen. Zolang het aanbod van groene stroom beperkt is, betekent stimulering van het gebruik van groene waterstof dat de prijzen toenemen. Internationale ontwikkelingen zijn van belang. Door buitenlandse maatregelen om waterstofproductie te stimuleren, gaat de stroomprijs omhoog, waardoor waterstofproductie (ook) in Nederland duurder wordt. Waterstofproductie kan beter op Europese dan op nationale schaal worden gestimuleerd. Een sterke stimulering van waterstofproductie in Nederland leidt tot een grotere uitrol van windparken, met negatieve gevolgen voor andere belangen op zowel land als op de Noordzee.

Het **kabinet Rutte IV** heeft in het **coalitieakkoord** (2021) verdere stappen gezet om de uitstoot van broeikasgassen verder te verminderen van 49% naar minstens 55% en richting 60% in 2030. Om dat te realiseren wordt substantieel budget uitgetrokken en is er aandacht voor belangrijke randvoorwaarden, zoals de beschikbare infrastructuur, voldoende vakmensen en het betrekken van burgers bij de besluitvorming. Volgens het **Planbureau voor de Leefomgeving** (PBL 2021e) moeten er nog wel aanvullende en minder vrijblijvende maatregelen genomen worden om de broeikasgasreductie te realiseren. Het Planbureau vindt dat voor deze reductie in 2030 "alles uit de kast moet worden getrokken." De uitdaging hierbij is om in verschillende sectoren (gebouwde omgeving, mobiliteit, en landbouw) maatregelen te nemen die minder vrijblijvend zijn maar toch het

draagvlak bewaren. Dat kan wellicht door burgers en beroepsgroepen (zoals boeren) te betrekken in de besluitvorming. Voor de industrie is het grootste risico dat de infrastructuur niet op tijd klaar is en dat er onvoldoende emissievrije energiedragers beschikbaar zijn door de relatief lange doorlooptijden. Verkorten van de procedures kan deze doorlooptijden beperken.

In een brief aan de Tweede Kamer (2022a) heeft de **minister van Economische Zaken en Klimaat** de contouren geschetst van het Nationaal plan energiesysteem. Het plan moet zorgen voor samenhang tussen de verschillende beleidsveranderingen vanuit verschillende ontwerpprincipes, zoals duurzaamheid, leveringszekerheid, betaalbaarheid, veiligheid, leefomgevingskwaliteit en maatschappelijke betrokkenheid. De energietransitie vraagt om een sterke overheid en dat wordt in het plan verder uitgewerkt. Elektriciteit wordt de belangrijkste energiedrager. Waterstof zorgt voor stabiliteit van het elektriciteitsnetwerk en kan dienen als grondstof en zorgen voor hogetemperatuurwarmte in de industrie. De rol bij verwarming van gebouwen blijft beperkt. De contouren sluiten naadloos aan op waterstofvisie uit 2020.

Netbeheer Nederland (2022) heeft een quickscan gemaakt voor 2030 en concludeert dat Nederland niet op schema ligt en dat er extra maatregelen nodig zijn. Ook uit de **concept-Klimaatnota** (2022c) en de begeleidende brief van de **minister van Klimaat en Energie** (2022d) blijkt dat de CO₂-reductie in 2030 niet uitkomt op de afgesproken 55%. Dit komt mede doordat door de oorlog in Oekraïne de kolencentrales weer zijn aangezet om minder afhankelijk te zijn van Russische energie. De minister komt met nieuwe maatregelen. De **Raad van State** (2022) vindt dat het beleid concreter moet worden.

Windenergie op zee wordt naar verwachting de grootste bron van nationale energieproductie worden (**Ministerie van Economische Zaken en Klimaat** 2022b). Dit is nodig om de samenleving te verduurzamen en het vergroot de energieonafhankelijkheid. De bedoeling is om windenergie op zee te versnellen van 11,5 GW in 2022 naar ca. 21 GW rond 2030. En verdere groei naar ca. 50 GW in 2040 en ca. 70 GW in 2050. De komende 30 jaar wordt de windproductie dus zeven keer zo groot! De oorlog in Oekraïne heeft ervoor gezorgd dat Nederland de eigen duurzame productie gaat vergroten om daardoor minder afhankelijk te zijn van het buitenland.

De geproduceerde elektriciteit van windmolens op de Noordzee kan in kabels aan land worden gebracht. Maar ook kan met de windenergie en ontzilt zeewater op zee waterstof worden geproduceerd die in buisleidingen naar land wordt getransporteerd. Het grote voordeel van waterstof op zee produceren en naar land brengen in buizen ten opzichte van elektriciteit transporteren in elektriciteitskabels en op land waterstof produceren is, dat in buisleidingen veel meer energie kan worden getransporteerd dan in kabels: "Eén buisleiding kan waterstof vervoeren van 10GW aan productie op zee, evenveel als vijf elektriciteitskabels van 2GW die TenneT nu als standaard gebruikt voor nieuwe windparken." Als de windparken verder uit de kust liggen wordt dat voordeel nog groter. Bovendien zijn er dan ook minder elektriciteitsaansluitingen op land nodig.

In 2020 is subsidie toegekend voor de bouw van een groene waterstoffabriek op de Noordzee (**RVO** 2020). Op een olieplatform, zo'n 10 kilometer voor de kust bij Scheveningen, wordt de windstroom omgezet in waterstof. Via het bestaande gasnetwerk wordt de waterstof aan land gebracht. In dit **PosHYdon-project** komen drie offshore energiesystemen (wind, gas en waterstof) op de Noordzee samen. De hoop en verwachting is dat de techniek sterk opgeschaald wordt. Hiervoor wordt samen met de marktpartijen een innovatieprogramma opgezet met een kennisplatform en concrete grootschalige demonstratieprojecten. Ook wordt onderzocht of bestaande gasinfrastructuur op de Noordzee gebruikt kan worden voor waterstof. Belangrijk is om samen te werken met andere Noordzeelanden. Verder is voldoende uitvoeringskracht bij zowel overheid als bedrijven van belang en liggen er uitdagingen bij voldoende geschikte arbeidskrachten en de beschikbaarheid van voldoende grondstoffen, waaronder kritieke metalen.

4.4 Samenvatting

De belangstelling voor waterstof is in het afgelopen decennium sterk toegenomen. Waterstof kan een belangrijke rol spelen om in 2050 een CO₂-neutrale energievoorziening tot stand te brengen. De rol van elektriciteit als energiedrager wordt belangrijker. Elektriciteitsnetten moeten verzaard worden, maar ook de gasinfrastructuur blijft nodig voor het transport van waterstof. Energie uit wind en zon kan grootschalig in waterstof worden opgeslagen. Ook kan waterstof worden ingezet voor vervoer, voorzien in de warmtevraag en als grondstof dienen in de industrie. Als wind en zon een belangrijke rol spelen in de toekomst zijn centrales nodig met hetzelfde vermogen als de huidige kolen- en gascentrales om tijdens 'Dunkelflaute' (geen zon, geen wind) in de energievraag te voorzien. Blauwe waterstof uit gas is een brugtechnologie naar een schone waterstofeconomie, omdat de productie van groene waterstof vooralsnog financieel niet haalbaar is. Energietransport door leidingen is veel goedkoper dan door elektriciteitskabels en het voorkomt kapitaalvernietiging door het gebruik van bestaande gasleidingen. In Nederland blijft de import van energie noodzakelijk en de energietransitie gaat geld kosten: de kosten verdubbelen de komende jaren naar zo'n 10% van het nationaal inkomen. Nederland verandert van een energie-exporteur in een energie-importeur. Waterstof heeft veel potentie om een systeemrol te vervullen, maar er zijn nationaal en internationaal ook nog veel uitdagingen. De kostprijs van waterstof moet door opschaling nog fors dalen om te kunnen concurreren met de fossiele alternatieven. Daarnaast zijn financiering, wet- en regelgeving, marktontwikkeling, veiligheid, voldoende arbeidskrachten en maatschappelijke acceptatie van groot belang voor een succesvolle ontwikkeling van waterstof. Nederland kan daarbij internationaal, in het Europese energiesysteem een voortrekkersrol vervullen. Alternatieve scenario's zijn mogelijk waarbij de centrale overheid het initiatief veel meer overlaat aan bedrijven, burgers en lagere overheden.

In de regeringsvisie vindt de energietransitie plaats door energiebesparing en opschaling/kostenreductie/innovatie van de productie van duurzame gassen. Het gebruik van aardgas wordt teruggebracht. Er zal meer elektriciteit gebruikt worden maar gassen blijven nodig. Blauwe waterstof zal in de energietransitie tot 2050 noodzakelijk zijn. De inzet van blauwe waterstof moet optimaal bijdragen aan de ontwikkeling van een breder waterstofsysteem, zonder de groei van groene waterstof te belemmeren. De overheid wil de regie nemen en de noodzakelijke randvoorwaarden vervullen door te stimuleren, ondersteunen, subsidiëren, onderzoeken en regelgeving aan te passen. Bedrijven moeten investeren in schaalbare toepassingen en innovatie. Er is een strategisch visie op aardgas, groen gas en waterstof. Waterstof past in de Nederlandse en Europese groeistrategie op de lange termijn. Nederland wil een voortrekkersrol spelen in de ontwikkeling van waterstof in Europa en een hubfunctie blijven vervullen door naast eigen waterstofproductie ook aanzienlijke hoeveelheden waterstof te importeren. Waterstof biedt kansen voor een schoner milieu, groeiende werkgelegenheid en minder afhankelijkheid van het buitenland. Er is nog veel fundamenteel onderzoek en innovatie nodig. Nadat eerst een nationaal waterstofprogramma in 2022 van start gaat, moet daarna opschaling van groene waterstof echt van de grond komen waarbij naast veel meer windmolens ook grotere elektrolysefabrieken nodig zijn. De overheid moet bij de subsidiering van waterstof wel het algemeen belang in het oog houden, afstand houden van het bedrijfsleven en de gevolgen van subsidies op de waterstofprijzen zowel nationaal als internationaal kritisch evalueren.

In de regeringsplannen zijn de doelstellingen van de broeikasreductie in 2030 verhoogd van 49% naar 55-60%. Om dat te realiseren zijn minder vrijblijvende en concretere maatregelen nodig. Nederland gaat vooral energie produceren met windmolens op de Noordzee. De geproduceerde elektriciteit wordt nu nog met kabels naar het vaste land getransporteerd, maar wordt in de toekomst met elektrolyzers op de Noordzee omgezet in waterstof en dan in buizen verder vervoerd.

5 Kosten en beschikbaarheid van waterstof

5.1 Inleiding

De hoge kosten vormen nu nog een belangrijke belemmering voor een grotere inzet van groene waterstof in het energiesysteem. In dit hoofdstuk wordt gekeken naar de verschillende opvattingen over de huidige en toekomstige productiekosten van groene, blauwe en grijze waterstof en welke factoren hierbij een rol spelen. De productiekosten en de uiteindelijke marktprijs van klimaatneutrale waterstof zijn een belangrijk onderdeel van de maatschappelijke acceptatie.

Daarnaast is er bij blauwe waterstof de maatschappelijke discussie over de opslag van CO₂ in lege gasvelden. Er wordt gekeken naar de argumenten van voor- en tegenstanders van blauwe waterstof. In Nederland wordt bijna uitsluitend grijze waterstof geproduceerd, maar er zijn meerdere plannen om de productie van duurzame groene waterstof substantieel te verhogen. Deze komen aan het einde van dit hoofdstuk aan de orde.

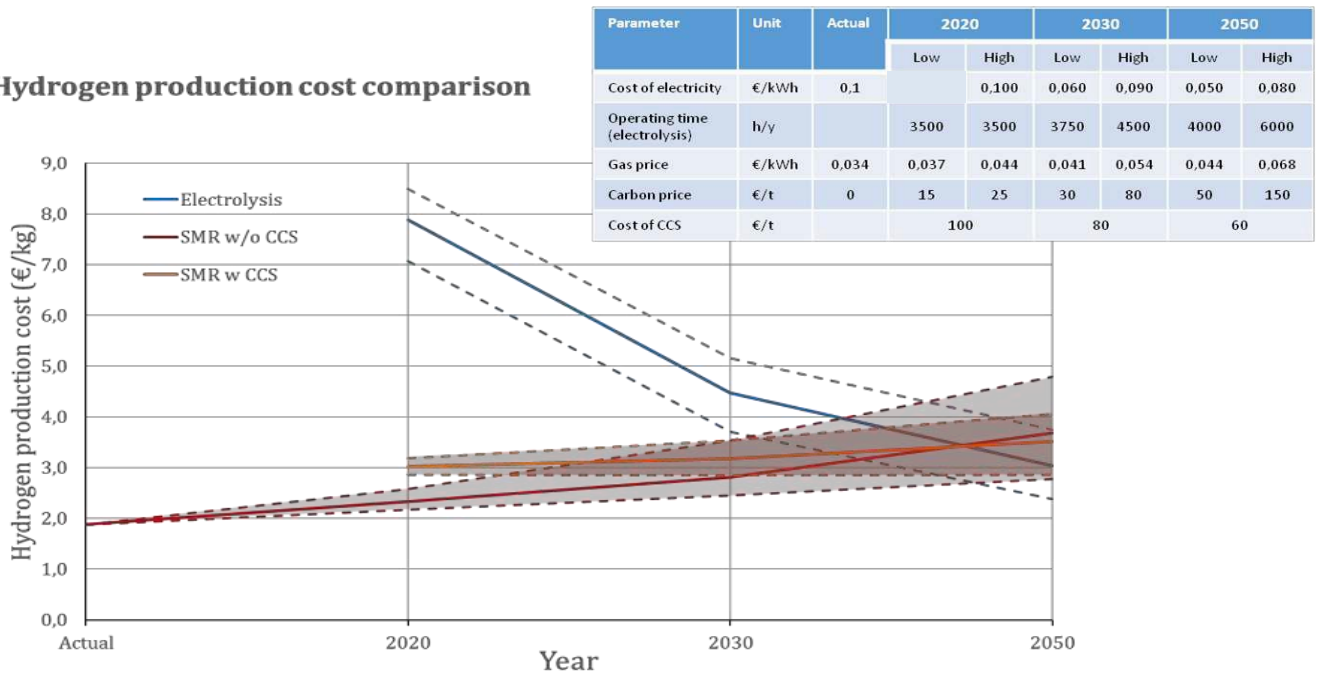
5.2 Productiekosten van waterstof

Waterstof kan uit verschillende bronnen geproduceerd worden. **Nikolaidis en Poullikkas (2017)** bestudeerden het productieproces van waterstof en concludeerden dat de productiekosten per kilogram waterstof erg hoog zijn voor de waterstofproductiemethoden die gebruik maken van hernieuwbare energiebronnen: de elektrolysemethoden (zon en wind) hebben de hoogste productiekosten per kilogram (tussen 4,15 en 23,27 US dollar (\$) /kg). De kosten per geproduceerde kilogram waterstof, voor steenkool en aardgas, met en zonder CCS (CO₂-afvang en opslag), liggen tussen 1,34 en 2,27 \$/kg, met de laagste waarde voor steenkoolvergassing zonder CCS.

De Adviescommissie **Elektrochemische Conversie & Materialen (2017)** geeft aan (op basis van **Hinkley c.s. (2016)**) dat de prijs van groene waterstof circa € 6 per kg bedraagt bij volcontinue productie en dat met conventionele waterstofproductie uit aardgas de kosten € 0,9 - 1,8 per kg bedragen, terwijl het Noorse NEL een prijs van € 1,25 per kg waterstof hanteert bij een elektriciteitsprijs van € 0,02 per kWh. De commissie heeft als doel om in 2030 waterstof CO₂-arm te produceren tegen een prijs van maximaal € 2 per kg en in 2050 tegen een prijs van € 1 per kg. Voor de hele transportsector is de doelstelling om in 2050 CO₂-neutraal te zijn.

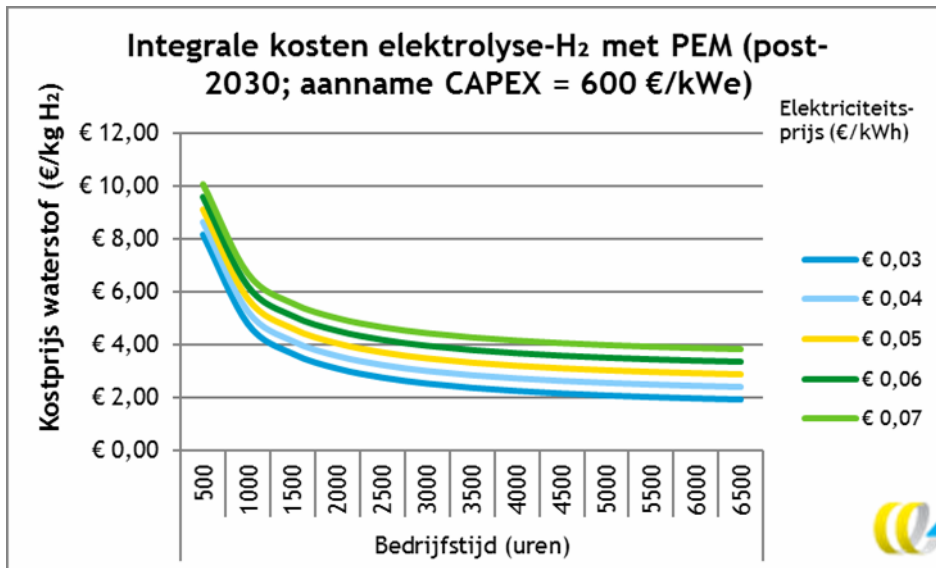
In **Net voor de toekomst** wijst **CE Delft (2017b)** op verschillende technische en financieel-economische factoren die de prijs van waterstof beïnvloeden. Dan gaat het bijvoorbeeld over de kostenontwikkeling van elektrolyzers, mogelijkheden om een groot overaanbod van windenergie te bufferen via waterstof, de vraag naar synthetische CO₂-vrije brandstoffen die ook waterstof vragen, beprijzen van CO₂-emissies en kostprijsontwikkelingen van fossiele energie (aardgas) en elektriciteit. CE Delft laat een grafiek zien (zie onder) waarbij uitgaande van een elektriciteitsprijs van € 0,10 de prijs van waterstof uit elektrolyse van € 8 in 2020 daalt naar € 4,50 in 2030 en verder naar € 3 in 2050. Deze prijzen liggen tot 2030 veel hoger dan de prijzen voor waterstof door stoom-methaanreforming uit aardgas met en zonder CCS. Pas tussen 2030 en 2050 worden de waterstofkosten uit verschillende technieken vergelijkbaar.

Hydrogen production cost comparison



Productiekosten waterstof uit elektrolyse en stoomhervorming van aardgas met en zonder CCS (European Zero Emission Platform, 2017)

CE Delft komt zelf met lagere elektriciteitsprijzen en een bedrijfstijd van 6500 uur voor de elektrolyser tot een kostprijs van waterstof die ligt tussen € 2 en € 4 in 2030 (zie onderstaande grafiek).



Kostenontwikkeling waterstof uit elektrolyse afhankelijk van elektriciteitsprijs en bedrijfsuren (Net voor de Toekomst p189)

Shell (2017) ziet een belangrijke rol in de energietransitie voor op industriële schaal geproduceerde waterstof. Centraal geproduceerde waterstof uit aardgas via stoom-methaanreforming is momenteel het meest effectief met productie kosten van € 1 tot € 2 per kg waterstof. Elektrolyse uit hernieuwbare elektriciteit wordt gezien als een enorm potentieel voor de toekomst, maar er moeten nog aanzienlijke kostenbesparingen worden gerealiseerd. Een groot voordeel van waterstof is dat het

kan worden geproduceerd uit (overtollige) hernieuwbare energiebronnen. Daarnaast kan het, in tegenstelling tot elektriciteit, voor langere tijd in grote hoeveelheden kan worden opgeslagen. In de afgelopen jaren is aanzienlijke vooruitgang geboekt bij waterstofproductie- en applicatietechnologieën. Desondanks staan waterstof en brandstofcellen nog steeds in de kinderschoenen wat betreft een breed commercieel gebruik in het wereldwijde energiesysteem; er is verdere steun en financiering nodig van overheid en maatschappij om van waterstof en brandstofcellen in de toekomst een van de pijlers van een duurzaam energiesysteem te maken. Het **Planbureau voor de leefomgeving PBL** (2020b) heeft onderstaand overzicht gemaakt met ramingen van de productiekosten van grijze, blauwe en groene waterstof, zoals die door verschillende instanties zijn berekend:

Kostprijs grijze, blauwe en groene waterstof €/kg in verschillende publicaties.

Productieroute	2030				2050			
	Min. waarde	Gem. Laag	Gem. Hoog	Max. waarde	Min. waarde	Gem. Laag	Gem. Hoog	Max. waarde
Grijs	€ 1,27	*	*	€ 2,82	€ 2,11	*	*	€ 2,11
Blauw	€ 1,14	€ 1,42	€ 2,58	€ 2,91	€ 1,14	*	*	€ 2,27
Groen	€ 1,27	€ 2,17	€ 3,40	€ 4,75	€ 0,73	€ 1,04	€ 1,66	€ 2,55

* Maar één studie in het overzicht opgenomen.

Bron: PBL (2020b)

Het PBL merkt hierbij op dat (in tegenstelling tot de uitkomsten in de tabel) blauwe waterstof altijd duurder is dan grijze waterstof, omdat er een extra bewerking nodig is (namelijk het opvangen en opslaan van CO₂). Naar verwachting is in ieder geval tot 2030 de kostprijs van groene en blauwe waterstof hoger zijn dan van grijze waterstof. De kostprijs van blauwe waterstof blijft voorlopig lager dan van groene waterstof.

De kostprijs van groene waterstof ligt naar verwachting in 2030 tussen € 1,27 en € 4,75 met een gemiddelde van € 2,72 (zie onderstaande tabel). Voor 2050 lopen de schattingen uiteen van € 0,73 naar € 2,55 met een gemiddelde van € 1,43. De verschillende uitkomsten worden verklaard door uiteenlopende aannames van de elektriciteitskosten en de bedrijfstijd, de investeringskosten en het type elektrolyser (PEM of Alkaline). Volgens het PBL blijven de kosten van aansluiting op het elektriciteitsnet, de kosten van water en de opbrengsten van warmte en zuurstof in de genoemde studies buiten beschouwing.

Kostprijs groene waterstof €/kg in 2030 en 2050 in verschillende publicaties.

Bron	2030			2050			Beschrijving
	Min.	Gem.	Max.	Min.	Gem.	Max.	
CE Delft (2018)	2,28	2,92	3,75	-	-	-	NL. Wind.
CE Delft (2018)	1,82	2,24	2,66	-	-	-	Marokko. Zon.
CE Delft (2018) & bewerking	2,84	3,75	4,75				NL. E-prijzen uit KEV.
DNV GL (2019b)	-		-	1,05		1,35	EU. E-prijs van 0 €/MWh en 3.000 uren
DNV GL (2019b)					1,80		EU. E-prijs van 29 €/MWh en 8.000 uren
TNO en DNV GL (2018)		2,94		-	-	-	NL. 2025 waarden; elek. prijs (niet alleen groen)
BloombergNEF (2019)	1,27		2,64	0,73		0,91	Wereld
TKI Nieuw Gas (2018)	3,00		3,50	-	-	-	NL. MW-schaal
TKI Nieuw Gas (2018)	2,00		3,00				NL. Schaal 10-100 MW
IEA (2019)	1,73		3,64	1,45		2,55	Europa
METI Japan (2017)		2,82			1,91		Japan
Glenk & Reichelstein (2019)	2,00		2,50	-	-	-	Duitsland
IRENA (2019)		1,73		0,86		1,13	Wereld. Wind.
IRENA (2019)		1,45		1,08		2,36	Wereld. Zon.
Weeda (2019)	2,60		4,20	-	-	-	NL. Aardgasprijs uit KEV
Min/Max	1,27		4,75	0,73		2,55	
Gemiddelde		2,72			1,43		
Gemiddelde min/max	2,17		3,40	1,04		1,66	

Bron PBL (2020b)

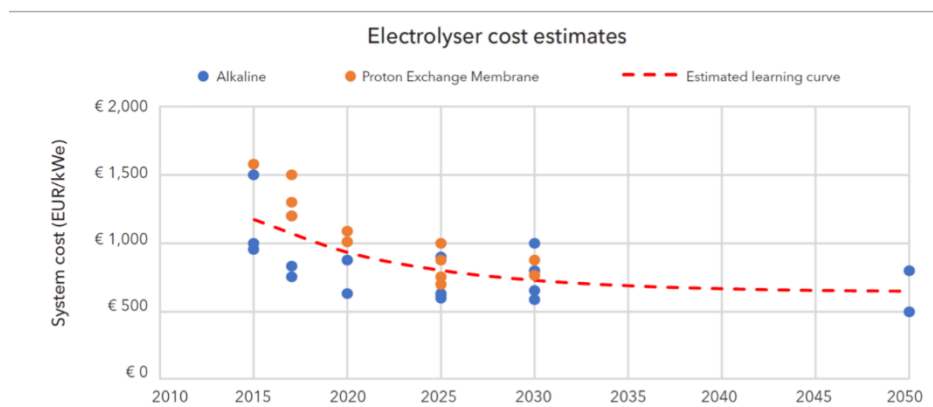
IEA (2019) en DNV GL (2019) schatten de investeringskosten voor Alkaline elektrolyzers voorlopig lager in dan van PEM elektrolyzers:

Investeringskosten van elektrolyzers in 2019, 2030 en lange termijn volgens IEA (2019).

	Nu (US\$/kW)	2030	Lange termijn
Alkaline elektrolyser	500 – 1400	400 – 850	200 – 700
PEM elektrolyser	1100 – 1800	650 – 1500	200 – 900
SOEC elektrolyser	2800 – 5600	800 – 2800	500 – 1000

Bron: PBL (2020b)

Verwachte kostenontwikkeling elektrolyzers DNV GL (2019)



Bron: PBL (2020b)

Uit het **CE Delft-rapport over waterstofroutes** (2018) blijkt dat, door schaalvergroting en doorontwikkeling van de techniek, in 2030 naar verwachting groene waterstofproductie kan concurreren met de productiekosten voor blauwe waterstof. Uitgangspunt is dat er gebruik gemaakt kan worden van lage elektriciteitsprijzen en stijgende aardgasprijzen, eventueel in combinatie met een hogere CO₂-heffing.

Financieel gezien lijkt de productie van groen waterstofgas als alternatief voor conventionele aansluitingen niet aantrekkelijk. Maar als ruimer wordt gekeken dan het financieel belang, dan zijn er vanuit maatschappelijk oogpunt wel kansen te benoemen die ook waardevol zijn: de productie van groene waterstof kan in de toekomst een belangrijke rol gaan spelen in de ontlasting en stabilisatie van het Nederlandse elektriciteitsnet. Ook speelt groene waterstofgas een belangrijke rol in het behalen van de CO₂-reductiedoelstellingen van Nederland. Groene waterstof biedt dan ondanks aanvankelijk hoge kosten een niet te onderschatten duurzame meerwaarde.

Volgens **IRENA** (2018) is waterstof uit hernieuwbare elektriciteit in het algemeen het meest kosteneffectief zijn bij een hoge bezettingsgraad van de elektrolyser in combinatie met een lage elektriciteitsprijs. Voor elke mogelijke productielocatie moeten de resultaten zorgvuldig worden beoordeeld. Grootchalige, off-grid elektrolyzers die rechtstreeks zijn aangesloten op zonne- en windparken hebben een lagere bezettingsgraad vanwege de aard van zonne- en windbronnen. Dit verhoogt de waterstofkosten. Elektrolyzers die dichtbij de vraag liggen en aangesloten zijn op het net, kunnen de bezettingsgraad maximaliseren en de logistieke kosten minimaliseren, maar ze kunnen dan weer geen gebruik maken van goedkope hernieuwbare elektriciteit. **IRENA** (2020) concludeert dat de kostprijs van groene waterstof zal dalen tot 2050 van 5 USD/kg (USD=Amerikaanse dollar) naar 1 USD/kg door een combinatie van dalende kosten van groene elektriciteit en van elektrolyzers samen met toegenomen efficiency en hogere bezettingsgraad. **IEA** (2019) wijst erop dat de kosten van waterstof tussen de verschillende landen uiteen kunnen lopen door de beschikbaarheid en prijzen van gas en elektriciteit. Verdere factoren van belang zijn: de geologische omstandigheden (zoals aanwezigheid van water en opslagmogelijkheden voor CO₂) en de maatschappelijke acceptatie van CO₂-opslag.

Arthur D. Little (2020) heeft voor Smart Delta Resources, een samenwerkingsverband van dertien energie- en grondstof intensieve bedrijven in Zeeland en Gent, onderzocht wat de mogelijkheden zijn voor de inzet van 1 GW elektrolysecapaciteit groene waterstof in 2030. De prijs van ongesubsidieerde groene waterstof komt uit op € 2,90 per kg bij een benuttingsgraad van de elektrolyzers van 4.000 uur per jaar (ongeveer 50% van de tijd) en op € 3,22 zonder de goedkope grootverbruikerstarieven elektriciteit. Terwijl de kosten van grijze waterstof dan op € 2,71 liggen, inclusief hogere prijzen voor de uitstoot van CO₂. Groene waterstof is dus alleen maar mogelijk met subsidie. Voor de jaarlijkse productie van 400 kiloton waterstof is uiteindelijk 5 GW elektrolysecapaciteit en 50 kiloton opslagcapaciteit nodig. De groene stroom komt dan van windparken op de Noordzee en de opslag vindt plaats in lege zoutcavernes in Groningen.

TNO (2020) komt voor Nederland in 2030 op een schatting voor blauwe waterstof van ruim € 2 per kg en voor groene waterstof van ongeveer € 4 per kg.

Volgens de **Raad voor Leefomgeving en Infrastructuur** (2021) waren de globale prijzen in 2021 per kg: grijs € 1,50; blauw € 1,50 - € 2,50; en groen € 2,50 - € 5. De Raad vindt het niet verwonderlijk dat de kostenschattingen voor waterstof onderling sterk verschillen, omdat de technieken voor de productie van duurzame waterstof nog in ontwikkeling zijn. De kostenreducties zijn een gevolg van innovaties, leereffecten en schaalvoordelen bij de elektrolysetechniek en in de rest van de keten. Ook zijn de kosten afhankelijk van de productietechniek, de prijs van elektriciteit, het aantal uren dat de elektrolyser produceert, de productiekosten en het transport.

Een prijsdoorbraak zou kunnen ontstaan door grootschalige productie van zonnestroom in de Sahara. Behalve de kosten zijn de volumes essentieel voor de ontwikkeling van een waterstofmarkt.

Daarbij is het nog volstrekt onduidelijk hoe de relatie zal worden tussen de **marktprijs en de kostprijs** van duurzame waterstof. **Den Ouden** (2020,2021) heeft de mogelijkheden verkend voor het opzetten van een waterstofbeurs in Nederland waardoor er een 'echte' prijs van waterstof tot stand kan komen.

HyDelta (2022) ziet een snellere ontwikkeling van groene waterstof: als de prijsstijgingen van 2022 voor aardgas (veroorzaakt door de oorlog in Oekraïne) en voor CO₂-emissies zich doorzetten kan groene waterstof al over 10 jaar concurreren met grijze waterstof.

5.3 Acceptatie van groene en blauwe waterstof

Voor maatschappelijke acceptatie is het onderscheid tussen blauwe en groene waterstof van belang. In opdracht van het Ministerie van Economische Zaken is een **Routekaart CCS** (de **Gemeynt c.s.** 2018) gemaakt waarin CO₂-afvang en -opslag een ongemakkelijk maar onmisbaar onderdeel van de energietransitie wordt genoemd. Volgens deze Routekaart blijkt uit vrijwel alle (mondiale) scenario's dat het halen van de klimaatdoelstelling om de opwarming te beperken tot maximaal 2 graden, niet mogelijk is zonder de inzet van CCS. Ook al is CCS duur, kost het veel energie, houdt het de fossiele industrie in het zadel en staat het de ontwikkeling van werkelijk duurzame opties in de weg. In de Routekaart staan de acties die op de langere en kortere termijn ondernomen moeten worden om te zorgen dat CCS ondanks de weerstand succesvol geïmplementeerd kan worden, waarbij het met name gaat om introductie bij de industrie. De opslag vindt alleen plaats onder de zeebodem en er wordt geen rekening gehouden met mogelijke in- of uitvoer van CO₂.

Door een gezamenlijke werkgroep van industrie en milieubeweging is een Joint fact finding (**Bracht & Braun** 2018) gepubliceerd waarbij een vergelijking is gemaakt tussen blauwe en groene waterstof. Voor de industrie is blauwe waterstof een belangrijke tussenstap, de milieubeweging wil meteen door naar groene waterstof. De werkgroep denkt dat tot 2030 blauwe waterstof goedkoper zal zijn dan groene. Pas daarna zou groene waterstof goedkoper worden. Dat is trouwens afhankelijk van allerlei factoren, zoals de gasprijs en de elektriciteitscase (CO₂-intensiteit van de elektriciteit, de bezetting van de elektrolyzers en de elektriciteitsprijs inclusief flex korting/vergoeding). Het verzet van de milieubeweging tegen blauwe waterstof kan een belangrijk beletsel worden voor een snelle introductie van waterstof.

Volgens het **World Energy Council Netherlands** (2018) duurt het nog minstens tien jaar voordat groene waterstof op een voldoende grote schaal grijze waterstof kan vervangen. Blauwe waterstof biedt een manier om uitstoot sneller terug te dringen en is al bijna commercieel haalbaar. De industrie (en niet het vervoer of de bebouwde omgeving) is de belangrijke katalysator voor de ontwikkeling van waterstof. Als door een overgang van grijs naar blauw meer waterstof kan worden geproduceerd en gebruikt, dan kunnen essentiële infrastructuur en toeleveringsketens voor de industriële waterstofeconomie gebouwd worden. Een voorbeelden hiervan is de ontwikkeling van een netwerk voor waterstoftransport (pijpleidingen, havens, schepen, enzovoort). Dit is vooral belangrijk gezien het complexe web van synergetische en symbiotische onderlinge verbanden tussen verschillende industriële partijen, waar de output van de een de input van een ander is. De overheden moeten hierbij een belangrijke stimulerende, coördinerende en ondersteunende rol spelen zodat tegen 2050 een welvarende koolstofneutrale Noordwest-Europese economie kan ontstaan. De energiemix die nodig is om de koolstofneutrale economieën van brandstof te voorzien, gaat uiteindelijk bestaan uit moleculen en elektronen. Waterstof moet het pad van grijs naar blauw naar groen volgen naar deze koolstofneutrale toekomst.

Mulder c.s. (2019a) laten door analyse van economische factoren, zien dat met de marktprijzen van aardgas en elektriciteit uit het afgelopen decennium, grijze en blauwe waterstof veel aantrekkelijker zijn dan groene waterstof. De toekomst van waterstof hangt af van twee belangrijke factoren: de wereldwijde markt voor aardgas en het (inter) nationale klimaatbeleid. Wanneer de internationale

gasmarkten krap worden (met hoge aardgasprijzen als gevolg) en wanneer massaal wordt geïnvesteerd in de productie van hernieuwbare elektriciteit (met vele uren lage elektriciteitsprijzen als gevolg) wordt elektrolyse de meest efficiënte manier om waterstof te maken. Wanneer ook het industriële gebruik van aardgas belast wordt, zoals het nu voor huishoudens in Nederland wordt gedaan, heeft de industrie een sterke prikkel om van aardgas naar waterstof over te stappen. In een krappe mondiale gasmarkt en een stringent klimaatbeleid is groene waterstof dus de meest gunstige vorm van waterstof.

Wanneer aan deze voorwaarden niet wordt voldaan, is blauwe waterstof een efficiënt alternatief om een aanzienlijk deel van de Nederlandse economie koolstofvrij te maken. De belangrijkste economische omstandigheden voor blauwe waterstof om winstgevend te worden, zijn een lage aardgasprijs en een CO₂-prijs die ten minste € 30 euro per ton is. Bij een ruime mondiale gasmarkt met een streng klimaatbeleid is blauwe waterstof dus een waarschijnlijker optie.

Mulder en Perey (2019b) temperen de hoge verwachtingen over de rol die groene waterstof in de energietransitie kan spelen. Voor de productie van groene waterstof is namelijk groene stroom nodig en die is voorlopig schaars, omdat er nog maar weinig elektriciteit door windmolens op land en zee wordt geproduceerd. Daarnaast neemt de vraag naar groene stroom toe door de groei van datacentra, warmtepompen en elektrisch vervoer. Mulder en Perey vinden blauwe waterstof de verstandigste keuze om de transitie naar waterstof snel te maken en op korte termijn emissiereductie te stimuleren.

Greenpeace (2019) is tegenstander van ondergrondse opslag van CO₂ en ook van ondergrondse opslag in lege gasvelden onder de Noordzee. Greenpeace baseert zich hierbij op onderzoek door **Kalavasta (2018)**. Greenpeace vindt de CCS-plannen voor de Noordzee duur en risicovol. Nergens ter wereld wordt CCS op de schaal toegepast die in Nederland wordt voorgesteld. De schaalgrootte en locatie van de Nederlandse plannen brengen nog onbekende risico's met zich mee. CCS kost veel energie en is duur (o.a. door de aanleg van een groot leidingnet). Het is een tijdelijke schijnoplossing waarbij veel subsidie (€ 550 miljoen) wordt ingezet die beter besteed kan worden aan investeringen in echt duurzame en rendabele maatregelen, zoals efficiëntere productietechnieken, groene waterstof en industriële warmtepompen. Nederland kan koploper worden in de wereld door de technologieën van de toekomst te ontwikkelen en daardoor een schone omgeving creëren en groene banen garanderen. Greenpeace wil niet dat het Nederlandse deel van de Noordzee de CO₂-vuilnisbelt van Europa wordt.

De opvattingen van de milieubewegingen over de ondergrondse opslag van CO₂ verschillen: enerzijds **Greenpeace en Milieudefensie** die het klimaatakkoord niet ondertekenden en anderzijds **Natuur & Milieu** die wel tekende en dus voorstander is van CCS. In het Klimaatakkoord is afgesproken dat CCS zal worden ingezet op plekken waar het duurzamere alternatieven niet verdringt. **CE Delft (2020c)** heeft voor Natuur & Milieu onderzocht dat er voor CCS bij de productie van staal, kunstmest en waterstof voorlopig (voor de komende 15 jaar) nog geen haalbare en betaalbare alternatieven zijn. Uit een Kamerbrief (**Ministerie van Economische Zaken en Klimaat 2021a**) blijkt dat het Porthosproject voor afvang en opslag van CO₂ onder de Noordzee een beschikking heeft gekregen voor maximaal €2,1 mrd subsidie uit de SDE++ en daarmee gaat zorgen voor een reductie van de CO₂-uitstoot van 2,3 megaton per jaar. Naast het Porthosproject zijn er nog twee grote CCS-projecten: Aramis in Rotterdam en Athos in Amsterdam. (NB Zoals de kenners van de Franse literatuur weten zijn Porthos, Athos en Aramis de namen van de drie musketiers van Alexandre Dumas).

Volgens **PBL (2020)** verkeert de productie van klimaatneutrale waterstof tot 2030 in de fase van toegepast onderzoek, pilots en projecten op praktijkschaal. Bij blauwe waterstof is ervaring nodig met het afvangen en opslaan van de CO₂ die bij de productie vrijkomt. De productie van blauwe waterstof kan waarschijnlijk sneller worden opgeschaald dan die van groene waterstof, omdat die

grotendeels stoelt op bewezen technieken. Maar: het is nog wel onzeker of de combinatie met afvang en opslag van CO₂ van de grond zal komen en of het CO₂-afvangpercentage tegen aanvaardbare kosten snel genoeg kan toenemen van 55% nu naar 90%.

Net als **Greenpeace** en **Milieudefensie** vindt **Klimaat-Eurocommissaris Timmermans** dat Nederland beter kan inzetten op groene waterstof dan op blauwe, omdat dat op lange termijn veel goedkoper is (FD 2021c). De Europese Commissie wil dat in 2030 minstens de helft van het waterstofgebruik in de industrie groen is. Het **PBL** (2021c) heeft berekend dat hierdoor het halen van de klimaatdoelen in Nederland veel duurder wordt. Er moeten dan tot 2030 meer zonne- en windparken gebouwd worden dan afgesproken in het Klimaatakkoord, met daarbij een verdubbeling van groene waterstoffabrieken.

De keuze tussen blauwe waterstof met afvang en opslag van CO₂ enerzijds en groene waterstof anderzijds, speelt ook bij de verduurzaming van **Tata Steel** in IJmuiden. De voormalige Hoogovens wilden eerst verduurzamen door de CO₂-uitstoot op te slaan, maar hebben nu besloten in te zetten op groene waterstof, op voorwaarde dat de overheid financieel bijspringt (FD 2021b).

Kernenergie is ook een optie om regelbare elektriciteit te produceren. Als hiermee waterstof geproduceerd wordt is er sprake van paarse waterstof. In de **concept-Klimaatnota** (2022) worden nieuwe kerncentrales genoemd als mogelijkheden voor de productie van groene waterstof. De maatschappelijke discussie over kernenergie is in Nederland nog niet afgerond.

De negen landen van de **North Seas Energy Cooperation** (NSEC 2022), waaronder Nederland, hebben in 2022 aangekondigd om hun collectieve ambities voor wind op de Noordzee te verhogen tot tenminste 260 GW in 2050. Dat is meer dan 85% van de EU-ambitie van 300 GW in 2050 en een belangrijke voorwaarde voor de ontwikkeling van duurzame waterstof in Nederland en Europa.

5.4 Omvang waterstofproductie

Volgens de ondertekenaars van het '**Manifest van de waterstofcoalitie**' (2018) kan de productie van waterstof qua kosten pas concurrerend zijn met conventionele technieken, als het op grote schaal wordt toegepast en de technologie verder ontwikkeld is. Op dit moment is groene waterstof duurder dan het fossiele alternatief. Maar door een forse kostenreductie van elektrolyzers, samen met een daling van de kosten van hernieuwbare elektriciteit is een kostendaling van waterstof tot 2030 zeker realiseerbaar. Hiervoor is schaalvergroting en marktzekerheid nodig. Door een gunstige geografisch ligging kan Nederland een aanzienlijke elektrolyse-capaciteit realiseren. In een Europese markt van 40 GW in 2030 kan Nederland rond de 3-4 GW tot stand brengen. Het Manifest is een oproep om snel grootschalig te beginnen met de ontwikkeling en toepassing van elektrolyse met duurzame energie. Alle sectoren in de markt moeten voor waterstof kiezen om daadwerkelijk een prijsverlaging te realiseren, waardoor de productie, opslag en het gebruik van waterstof ook prijstechnisch interessant wordt.

De **Waterstofcoalitie** heeft in 'Tijd dringt voor waterstof' (2019) de regering opnieuw opgeroepen om prioriteit te geven aan waterstof als essentiële bouwsteen voor de energietransitie en de volgende twee zaken te organiseren:

- tot 2025 moet het kabinet ruim voldoende middelen voor exploitatiesubsidies begroten, zodat de overheid samen met het bedrijfsleven 500 MW elektrolyzers financiert.
- uiterlijk midden 2020 stelt het kabinet een routekaart vast voor groene waterstof voor de opschaling van elektrolyse naar 3-4 GW in 2030.

Door deze twee punten kan een aanzienlijke CO₂-reductie worden gerealiseerd door toename van groene stroomproductie, vergroening van de industrie en andere sectoren. Er moeten nu toekomstbestendige investeringen gedaan worden om de klimaatneutrale samenleving in 2050 bereiken. In 2021 pleitte de Waterstofcoalitie (2021) voor een waterstofpact bij een nieuw kabinet met een overheidsinvestering van € 2,5 miljard in de periode 2021-2025. Dit om een vliegwiel te

creëren voor de groei van de Nederlandse waterstofketen. Hiermee kan voor 500 MW elektrolyse gebouwd worden, kan een landelijk waterstofnetwerk gerealiseerd worden en kan de overgang van de industrie naar duurzame waterstof worden gestimuleerd.

TNO en de partners van het Gigawatt Elektrolyser-project (2019) willen de capaciteit van elektrolyzers, die nu wordt gemeten in megawatt, opschalen naar het niveau van gigawatt. Een schaalvergroting met een factor duizend en een reductie van de kosten voor de bouw van een elektrolyser met een factor drie à vier is nodig. Bij het onderzoek is een grote groep bedrijven (zoals Nouryon, Shell, Yara, OCI Nitrogen, Gasunie, DOW Chemical, Ørsted en Frames) en kennisinstellingen betrokken. Daarnaast houden energiebedrijven RWE en Innogy een haalbaarheidsonderzoek naar de bouw van een 100 MW elektrolyser voor de productie van groene waterstof in Eemshaven. Niet alleen in Noord-Nederland zijn er grote waterstofprojecten aangekondigd maar ook in de Rijnmond (BP, chemiebedrijf Nouryon en Havenbedrijf Rotterdam) en het Amsterdamse havengebied (Nouryon, Tata Steel en het Havenbedrijf Amsterdam). (Energieia 2019a).

In oktober 2022 kondigde het Frans bedrijf Lhyfe aan een elektrolyser van 200 MW te willen neerzetten in Delfzijl. Energieia (2022c) constateerde dat dit het tiende waterstofproject in Noord-Nederland is, maar dat nog maar één project echt draait. In november werd de investeringsbeslissing van **RWE** in de Eemshaven nagenoeg definitief (Dagblad van het Noorden 2022). RWE heeft namelijk de aanbesteding gewonnen van een windpark op de Noordzee (Hollandse Kust West VII), waardoor er voldoende groene stroom beschikbaar komt om in 2027 een elektrolyser van 600 MW aan het werk te zetten. Bij de andere projecten is nog geen definitief investeringsbesluit genomen. Ook bij de grote landelijke plannen heeft alleen **Shell** besloten om in Rotterdam een groene elektrolyser te bouwen van 200 MW (Shell 2022). Voor het overige wacht de sector af tot er meer duidelijkheid is over subsidies en het structurele beleid.

Aurora (2020) heeft de waterstofmarkt in Noordwest Europa (Nederland, Duitsland en België) onderzocht en komt tot de conclusie dat het gebruik van fossielvrije waterstof in de gebouwde omgeving en de mobiliteit kan leiden tot een flinke stijging van de vraag en omdat de productie beperkt is, tot een prijsstijging. Als in deze sectoren het accent wordt gelegd op directe elektrificatie kan waterstof gebruikt worden voor de vergroening van de industrie als grondstof voor chemicaliën en raffinaderijen, maar ook voor nieuwe processen in de staal- en cementproductie, om de zero-emissie doelstellingen van de EU te halen. Het gebruik van duurzame waterstof moet dus beperkt worden om het betaalbaar te houden. Overheden moeten wel de opschaling van de productie van groene waterstof ondersteunen. Als de productie volledig aan de markt wordt overgelaten, zal er vooral worden ingezet op de blauwe waterstof, omdat dat financieel aantrekkelijker is. Aurora vindt overigens wel dat CCS in continentaal Europa moet worden onderzocht. Wat zijn de kosten van opslag in Nederlandse en Duitse gasreservoirs en hoe is de maatschappelijke acceptatie?

Ryszka (2020) toont aan dat het voorlopig voor de verduurzaming van het elektriciteitssysteem goedkoper en efficiënter is om niet te investeren in waterstof maar om eerst wind- en zonne-energie uit te breiden. Driekwart van de emissiereductie die nodig is om klimaatveranderingen te beperken, kan bereikt worden zonder dat er opslagtechnologieën, zoals via waterstof nodig zijn. Waterstof heeft veelbelovende toepassingen, maar doordat de kosten voor de elektriciteitssector op korte tot middellange termijn hoog zullen zijn, zal de elektriciteitssector waarschijnlijk geen grote rol gaan spelen in de waterstofontwikkeling.

Drift (2020), het transitieonderzoeksinstituut aan de Erasmus Universiteit in Rotterdam, heeft in kaart gebracht dat er minstens tien windparken op de Noordzee bij moeten komen om voldoende groene waterstof te produceren. Daarnaast zal Nederland ook veel waterstof moeten importeren. Er moet tussen de 30 en 70% van de duurzame energie in Noordwest-Europa worden ingevoerd. Daardoor wordt Nederland nog afhankelijker van andere landen, en wellicht ook van politiek gevoelige regio's als Noord-Afrika en het Midden-Oosten.

Ook **Gasunie en Tennet** (2020), **Van Wijk & Wouters** (2019) en **Jepma c.s.** (2019) wijzen op een hoge import van duurzame energie in de toekomst. Overigens geldt dat nu ook al voor fossiele energie. Volgens **DNV** (2020, 2021) zit de uitdaging voor de waterstofeconomie niet in de ambitie, maar in het veranderen van de tijdlijn, van waterstof aan de horizon naar waterstof in onze woningen, bedrijven en transportsystemen.

TKI Nieuw Gas (2021) heeft een uitgebreid overzicht gepubliceerd van alle waterstofprojecten in Nederland. Ook is er een **Staalkaart groene waterstof** (BDH c.s. 2021) gemaakt.

Zoals eerder in hoofdstuk 4 is aangegeven wil de regering de samenleving verduurzamen en vanwege de oorlog in de Oekraïne ook de energieonafhankelijkheid vergroten door de productie van windenergie op zee te versnellen naar ca. 21 GW rond 2030 en ca. 70 GW in 2050. Deze plannen betekenen een sterke stimulans voor de omvang van de Nederlandse waterstofproductie.

DNV (2022b) ziet dat Europa en de oorlog in Oekraïne met energiebesparing en meer eigen duurzame eigen energie productie minder afhankelijk wil worden van Rusland. Dat geeft een positieve impuls aan de energietransitie. Maar buiten Europa, wordt door hogere energieprijzen echter meer fossiele energie, zoals steenkool, ingezet. Deze tegengestelde effecten in Europa en de rest van de wereld, zorgen er per saldo voor dat op wereldniveau het structurele tempo van de energietransitie niet vertraagd wordt door de oorlog en ook niet door Covid. Dit tempo wordt bepaald door dalende kosten van duurzame energie, stijgende belasting van CO₂-uitstoot en toenemende elektrificatie. DNV verwacht dat er in 2050 nog wel fossiele brandstoffen gebruikt wordt. Om energieneutraal te worden zal er daarom veel geïnvesteerd moeten worden in de afvang en opslag van CO₂.

5.5 Samenvatting

De productiekosten van groene waterstof zijn momenteel veel hoger dan van grijze waterstof. Dat blijft de komende 10 jaar zo. De ontwikkeling van waterstoftechnologie staat nog in de kinderschoenen. Door onderzoek, schaalvergroting, markt zekerheid en financiële ondersteuning kan de prijs van groene waterstof in de toekomst lager worden.

Waterstof kan een belangrijke rol spelen bij ontlasting en stabilisatie van het elektriciteitsnet. Ook is koolstofvrije waterstof belangrijk voor het realiseren van de CO₂-reductiedoelstellingen.

De productiekosten van groene waterstof worden bepaald door factoren als de kosten en bedrijfstijd van elektrolyzers, het type elektrolyser (PEM of Alkaline) en de prijzen van groene elektriciteit. De schattingen voor de productiekosten van groene waterstof in 2030 lopen uiteen van € 1,27 tot € 4,75 met een gemiddelde van € 2,72; en voor 2050 van € 0,73 tot € 2,55 met een gemiddelde van € 1,43.

De productiekosten verschillen ook internationaal. Het gaat niet zozeer om de exacte cijfers, maar om de trend dat elektrolyse goedkoper wordt door schaalvergroting en technologische ontwikkeling (leercurve). De vraag blijft wel, of de echte cijfers overeen zullen komen met de modelmatige inschattingen en aannames. De verwachting is dat de kosten van groene waterstof de komende 10 jaar gehalveerd worden. Maar groene waterstof is dan nog altijd twee tot drie keer duurder dan grijze waterstof. Pas in de verdere toekomst richting 2050 kan de productieprijs van groene waterstof in de buurt komen van de prijs van grijze waterstof, ook omdat de prijs van grijze waterstof stijgt door hogere CO₂-lasten.

Uiteindelijk gaat het niet om de kostprijs, maar om de marktprijs van waterstof. De markt met vraag en aanbod moet zich hiervoor nog ontwikkelen.

Blauwe waterstof is een mogelijkheid om sneller de uitstoot van CO₂ te reduceren. Als de kosten van afvang en opslag van CO₂ lager worden dan de belasting die betaald moet worden om CO₂ uit te stoten, wordt blauwe waterstof financieel aantrekkelijker dan grijze waterstof. Over het omslagpunt in de tijd lopen de prognoses uiteen. In sommige modellen ligt het omslagpunt van grijs naar blauw al voor 2030 en de omslag van blauw naar groen tussen 2030 en 2050. In andere modellen vindt de

omslag naar groene waterstof pas na 2050 plaats.

De wereldwijde markt voor aardgas en het (inter)nationale klimaatbeleid bepalen de toekomst van waterstof. In een krappe mondiale gasmarkt en een stringent klimaatbeleid is groene waterstof de meest gunstige vorm van waterstof. Bij een ruime mondiale gasmarkt met een streng klimaatbeleid, kan blauwe waterstof een efficiënt alternatief zijn.

Voor de industrie is blauwe waterstof een belangrijke tussenstap naar een fossielvrije toekomst, maar de milieubeweging verzet zich vanwege de daarbij horende opvang en opslag van CO₂. De milieubeweging en de Europese Commissie willen meteen door naar groene waterstof, omdat blauwe waterstof geen oplossing is voor de lange termijn. Greenpeace vindt de CCS-plannen voor de Noordzee duur en risicovol. In het Nederlandse klimaatbeleid is het sinds 2021 mogelijk om afvang en opslag van CO₂ te subsidiëren uit de SDE++ regeling.

De belangrijkste aanjager voor de ontwikkeling van waterstof is de industrie. Tot 2050 is er in Nederland niet voldoende groene waterstof voor toepassing in de gebouwde omgeving. In de industrie zijn wel mogelijkheden voor schaalvergroting en ontwikkeling van een netwerk van waterstoftransport. Er zijn ambitieuze plannen om de productie van groene waterstof spectaculair op te schalen. Schaalvergroting en marktzekerheid zijn daarbij noodzakelijk. Het gaat niet meer om productie in megawatt maar in gigawatt, dat betekent dat de productie moet verduizendvoldigen. Waterstof moet vanuit plannen aan de horizon concreter worden naar toepassingen in bedrijven, transportsystemen en in het dagelijks leven. De plannen moeten leiden tot concrete investeringen. Nederland en Noordwest-Europa gaan in de toekomst veel waterstof en duurzame energie invoeren. De schattingen lopen hierover uiteen en liggen op de helft van het verbruik met ruime marges naar boven en beneden. De energieafhankelijkheid, die nu al bestaat ten aanzien van politiekgevoelige regio's als Rusland, Arabische en Afrikaanse landen wordt niet minder. De oorlog in Oekraïne heeft er wel voor gezorgd dat Nederland voor duurzame energie meer zelfvoorzienend en minder afhankelijk wil zijn van andere landen. Volgens de concept-Klimaatnota 2022 wordt de Noordzee de belangrijkste producent van duurzame energie. De elektriciteitsproductie van windmolens gaat zeer sterk stijgen en daarmee de mogelijkheden voor de productie van groene waterstof.

6 Maatschappelijke acceptatie van duurzame energie

6.1 Inleiding

Bij maatschappelijke acceptatie van duurzame energie wordt gekeken naar de mening van de samenleving dit actuele onderwerp. Vinden de mensen duurzame energie een goed idee of juist niet en verzetten ze zich dan? Voordat wordt ingegaan op de maatschappelijke aanvaarding van waterstof, behandelen we in dit hoofdstuk eerst de acceptatie van duurzame energie in zijn algemeenheid. Vragen over de acceptatie van waterstof zijn namelijk van vrij recente datum, terwijl de discussie over acceptatie van andere vormen van duurzame energie al langer bestaat.

Op de eerste plaats wordt ingegaan op verschillende vormen van maatschappelijk draagvlak die in de sociaalpsychologische vakliteratuur worden onderscheiden. Er zijn veel factoren die invloed hebben op maatschappelijke acceptatie en het is belangrijk om deze te kennen, omdat de overgang naar een duurzame toekomst moeilijk wordt als er geen maatschappelijk draagvlak is. Maatschappelijke acceptatie wordt bepaald door objectieve factoren die betrekking hebben op gevolgen voor de hele maatschappij en subjectieve, psychologische factoren die betrekking hebben op het individu. Deze objectieve en subjectieve factoren en hun onderlinge samenhang worden in kaart gebracht en we bekijken op welke manieren deze factoren beïnvloed kunnen worden.

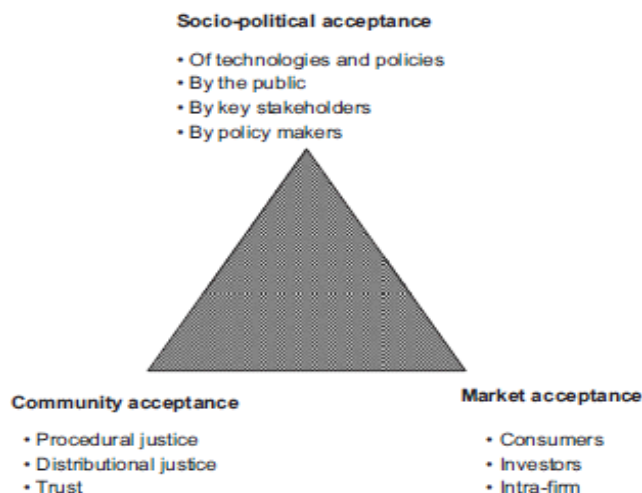
6.2 Dimensies van maatschappelijke acceptatie

De basis voor theorievorming voor studies over maatschappelijke acceptatie van duurzame energie is een artikel van **Wüstenhagen c.s.** (2007). De theorie heeft vooral betrekking op windenergie, maar kan ook gemakkelijk worden toegepast op de acceptatie van andere vormen van duurzame energie.

Er worden drie dimensies van maatschappelijke acceptatie onderscheiden:

- a. sociaal-politieke acceptatie,
- b. acceptatie door de lokale gemeenschap en
- c. marktacceptatie.

Deze dimensies worden weergegeven in onderstaande driehoek:



a. Sociaal-politieke acceptatie is de breedste, meest algemene vorm van sociale acceptatie. Het heeft betrekking op zowel de beleidskaders, die zijn gericht op het stimuleren van hernieuwbare energiebronnen als op de algemene acceptatie van nieuwe technologieën. De sociaal-politieke acceptatie voor duurzame energie wordt in Nederland weerspiegeld door het **Klimaatakkoord** uit 2019. Hierin werden afspraken gemaakt met meer dan honderd partijen (zoals overheden, werkgevers, vakbeweging, natuur- en milieuorganisaties, financiële instellingen, andere maatschappelijke organisaties) om de CO₂-uitstoot te beperken en om in 2050 klimaatneutraal te

zijn. Nog lopende afspraken uit het Energieakkoord van 2013, om de energievoorziening te verduurzamen, werden opgenomen in het Klimaatakkoord. Ook voor waterstof is een breed maatschappelijk draagvlak bij beleidsmakers en stakeholders (zie hst 3).

b. Acceptatie door de (lokale) gemeenschap heeft betrekking op plaatsingsbesluiten van duurzame energieprojecten door lokale stakeholders, in het bijzonder bewoners en lokale autoriteiten.

Het gaat daarbij over:

- procedurele rechtvaardigheid: is er een eerlijk besluitvormingsproces waarbij alle relevante stakeholders de mogelijkheid tot participatie hebben gekregen?
- distributionele rechtvaardigheid: hoe worden de kosten en baten verdeeld?
- trust: is er vertrouwen in de informatie en intenties van de investeerders en actoren van buiten de gemeenschap?

De verschillende factoren hangen sterk af van de locatie en de specifieke situatiefactoren. Op lokaal niveau kunnen mensen beïnvloed worden door verschillende aspecten van rechtvaardigheid, zoals wie profiteert en wie ondervindt nadelen? Wordt het als eerlijk ervaren? Is het fair? Vertrouwen is een kernbegrip bij locatie-vraagstukken. Vertrouwen van de stakeholders in elkaar, in de ervaren competenties en intenties, in de uitkomsten voor de gemeenschap, in de manier waarop risico's worden gedefinieerd, hoe hierover informatie wordt gegeven, wie informatie geeft en of deze aansluit bij de eigen opvattingen van omwonenden.

c. Acceptatie door de markt betreft de houding van consumenten, producenten en investeerders.

Wanneer stappen consumenten over op waterstofauto's? Er is nog weinig aanbod van waterstofauto's en ze zijn duur. Willen consumenten bij de verwarming van hun huizen aardgas vervangen door waterstof? Investeerders hebben de neiging om op basis van in het verleden genomen beslissingen andere keuzemogelijkheden in het heden uit te sluiten. Welke bedrijven willen investeren in de ontwikkeling van waterstof, van waterstofvoertuigen en van waterstoftankstations?

Het **Planbureau voor de Leefomgeving** (2019) ziet sociaal-politieke acceptatie als inputlegitimiteit, waarbij het gaat om algemene publieke steun en acceptatie van een bepaald doel. Acceptatie door de lokale gemeenschap is vergelijkbaar met outputlegitimiteit: acceptatie op het lokale niveau van concrete maatregelen. Steun voor de beleidsdoelen van de energietransitie leidt niet automatisch tot steun voor concrete overheidsmaatregelen.

De acceptatie door de lokale gemeenschap speelt bij waterstof een rol bij de productie- en opslaglocaties van waterstof, bij waterstofvoertuigen en bij waterstoftankstations. Het draagvlak van de bevolking gaat over de vraag waar de duurzame elektriciteit vandaan komt, waarmee waterstof wordt geproduceerd: komt het van windmolens en zonneparken op land of op zee. Hoeveel kan Nederland zelf produceren? Moet waterstof groen zijn of is ook blauwe waterstof acceptabel (waarbij CO₂ wordt afgevangen en ondergronds wordt opgeslagen)? Het mislukken van plannen voor ondergrondse opslag in Barendrecht toonde aan dat voor blauwe waterstof geen maatschappelijk draagvlak was (**Huijts** 2013), en ook de discussie over de opslag van CO₂ in lege gasvelden onder de Noordzee verloopt moeizaam (NRC 2017). Bij de milieubeweging zijn grote bezwaren. Ook is er nog veel onduidelijk over grootschalige opslag van waterstof in lege zoutcavernes in Noord-Nederland. De spanning tussen lokaal en nationaal draagvlak komt terug in het Nederlandse klimaatbeleid. Voor de uitwerking van het klimaatakkoord is Nederland verdeeld in dertig energieregio's. De overheden hebben samen met maatschappelijke partners, bedrijfsleven en inwoners in 2021 een Regionale Energiestrategie (RES) ontwikkeld, die inzicht geeft in de mogelijkheden voor regionale energieopwekking en -besparing en ook in de keuzes voor concrete plekken, projecten en planning. Hierbij is een nationaal doel gesteld van 35 terawattuur aan duurzame energieproductie in 2030. Het **Planbureau voor de Leefomgeving PBL** (2020c) heeft de concept-RES'en geanalyseerd. Daaruit blijkt dat het mogelijk is, om in het kwantitatieve doel van 35 terawattuur te halen. Het PBL constateert

verder dat de regio's over het algemeen veel moeite hebben gedaan om stakeholders te betrekken, maar dat die tot nu toe in veel gevallen vooral 'professionele' organisaties betreffen, zoals belangenorganisaties (milieuverenigingen, windenergiebedrijven, boerenorganisaties), experts (consultants) en bedrijven. Participatie van de 'gewone' burger komt meestal pas later aan de orde en vraagt nog de nodige aandacht. Het PBL (2021b) benadrukt dat in de energietransitie een centrale aanpak onverminderd van belang blijft. De RES betreft slechts een deel van de energieopgave. Bij andere onderdelen is primair het Rijk aan zet, zoals bij een transportleiding voor waterstof, (inter)nationale elektriciteitsverbindingen, eventuele nieuwe kerncentrales, opslaglocaties voor radioactief afval en activiteiten op de Noordzee (CO₂-afvang en opslag; windparken). Beleidsmakers moeten opnieuw de nodige inspanningen verrichten om de verschillende partijen te betrekken bij het proces. De ervaring leert, dat grootschalige ingrepen op veel weerstand van omwonenden kunnen stuiten. Voor het creëren van draagvlak voor de energietransitie is vertrouwen is een kernbegrip. Het wekt bij burgers weinig vertrouwen als de overheid besluit om (ondergrondse) gasbuizen aan te leggen en dezelfde overheid aan de keukentafel komt praten over het aardgasvrij maken van de woning. Met het oog op het lokale, maatschappelijke draagvlak is het van belang om raden en burgers goed over dit soort ontwikkelingen te informeren. Mogelijke spanningen met de resultaten uit de RES'en kunnen volgens het PBL immers hard aankomen bij hen, die zich in de regio's hebben ingespannen voor de daar breed gedragen plannen.

In een overzichtartikel geeft **Batel** (2020) aan dat in de sociale wetenschappen ruwweg 30 jaar onderzoek wordt gedaan naar de maatschappelijke acceptatie van de technologie van hernieuwbare energie en de daarmee samenhangende infrastructuur. Hierbij lag het accent aanvankelijk vooral op het overwinnen van weerstand en daarna op het begrijpen van weerstand en het vergemakkelijken van de energietransitie. Zo was er veel aandacht voor het al dan niet bestaan van NIMBY (Not in my backyard) en voor rechtvaardigheid (distributieve en procedurele), terwijl recentelijk meer sprake is van een kritische benadering of de weerstand wel overwonnen moet worden. Aandachtsgebieden zijn ideologie, maatschappelijke betrokkenheid en communicatie (discourse analyse).

6.3 Factoren die maatschappelijke acceptatie bepalen

Devine-Wright (2007) verklaart maatschappelijk verzet tegen duurzame energie aan de hand van persoonlijke factoren (leeftijd, geslacht, sociale klasse en inkomen), sociaalpsychologische factoren (kennis en directe ervaring, milieubewustzijn, politieke overtuiging, gebondenheid aan woonplek, rechtvaardigheid en vertrouwen) en contextuele factoren (soort technologie en schaalgrootte, institutionele factoren (eigenaarschap, verdeling baten, compensatie) en ruimtelijke aspecten). Hij pleit ervoor om maatschappelijke opvattingen niet als een obstakel te zien. Hij wil de dynamica van publieke betrokkenheid beter begrijpen om groei van duurzame energie mogelijk te maken. Daarom is interdisciplinair, vernieuwend onderzoek nodig om gedragsveranderingen te beïnvloeden.

Schweizer-Ries (2011) komt aan de hand van positieve of negatieve waardering en passieve of actieve houding tot een viertal dimensies van acceptatie:

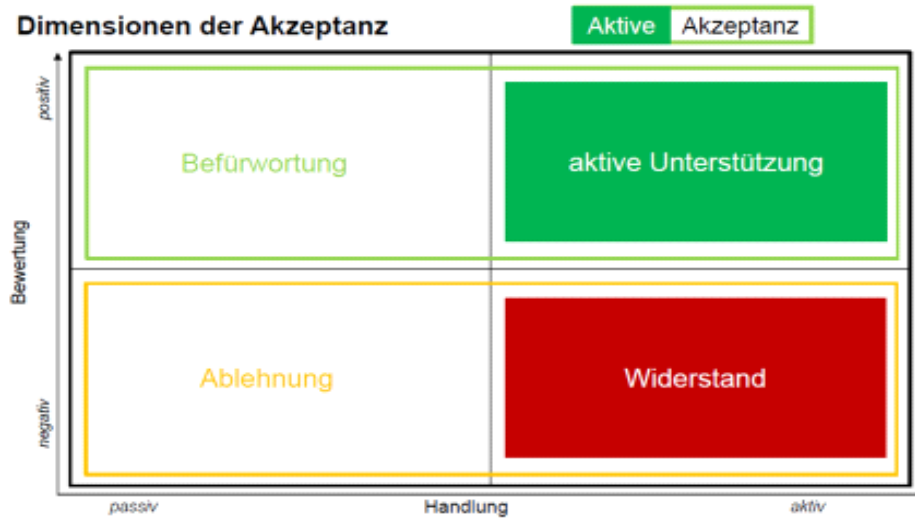
- Befürwortung (instemming)
- Ablehnung (verwerpen)
- Aktive Unterstützung (support, ondersteuning)
- Widerstand (actief verzet)

Theoretischer Hintergrund

Akzeptanzmodell in Anlehnung an Schweizer-Ries (2008)

OUI BIOMASSE

Dimensionen der Akzeptanz



17

Kira Schumacher, KIT, DFU, Akzeptanz von Biogasanlagen im internationalen Vergleich

De 'echte' aanhangers en tegenstanders zijn overtuigd van hun gelijk en zijn bereid om actie te voeren, maar vaak weten mensen het niet zo goed. Ze twijfelen en blijven passief. Schweizer-Ries onderscheidt vier categorieën die de acceptatie van duurzame energie-technologieën beïnvloeden:

- omgeving/context (bijv. lokale karakteristieken, wettelijk kader),
- technologie (bijv. financieel assessment, risicoassessment),
- individu (omgevingsbewustzijn, standpunt over duurzame energie, sociaal economische status, identiteit),
- proces (perceptie van het politiek proces, vertrouwen en rechtvaardigheid),

De voorspellers voor acceptatie zijn:

- veranderingen in het landschap, lokale verbondenheid en identiteit,
- regionale waarde-creatie,
- eerlijkheid van het proces.

Batel c.s. (2013) maken onderscheid tussen 'social support' en 'social acceptance'. Het gaat dan om actieve en passieve acceptatie. Actief gaat dan om ondersteuning (support) en zelf gebruiken van een techniek, terwijl passieve acceptatie betekent dat er geen weerstand wordt geboden.

Perlaviciut en Steg (2014) geven aan dat zonder maatschappelijke acceptatie alternatieve energie niet tot ontplooiing komt. Maatschappelijke acceptatie wordt bepaald door contextuele objectieve factoren en door subjectieve, individuele psychologische factoren.

Contextuele objectieve factoren bestaan uit:

- collectieve baten en lasten,
- individuele baten en lasten,
- eerlijke verdeling van baten en lasten.

Collectieve baten en lasten zijn de gevolgen voor de hele maatschappij ten aanzien van omgeving en veiligheid.

Individuele baten en lasten zijn de gevolgen voor het individu, zoals geld, kwaliteit/betrouwbaarheid en fysieke eigenschappen (lawaai, onshore/offshore en verstoring van het landschap).

Een eerlijke verdeling van baten en lasten betreft de vraag wie de lasten draagt en wie de baten krijgt. Factoren als compensatie voor ervaren overlast en eerlijke procedures, zoals

informatievoorziening, transparantie, mogelijkheden van participatie en onpartijdige positie van de overheid spelen hierbij een rol.

Hoe mensen de objectieve factoren ervaren wordt bepaald door subjectieve, individuele, psychologische factoren. Gelijke objectieve karakteristieken kunnen bij verschillende mensen tot verschillende waarderingen van baten en lasten leiden en tot een andere mate van acceptatie. Factoren als plaats-gehechtheid (de emotionele band van een persoon met een lokaal gebied) en plaats-identiteit (de mate waarin een plek bijdraagt aan eigenwaarde of identiteit) spelen hierbij een rol.

Energie is een complexe materie. Mensen moeten dus voor informatie op anderen (energiebedrijven, overheden, belangengroepen, kennisinstellingen) kunnen vertrouwen. Dit vertrouwen -dat gebaseerd is op competenties, ervaring, integriteit, eerlijkheid, openheid en betrokkenheid bij het publieke belang- is een belangrijke factor voor maatschappelijke acceptatie. Mensen hebben de neiging meer vertrouwen te hebben in partijen met waarden, die aansluiten bij hun eigen waarden.

Waarden zijn levensdoelen of idealen die mensen belangrijk vinden en willen nastreven in hun leven. Waarden zijn algemene psychologische factoren, die richting geven aan een breed spectrum van specifieke houdingen, geloof, voorkeuren en gedragingen. Zij spelen een belangrijke rol bij de acceptatie van energievormen. Het gaat om vier vormen van waarden die relevant zijn voor het menselijk gedrag bij duurzame energie.

Er zijn zelfoverstijgende en zelfverheffende waarden.

Zelfoverstijgende waarden gaan primair uit van collectieve uitkomsten met twee vormen, altruïstische waarden zijn gericht op het welbevinden van andere mensen en de maatschappij, en biosferische waarden zijn gericht op de kwaliteit van de omgeving.

Zelfverheffende waarden gaan uit van individuele baten en lasten. Het zijn egoïstische motieven gericht op behoud en stimuleren van het eigen persoonlijke belang (zoals rijkdom en status) en hedonistische motieven gefocust op een beter gevoel zoals meer comfort en plezier.

Waarden bepalen welke baten en lasten van de energiealternatieven het belangrijkste zijn en beïnvloeden dus de acceptatie ervan. Mensen met sterke zelfoverstijgende waarden kijken waarschijnlijk naar de collectieve consequenties van energiealternatieven en accepteren alternatieven met hoge collectieve baten en lagere collectieve lasten. Mensen met sterke zelfverheffende waarden daarentegen kijken meer naar directe individuele consequenties en accepteren energiealternatieven met hoge individuele baten en lage individuele lasten.

Zelfoverstijgende waarden leiden tot meer betrokkenheid met het milieu en vervolgens tot meer acceptatie van duurzame energie en minder van kernenergie.

In de praktijk gaat men ervan uit dat financiële argumenten het belangrijkste zijn bij de acceptatie van energiealternatieven en dat er financiële compensatie wordt gegeven om acceptatie te realiseren. Uit onderzoek blijkt echter dat mensen duurdere duurzame energie accepteren als er andere aantrekkelijke gevolgen voor het milieu of klimaat tegenover staan.

Verstreckte informatie moet aansluiten bij wat mensen belangrijk vinden. Informatie heeft effect als mensen vertrouwen hebben in degene die informatie verstrekt en als het aansluit bij hun waarden. Maatschappelijke acceptatie van duurzame energie kan gestimuleerd worden door de lasten ervan te verlagen en de baten te verhogen en voor fossiele energie de lasten te verhogen en de baten te verlagen. Mensen krijgen meer vertrouwen in energiebedrijven als zij eerlijk en transparant zijn over hun waarden, maar vooral als ze hun waarden laten zien door te investeren in de gemeenschap en het milieu, door sociale faciliteiten op te zetten, door naar meningen van de mensen te luisteren en dit mee te nemen in de besluitvorming.

Daarnaast kan de invloed van milieu-waarden verstevigd worden door duurzaamheid op te nemen in onderwijsprogramma's, door het activeren van duurzaamheid in promotiecampagnes, door

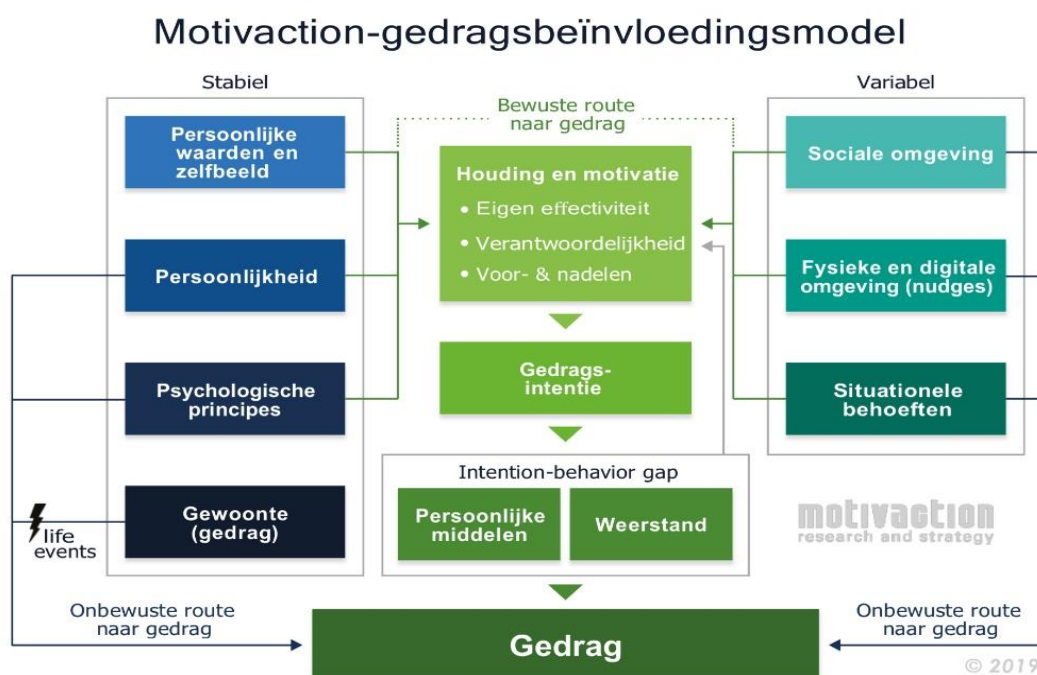
motieven voor deze waarden te geven en inspirerend voorbeeldgedrag te laten zien.

In het integrale **Motivaction-gedragbeïnvloedingsmodel** (Motivaction 2019) wordt gedrag gezien als een samenspel van bewustwording, innovatie en onbewuste beïnvloeding. Overheden en maatschappelijke organisaties gingen er lange tijd vanuit dat meer kennis automatisch zou leiden tot aanpassing van houding en gedrag. Bij massamediale campagnes lag de nadruk op het informeren van burgers. Maar: gedrag is niet alleen het resultaat van bewuste maar ook van onbewuste processen. Voorbeelden zijn de neiging om het eigen gedrag aan te passen aan dat van anderen en de effecten van 'nudging' (een vriendelijk duwtje in de goede richting).

Gedrag wordt bepaald door stabiele en variabele factoren. Stabiele factoren zijn moeilijker te veranderen dan variabele factoren. Bij stabiele factoren gaat het om het om iemands zelfbeeld, persoonlijkheid en psychologische principes. Variabele factoren betreffen de fysieke en digitale omgeving en de situationele behoeften.

De stabiele en variabele factoren hebben bewust of onbewust invloed op gedrag. Bij de bewuste route neemt iemand een weloverwogen beslissing aan de hand van factoren als de eigen effectiviteit, het verantwoordelijkheidsgevoel en de verwachte voor- en nadelen. Deze factoren leiden tot een gedragsintentie maar niet alle voornemens worden uitgevoerd. Dit wordt de 'intention-behavior gap' genoemd. Deze 'gap' wordt veroorzaakt door het ontbreken van persoonlijke middelen en weerstand. Dat kan te maken hebben met het vasthouden aan het bestaande, met vrijheidsbeperkingen en met twijfels aan het nut. Gedragsintenties zijn dus niet altijd goede voorspellers van het werkelijke gedrag.

Bij de onbewuste route past iemand zijn gedrag automatisch aan, zoals bij het stoppen voor rood licht.



Gedrag kan op allerlei manieren beïnvloed worden: door bewustwordingscampagnes, wetten, financiële prikkels zoals boetes of subsidies, educatieprojecten, introductie van een nieuwe sociale norm, en fysieke nudges, die het gedrag vaak onbewust sturen. Interventies zijn gebaseerd op één of meerdere factoren uit het model. Meestal is een 'one-size-fits-all aanpak' niet effectief, omdat niet

iedereen hetzelfde op een bepaalde methode reageert. Soms moet je je richten op een specifieke doelgroep en moet je er rekening mee houden dat mensen verschillend zijn.

Motivaction (2015) onderzocht al eerder welke waarden voor de Nederlandse bevolking belangrijk zijn voor het draagvlak van de energietransitie. Het bleek dat vier kernwaarden belangrijk zijn voor het energiesysteem: veiligheid, milieuvriendelijkheid, betaalbaarheid en beschikbaarheid. Minder belang werd gehecht aan landschapsbehoud en onafhankelijkheid. Uit weer een ander onderzoek (Motivaction 2018) bleek dat driekwart van de Nederlanders de verantwoordelijkheid en de kosten van klimaatmaatregelen neerlegt bij het bedrijfsleven (vooral de grote bedrijven) en de overheid. Ook was maar één op de drie Nederlanders bereid een iets hogere energierekening te betalen voor klimaatmaatregelen.

Volgens onderzoek door **Pricewise** (2020) wil slechts een kwart van de Nederlanders meer betalen voor verduurzaming van hun vaste lasten, zoals een duurzame energieleverancier, provider of verzekeraar. Van hen wil driekwart maximaal € 30 per maand extra betalen en jongeren willen hiervoor vaker betalen dan 30-plussers. Groene energie is de populairste verduurzaming. De helft wil niets meer betalen en een kwart is neutraal. De helft van de Nederlanders kiest dus de portemonnee boven de duurzaamheid van vaste lasten.

Segreto c.s. (2020) onderzochten de maatschappelijke acceptatie van 25 Europese hernieuwbare energieprojecten en concludeerden, dat **vertrouwen in de lokale autoriteiten en de ontwikkelaars** een belangrijke motor was voor lokale acceptatie. Dit vertrouwen moet worden opgebouwd via een transparant proces langs de volledige keten van begin tot einde van het project. Hierbij hoort het verstrekken van kwaliteitsinformatie aan en participatie door de bevolking. De informatie moet van hoge technische kwaliteit zijn met gegevens over de economische- en milieueffecten. Factoren als opleiding en inkomen van bewoners, waren sleutelfactoren. De uitkomst van de kosten-batenanalyse was de meest invloedrijke factor voor publieke acceptatie. Economische en sociale voordelen bevorderden de publieke acceptatie. Compenserende maatregelen als lagere energiekosten voor bewoners, de ontwikkeling van recreatieve infrastructuur, verbeterde milieukwaliteit en verwachte toename van de toeristische sector hadden een sterke invloed op de publieke opinie en acceptatie. Uit onderzoeken door **TNO** (2020a, 2021a) naar het maatschappelijk draagvlak voor overheidsbeleidsmaatregelen gericht op het tegengaan van klimaatverandering, bleek dat er redelijk wat draagvlak in de samenleving is voor klimaatmaatregelen. De ervaren eerlijkheid van een beleidsmaatregel had de meeste invloed op het draagvlak. Met name de distributieve verdeling, een eerlijke verdeling van lusten en lasten tussen betrokken partijen, was belangrijk. Na eerlijkheid was de effectiviteit van de maatregelen een voorspeller van draagvlak: dit was hoger als een maatregel effectiever wordt ingeschat. Ook relevantie speelde een rol: het draagvlak werd lager naarmate mensen verwachtten, dat de gevolgen van een maatregel negatiever voor henzelf zouden zijn. Naast kenmerken van een maatregel speelden persoonlijke kenmerken een rol bij maatschappelijke acceptatie. Mensen die bezorgder zijn over klimaatverandering en mensen met een sterke milieu-identiteit, waren vaker voorstander van klimaatmaatregelen. Demografische factoren, zoals geslacht, leeftijd en opleidingsniveau, speelden maar een kleine rol bij de verklaring van het maatschappelijk draagvlak.

Het draagvlak kan vergroot worden door:

- het vergroten van de (ervaren) eerlijkheid van maatregelen,
- het bieden aan burgers van meer inzicht in de effectiviteit van klimaatmaatregelen,
- het blijven communiceren over klimaatverandering
- en het voorzien in de juiste informatie over mogelijke oplossingen.

Het **Sociaal en Cultureel Planbureau** (2021) constateert dat milieuvriendelijke attitudes en intenties niet automatisch leiden tot milieuvriendelijk gedrag. Woningverduurzaming leidt tot minder fossiel brandstofgebruik en minder broeikasgasemissies en draagt daardoor bij aan de doelen van het

klimaatbeleid, maar dat wil nog niet zeggen dat alle woningeigenaren dat ook willen en kunnen. Wat betreft het willen verwijst de literatuur als belangrijkste onderliggende mechanisme naar de 'attitude-behaviour' gap. Maar ook als men gemotiveerd is om maatregelen te nemen, gaat men lang niet altijd tot actie over. Of mensen ook daadwerkelijk duurzaam gedrag kunnen vertonen wordt namelijk in belangrijke mate bepaald door de middelen (informatie, tijd, kennis, geld) en vaardigheden (informatieverwerking, digitale-, netwerkvaardigheden) die zij hebben. En door de beschikbare praktische mogelijkheden.

Drijfveren van burgers om energiebesparende maatregelen te nemen zijn verwachtingen over geldbesparing, verbetering van comfort in huis en een beter milieu. Mensen laten zich daarbij beïnvloeden door wat mensen in hun omgeving doen. Bij barrières zijn er financiële redenen, zoals geen geld hebben, onzekerheid of de investering zich zal terugverdienen en een aversie tegen lenen. Andersoortige barrières liggen op het vlak van informatie (gebrekkige informatie over maatregelen, weinig inzicht in energiekosten, onzekerheid over betrouwbaarheid leverancier en kostenbesparing) en besluitvorming (lastige, complexe en onomkeerbare beslissingen, opzien tegen 'gedoe'). Ook spelen er gedragsmatige mechanismen, zoals de neiging van mensen om acties vooruit te schuiven, vasthouden aan gewoontegedrag, nabootsgedrag en onderschatting van de gevolgen van gedrag in de verre toekomst. Verder zijn er bij de adoptie van nieuwe energietechnologie barrières met betrekking tot financiën, milieu, leveringszekerheid, vertrouwen en onzekerheid, ongemak en impact op het wonen.

Het Planbureau geeft aan dat in de wetenschappelijke literatuur wordt benadrukt dat maatregelen die de energie-efficiëntie verbeteren (zoals investeren in isolatie en zonnepanelen) effectiever zijn dan maatregelen die het alledaagse gedrag van de bewoners proberen te beïnvloeden (zoals korter douchen, verlagen van de thermostaat en het sluiten van gordijnen). De verklaring hiervoor is dat voor blijvende efficiëntie maatregelen meestal eenmalige besluitvorming nodig is. Het blijvend aanpassen van alledaags -en vaak onbewust- gedrag is lastig door de psychologische barrières, de beperkte invloed van motivationele factoren en dat te midden van veel andere bepalende factoren, zoals het beschikbare aanbod van energie(on)zuinige alternatieven, sociale en culturele normen en economische factoren.

Onderzoekers van de TU Delft en de Universiteit van Utrecht (Mouter c.s. 2021) hebben een volksraadpleging over het klimaat gehouden waarbij een voor Nederland representatieve groep deelnemers hun mening en adviezen konden geven over de verscherpte klimaatdoelen van 2030, waarbij de CO₂-reductie 55% moet zijn in plaats van 49% ten opzichte van 1990.

Ongeveer een kwart van de Nederlanders heeft een zeer uitgesproken positieve of negatieve mening over het klimaatbeleid. Een brede middengroep van driekwart van de Nederlanders ondersteunt het klimaatbeleid. Voor deze groep zijn rechtvaardigheid en efficiëntie kernwaarden.

Er zijn drie rechtvaardigheidsvoorwaarden:

- maatregelen die de persoonlijke levenssfeer van burgers direct raken zijn pas acceptabel als andere maatregelen zichtbaar maximaal zijn toegepast en de overheid een streng beleid voert tegen grote vervuilende sectoren,
- bescherming lage inkomens en het voorkomen van een grotere kloof tussen arm en rijk
- en de vervuiler moet betalen.

En één efficiëntievoorwaarde: de baten van een maatregel moeten hoger zijn dan de kosten en er mag geen beter alternatief zijn.

Windparken op zee, een hogere CO₂-heffing en hogere subsidie voor CO₂-reductie voor de industrie, isolatiesubsidie, hogere vliegbelasting en investeringen in groene waterstof kunnen op brede steun rekenen, in tegenstelling tot de verhoging van de energiebelasting, wind en zon op land, vleestaks en de komst van kerncentrales.

Het **Klimaatcrisis Beleid Team** (KBT 2021) vindt dat de uitstoot van CO₂ beperkt moet worden door

een jaarlijks dalend plafond en door hogere CO₂-heffingen. De inkomsten uit de verkoop van de emissierechten moet gebruikt worden om de belasting op arbeid te verlagen en lage-inkomensgroepen te compenseren. Hierdoor kan een breed draagvlak voor het klimaatbeleid worden gegarandeerd, omdat rekening wordt gehouden met de internationale concurrentiekracht van bedrijven en met een rechtvaardige verdeling van de lasten voor burgers.

6.4. Samenvatting.

Maatschappelijke acceptatie van duurzame energie omvat de acceptatie door de sociale politiek, door de lokale gemeenschap en door de markt.

Sociaal-politieke acceptatie heeft betrekking op acceptatie van de beleidskaders die zijn gericht op het stimuleren van hernieuwbare energiebronnen en van nieuwe technologieën. Het belang van duurzame energie en klimaat wordt in Nederland breed gedragen, omdat bij het totstandkoming van het Energie- en Klimaatakkoord meer dan honderd maatschappelijke organisaties zijn betrokken.

Lokaal draagvlak betreft de acceptatie door bewoners en lokale autoriteiten. Het gaat daarbij over procedurele, distributionele rechtvaardigheid en het onderlinge vertrouwen. Wat zijn de voor- en nadelen van beleidsmaatregelen, welke procedures zijn gevolgd en wie ondervindt de gevolgen.

Worden de voor- en nadelen eerlijk verdeeld? Vertrouwen is een kernbegrip bij locatie-vraagstukken. Vertrouwen van de stakeholders in elkaar, in de ervaren competenties en intenties, in de uitkomsten voor de gemeenschap, in de manier waarop risico's worden gedefinieerd, hoe hierover informatie wordt gegeven, wie informatie geeft en of deze aansluit bij de opvattingen van de omwonenden. Bij de acceptatie door de markt moeten bedrijven gaan investeren en produceren. Consumenten moeten het aantrekkelijk genoeg vinden om de producten te kopen en te gebruiken.

In het Nederlandse klimaatbeleid is er wel draagvlak bij overheden, belangenorganisaties en andere stakeholders op nationaal en regionaal niveau maar (nog) niet onder de 'gewone' burgers. Nationale infrastructuurplannen voor duurzame energie kunnen daardoor lokale weerstand ontmoeten.

Het maatschappelijk draagvlak kan bij voor- en tegenstanders actief of passief zijn.

Acceptatie wordt bepaald door objectieve en subjectieve factoren. De objectieve, contextuele gevolgen van de komst van duurzame energie liggen op technisch, financieel-economisch, juridisch en maatschappelijk vlak. Het gaat ook over de verdeling van baten en lasten.

Subjectieve, individuele, psychologische factoren bepalen hoe mensen objectieve factoren ervaren. Daarbij gaat het om waarden: levensdoelen of idealen die mensen belangrijk vinden en willen nastreven. Zelfoverstijgende waarden gaan primair uit van collectieve uitkomsten gericht op het welbevinden van andere mensen en de maatschappij, of op de kwaliteit van de omgeving.

Zelfverheffende waarden gaan uit van individuele baten en lasten. Bij de acceptatie van energiealternatieven gaat het niet alleen om financiële argumenten: mensen accepteren duurdere duurzame energie als er andere aantrekkelijke gevolgen voor het milieu of klimaat tegenover staan.

Vertrouwen is een belangrijke factor voor maatschappelijke acceptatie. Mensen hebben de neiging meer vertrouwen te hebben in partijen met waarden die aansluiten bij hun eigen waarden.

Individueel gedrag wordt bepaald door bewuste en onbewuste processen. Bij bewuste processen worden aan de hand van factoren als de eigen effectiviteit, het verantwoordelijkheidsgevoel en de verwachte voor- en nadelen, beslissingen weloverwogen genomen en bij onbewuste niet. Gedrag kan op allerlei manieren beïnvloed worden waarbij rekening wordt gehouden met bewuste en onbewuste processen. Meer kennis leidt niet altijd tot gedragsverandering en ook zijn gedragsintenties niet altijd goede voorspellers van daadwerkelijk gedrag.

Vertrouwen door de lokale bevolking moet worden opgebouwd door een transparant proces met hoogwaardige informatie en participatie door de bevolking gedurende de hele plannings- en uitvoeringsperiode. Een kosten-batenanalyse met inzicht in alle maatschappelijke voor- en nadelen is daarbij een belangrijk instrument.

Eerlijkheid, effectiviteit en relevantie zijn invloedrijke factoren voor het draagvlak van het klimaatbeleid. Een groot maatschappelijk draagvlak betekent nog niet dat mensen zich ook automatisch milieuvriendelijker gaan gedragen. Daadwerkelijk duurzaam gedrag wordt belemmerd door allerlei barrières op het vlak van financiën, informatie, besluitvorming, uitstelgedrag, gewoontegedrag, korte termijn denken en aversie van nieuwe technologieën.

In het feitelijk energiegedrag laten mensen zich vaak leiden door de wat ze voor energie moeten betalen. Duurzame energie is altijd duurder dan fossiele energie. Om maatschappelijk draagvlak voor de energietransitie te krijgen en te vergroten is het belangrijk om de (ervaren) eerlijkheid van maatregelen te vergroten en meer inzicht te geven in de effectiviteit van klimaatmaatregelen.

7 Maatschappelijke acceptatie van waterstof

7.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk ging het over de maatschappelijke acceptatie van duurzame energie. In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op het draagvlak voor waterstof als een duurzame energiedrager. Eerst wordt gekeken of er draagvlak is voor waterstoftechnologie. Staan mensen over het algemeen positief of negatief tegenover het gebruik van waterstof? Daarna wordt specifieker ingegaan op de acceptatie van waterstof als duurzame energiebron voor auto's en de acceptatie van waterstoftankstations. Hebben mensen bezwaren tegen de komst van een waterstoftankstation en zo ja, is er dan verzet? Hoe was dat bij de vestiging van twee waterstoftankstations in Groningen? Ook wordt onderzocht wat de gunstigste locatie is voor zo'n waterstof vulpunt.

7.2 Maatschappelijke acceptatie van waterstoftechnologie

Volgens **Zachariah-Wolff en Hemmes** (2006) kunnen ongelukken met waterstoftoepassingen, die een stroom van negatieve publiciteit veroorzaken, een grote dreiging zijn voor de maatschappelijke acceptatie bij inzet op de verschillende gebieden.

In de onderzoeken naar de maatschappelijke waardering van waterstoftechnologie in Nederland constateren **Achterberg c.s.**(2010) dat de algemene opinie positief staat tegenover de waterstoftechnologie, maar dat ook de kennis van waterstof beperkt is. Mensen met kennis van waterstof staan positiever tegenover waterstof dan mensen met geen of weinig kennis. Belangrijker dan kennis zijn echter vertrouwen in technologie, zorgen om het milieu en het zorgdragen voor de planeet voor de komende generatie (rentmeesterschap). Het is dan ook lastig om acceptatie te verhogen door meer informatie te geven aan mensen, die geen vertrouwen hebben in techniek en weinig waarde hechten aan natuur en milieu. Het draagvlak moet daar op een andere manier verworven worden. Het draagvlak voor waterstoftechnologie is groot, maar is volgens **Achterberg** (2014) in Nederland wel minder geworden. De belangrijkste verklaring hiervoor is het afnemende maatschappelijke vertrouwen in wetenschap en technologie in zijn algemeenheid.

Volgens **Schmidt en Donsbach** overheersen in de maatschappelijke acceptatie van waterstof de positieve aspecten (2016). In een onderzoek, waarbij de resultaten van een representatieve enquête onder de bevolking gecombineerd werden met een analyse van Duitse nieuwsmedia en een analyse van stakeholder-communicatiemateriaal, werd geconcludeerd dat waterstof essentieel is voor de toekomstige energievoorziening, maar dat het een vaag publiek profiel heeft. Om brede steun bij de bevolking te krijgen, moet een specifiek waterstofimago worden ontworpen waarin de concrete voordelen voor het dagelijks leven worden benoemd. Een vaak gebruikt argument in de media en in communicatiemateriaal over de voordelen van waterstof, is het vermogen om (overtollige) wind- en zonne-energie op te slaan. Het besef van dit voordeel heeft echter geen significante invloed op de acceptatie van waterstof. In plaats daarvan bleken voordelen als de onafhankelijkheid van het centrale elektriciteitsnet of het potentieel om de energievoorziening te decentraliseren belangrijke determinanten te zijn, maar minder vaak voor te komen in de documenten van de stakeholders en in de media.

Het gebruik van minder bekende en meer specifieke argumenten lijkt effectief te zijn met betrekking tot de maatschappelijke acceptatie van waterstof. Bij de stakeholders kwamen de positieve argumenten schoon/milieuvriendelijk, de mogelijkheid om het bestaande aardgasnet te gebruiken als opslagmogelijkheid en de opslag van overtollige hernieuwbare energie het meest voor. Er werden veel meer positieve dan negatieve argumenten gebruikt. Negatieve argumenten waren: hoge kosten van waterstof, gebrek aan waterstofinfrastructuur, een lage mate van efficiëntie en problemen bij gebruik van het aardgasnet. In de media waren de belangrijkste positieve argumenten het hoge ontwikkel- en innovatie-potentieel en waterstof als opslagmogelijkheid. De hoge kosten waren het

belangrijkste negatieve argument.

Oltra c.s. (2017) concluderen in een internationale studie in zeven Europese landen dat de kennis van waterstof beperkt is en dat er wel verschillen zijn in de onderzochte landen, maar dat de maatschappelijke acceptatie voor waterstoftoepassingen in huis en vervoer groot is. Toch gaan de consumenten niet tot daadwerkelijke aanschaf over vanwege de kosten, de technologische onvolwassenheid of het gebrek aan tankstations voor waterstofauto's. Ook kunnen alternatieven, zoals warmtepompen, zonnepanelen en batterijauto's, aantrekkelijker zijn.

Ingaldi en Klimecka-Tatar (2020) constateren dat de kennis erg laag is over (groene) waterstof als energiebron en over de productieveiligheden en opslagmethoden van waterstof. Zij zien een laag kennisniveau als een mentale barrière voor de maatschappelijke acceptatie van waterstof en van waterstoftechnologie. Daarnaast zijn er sociale barrières, waarbij de voorkeur wordt gegeven aan bestaande, bekende, traditionele technologieën boven nieuwe, onbekende, onzekere technologieën. Ook zijn er economische en technische barrières. Economische barrières zijn veel gemakkelijker te doorbreken in hoogontwikkelde en rijke samenlevingen door de beschikbare hoeveelheid startkapitaal en door een hoger opleidingsniveau. Bij de overdracht van technologie en het commerciële gebruik van technologie moet ook rekening worden gehouden met technologische barrières.

Martin en Ashworth (2021) zien dat de Australische bevolking niet zoveel weet van waterstof, maar dat men er in het algemeen positief tegenover staat, omdat het kansen biedt voor economische en regionale ontwikkeling (zoals werkgelegenheid en export). Wel moet waterstof veilig zijn en mag de productie geen negatieve impact hebben op de omgeving.

Schönauer en Glanz (2021) bevestigen dat de maatschappelijke acceptatie van waterstof in zijn algemeenheid hoog is, maar dat deze veel lager wordt als er waterstofinfrastructuur (zoals pijpleidingen) in de eigen woonomgeving wordt aangelegd. De acceptatie in de woonomgeving kan vooral verklaard worden door sociodemografische factoren, met name leeftijd, en project gerelateerde factoren als vertrouwen in de stakeholders. Dit contrast tussen positieve acceptatie op algemeen niveau en negatieve acceptatie op individueel niveau wordt het NIMBY-effect (Not In My Back Yard) genoemd en is ook van toepassing bij wind- en zonne-energie.

Emodi c.s. (2021) constateren dat er internationaal van 2008 tot 2020 steeds meer onderzoek is gedaan naar de maatschappelijke acceptatie van waterstof. De belangrijkste factoren die invloed hebben op de acceptatie zijn voorkennis, kosten/risico's, milieukennis, hoger onderwijs en inkomen, persoonlijke en distributieve voordelen, beschikbaarheid van infrastructuur en de nabijheid van waterstoffaciliteiten. In het algemeen is er een laag waterstofbewustzijn. Voor een succesvolle waterstofindustrie zijn van belang: beschikbaarheid van infrastructuur, betaalbaarheid, betrokkenheid van de lokale gemeenschap, bijdrage aan de regionale kennisontwikkeling, behoud van de biodiversiteit, veiligheid en voordelen voor de lokale gemeenschap.

De **Raad voor Leefomgeving en Infrastructuur** (2021) wijst op het belang van draagvlak in de energietransitie. Waterstof is noodzakelijk voor een betaalbaar, betrouwbaar en klimaatneutraal energiesysteem. Waterstof wordt een essentieel onderdeel in de transitie van een fossiel naar een duurzaam energiesysteem. Het gaat een rol spelen in de industrie als grondstof en voor hogetemperatuurwarmte, in de energiesector voor flexibele opslag en transport van energie, in de transport- en mobiliteitssector als brandstof voor vervoermiddelen en in de gebouwde omgeving voor verwarming van huizen en van tapwater. De overheid moet burgers voorbereiden op deze cruciale rol en ze daarnaast op een toegankelijke manier uitleggen dat de transitie gaat verlopen via tijdelijke overgangstechnieken, zoals het gebruik van blauwe waterstof zolang er nog niet voldoende groene waterstof beschikbaar is. Ook moet duidelijk worden gecommuniceerd dat extra kosten onvermijdelijk zijn in deze overgangsfase. Er moet zichtbaar worden gemaakt hoe die kosten verdeeld worden tussen bedrijven, burgers en tussen bevolkingsgroepen onderling. Er moet niet een

te rooskleurig beeld worden geschetst van de kosten van waterstof in de energietransitie, immers elke vorm van duurzame energie heeft een prijsverhogend effect voor bedrijven en consument. De **EnTranCe waterstofmonitor** (2021) geeft aan, dat er nog veel te winnen valt op het gebied van kennis van waterstof. Ongeveer 1/3 van de vragen over eigenschappen van waterstof, zoals veiligheid en giftigheid, werd fout beantwoord. Ook bleek dat zo'n 40% van de Nederlandse bevolking nog nooit van waterstoftechnologie heeft gehoord. De kennis over waterstofprojecten verschilt per provincie en is het grootst in Groningen en het laagst in Limburg. Mensen hoeven weliswaar geen objectieve kennis over waterstof te hebben om het toch te gebruiken. Om auto te rijden, hoef je immers ook niet te weten wat benzine precies is. Toch is kennis van een complexe en nieuwe technologie belangrijk, omdat het invloed kan hebben op uiteindelijke politieke keuzes. De kennis over de soorten waterstof (grijs, blauw en groen) is op dit moment nog laag: betere informatievoorziening kan dus een punt van aandacht zijn. Vooral wanneer het gaat om gevaren die niet kloppen -zoals de uitspraak dat waterstof giftig is- is het verspreiden van objectieve kennis belangrijk. Wanneer mensen denken aan waterstofprojecten komt vooral de waterstofbus naar voren. Waterstof is bekender als duurzame brandstof bij mobiliteit dan als optie om aardgas te vervangen in de woonomgeving, door huizen te verwarmen met een waterstof-cv-ketel. In het onderzoek bleek dat mensen met meer kennis van waterstof positiever zijn over waterstofketels in de eigen woning dan mensen met minder kennis. Voor het toepassen van waterstof in woningen, is het dus belangrijk om de technologie goed te introduceren en de bekendheid ervan te verhogen. In de monitor blijkt verder dat jongeren minder belang hechten aan de twee pijlers van de energietransitie: zuinig omgaan met energie en overstappen op groene stroom. Daarbij zijn jongeren minder overtuigd van het belang van waterstof voor de energietransitie. Wel schatten zij het belang van aardgasvrij wonen juist hoger in. In de communicatie is het daarom belangrijk om jongeren uit te nodigen voor het maatschappelijk debat. Daarnaast zien burgers op dit moment vooral de regering en de industrie als de bepalende spelers in het debat en zien ze gemeenten en zichzelf als het minst invloedrijk. Wanneer men burgers wil betrekken bij de ontwikkeling van waterstoftechnologie, moet er aandacht zijn hoe de lokale gemeenschap kan aansluiten bij de energietransitie.

7.3 Maatschappelijke acceptatie van waterstof in het vervoer

Yetano Roche (2010) onderscheidt in een overzichtsartikel verschillende theorieën die verklaren waarom mensen rijden in waterstofauto's. Het kopen van en rijden in een waterstofauto kan bekeken worden vanuit economisch, sociaalpsychologisch en symbolisch perspectief. Bij het economisch perspectief maximaliseert de consument het nut op basis van preferenties, kennis van alternatieven en het beschikbare budget. In de sociaalpsychologie gaat het om attitudes en risicoperceptie. In het symbolisch perspectief laat een auto zelfidentiteit zien: interesses, overtuigingen, waarden en sociale status. Rijden in een waterstofauto is dan een statement van mijn persoonlijkheid. De auto symboliseert behoud van het milieu, financiële verantwoordelijkheid en onafhankelijkheid van aardolieproducenten, evenals de connotaties die verband houden met deze betekenissen: ethisch handelen, intelligentie of uniciteit.

In zijn algemeenheid is de conclusie in de literatuur dat de houding van het publiek ten opzichte van waterstof grotendeels positief is, dat de kennis over het onderwerp beperkt is en dat veiligheidsaspecten geen probleem vormen. Volgens de economische studies zijn de kosten het belangrijkste kenmerk bij aankoopbeslissingen over auto's. Prestatie- en gemak kenmerken (zoals bereik en brandstofbeschikbaarheid) volgen in de rangorde, waarbij de milieuvoordelen consistent van relatief weinig belang blijken te zijn. Een alternatief beeld van de drijvende krachten achter de aankoop van elektrisch auto's werd gegeven door de studie van het koopgedrag van auto's door middel van semiotiek. De aanpak bracht het brede scala aan connotaties aan het licht dat elektrische auto's hebben voor hun eigenaren, zoals ethiek, intelligentie, onafhankelijkheid en uniciteit.

De uitkomsten van onderzoeken onder passagiers en chauffeurs van waterstofbussen waren positief en er waren geen bezwaren vanuit veiligheidsperspectief. Ook taxichauffeurs in Londen waren positief vanuit hun eigen financiële belangen en niet vanuit milieu- of gezondheidsargumenten.

Lebutsch en Weeda (2011) onderzochten de uitrol van waterstofvoertuigen en een bijbehorende waterstoftankinfrastructuur in Nederland. De studie richtte zich op de uitrol in de periode na de grootschalige demonstratiefase, wanneer de nieuwe auto's commercieel verkrijgbaar zijn en in de showrooms van autodealers verschijnen. De uitrolsimulaties gaven aan dat tegen 2050 35-40% van alle auto's in Nederland waterstofauto's kunnen zijn, als hun technische prestaties vergelijkbaar zijn met conventionele auto's en er voldoende prikkels zijn geïntroduceerd. Kostenanalyse en analyse van broeikasgasemissies van uitrolscenario's laten zien dat waterstof betaalbaar en levensvatbaar is en goede perspectieven biedt voor grote emissiereducties in het wegvervoer. De bijbehorende kosten zijn aanzienlijk, maar niet onoverkomelijk en relatief klein in vergelijking met de belastingbegroting van het wegtransport. Het uitrollen van een waterstofnetwerk met tankstations en waterstofauto's kost tijd en vergt doorzettingsvermogen van alle betrokkenen. Er is een lange-termijn visie nodig. Tegen betaalbare kosten kan een substantiële CO₂-reductie worden bereikt. Met name in de beginfase moeten starters financieel en niet-financieel ondersteund worden.

Volgens **Zimmer en Welke** (2012) wordt het gebrek aan waterstofkennis van de geïnterviewden veroorzaakt, doordat in hun dagelijks leven waterstof- en brandstofceltechnologie helemaal niet of slechts marginaal voorkomt. In het beste geval komen ze waterstof toevallig tegen als ze waterstofbussen zien rijden of als ze een waterstoftankstation passeren. Niettemin heeft de bevolking een zeer positieve houding tegenover waterstofauto's. Met name de mogelijkheid om individueel mobiel te zijn zonder het milieu te schaden is aantrekkelijk, omdat mensen zich dan niet schuldig hoeven te voelen. De geïnterviewden brachten dit in verband met de voorwaarde dat de waterstof groen moest zijn en niet geproduceerd uit fossiele energie. De bezorgdheid van deskundigen dat het gebruik van waterstof voor transport tot grotere twijfels over de veiligheid bij het grote publiek zou leiden, kon niet worden onderbouwd. Het woord waterstof werd maar heel zelden, of helemaal niet, gekoppeld aan termen als gevaar of risico. En zelfs wanneer er direct naar werd gevraagd, geloofden de geïnterviewden niet, dat tankstations voor waterstof gevaarlijker waren dan conventionele tankstations. Wat betreft de acceptatie van waterstoftechnologie door het grote publiek, moeten beleidsmakers zich minder zorgen moeten maken over de vraag of mensen de technologie als onveilig beschouwen, maar zich meer richten op het feit dat mensen verwachten dat de waterstof op de markt daadwerkelijk met hernieuwbare energie is geproduceerd.

Alazemi & Andrews (2015) geven aan dat de grootste zorg bij het gebruik van waterstof over veiligheidsproblemen gaat, maar dat was ook het geval in de beginjaren van het gebruik van benzine en diesel. Waterstofgas is niet-toxisch, veilig voor het milieu en heeft een laag stralingsniveau, waardoor het risico op een secundaire brand wordt verminderd. Speciaal punt van aandacht is dat waterstof brandt met een kleurloze vlam die mogelijk niet zichtbaar is. Bij veiligheid gaat het om brandsnelheid, explosiegrenzen en zelfontbrandingstemperatuur. Het is bijna onmogelijk om waterstof te laten exploderen in een open ruimte vanwege de hoge vluchtigheid. Omdat waterstof veel lichter is dan lucht, stijgt het snel op als het vrijkomt. In het geval van lekken is waterstof daarom meestal veiliger dan andere brandstoffen. Als de passende normen en veilige werkmethoden worden gevolgd is waterstof net zo veilig als andere brandstoffen. Alle componenten die in tankstations voor waterstof worden gebruikt, moeten worden gecertificeerd door de bevoegde veiligheidsinstantie.

7.4 Maatschappelijke acceptatie van waterstoftankstations

O'Garra c.s. (2005; 2008) hebben in 2003 twee onderzoeken gedaan naar de komst van waterstof bij bestaande tankstations in Londen:

- een telefonische enquête gehouden onder 400 inwoners van groot-Londen en
- een schriftelijke enquête onder 800 bewoners van vijf Londense wijken rond bestaande tankstations.

De conclusies uit het eerste onderzoek waren dat waterstof onbekend was (minder dan de helft van de ondervraagden had gehoord van waterstof als brandstof voor transport) en dat iets meer dan een derde duidelijk voorstander is van de introductie van waterstofvoertuigen. Bekendheid met waterstoftechnologieën was de belangrijkste bepalende factor voor acceptatie van waterstof. Waterstofkennis bleek weer gerelateerd te zijn aan geslacht (mannen), leeftijd (ouderen), opleiding (universitaire opleiding) en milieubewustzijn. Door de grote onbekendheid van waterstof was het onduidelijk of in de toekomst mogelijke waterstofopslag zou worden tegengewerkt of ondersteund. Vergroten van bewustwording is volgens **O'Garra c.s.** de sleutel tot meer publieke acceptatie van waterstof technologieën. Hierbij is vooral een positieve benadering belangrijk en ook moet de communicatie zich richten op een breed publiek.

Het tweede onderzoek gaf aan dat er weinig verzet was, maar dat er behoefte was aan meer informatie om een beslissing te nemen over een waterstoftankstation. Weerstand werd bepaald door gebrek aan vertrouwen in veiligheidsmaatregelen, door een niet-milieubewuste attitude en door zorgen over het bestaande lokale tankstation. Ook werd een schatting gemaakt van de negatieve effecten voor omwonenden door een financiële berekening te maken van de tijd, die bewoners wilden besteden aan verzet tegen de uitbreiding van een tankstation met waterstof. Een verrassende conclusie was verder dat de weerstand kleiner was naarmate mensen dichtbij het tankstation woonden. De omwonenden wilden ook minder informatie over waterstof. Het is mogelijk dat personen die dichtbij potentieel risicovolle instellingen wonen, er de voorkeur aan geven om te denken dat ze veilig zijn en zich daarom niet tegen zo'n ontwikkeling verzetten. Ze gaan dan ook zeker niet op zoek naar meer informatie, die hen anders zou kunnen vertellen. Deze opzettelijke onwetendheid is volgens **O'Garra c.s.** waarschijnlijk een gevolg van cognitieve dissonantie, waarbij psychisch ongemakkelijke waarheden worden vermeden.

Het onderzoek van **Thesen en Langhelle** (2008) in Noorwegen uit 2008 werd telefonisch gehouden onder 1.000 omwonenden van toekomstige waterstofstations in Stavanger. In vergelijking met het onderzoek in Londen bleek dat in Noorwegen de bekendheid van waterstof hoger was en dat de bevolking positiever stond tegenover de komst van waterstofstations. Meer kennis over waterstof betekende een grotere support. In Stavanger bleek de support van mannen veel positiever te zijn dan in Londen. Ook was opmerkelijk dat in Stavanger milieu argumenten een belangrijkere rol speelden dan in Londen. Dat kan verklaard worden doordat er in Londen geen steun was van milieuactivisten. Een plausibele verklaring voor de verschillende uitkomsten was verder dat het station in Stavanger alleen maar positieve exposure kreeg in de pers tijdens het onderzoek, terwijl er in Londen een negatieve focus was door lokale weerstand. Net als in Londen waren de mensen die vlakbij het tankstation woonden positiever dan de mensen die verder weg woonden. Dit werd verklaard door de positieve framing van het project zelf en van de waterstoftechnologie in de transportsector. Mensen die vlakbij woonden hadden een sterker gevoel van eigenaarschap met wat gezien werd als een wetenschappelijk en technisch belangrijk project.

Als vervolg op het onderzoek van **Thesen en Langhelle** hielden in 2009 **Tarigan c.s.** (2012) in Stavanger 1.000 telefonische interviews. In het onderzoek wordt geconcludeerd dat leeftijd, opleidingsduur en geslacht van invloed zijn op de acceptatie van waterstofvoertuigen en tankstations, evenals op de bereidheid om te betalen voor waterstofbrandstof. De resultaten geven aan dat meer kennis over waterstofvoertuigen en tankstations minder support voor waterstofvoertuigen en tankstations kan betekenen. Maar ook, dat meer kennis een positieve invloed heeft op een milieubewuste duurzame attitude en dat heeft weer een positieve invloed op de support voor het gebruik van waterstofvoertuigen en tankstations.

De onderzoeken van **Thesen, Langhelle en Tarigan c.s.** hadden betrekking op 'the Scandinavian Hydrogen Highway', een ambitieus project om in Noorwegen tussen Stavanger en Oslo een netwerk van waterstoftankstations op te zetten. De meeste Noorse stations werden oorspronkelijk geëxploiteerd door Statoil (nu Equinor) met tankstations in Oslo, Drammen, Porsgrunn, Lillestrøm en Stavanger. Statoil stopte in 2011 met waterstof (geen business case) en het tankstation in Stavanger werd in 2012 ontmanteld. De andere tankstations werden overgenomen door HYOP AS. De meeste zijn om economische redenen buiten gebruik. Die in Drammen was in 2015 gesloten. Porsgrunn (Grenland) werd in 2018 gesloten (Netinform 2019).

Onderzoek van **Martin c.s.** (2009) onder 182 deelnemers aan ride-and-drive-clinics in California in 2009 toont aan, dat de opvatting over veiligheid van zowel rijden als tanken door zélf te rijden en te tanken positief beïnvloed wordt. Percepties van veiligheid zijn geen belangrijke rem voor de toepassing van waterstof. De acceptatie van waterstof wordt hoger door clinics, waarbij mensen zelf tanken en in waterstofauto's rijden. Overigens geeft Martin aan dat de steekproefpopulatie niet representatief is door een waarschijnlijke oververtegenwoordiging van early adopters van alternatieve brandstof voor voertuigen. We moeten dus voorzichtig zijn met het trekken van algemene conclusies. Maar aanpassingsstrategieën die ervoor zorgen dat mensen kennismaken met onbekende waterstoftechnologie, kunnen helpen om de potentiële markt uit te breiden. Natuurlijk moeten volgens Martin ook andere technisch-economische uitdagingen worden aangepakt, zoals de beperkte infrastructuur en de hoge kosten van waterstofauto's en waterstofbrandstof.

Kwalitatief onderzoek van **Mumford en Gray** (2009) laat zien, dat oppositie tegen een waterstoftankstation ontstond als gevolg van slechte relaties uit het verleden tussen de ontwikkelaars van de faciliteiten en de omwonenden over de bouw van het oorspronkelijke tankstation in 2001. Toen er in 2003 plannen waren voor uitbreiding met een waterstoftankinstallatie op de bestaande locatie waren omwonenden al boos en wantrouwend tegenover de ontwikkelaars. Daarom waren ze gekant tegen het waterstoftankstation.

Volgens **Zimmer en Welke** (2012) heeft de bevolking een zeer positieve houding tegenover waterstof, omdat het de mogelijkheid biedt om mobiel te zijn zonder het milieu schade toe te brengen. De waterstof moet dan wel uit hernieuwbare bron komen. Tankstations voor waterstof worden ook niet gevaarlijker gevonden dan conventionele tankstations.

Huijts c.s. (2013a,2013c) onderzochten de psychologische motieven die mensen hadden om zich al dan niet te verzetten tegen de mogelijke komst van een waterstoftankstation. De deelnemers aan het onderzoek werd gevraagd om zich voor te stellen dat waterstoffaciliteiten werden toegevoegd aan het voor hen dichtstbijzijnde benzinetankstation. Twee veelgebruikte theorieën uit de psychologie voor de intentie om actie te ondernemen voor of tegen een waterstoftankstation werden getest: het Norm Activatie Model dat gedrag verklaart op basis van morele argumenten en de Theorie van Gepland Gedrag waarbij mensen handelen uit eigen belang en hun keuze wordt bepaald door een kosten-baten analyse van positieve en negatieve effecten. De conclusie van het onderzoek was dat voor de acceptatie van waterstoftankstations morele overwegingen belangrijker zijn dan kosten-baten afwegingen. De deelnemers aan het onderzoek vonden zelf dat ze weinig kennis hadden over waterstof en over waterstoftechnologie. Meer mensen in de geïnformeerde groep konden een mening vormen dan in de niet-geïnformeerde groep. Door de informatie werd het percentage voorstanders aanzienlijk verhoogd, terwijl het percentage tegenstanders nagenoeg gelijk bleef. De uitkomsten geven ook aan dat ongeveer vier tot vijf keer meer burgers vóór een lokaal waterstoftankstation waren dan tegen. In beide groepen waren zowel voor- als tegenstanders gemiddeld genomen niet erg geneigd om actie te ondernemen, maar bij tegenstanders was dat wat meer dan bij voorstanders.

Er zijn verschillende praktische implicaties voor beleidsmakers die de acceptatie van waterstof als brandstof- en waterstoftechnologie willen stimuleren. Beleidsmakers kunnen morele oppositie

verminderen en morele steun vergroten door beleid te introduceren dat leidt tot een technologie die gunstiger is voor de samenleving en/of het milieu. Ze kunnen bijvoorbeeld voor subsidietoewijzing veiligheidsnormen stellen of specifieke energiebronnen eisen voor de productie van waterstof en op die manier indirect het ontwerp van het technologische systeem beïnvloeden. Ze kunnen ook de locatie van de technologie beïnvloeden, bijvoorbeeld door alleen toestemming te geven voor locaties waar burgers zich geen zorgen hoeven te maken over veiligheidskwesties. Ook kunnen beleidsmakers informatie verstrekken aan het publiek om de acceptatie te vergroten. Wanneer milieu- en maatschappelijke effecten met betrekking tot het gebruik van waterstof als brandstof en ook voor waterstoftankinstallaties positief zijn, vergroot informatie hierover waarschijnlijk de op moraal gebaseerde intentie om actie te ondernemen ten gunste van een lokale waterstoftankinstallatie en vermindert het de op moraal gebaseerde intentie om ertegen te handelen. Informatie over de mening van andere burgers, die niet in deze studie was opgenomen, is waarschijnlijk ook van invloed op intenties om te handelen.

Huijts (2013c) verwacht weinig weerstand tegen waterstoftankstations. Maar ondanks dat er een meerderheid van burgers voor waterstoftankstations is, wordt ook weinig steun verwacht. Sommige burgers gaven echter aan, wel actie te willen ondernemen. Aangezien al één of een paar burger(s) invloed kunnen hebben op het succes van een implementatie, is het aan te bevelen om de mening van burgers wel in ogenschouw te nemen. De overheid en de industrie kunnen burgers informeren en hun mening vragen voordat ze beslissingen nemen over en investeren in een waterstoftankstation. Om echt vertrouwen op te bouwen en maatschappelijke acceptatie te verwerven pleit **Huijts** ervoor om zo vroeg mogelijk open en eerlijk met burgers te communiceren. Het gedrag heeft meer invloed dan meningen bij de invoering van een energietechnologie. De respondenten in de studie over de acceptatie van waterstoftankstation hadden een vrij laag kennisniveau. Mogelijk wordt het kennisniveau onder burgers hoger wanneer de techniek vaker voorkomt, waardoor ook de mening van burgers kan veranderen. Deelnemers die meer kennis hebben, kunnen mogelijk gemiddeld positiever zijn over een technologie.

Huijts (2013c) wijst verder op het vertrouwen dat burgers hebben in verschillende actoren. Bij de discussie over CO₂ in de ondergrond, hebben burgers het meeste vertrouwen in de milieubeweging en het minst in de industrie. Het vertrouwen in de overheid is matig. De milieubeweging kan dus een belangrijke rol spelen bij maatschappelijke acceptatie.

In 2014 hielden **Huijts en Van Wee (2015)** opnieuw een representatief onderzoek onder de Nederlandse bevolking. Via het invullen van een online vragenlijst werd aan burgers gevraagd om de hypothetische vestiging van waterstoftankfaciliteiten bij een bestaand benzinstation te evalueren. De factoren die het draagvlak beïnvloeden bij de vestiging van een tankstation zijn enerzijds objectieve factoren als geslacht, leeftijd, inkomen, opleiding, locatie (afstand en soort omgeving, zoals industriegebied of woonwijk) en anderzijds subjectieve (psychologische) factoren als kennis, vertrouwen in overheid en exploitant, negatieve of positieve affectie, ervaren baten/lasten en risico's. Positieve gevoelens waren satisfactie, plezier, hoop, kalmte en trots. Negatieve emoties waren ongerustheid, stress, machteloosheid, angst en boosheid. De sterkste voorspellers bij de psychologische variabelen waren de positieve en negatieve emoties, samen met lokale effecten en de maatschappelijke en ecologische effecten. Andere psychologische variabelen, zoals objectieve en subjectieve kennis, vertrouwen in de gemeente en in de overheid hadden allemaal een matig significant positief effect op de acceptatie. De psychologische variabelen hadden een significanter effect dan de sociaal-demografische en ruimtelijke variabelen. De conclusies waren verder dat mannen, jongeren en het hebben van een hogere opleiding en inkomen positiever zijn dan vrouwen, ouderen en het hebben van een lagere opleiding en inkomen. Huiseigenaren zijn negatiever dan huurders. In tegenstelling tot de eerder genoemde onderzoeken in Londen en Stavanger waren mensen die dichtbij wonen negatiever dan mensen die verder weg wonen. Een tankstation op een

industrieterrein leidt vermoedelijk tot minder weerstand dan in een woonwijk. Weinig kennis, weinig vertrouwen in overheid en exploitant, negatieve affectie, negatieve baten/lasten en grote risico's leiden tot een laag draagvlak. Overheid en bedrijfsleven kunnen deze inzichten gebruiken om meer acceptabele locaties te kiezen en gericht te communiceren. **Huijts en Van Wee** raden aan de eerste waterstoftankstations niet in dichtbevolkte gebieden of vlakbij de bewoning te vestigen. Informatie kan een positief effect hebben op zowel kennis als vertrouwen, en daardoor op de acceptatie. Informatie moet specifiek gericht worden op groepen die tankstations gemiddeld minder acceptabel vinden, zoals vrouwen, ouderen, direct omwonenden en huiseigenaren. Het algemene vertrouwen in de sector kan vergroot worden door meer sociaal verantwoord ondernemen. Aandacht in het onderwijs over nieuwe technologieën kan ook een positieve invloed hebben. Over het algemeen blijkt de publieke aanvaardbaarheid van een lokaal waterstoftankstation vrij hoog te zijn. Sterke weerstand, zoals bij ondergrondse opslag van CO₂, is onwaarschijnlijk.

Huijts (2018) heeft in 2017 een vragenlijstonderzoek uitgevoerd onder 271 burgers die in de buurt van de eerste waterstoftankstation in Arnhem wonen, rond het tijdstip van implementatie. Hierbij werden de effecten geanalyseerd van de vestiging van het waterstoftankstation (zoals de gevolgen voor het milieu, de risico's en het nut voor de lokale burgers) op twee negatieve gevoelens (boosheid en angst) en twee positieve gevoelens (vreugde en trots). De resultaten laten zien, dat boosheid in aanzienlijke mate wordt verklaard door (van sterkere tot zwakkere effecten) de procedurele en distributieve (verdeling van) oneerlijkheid. Angst wordt verklaard door distributieve oneerlijkheid, veiligheid, geslacht en voorafgaand bewustzijn. Vreugde wordt in belangrijke mate verklaard door milieu-uitkomsten en nut. Trots, als laatste, wordt verklaard door voorafgaand bewustzijn, risico's, vertrouwen in de industrie en nut.

Zowel de procedurele oneerlijkheid (gemeten door het beoordelen van het besluit van de gemeente om een vergunning te verlenen) als de oneerlijkheid in de verdeling van de kosten, risico's en voordelen van het waterstof tankstation verklaarden boosheid en angst. Om negatieve emoties te voorkomen, moet met beide soorten oneerlijkheid rekening worden gehouden. Voorafgaand bewustzijn geeft meer trots en vreugde en ook minder angst dan eerdere onbewustheid. Het vooraf informeren van burgers kan dus de acceptatie vergroten. Vertrouwen in de industrie heeft een significant positief effect op trots en een negatief effect op angst. Acties die vreugde en trots brengen, en ook woede en angst verminderen, kunnen de steun voor een waterstoftankstation versterken en weerstand verminderen. In ieder geval moet bij communicatie altijd een goede balans worden gevonden tussen het aangeven van positieve en negatieve uitkomsten van de komst van een waterstoftankstation. Gebeurt dat niet, dan kunnen burgers zich gemanipuleerd voelen.

Huijts c.s. (2019) constateerden dat mensen die in de buurt van het waterstoftankstation in Arnhem woonden na de implementatie positiever waren dan voorheen. Dit verklaarden zij op basis van twee psychologische mechanismen, verliesaversie en vermindering van cognitieve dissonantie. Wanneer mensen wordt gevraagd om een waterstoftankstation te evalueren dat op het punt staat te worden geïmplementeerd, betekent dit dat ze een verandering in status-quo ervaren, wat verliesaversie kan veroorzaken. Na implementatie veranderen mensen hun negatieve mening in een meer positieve zodat ze weer op hun gemak kunnen zijn met hun leefomgeving (cognitieve dissonantie).

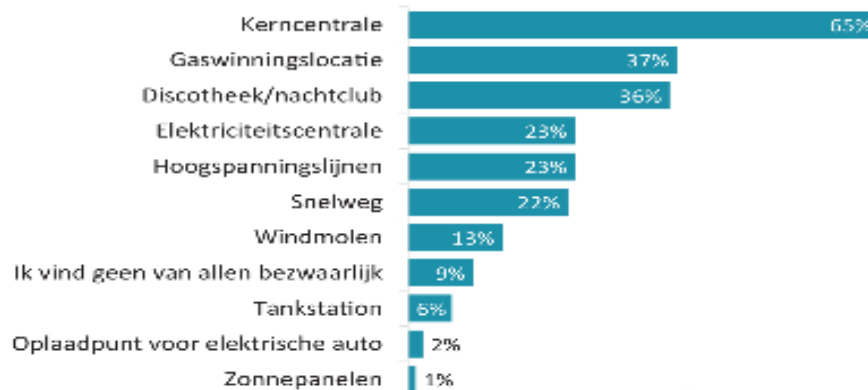
Hienuki c.s. (2019) concludeerden dat een groep mensen met meer kennis van waterstof minder vertrouwen en een lagere acceptatie had met betrekking tot waterstoftankstations dan een groep mensen met minder kennis. Veel beleid met betrekking tot waterstof gaat over betere milieuprestaties en energiezekerheid maar het is belangrijker om uit te leggen hoe technologie, veiligheidsmaatregelen en regelgeving worden geïmplementeerd. Het grote publiek vindt de veiligheid en risico's van waterstoftankstations vergelijkbaar met die van benzinstations; er wordt echter ook erkend dat waterstof zou kunnen exploderen, maar dat leidt niet tot minder acceptatie. Het begrip van mensen van bepaalde risico's bij waterstof kan ook leiden tot een grotere

aanvaardbaarheid. Volgens **Hienuki c.s.** zou meer kennis moeten leiden tot meer vertrouwen en daardoor tot hogere acceptatie.

Ono c.s.(2019) onderzochten of informatie over risico of veiligheidsmaatregelen invloed had op de acceptatie van waterstoftankstations. Zij hielden een enquête waarin ze respondenten vroegen naar hun acceptatie voor het bouwen van een waterstoftankstation naast hun huis of bij het dichtstbijzijnde benzinestation. Het bleek dat meer dan de helft van de respondenten positief was over een waterstoftankstation naast de woning maar dat de acceptatie voor waterstof bij een bestaand tankstation (met meer dan 80%) veel hoger was. Informatie over risico's en veiligheidsmaatregelen bleek positief te werken bij een tankstation naast de woning, maar minder bij waterstof bij het dichtstbijzijnde benzinestation. Hier leidde deze informatie tot een licht afname van de acceptatie, omdat respondenten angstig werden. Factoranalyse toonde aan dat risicoperceptie-factoren, zoals 'rampzalig' en 'vrees', betere verklarende factoren waren voor acceptatie dan demografische en andere kenmerken (geslacht, leeftijd, voertuigbezit, frequentie van openbaar vervoer, afstand van de woning tot een tankstation en houding ten opzichte van het milieu). Risico-informatie kan de zorgen van de respondenten (gevoelens van angst en onzekerheid) wegnemen.

Uit de Publieksmonitor klimaat en energie 2019 (**Ministerie van Economische Zaken en Klimaat**, 2019) blijkt 90 % van de Nederlanders een tankstation hebben op maximaal 10 kilometer van hun huis en dat zij hiervan weinig hinder ervaren (1,5 op een schaal van 10 = extreem veel hinder). Dat is minder dan de ervaren hinder van een hoogspanningsnet (2,1) windmolenpark (2,5) of gaswinningslocatie (4,3). Uit eerder onderzoek van **Motivaction** (2015) bleek al dat er weinig bezwaren waren tegen een tankstation:

Als je moest kiezen, welke van de hieronder genoemde voorzieningen zou je dan het meest bezwaarlijk vinden in je eigen omgeving? (2.054 respondenten)



Voor de vestiging van een waterstoftankstations is het in de toekomst nodig dat er zorgvuldig wordt gecommuniceerd met omwonenden. Dit is voorgeschreven in de nieuwe Omgevingswet, die waarschijnlijk in 2023 ingaat. Een van de doelen van de Omgevingswet (**Rijksoverheid Omgevingswet 2020**) is het bevorderen van participatie door burgers zo goed mogelijk te betrekken bij de ontwikkeling van hun leefomgeving. **Ekinetix** (2020) heeft aan de hand van de vestiging van een waterstoftankstation in Rhooon een communicatietraject ontwikkeld om aan deze nieuwe wettelijke eisen te voldoen en dus het draagvlak te verhogen. Via verschillende communicatiekanalen (infoavond, telefoon, filmpjes, presentaties, mail) werden omwonenden tijdig (dus voordat er een definitief plan was) geïnformeerd over het voornemen voor een waterstoftankstation. Aan de orde kwamen de motieven van de initiatiefnemers, eigenschappen van waterstof, beelden van het

tankstation, waterstofauto's, aanvoerroutes, aantal gebruikers, duurzaamheid, risico's en gevaren, besluitvorming en wettelijke procedures.

7.5 Invloed van locatie waterstoftankstations op acceptatie

Resultaten van onderzoek door **Bunzeck c.s.** (2010) laten zien dat zowel in Nederland als in de VS automobilisten bij voorkeur tanken kort na het verlaten van een vertrekpunt. De meeste mensen tanken in gebieden waar ze redelijk vertrouwd mee zijn, bijvoorbeeld dichtbij huis of hun werk. Bovendien tanken mensen vaak op hun dagelijkse reis -zoals bij het woon-werkverkeer- in plaats van op reizen die ze minder vaak doen, bijvoorbeeld om te winkelen. Automobilisten geven de voorkeur aan een tankstation langs hun gebruikelijke route. Waterstoftankstations moeten dus niet alleen langs snelwegen liggen maar ook in de gebouwde omgeving. Ook willen automobilisten alleen maar omrijden als dat gecompenseerd wordt door een lagere brandstofprijs. Daarom kan de hoogste acceptatie worden bereikt, door bestaande tankstations in de gebouwde omgeving waar veel getankt wordt, uit te breiden met een waterstoffaciliteit. Bij de strategische planning van een alternatieve waterstoftankinfrastructuur moet dus de nadruk liggen op belangrijke woon-werkroutes (langs snelwegen of grotere wegen) om tegemoet te komen aan de meest voorkomende eisen van de automobilist en om te compenseren voor de (in eerste instantie) lagere beschikbaarheid van waterstof.

Alleen lokale beschikbaarheid van waterstof is echter niet voldoende: automobilisten hebben tankstations nodig verspreid over het hele land. Dus niet alleen in belangrijke steden of regio's. Nationale dekking van waterstoftankstations is nodig om de angst van mensen om zonder brandstof te raken, weg te nemen. Ook kan de wijdverspreide beschikbaarheid van waterstoftankpunten door consumenten worden geïnterpreteerd als een graadmeter voor het succes van waterstof, omdat veel meer mensen in het hele land kiezen voor waterstof. Verder bleek in dit onderzoek dat autobestuurders de beschikbaarheid van een alternatieve brandstof in het buitenland positief waarderen. De internationale beschikbaarheid maakt internationale reizen met auto's mogelijk. Ook de internationale beschikbaarheid kan door een bestuurder worden geïnterpreteerd als een internationaal succes, waarbij waterstof wordt gezien als een bewezen technologie. Dit kan een extra reden zijn om over te stappen naar waterstofauto's.

De prijs van waterstof en de locatie van de waterstoftankstations zijn de belangrijkste variabelen die het tankgedrag van automobilisten bepalen.

Huétink c.s. (2010) vinden het belangrijk dat bij de locatie van tankstations gekeken wordt naar het gedrag van de consumenten. Die worden in hun gedrag gestimuleerd door wat er in hun omgeving gebeurt. Zij kopen een waterstofauto afhankelijk van hun eigen mate van innovatie en het aantal waterstofauto's in hun buurt. Ook is het beter om een netwerk van tankstations te spreiden over het land dan alleen te focussen op dichtbevolkte gebieden.

7.6 Groene waterstoftankstations in Groningen

In juni 2021 is in de stad Groningen een waterstoftankstation geopend voor de bussen van **Qbuzz** (OOG TV, 2021). Het tankstation is bij een bus stalling. Het is opgezet als een 'besloten' station waar geen andere auto's mogen laden. Qbuzz heeft twintig nieuwe waterstofbussen aangeschaft die gaan rijden in de reguliere dienstregeling van Groningen en Drenthe. De bussen kunnen met een volle tank waterstof ongeveer 400 kilometer rijden en dat is meer dan de actieradius van 200 kilometer die geldt voor de batterij-elektrische bussen. Het waterstoftankstation is gebouwd door **Shell** dat de groen gecertificeerde waterstof in trailers aanvoert. Voor de bouw zijn de benodigde vergunningen verstrekt. Het busstation ligt op een industrieterrein. In het communicatietraject is de omgeving geïnformeerd via een voorlichtingsbijeenkomst van de bedrijvenvereniging, waarbij ook de eigenaar van een nabijgelegen studentencomplex aanwezig was.

In november 2021 heeft **Holthausen** in de stad Groningen een publiek toegankelijk

waterstoftankstation geopend (Dagblad van het Noorden, 3 november 2021). Het is gebouwd door **Resato** en de groene waterstof wordt in tubetrailers aangevoerd of via elektrolyse ter plekke geproduceerd. Dit tankstation gaat ook dienst doen voor de waterstofvoertuigen (totaal 8 bestelbussen en 4 vuilniswagens) die de gemeentes Groningen en Noordenveld, de Gasunie en Century hebben gekocht bij Holthausen. Deze voertuigen zijn omgebouwd tot waterstof-elektrische voertuigen. De **gemeente Groningen** (2018) heeft de doelstelling om in 2035 CO₂-neutraal te zijn. Afgeleide doelstellingen zijn het volledig emissieloos zijn van de bevoorrading van de binnenstad in 2025, emissieloos doelgroepenvervoer in 2023 en emissieloos busvervoer in 2030.

De vestiging van het voor publiek toegankelijk waterstoftankstation heeft geen negatieve reacties opgeleverd. De vergunningsprocedure heeft zo'n 5 jaar geduurd, doordat in overleg met de gemeente eerst gezocht is naar een geschikte locatie. En toen deze gevonden was, bleek niet de gemeente maar de provincie de beoordelende instantie te zijn, omdat op het terrein ook een elektrolyser aanwezig is om waterstof te produceren. Op basis van de literatuur was de verwachting dat er weinig bezwaren zouden zijn tegen de komst van een waterstoftankstation en dat bleek ook zo te zijn. Voor, tijdens en na de bouw waren er geen negatieve berichten in de pers en sociale media. Factoren die hierbij een rol gespeeld hebben:

- de locatie is op een industrieterrein waar geen direct omwonenden zijn;
- er zijn in Nederland al waterstoftankstations die probleemloos functioneren en waar zorgvuldig met veiligheid wordt omgegaan;
- voor waterstoftankstations is een duidelijk veiligheidskader: PGS-35 (hst 3.6);
- Groningen was een witte vlek en er is behoefte aan een landelijk dekkend net van waterstoftankstations;
- in zijn algemeenheid hebben mensen weinig bezwaren tegen een tankstation (hst 7.4);
- in 'Groningen en Ommeland' is een positieve sfeer rond waterstof. Noord-Nederland profileert zich als hydrogeen valley en de gemeente Groningen wil in 2035 energieneutraal zijn. Er rijden bussen en vuilnisauto's op waterstof rond. Onderwijsinstellingen (MBO, HBO en Universiteit) richten onderwijs en onderzoekprogramma's in met waterstof. **EnTranCe** is een proeftuin voor gezamenlijke waterstofprojecten tussen onderwijs en bedrijfsleven. In Hoogeveen en Wagenborgen zijn experimenten om aardgas te vervangen door waterstof om huizen te verwarmen en te voorzien van warmtapwater. In Winschoten is gestart met de productie van waterstofvrachtwagens. Deze initiatieven geven een gevoel van trots. Het is een succes waar mensen graag deel van uitmaken. Het biedt perspectief en nieuwe werkgelegenheid in een regio waar het einde van de aardgaswinning nadert en de expertise van (aard)gas kan worden ingezet voor (waterstof)gas.

7.7 Samenvatting

De algemene opinie in Nederland en Europa staat positief tegenover de waterstoftechnologie, maar de kennis van waterstof is beperkt. Belangrijker dan kennis zijn echter vertrouwen in technologie, zorgen om het milieu en de planeet voor de komende generatie. Het draagvlak voor waterstoftechnologie is in Nederland wel minder geworden door het afnemende maatschappelijke vertrouwen in wetenschap en technologie in zijn algemeenheid.

De communicatie over waterstof kan zich beter richten op concrete voordelen voor het dagelijks leven, dan op de mogelijkheid om elektriciteit in op te slaan. Ook al staan consumenten positief tegenover waterstof, dan hoeft dat niet te betekenen dat ze waterstof gaan gebruiken. Dat hangt ook af van kosten, technologische volwassenheid, beschikbaarheid en aantrekkelijkheid van alternatieven.

Rijden in waterstofauto's wordt vanuit economisch perspectief verklaard door de preferenties, kennis en beschikbaar budget van de consument. Kosten spelen een belangrijke rol bij de aankoopbeslissing. Daarnaast zijn prestaties en gebruiksgemak van belang, maar zijn milieufactoren

weinig belangrijk. Waterstofauto's zijn duur en het aantal modellen waaruit een consument kan kiezen is beperkt. Bovendien zijn er maar weinig tankstations. Desondanks kunnen consumenten kiezen voor een waterstofauto, omdat zo'n auto zelfidentiteit laat zien: interesses, overtuigingen, waarden en sociale status

Consumenten hebben weinig kennis van waterstof, omdat ze er in hun dagelijks leven nauwelijks mee in aanraking komen. Toch heeft de bevolking een zeer positieve houding tegenover waterstofauto's. Met name de mogelijkheid om individueel mobiel te zijn zonder het milieu te schaden is aantrekkelijk. Belangrijk is wel dat de waterstof echt groen is. Acceptatie van waterstof in het vervoer wordt door deskundigen vaak gezien als een veiligheidsprobleem. Maar het woord 'waterstof' wordt maar heel zelden, of helemaal niet, gekoppeld aan termen als gevaar of risico. Geïnterviewden vinden waterstoftankstations niet gevaarlijker vinden dan conventionele tankstations.

In Engeland bleek dat er in zijn algemeenheid weinig verzet is tegen de komst van waterstoftankstations, maar dat gebeurde wel als er al gedoe en wantrouwen was. Vergroten van kennis is de sleutel voor publieke acceptatie. Een positieve benadering is belangrijk en de communicatie moet zich op een breed publiek richten. In Noorwegen bleken omwonenden positiever te staan tegenover de komst van een waterstoftankstation. Dat kan verklaard worden door steun van milieuactivisten en door positieve aandacht in de pers. Met name direct-omwonenden kregen het gevoel dat ze onderdeel waren van een belangrijk project. Meer kennis leidde echter enerzijds tot minder acceptatie, maar anderzijds tot meer milieubewustzijn en daardoor weer tot meer acceptatie. Acceptatie van waterstof tanken en rijden kan ook bevorderd worden door mensen zelf te laten rijden en tanken met waterstof.

Bij de psychologische verklaring voor de maatschappelijke acceptatie van een waterstoftankstation blijken morele overwegingen belangrijker te zijn dan kosten-baten afwegingen. Meer informatie leidt niet altijd tot meer draagvlak. Het draagvlak kan vergroot worden door strenge veiligheidsnormen, door eisen te stellen aan de herkomst van waterstof en door een zorgvuldige locatiekeuze voor een waterstoftankstation. Voor draagvlak is vertrouwen nodig op basis van open, eerlijke en vroegtijdige communicatie met alle betrokkenen. Belangrijk is ook, wie communiceert. Het vertrouwen is groter in de milieubeweging dan in de overheid en het bedrijfsleven.

Het draagvlak voor een waterstoftankstation wordt sterker beïnvloed door psychologische factoren als positieve (vreugde, trots) en negatieve (boosheid, angst) emoties dan door objectieve factoren als sociaal-demografische variabelen, baten voor het milieu en energiezekerheid. Er is weinig weerstand te verwachten tegen de komst van een waterstoftankstation, maar er is ook weinig positieve steun. Omdat het verzet van enkelen wel negatieve invloed kan hebben, moet er zo vroeg mogelijk, op een open en eerlijke manier met bewoners worden gecommuniceerd.

In de communicatie moet een evenwichtige balans gevonden worden tussen de positieve en negatieve gevolgen van de vestiging van een waterstoftankstation. Acties die het positieve gevoel versterken en het negatieve gevoel verminderen leiden tot meer draagvlak en minder weerstand. Mensen die bij een waterstoftankstation wonen, zijn na implementatie positiever dan ervoor. De weerstand tegen tankstations in zijn algemeenheid is in Nederland laag. Dat bleek ook bij de komst van twee waterstoftankstations in de stad Groningen.

Acceptatie van waterstofrijden wordt gestimuleerd door aan te sluiten bij het tankgedrag van automobilisten. Omdat de meeste mensen tanken in een vertrouwde omgeving wordt de hoogste acceptatie bereikt door bestaande tankstations -verspreid over het hele land- uit te breiden met een waterstofpomp. Als er meer waterstoffaciliteiten zijn in binnen- en buitenland kan dat ook gezien worden als een succesindicator, waardoor vooral innovatieve automobilisten worden gestimuleerd om te rijden op waterstof.

8 Elektrisch rijden op waterstof en op batterijen

8.1 Inleiding

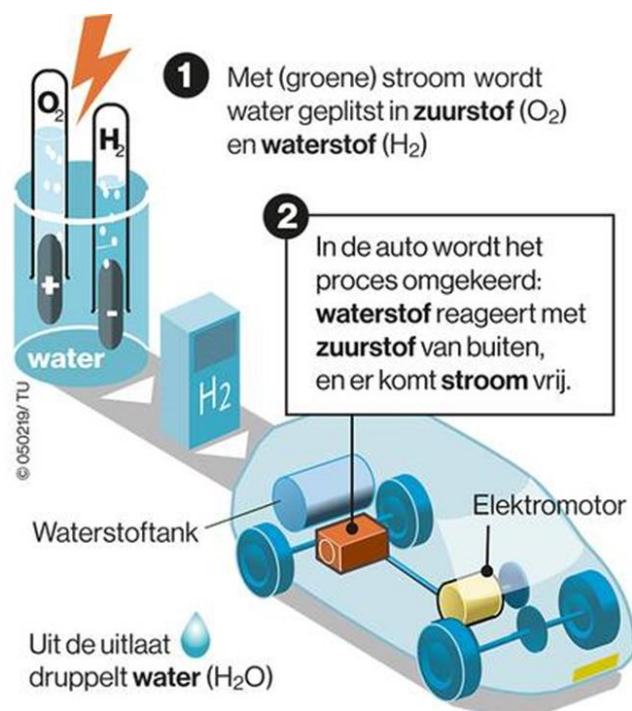
In Nederland moeten in het komende decennium alle nieuw verkochte personenauto's emissieloos zijn. Dat kan met waterstofauto's en batterijauto's. Beide vormen van elektrisch rijden worden in de volgende paragraaf met elkaar vergeleken. Wat zijn de voor- en nadelen van deze opties? Vervolgens komen de toename van het aantal elektrische auto's en de daarbij behorende infrastructuur aan de orde. Onderzoeken naar de populariteit van elektrisch rijden worden besproken naast de argumenten om al dan niet elektrisch rijden. Tenslotte wordt dieper ingegaan op de kosten van elektrisch rijden gedurende de hele leeftijd van de auto (life cycle analysis) en de gevolgen ervan voor het milieu, zoals klimaatverandering en grondstofuitputting.

8.2 Vergelijking tussen waterstofrijden en batterijrijden

Er zijn twee belangrijke vormen van elektrisch rijden: elektrisch rijden op accu's in batterijauto's en rijden met brandstofcellen op waterstof in waterstofauto's. Naast deze volledig elektrische auto's zijn er nog auto's die zowel een batterij als een verbrandingsmotor hebben, zoals elektrische auto's met een range extender (deze rijden op een brandstofmotor als de batterij leeg is) en de hybride auto's met of zonder plug-in stekker. Ook kan waterstof als brandstof dienen in een speciale verbrandingsmotor. Deze mogelijkheden blijven verder buiten beschouwing.

Batterijauto's en waterstofauto's rijden allebei op een elektromotor. Bij een batterijauto komt de elektriciteit die de elektromotor voedt uit een batterij, die kan worden opgeladen met stroom uit het elektriciteitsnet. In een waterstofauto komt de elektriciteit uit een brandstofcel waar waterstof uit de tank met zuurstof uit de buitenlucht wordt omgezet in elektriciteit. Tijdens het rijden komt uit de uitlaat alleen maar water en geen CO₂, stikstof of fijnstof.

In onderstaande tekening wordt de werking van een waterstofauto uitgelegd:



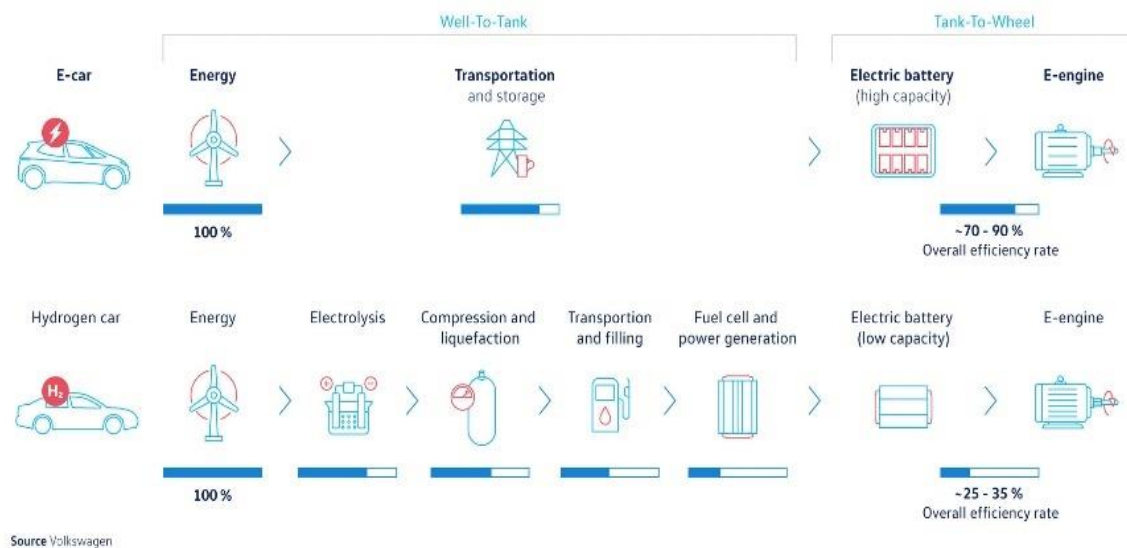
Bron: Algemeen Dagblad (AD) 15-02-2020.

Een groot verschil in beide vormen van elektrisch rijden is de efficiëntie: het is efficiënter om elektriciteit meteen in een batterijauto te laden, dan om eerst uit elektriciteit waterstof te produceren en deze waterstof te laden in de batterijcel van een waterstofauto. Bij deze omzettingen gaat veel energie verloren. Er is ruwweg drie keer zoveel groene elektriciteit nodig voor waterstofauto's dan voor batterijauto's om dezelfde afstand af te leggen.

Onderstaande afbeelding (Volkswagen, 2020) geeft een duidelijk beeld van de efficiëntie. De E-car (batterijauto) heeft een overall efficiency van 70-90% en de hydrogen car (waterstofauto) komt niet verder dan 25-35%. De well-to-wheel-efficiency heeft betrekking op het autorijden inclusief het hele productieproces om energie te produceren en kan worden opgesplitst in well-to-tank (het productieproces) en tank-to-wheel (het rijden).

Hydrogen and electric drive

Efficiency rates in comparison using eco-friendly energy



Volkswagen (2020) concludeert dat een waterstofauto dus twee tot drie keer meer elektriciteit gebruikt dan een batterijauto. Omdat de schaarse groene elektriciteit zo efficiënt mogelijk gebruikt moet worden, vindt Volkswagen het verkeerd om van groene elektriciteit waterstof te maken en dat te gebruiken voor personenauto's.

Ook **Schrödl** (2019) ziet waterstof niet als een geschikte energiebron voor individueel personenvervoer: een groene waterstofauto heeft 2,4 keer meer energie nodig dan een batterijauto. En als waterstof uit aardgas wordt gemaakt, is de CO₂-uitstoot niet minder dan van benzine of diesel.

Volkens (2021) laat zien dat de elektromotor op het gebied van efficiëntie niet te verslaan is door een benzine- of een dieselmotor. Uit onderstaande tabel blijkt dat de tank-to-wheel efficiency van een benzinemotor op zo'n 29% ligt en van een dieselmotor op 32%. Voor een waterstofauto met brandstofcel is het rendement 40% en voor batterijauto's 90%.

Uit de tabel blijkt verder dat de CO₂-uitstoot van elektrische auto's (zowel voor well-to-wheel als well-to-tank) veel lager is dan van fossiele auto's als de gebruikte elektriciteit groen is (zie verder hoofdstuk 7.4).

EFFICIENCYGRAAD EN CO₂-EMISSIE VAN DE AANDRIJFSOORTEN

AANDRIJFSOORT	BRANDSTOF	PRODUCTIEWIJZE	ENERGIEBRON	CO ₂ -EQUIVALENT in gram per kilometer			EFFICIENCYGRAAD in %
				WT	TW	WT + TW = WW	TW
Benzinemotor	benzine	raffinage	aardolie	24	140	164	29 benzine / 32 aardgas
	CNG	conditionering	aardgas	15	126	141	
Dieselmotor	diesel	raffinage	aardolie	24	128	152	32
	biodiesel	verestering	koolzaad	-50	133	83	
Hybride-aandrijving (benzinemotor)	benzine	raffinage	aardolie	20	120	140	33
Elektromotor (brandstofcel)	waterstof	elektrolyse	Europese stroommix	196	0	196	40
			windstroom	5	0	5	
Elektromotor (Li-Ion-accu)	stroom	elektriciteitscentrale	Europese stroommix	87	0	87	80
			windstroom	2	0	2	

Bron: (BMW), eigen metingen; WT = Well-to-Tank, TW = Tank-to-Wheel, WW = Well-to-Wheel

Ontleend aan Autoweek 24 juli 2021.

Rijpert en Groenhuijsen (2016) voorspelden dat we aan de vooravond staan van de grote doorbraak van elektrisch rijden. In de transitie naar emissieloos vervoer is de waterstofauto een concurrent van de batterijauto. De voordelen van de waterstofauto zijn het grotere bereik (range) en het korte tijdsbestek waarin kan worden getankt. De waterstofauto wordt dan ook gezien als de beste van de twee opties wanneer er vaak veel kilometers moeten worden gereden. De grootste nadelen van de waterstofauto zijn de lagere efficiëntie wanneer de waterstof wordt verkregen door middel van elektrolyse naast het gebrek aan tankinfrastructuur en de hoge prijs van de brandstofcellen. De beide technologieën hoeven elkaar zeker niet uit te sluiten, maar de waterstofauto staat al wel op achterstand. En met de snelle ontwikkelingen in batterijrijden lijken de grootste nadelen van de batterijauto (kosten batterij, beperkt bereik en lange oplaadtijd), binnen afzienbare tijd te verdwijnen.

Volgens **Shell** (2018) zijn op dit moment de aanschaf- en brandstofkosten van waterstofauto's nog niet concurrerend. Maar in een ambitieus klimaatactie-scenario met snelle technologische vooruitgang en schaafeffecten in productie en marktontwikkeling, kan waterstof voor auto's op korte termijn veel kosteneffectiever worden. Tegelijkertijd worden voertuigen met fossiele verbranding duurder door een complexere uitlaatgasbehandeling. Met name in stedelijke en grootstedelijke gebieden worden door strengere regels voor luchtkwaliteit en uitlaatemissies waterstofauto's steeds aantrekkelijker in vergelijking met personenauto's met fossiele verbrandingsmotoren. Zodra de aanschafkosten van waterstofauto's meer in de buurt komen van batterijauto's, bieden waterstofauto's een echt alternatief voor batterijvoertuigen. Dat komt, omdat waterstofauto's extra voordelen bieden, zoals meer comfort, een groter bereik en kortere oplaadtijden. Ook zijn er geen (zware) accu's nodig die ruimte innemen. Als batterijvoertuigen worden verbeterd in termen van comfort, bereik of oplaadtijd, worden ze duurder en verliezen hun economisch voordeel ten opzichte van waterstofauto's. **Shell** ziet dat de ontwikkeling van tankinfrastructuur in de afgelopen jaren aanzienlijk versneld is en verwacht een kostenreductie in de orde van 50% voor de komende jaren, dankzij wettelijke en technische standaardisatie en schaafeffecten. Desalniettemin bestaat er een risico op aanzienlijke onderbenutting aan het begin van de groeifase van de markt. Er is dus in de vroege ontwikkelingsstadia financiële ondersteuning nodig voor uitbreiding van de infrastructuur. De (Contouren van de) Routekaart Waterstof (**TKI Nieuw Gas** 2018) geeft aan dat waterstofauto's en batterijauto's vooral complementair zijn: batterijauto's zijn een goed alternatief voor benzineauto's en waterstof is vooral interessant voor diesellootvoertuigen. Daarnaast kunnen bij waterstof grotere hoeveelheden snel worden getankt zonder hoge kosten voor versterking van de elektrische infrastructuur. De Routekaart ziet voor waterstof toepassingen met grote potentie op het gebied van goederenvervoer (variërend van bestelauto's tot zware vrachtwagens, die bijvoorbeeld gebruikt worden voor goederendistributie van grote supermarkten), vuilniswagens, veegwagens, heftrucks,

hefwerktuigen en toepassingen in de scheepvaart en openbaar vervoer.

Het **KPMG**-rapport Global Executive Survey 2018 (KPMG 2018) geeft aan dat in totaal 55 procent van de deelnemers aan hun onderzoek (directeuren in de internationale automobielsector) verwacht, dat batterijauto's op termijn last krijgen van gebrek aan laadinfrastructuur. De meeste ondervraagde directeuren verwachten dat de waterstofauto de batterijauto inhaalt rond 2025. De batterijauto is dus een tussenoplossing. Volgens **KPMG** introduceren autobedrijven batterijauto's vooral om door de overheid opgelegde emissienormen te halen. De directeuren hopen dat waterstoftechnologie spoedig doorbreekt. Die technologie is er al, alleen de beschikbaarheid van waterstof is niet optimaal. Bovendien wordt bijna alle waterstof opgewekt met fossiele energie en dat kan niet in een CO₂-neutrale toekomst. Waterstof kan wel groen worden geproduceerd met zon- of windenergie, maar dat is duurder. Een andere kanttekening is dat waterstofauto's drie keer minder efficiënt zijn dan batterijauto's. Het tankproces bij waterstof is hetzelfde als bij een benzineauto en een waterstofauto heeft maar een klein accupakket, waarvan de productie maar een beperkte invloed op het milieu. Verder is de vraag of er wel voldoende stroom is voor iedereen, als straks miljoenen batterijauto's willen laden.

In 2025 zullen alle nieuw instromende OV- bussen zero-emissie zijn, zodat in 2030 alle ongeveer 5.000 OV-bussen emissieloos zijn (**RVO** 2018). Na 2025 is naar verwachting de markt voor batterij-elektrische bussen volwassen. Voor waterstofbussen zijn in 2025 ook flinke sprongen gemaakt zijn en in datzelfde jaar is 50% van de taxi's zero-emissie zijn. In Nederland mogen nieuw verkochte auto's vanaf 2035 geen CO₂ meer uitstoten.

In Groningen rijdt **Qbuzz** met waterstofbussen en elektrische batterijbussen. Stadsbussen rijden op batterijen en waterstofbussen worden ingezet op langere trajecten waar minder laadfaciliteiten zijn. Ook bij vervanging van dieseltreinen is waterstof een optie. In Duitsland rijdt sinds september 2018 in Nedersaksen een waterstoffrein (**Spoorpro** 2018a)m. In Friesland en Groningen wordt geëxperimenteerd met waterstoffreinen (**Spoorpro** 2018b). Verder is er belangstelling vanuit steden om vuilniswagens en veegwagens op waterstof te laten rijden. Het zijn geen grote maar wel belangrijke markten die kunnen bijdragen aan acceptatie van waterstof vanwege de zichtbaarheid ervan en de rol die ze vervullen (schoonmaken) binnen de gebouwde omgeving.

Het **Planbureau voor de Leefomgeving** (**PBL** 2018) geeft aan dat veel consumenten nog huiverig zijn om een elektrische auto te kopen, vooral, omdat ze duur zijn in aanschaf, een beperkte actieradius hebben en het opladen tijd kost en niet overal mogelijk is. Maar er komen in de nabije toekomst steeds meer goedkopere elektrische modellen op de markt met een grotere actieradius. Op basis van de huidige ontwikkeling zijn dat geen waterstofauto's zijn maar vrijwel uitsluitend batterijauto's. Volgens het **PBL** heeft de ontwikkeling van waterstofauto's tijd nodig om als technologie marktrijp te worden. Ook is de productieprijs van groene waterstof in alle gevallen hoger dan die van (hernieuwbare) elektriciteit. Om groene waterstof te maken, is immers bovenop de groene stroom nog omzetting via elektrolyse nodig. Waterstofauto's zouden op langere termijn een technologische inhaalslag kunnen maken, waardoor het brandstofprijnsverschil verkleind wordt en de ervaren pluspunten van waterstofauto's dit prijsverschil rechtvaardigen. Het **PBL** vindt dat het stimuleren van waterstofauto's het voordeel heeft dat er meerdere opties worden opengehouden maar dat er ook risico's zijn. Het gevaar bestaat namelijk dat waterstof een desinvestering is, omdat de elektrische auto al veel verder is om een aantrekkelijk product te worden voor de consument. Verder vergroot het stimuleren van waterstof de onzekerheid bij de consument om over te stappen op niet-fossiele brandstof. Het risico bestaat dus dat investeren in waterstof de overgang naar elektrisch rijden belemmert.

Op basis van een theoretische studie waarbij 20 miljoen voertuigen in Duitsland op waterstof of batterijen rijden concludeert het **Jülich Research Center** (**Robinius Martin c.s.** 2018) dat de infrastructuurkosten voor waterstofauto's op lange termijn lager uitvallen dan voor batterijauto's. Dit

resultaat is in tegenspraak met de gangbare mening dat er al een elektrische infrastructuur is om elektrische auto's op te laden, terwijl de infrastructuur voor waterstof nog gebouwd moet worden. Dit maakt de investeringskosten voor waterstof aanvankelijk hoger dan voor elektriciteit. Toch zijn de kosten van waterstofinfrastructuur uiteindelijk lager. Uitgaande van 20 miljoen voertuigen, kost de elektrische infrastructuur € 51 miljard, terwijl dat bij waterstof € 40 miljard is. Dat de waterstofinfrastructuur uiteindelijk minder kost, is deels te danken aan effectiever gebruik. Zodra de waterstofinfrastructuur er eenmaal staat, kan deze veel beter worden gebruikt, omdat de vultijden veel korter zijn dan bij het opladen van batterijen. Dus om al die 20 miljoen auto's te bedienen, is minder infrastructuur nodig dan bij de batterijvariant. En als de elektrische infrastructuur 20 miljoen auto's voldoende vermogen moet leveren, dan vergt dat ook enorme investeringen. Een batterijauto is echter efficiënter dan een waterstofauto. Het omzetten van elektriciteit naar waterstof en terug naar elektriciteit brengt namelijk grote energieverliezen met zich mee (de efficiëntie van die keten is ongeveer 45%). Aan de andere kant wordt waterstof vooral geproduceerd wanneer er een overschot is aan goedkope elektriciteit en dus zijn er lagere infrastructuurkosten. Het resultaat van dit alles is, dat de kilometerprijs van beide typen ongeveer gelijk is aan 4,5 eurocent per km.

De onderzoekers concluderen dat zowel elektrisch laden als waterstof tanken van groot belang is voor het realiseren van koolstofarme, schone en op hernieuwbare energie gebaseerde transportconcepten. Een slimme en complementaire combinatie van elektrisch laden en waterstof tanken kan de kracht van beide combineren en niet-duurzame oplossingen met een lage relevantie of efficiëntie voorkomen. Profiteren van opties, zoals het 's nachts opladen van accu's, het gebruiken van batterijvoertuigen voor reizen over korte afstanden en het voldoen aan de uitdagingen bij langeafstands- en zwaar transport door waterstofvoertuigen kan gunstig zijn voor systeemoplossingen. Een hybride strategie voor de uitrol van beide infrastructuren helpt om de energie-efficiëntie te maximaliseren en het gebruik van hernieuwbare energiebronnen te optimaliseren, waardoor de CO₂-uitstoot tot een minimum wordt beperkt. Terwijl elektrische laadinfrastructuur hogere efficiëntie mogelijk maakt, maakt de uitrol van waterstofinfrastructuur voor transport verdere grootschalige toepassingen mogelijk in andere sectoren, zoals de industrie. Door het ontwikkelen van een waterstofinfrastructuur kan koppeling tussen verschillende sectoren tot stand gebracht worden.

Bij de afweging tussen rijden met batterijen of rijden op waterstof moet dus een afweging worden gemaakt tussen de extra kosten van het elektriciteitsnetwerk (verzwaren en uitbreiden) en de kosten van de waterstof 'omweg'.

Horlings (2018) wijst erop dat een nadeel van waterstof tanken is dat bij iedere tankbeurt de interne druk een beetje daalt. Nadat een paar auto's hebben getankt, moet die druk worden hersteld. Een volgende auto moet daardoor dertig minuten wachten. Als er veel waterstofauto's rondrijden wordt de tankinfrastructuur een serieuze uitdaging. Ook geeft **Horlings** aan dat het bouwen van waterstankstations duur is. Als waterstof in alle fossiele auto's zou worden toegepast, dan zouden er minstens 4000 tankstations nodig zijn en dat vergt een investering van € 6 miljard. Het is dan veel goedkoper om laadpalen en snellaadpunten te bouwen dan waterstofstankstations.

Steinbuch (2018) vindt dat waterstof hard nodig is voor de energietransitie. Duurzame energie kan worden opgeslagen in waterstof en daardoor voorzien in de industriële vraag naar waterstof. Voor scheepvaart en zwaar transport ziet hij mogelijkheden maar niet voor het personenvervoer. De aanschaf, het gebruik en het onderhoud van waterstofauto's zijn duurder dan van batterijauto's, en het is feitelijk ook een verspilling van duurzame energie. Voor 100 km rijden is namelijk 1 kg waterstof nodig en om dat te produceren is 75 kWh aan energie nodig is. Voor een batterij-elektrische auto is voor 100 kilometer rijden ongeveer 25 kWh nodig. Het rijden met waterstof kost dus driemaal zo veel energie als met een batterijauto. Ook zorgen toekomstige prijsdalingen van batterijen vrijwel niet voor een lagere aanschafprijs van de waterstofauto. Tenslotte verwacht hij dat

door een complexere aandrijflijn de onderhoudskosten stijgen. De belangrijkste voordelen van waterstofrijden zijn de actieradius en de snelheid van tanken. Deze voordelen zijn niet van toepassing wanneer mensen thuis hun batterijauto opladen en door de ontwikkeling van snelladers, waardoor je in 10 minuten genoeg kunt laden voor ruim 300 km.

Volgens **Natuur&Milieu** (2019) is elektrisch rijden niet langer een futuristisch concept. Het is hier en nu, en voor iedereen. Er is een geleidelijk overgang naar deze nieuwe manier van vervoeren. Schoner, stiller en met minder CO₂-uitstoot: dus beter voor onze planeet. Elektrische auto's stoten 40 procent minder CO₂ uit dan benzine- of dieselauto's en dus verbetert de luchtkwaliteit. Ook in de overgang naar duurzaam energiegebruik is de auto een belangrijke schakel. De accu's van elektrische auto's lenen zich perfect voor de opslag van deze energie. Duurzaam opgewekte energie kan bewaard worden voor momenten waarop er weinig opgewekt wordt. Zo kan ook in een windstille nacht gebruik worden gemaakt van zon- en windenergie. Elektrische auto's zijn relatief duur in aanschaf, maar goedkoop in gebruik. Elektriciteit is immers veel voordeliger dan benzine of diesel en daarnaast heeft een elektrische auto veel minder onderhoud nodig. Bij rijden op waterstof moet eerst uit energie waterstof worden geproduceerd, waarna die waterstof in de auto weer naar elektriciteit moet worden omgezet. Bij het twee keer omzetten van de energie treedt tot wel 60% energieverlies op. Een batterijauto geeft een beter rendement, omdat die omzetting niet plaats hoeft te vinden. Omdat groene waterstof nog maar beperkt beschikbaar is, moet deze worden ingezet in sectoren die niet snel op een andere manier hun CO₂-uitstoot kunnen verkleinen, zoals de industrie en vrachttransport. **Natuur&Milieu** noemt het een mythe dat de batterijauto tijdelijk is en we uiteindelijk allemaal op waterstof gaan rijden. Personenauto's kunnen met batterijen al elektrisch rijden en moeten dus niet op waterstof gaan rijden. Bovendien is de CO₂-uitstoot van waterstofauto's hoger dan van batterijauto's door het hogere elektriciteitsverbruik (Natuur&Milieu 2017).

Het Klimaatakkoord (**Sociaal Economische Raad** 2018) formuleert voor 2025 de ambitie van 50 waterstoftankstations, 15.000 waterstofpersonenauto's en 3.000 zware waterstofvoertuigen als strategische basis voor een versnelde groei richting 2030 en met name 2050. De Rijksoverheid stimuleert de verduurzaming van de eigen vloot door de inzet van schone voertuigen, duurzame energiedragers en het programma 'Duurzaam Inkopen'. Met een uitgebreid pakket aan maatregelen wordt de groei van elektrisch autorijden gestimuleerd met de daarbij noodzakelijke laadinfrastructuur.

Bij de aankoop van een auto spelen volgens het **Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid** (2020) zowel bewuste, situationele en rationele overwegingen (zoals de kosten, actieradius en laadtijd) als onbewuste, emotionele en sociale overwegingen een rol. Bij emoties gaat het om de overstap van het bekende fossiele rijden naar het onbekende elektrische rijden. Voorbeelden van negatieve emoties bij elektrisch rijden zijn 'actieradius-angst' en 'laadkoorts-angst'. Angsten dat door de beperkte actieradius de bestemming niet bereikt kan worden en negatieve gevoelens over de zoektocht naar een laadlocatie, de laadtijd en de laadkosten. Gebruikservaring, zoals een testrit, kan tot een positiever beeld van elektrische rijden leiden. De aankoop van een elektrische auto kan status geven door de positieve impact op het milieu. Ook het vooroplopen met een innovatieve technologie is een aanschafmotief. Bij sociale argumenten kijken mensen naar wat 'de meeste mensen' doen en conformeren ze zich daaraan. Wanneer er meer elektrische auto's op de weg komen, worden ze 'normaler'. Positieve uitingen van opinieleiders kunnen bijdragen aan de populariteit van elektrisch rijden. Bij het kopen van een auto is sprake van een bureneffect als consumenten zich laten beïnvloeden door de aankopen in hun directe omgeving (buren en bekenden). In de **theorie van Rogers** (1983) verloopt de marktpenetratie van een innovatief product als elektrisch rijden in het algemeen in stappen, via verschillende gebruikersgroepen. De mensen die als eerste een nieuw, innovatief, product aanschaffen zijn de 'innovators'. Mensen die nu al een

elektrische auto hebben aangeschaft behoren over het algemeen tot deze groep. De later hierop volgende groepen heten: pioniers, voorlopers, achterlopers en achterblijvers.

Het **Kennisinstituut** verwijst voor beleidsmaatregelen naar een **interventieladder (Nuffeld Council on Bioethics 2007)**, waarbij de onderste trede bestaat uit 'niets doen of de situatie monitoren'. Van beneden naar boven volgen daarna:

- 'overreding (waaronder informeren, het verruimen van keuzen en framing)';
- 'financiële instrumenten, zoals subsidies en fiscale maatregelen (zowel incentives voor elektrische voertuigen als discentives voor auto's met verbrandingsmotor) en privileges voor elektrische auto's, zoals toegang tot speciale rijstroken (e-lanes) of korting op parkeertarieven';
- 'maatregelen waardoor keuzen worden beperkt, of zelfs helemaal geëlimineerd, zoals normering, geboden/verboden en milieuzones.'

Het **Kennisinstituut** ziet voor het overheidsbeleid vooral perspectief in de lagere treden van de interventieladder: overreding en positieve financiële incentives. Dus meer in de 'zachtere' kant van het beleidsspectrum op basis van vrijwilligheid en minder in de 'hardere' kant met dwang.

Een bijzonder voordeel van elektrische auto's is dat ze onderdeel kunnen worden van een groter innovatief energiesysteem en kunnen meehelpen het elektriciteitsnet te stabiliseren. Naarmate er meer gebruik gemaakt wordt van zon en wind voor de elektriciteitsvoorziening, is er meer back-up nodig voor de momenten waarop het niet waait en het bewolkt is. Batterijauto's kunnen worden opgeladen wanneer er een overschot aan elektriciteit is en worden ontladen bij een tekort. Met blockchaintechnologie worden elektrische auto's ingezet om het hoogspanningsnet in balans te houden en om opstoppingen (congestie) in het hoogspanningsnet te voorkomen. Hierdoor kun je met een elektrische auto geld verdienen (**TenneT 2019**).

Uit het rapport "**De waterstofauto en de automobilist**" (2020) van **Koninklijke Nederlandse Automobil Club (KNAC)** en **Bovag** blijkt dat de waterstofauto door een ruime meerderheid van de automobilisten gezien wordt als een interessant alternatief voor batterij-elektrische auto's en auto's die rijden op benzine, diesel of gas. De redenen die hiervoor genoemd worden zijn: geen zware accu nodig, geen CO₂-uitstoot en snel tanken. De nadelen van waterstofrijden zijn: onvoldoende tankstations, vraagtekens bij de veiligheid van waterstof omdat het explosief is, de nog niet groene productie van waterstof, de hoge kosten en de trage ontwikkeling van de infrastructuur.

De genoemde voor- en nadelen verschillen wel enigszins voor de groepen uit het onderzoek, te weten het algemeen publiek, KNAC-leden en leaserijders. Het algemeen publiek en de leaserijders noemen vooral milieu gerelateerde zaken, zoals geen CO₂-uitstoot en luchtverontreiniging, als belangrijkste voordelen van de waterstofauto. KNAC-leden daarentegen hebben vooral oog voor het gebruikersgemak, zoals snel tanken en een grote actieradius. Een beter netwerk van waterstoftankstations is een absolute voorwaarde voor alle respondenten: ruim driekwart haakt af als er langer dan vijftien minuten gereden moet worden van hun huis naar een tankstation.

De **Raad voor Leefomgeving en Infrastructuur (2021)** geeft aan dat bij vergelijking tussen waterstofrijden en batterijrijden in verschillende studies twee factoren van doorslaggevende belang zijn. De eerste factor is dat het opladen van batterijen relatief veel tijd kost, waardoor batterijwagens een deel van de dag niet kunnen rijden. Dat is nadelig voor wagens in de logistiek, die continu beschikbaar moeten zijn. Voor personenauto's is dit aspect vaak minder relevant. De tweede factor is het energieverbruik in combinatie met de mogelijkheid om te tanken. Doordat batterijen relatief veel ruimte innemen kan er minder energie worden opgeslagen. Naarmate een wagen meer energie verbruikt en minder vaak de mogelijkheid heeft om te tanken, wordt dit in sterkere mate een beperkende factor. Hierdoor zijn batterijen minder geschikt voor zwaar vrachtvervoer over lange afstanden, maar wel geschikt voor personenauto's.

De Routekaart Waterstof (**NWP 2022**) geeft als mijlpalen voor 2025 dat er 50 waterstoftankstations zijn gerealiseerd, dat er tussen 10.000 en 15.000 waterstof-personenauto's en lichte commerciële

voertuigen (inclusief bestelbusjes en taxi's) en tussen 500 en 800 waterstoftrucks en andere zware voertuigen op de weg zijn in Nederland. Voor 2030 moeten er een landelijk dekkend netwerk van waterstoftankstations voor verschillende modaliteiten kan worden gerealiseerd. Het gaat dan om 200 tankstations (waarvan 50 XL voor het zwaar transport). Ook neemt het aantal modellen neemt, er zijn meerdere voertuigenfabrikanten, er zijn 40.000 tot 75000 waterstof-personenauto's en lichte commerciële voertuigen (inclusief bestelbusjes, taxi's en bakwagens) en 5.000 tot 10.000 waterstoftrucks voor het zwaar transport op de weg in Nederland. Belangrijk voor de eindgebruiker is dat de 'Total Cost of Ownership (TCO)' in lijn ligt met beschikbare alternatieven. Zo'n TCO stimuleert daarmee de hele keten, van productie tot eindgebruik. De betrokken partijen (voertuigfabrikanten, tankstation exploitanten en de overheid) moeten duidelijkheid bieden over hun tijdspaden voor de introductie en opschaling van voertuigen en de uitrol van productiefaciliteiten, zodat de overheid daarop kan anticiperen met beleid en ondersteunend instrumentarium.

8.3 Ontwikkelingen elektrisch rijden

Het aantal waterstoftankstations in de wereld neemt toe. In 2013 waren er 224 in bedrijf verspreid over 28 landen: 43% in Noord- en Zuid-Amerika, 34% in Europa en 23% in Azië. In Europa waren de meeste in Duitsland: 22 stuks (Alazemi & Andrews 2015). In december 2010 werd in Arnhem het eerste publiekelijk toegankelijk waterstoftankstation geopend. Dat werd weer gesloten en in 2017 heropend (Gelderlander 2018). In november 2022 waren er tien openbare waterstoftankstations in Nederland en 13 'in realisatie' (H₂Platform november 2022).

Volgens het **RVO** (2022) reden er in Nederland in juli 2022 bijna 450.000 elektrische personenauto's waarvan circa 2/3 volledig elektrisch en 1/3 hybride. Er waren 563 waterstofauto's. Ruim 5% van personenauto's rijdt elektrisch. Er waren bijna 100.000 laadpunten. Voor een overzicht van aantallen elektrische auto's, zie bijlage 10.

Sinds 2017 publiceert de **ANWB** jaarlijks een Monitor over elektrisch rijden (ANWB 2017-2021). Uit de monitor van 2021 blijkt dat nog maar 4% van de Nederlanders elektrisch rijdt, maar dat steeds meer Nederlanders bekend zijn met het fenomeen, want als de huidige auto vervangen moet worden is een elektrische auto steeds vaker een serieuze optie. Nederlanders hebben een steeds duidelijkere mening over elektrisch rijden (geïnteresseerd: 36%, neutraal: 34% en ongeïnteresseerd: 30%). Voor geïnteresseerden komt het aanschafmoment steeds dichterbij. De verwachting is dat elektrisch rijden de toekomst is. De redenen waarom mensen een elektrische auto kopen: vanwege het milieu (35%), nooit meer hoeven tanken (32%), voordelig in gebruik (31%), rijeigenschappen (24%), voorbereid op techniek van de toekomst (23%) en kunnen rijden op eigen energie (23%). In de afgelopen 5 jaar is de milieufactor minder belangrijk geworden en zijn de argumenten om 'nooit meer te hoeven tanken' en 'voordelig in gebruik' stabiel. 'Het kunnen rijden op eigen energie' is voor het eerst in 2021 meegenomen en blijkt voor bijna 1/4 van de mensen een belangrijk argument te zijn. De redenen om geen elektrische auto te rijden: te duur in aanschaf (51%), huidige auto nog niet aan vervanging toe (31%), actieradius onvoldoende (29%), te weinig laadpunten (27%), zorgen over kwaliteit/levensduur van de accu (26%) en geen mogelijkheid om te laden (21%). De actieradius is in de afgelopen 5 jaar als barrière minder belangrijk geworden. De gemiddelde kilometerprijs van een elektrische auto is inmiddels lager dan van een benzineauto maar toch blijft de hoge aanschafprijs met afstand de grootste drempel.

De kopgroep van elektrische rijders in de particuliere sector zijn Nederlanders met een privé parkeerplaats. Bij hen wegen de 'kosten' en 'de oplaadinfrastructuur' minder zwaar. Het merendeel van de Nederlanders rijdt in een occasion. Zij ervaren 'de hoge aanschafprijs' als een belangrijke barrière en zijn onbekend met de stimuleringsmaatregelen van de overheid. De **ANWB** ziet een grotere bekendheid en vergroting van het aanbod van betaalbare elektrische auto als prikkels om het elektrisch rijden te stimuleren. De **ANWB** adviseerde in een eerdere monitor om de kleine groep die

al elektrisch rijdt in te zetten als promotor. Verder vond de **ANWB** dat de overheid duidelijker moet communiceren over de subsidiemogelijkheden, omdat subsidies een positief effect hebben op de aanschaf van elektrische auto's.

Het **Ministerie van Economische Zaken en Klimaat** kwam in de Publieksmonitor Klimaat en Energie (2019) tot de volgende barrières voor mensen die niet elektrisch rijden: mijn huidige auto rijdt nog prima (43%), ik denk dat een elektrische auto te duur voor mij is in aanschaf (36%), ik rijd geen auto: heb geen auto of rijbewijs (22%), met een elektrische auto kan ik minder ver rijden (zonder op te laden onderweg) (19%), een elektrische auto is niet geschikt voor vakantie (13%).

Aanleidingen voor mensen die wel elektrisch rijden: omdat het prettiger rijdt dan een gewone auto (24%), omdat het helpt klimaatverandering tegen te gaan (21%), omdat ik het altijd al deed (14%), omdat het kopen van een elektrische auto niet duurder was dan een gewone auto (13%), omdat elektrisch rijden goedkoper is dan rijden op benzine (11%)

Stimulans top 5 voor twijfelaars (mensen die zeker wel of denken wel elektrisch te willen rijden) zijn: als elektrische auto's niet duurder zijn dan gewone auto's in aanschaf (53%), als het mogelijk wordt om langere afstanden af te leggen op de accu (40%), als elektrisch rijden goedkoper wordt dan rijden op benzine (40%), als er meer laadpalen komen (24%), als er subsidie voor is (21%).

In Nederland was zowel in 2019 als in 2020 een batterijauto (Tesla 3) de bestverkochte auto van het jaar (RVO 2021). Ook de Volkswagen ID.3 was populair in 2020. Voor leaserijders is vooral de fiscale bijtellingsregeling van belang. Ook voor particulieren is elektrisch rijden interessant, omdat de kosten per kilometer bij de goedkopere modellen lager zijn dan bij benzineauto's: er hoeft geen wegenbelasting betaald te worden, de onderhoudskosten zijn lager en thuis laden is goedkoper dan tanken. Wanneer er langs de snelweg wordt geladen is zijn de kosten per kilometer ongeveer even hoog als bij benzine (Dagblad van het Noorden 2020).

De Amerikaanse **Nikola Motor Company** (Nikolamotor 2019) ziet de toekomst van het waterstofauto's zonnig in. Er is een uitgewerkt plan om de Verenigde Staten en Canada van een netwerk met 364 waterstofstations te voorzien. Onlangs is de Nikola One gelanceerd: een hybride waterstof-elektrische truck met een range van 1.200 tot bijna 2.000 kilometer en een elektromotor van 1.000 pk (735 kW). Daarnaast zijn er de volledig elektrisch aangedreven Nikola Zero en de Nikola Two, een compactere vrachtauto voor kortere afstanden en distributiewerk.

Het Nederlandse bedrijf **Holthausen** wil in samenwerking met **Hyzon** een Europese bouwer van trucks en bussen op waterstof te worden. De productie ligt eerst rond de 800 trucks en over twee jaar rond de 2.000. **Holthausen** heeft de ambitie om uiteindelijk de Tesla van de waterstoftrucks te worden (Volkskrant 2020b). De productielocatie in Winschoten is in 2021 in gebruik genomen (FD 2021a). Zowel bij **Nikola** als bij **Hyzon** zijn echter financiële problemen, waardoor investeringen niet worden gerealiseerd en beleggers de koersen van hun aandelen zien kelderen (FD 2022). **Holthausen** heeft zich eind 2022 teruggetrokken uit de fabriek in Winschoten.

Andere bedrijven die investeren in waterstofvoertuigen zijn **Ford, Nissan, Hyundai, Kia, Honda, Toyota, Audi, BMW en aanvankelijk ook DaimlerChrysler**. Actuele informatie over waterstofrijden is te vinden op <https://h2.live>. Volgens het Handelsblatt (2020) stopt autofabrikant **Daimler** met de ontwikkeling van brandstofcellen voor personenauto's. Dit betekent het einde voor de productie van de Mercedes GLC F-cell. **Daimler** verschuift de aandacht naar de inzet van de brandstofceltechnologie bij vrachtwagens. De Duitse autofabrikant zet samen met Volvo een joint venture op en gaat op deze manier de strijd aan met Nikola. De strengere CO₂-normen van de EU in de komende jaren zijn een belangrijke reden om te investeren in elektrische vrachtwagens.

Waterstoftrucks hebben geen last van zware batterijen waardoor het netto laadvermogen groter is. Ook wordt de actieradius bij waterstoftrucks niet beïnvloed door weersomstandigheden, terwijl bij koud weer de actieradius van batterijvoertuigen minder wordt. Voor vrachtverkeer levert snel tanken met waterstof tijdwinst op in vergelijking met het opladen van de accu's.

BloombergNEF (2020) verwacht dat waterstof een waardevolle rol kan spelen bij het koolstofvrij maken van lange-afstandsvrachtwagens met een zware lading. Deze kunnen rond 2030 goedkoper rijden met waterstofbrandstofcellen dan met dieselmotoren. Maar het grootste deel van de auto-, bus- en lichte vrachtwagenmarkt gaat waarschijnlijk elektrische aandrijflijnen gaan gebruiken in plaats van brandstofcellen, omdat deze goedkoper zijn.

Desondanks werken in **Clean Energy Partnership** (2020) Duitse energieleveranciers, gasproducenten en de automobielbranche samen aan verdere promotie van waterstof door de aanleg van een Duitse waterstofsnelweg: een keten van waterstoftankstations langs snelwegen, die een 1800 km lange lus door het land vormt en die de belangrijkste waterstofcentra van het land verbindt.

Een stimulans voor elektrisch rijden is de afspraak tussen Nederlandse steden en de staatssecretaris van Infrastructuur en Waterstaat om in 2025 het stadscentrum op slot te doen voor bestelbusjes en trucks, die rijden op diesel en benzine. Winkels, bedrijven en burgers in het centrum van deze steden kunnen dan alleen nog worden bevoorrad door voertuigen 'zonder uitlaat'. Gemeenten gaan de komende jaren ook aan het werk om bijvoorbeeld vuilniswagens en veegkarretjes emissievrij te maken. Naar verwachting gaan met name vuilniswagens op waterstof lopen. Het kabinet ziet de emissievrije zones als een belangrijke stap naar volledig uitstootvrij verkeer in 2050 (Volkskrant 2021a).

Volgens **PwC** (2021) kan de ambitie van het Klimaatakkoord worden gehaald dat in 2030 alle nieuw verkochte auto's in Nederland elektrisch zijn. Er is nog wel een lange weg te gaan. De markt zorgt tot op zekere hoogte zelf voor de transitie naar de elektrische auto en de benodigde infrastructuur, en de overheid helpt met Nederlandse en Europese regelgeving. Dat verschaft duidelijkheid aan alle partijen die investeren in een groene toekomst. In 2030 rijden er naar verwachting bijna twee miljoen elektrische auto's in Nederland rond. Daarna komen er ieder jaar ongeveer 400.000 bij. Het straatbeeld verandert geleidelijk door een toenemend aantal laadpalen en elektrische auto's. Er zijn voldoende betaalbare modellen beschikbaar zijn en ook is een tweedehandsmarkt op gang gekomen. De fiscale stimuleringsmaatregelen kunnen worden afgebouwd, omdat de gemiddelde kostprijs van een elektrische auto onder die van de brandstofauto is gedaald. Het elektriciteitsnetwerk is voldoende verzaamd om genoeg elektriciteit te leveren. De **Europese Commissie** (2022) heeft in 'Fit for 55' aangegeven dat al vanaf 2025 geen nieuwe fossiele auto's verkocht mogen worden. Uit het Nationaal Laadonderzoek 2021 (**Rijksdienst voor Ondernemend Nederland** 2021) blijkt dat 78% van de elektrische auto's thuis wordt geladen. Thuisladen is goedkoper en er hoeft nooit naar een laadpaal te worden gezocht. Het is aantrekkelijk in combinatie met zonnepanelen en driekwart van de elektrische rijders heeft die dan ook op het dak liggen. Maar slechts 25% van de Nederlandse huishoudens heeft die mogelijkheid en de andere 75% moet dus elders laden.

8.4 Kosten elektrisch autorijden en gevolgen voor milieu

Volgens de **Hydrogen Council** (2020) verschillen de kosten van waterstof- en batterijvoertuigen sterk per segment. Waterstof is al vóór 2030 goedkoper voor zwaar goederentransport en taxiverkeer. Voor stadsvervoer per auto en bus blijven tot 2050 batterijen goedkoper. Het **H2-platform** (2021) geeft aan dat de brandstofkosten per kilometer voor waterstofrijden en benzine vergelijkbaar zijn, maar hoger liggen dan voor batterijrijden.

Uit berekeningen van **Transport & Environment** (2020) blijkt dat in 2030 vrachtwagens op batterijen goedkoper zijn dan vrachtwagens op waterstof. Daar staat tegenover dat waterstofvrachtwagens een groter bereik en een kortere laadtijd hebben. In de EU zijn batterijvrachtwagens beginjaren 2030-2040 even duur zijn als dieselauto's en bij waterstofvrachtwagens geldt dat pas midden 2040-2050.

Over de impact van een elektrische auto voor het milieu geeft een andere studie van **Transport & Environment** (2020) duidelijkheid. Een elektrische auto stoot gedurende zijn leven gemiddeld drie

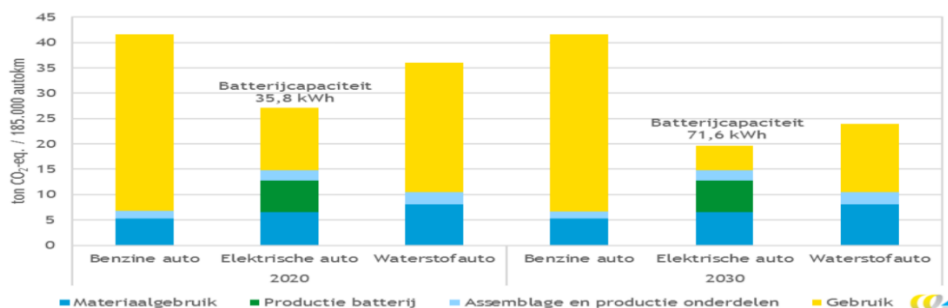
keer minder CO₂ uit dan een vergelijkbare benzine- of dieserversie. Transport & Environment heeft een levenscyclusanalyse gemaakt waarbij alle onderdelen van de energieketen worden meegenomen, zoals de energie die de productie van de auto kost, de accu, de benzine en diesel. Ook is gekeken naar de manier waar elektriciteit wordt opgewekt: in kolencentrales, gascentrales of met duurzame energiebronnen. Natuurlijk heeft groene stroom het gunstigste effect op het milieu, maar zelfs als de elektriciteit uit kolencentrales komt is elektrisch rijden beter voor het milieu dan rijden met fossiele brandstof.

Ook **Knobloch c.s.**(2020) komen tot de conclusie dat rijden in elektrische auto's voor een vermindering van CO₂-uitstoot zorgt. Bij de productie van elektrische auto's komt weliswaar CO₂ vrij en het opwekken van de benodigde elektriciteit wordt op veel plekken in de wereld nog steeds gedaan door vervuilende kolen- en gascentrales, maar als wereldwijd wordt ingezet op elektrificatie blijken er bijna altijd netto minder broeikasgassen vrijkomen.

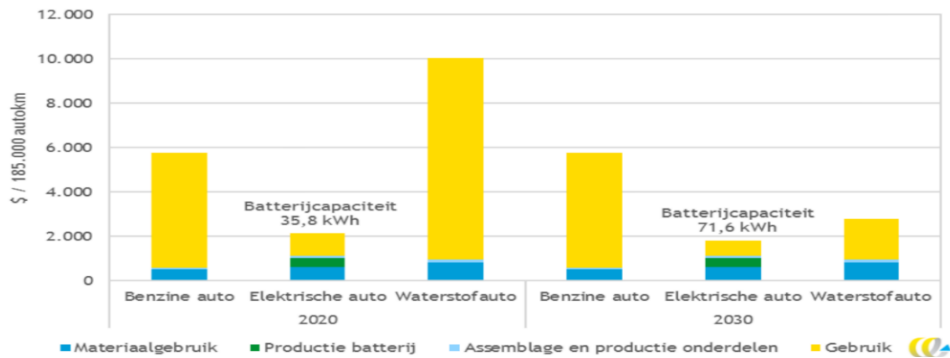
Voor Nederland heeft **CE Delft** (2020b) van drie typen personenauto's de milieu-impact en de actuele kosten (2020) en die in de toekomst (2030) geanalyseerd. Het betrof een vergelijking tussen een benzineauto (Volkswagen Comfortline Golf 1.0 TSI), een batterij-elektrische auto (Volkswagen e-Golf (100 kW) en een waterstofauto (Toyota Mirai). De auto's hebben een levensduur van 185.000 km. Met een levenscyclusanalyse zijn twee milieu-indicatoren (klimaatverandering en grondstofuitputting) in beeld gebracht. Uit onderstaande grafieken blijkt dat in 2020 de benzineauto de hoogste klimaatimpact en de grootste grondstofuitputting heeft. Dat komt door het brandstofgebruik van de benzineauto. De batterijauto heeft (ondanks de batterijproductie) substantieel minder klimaatimpact en minder grondstofuitputting dan de benzineauto. Naarmate er meer gereden wordt scoort de batterijauto beter op beide milieu-indicatoren dan de benzineauto. Bij een levensduur van 185.000 km wordt na 70.000 km de impact van rijden in een batterijauto op klimaat en grondstofuitputting gunstiger dan rijden in een benzineauto. De waterstofauto heeft een grotere impact op klimaat en grondstoffenuitputting dan de batterijauto, maar een lagere klimaatimpact dan de benzineauto.

Ook in 2030 heeft de benzineauto de grootste klimaatimpact en de grootste grondstofuitputting. Doordat er meer groene stroom beschikbaar is, hebben batterijauto's in 2030 in vergelijking met 2020 minder negatieve impact op klimaat en grondstofuitputting dan de benzine- en waterstofauto. Rijden in een batterijauto wordt gunstiger voor het milieu na 50.000 km ten opzichte van benzineauto's en na 75.000 km ten opzichte van waterstofauto's. De waterstofauto heeft in 2030 significant minder klimaatimpact en grondstofuitputting dan in 2020, omdat wordt aangenomen dat waterstof in 2030 wordt geproduceerd met groene elektriciteit in plaats van met aardgas. De milieu-indicatoren van de waterstofauto zijn nog wel minder gunstig ten opzichte van de batterijauto.

De klimaatimpact van de verschillende typen auto's bij een levensduur van 185.000 km



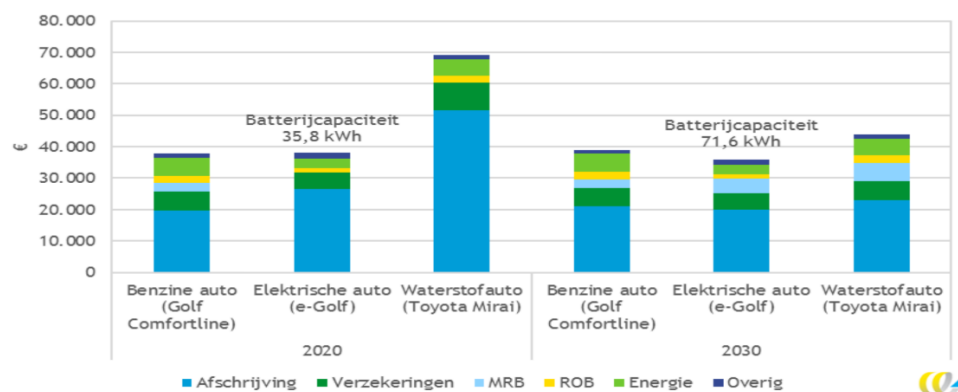
De grondstofuitputting van de verschillende typen auto's bij een levensduur van 185.000 km



De conclusie uit de kostenanalyse (zie onderstaande grafiek met de totale kosten=TCO) is in 2020 dat rijden in een batterijauto even duur is als in een benzineauto. De batterijauto is duurder in aanschaf dan de benzineauto en heeft daardoor hogere afschrijvingskosten, maar dat wordt gecompenseerd door vrijstelling van motorrijbelasting (MRB), lagere energiekosten (elektriciteit) en lagere onderhoudskosten (reparatie, onderhoud en banden = ROB). De aandrijflijn van de batterijauto heeft minder draaiende delen en heeft daardoor minder onderhoud nodig dan de aandrijflijn van een benzineauto.

Rijden in een waterstofauto is in 2020 tweemaal zo duur als in een benzine- en batterijauto. Dat wordt veroorzaakt door de hogere aanschafprijs van de waterstofauto. Ook zijn verzekeringspremies relatief hoog door deze aanschafprijs en het gewicht. De waterstofauto compenseert dit niet op het gebied van energie: kosten voor reparatie, onderhoud en banden, en vrijstelling motorrijbelasting. In 2030 is rijden in een batterijauto goedkoper dan in een benzineauto door goedkopere auto's (lagere afschrijvingen). Ook rijden in een waterstofauto is veel goedkoper geworden door lagere afschrijvingen, maar nog altijd duurder dan in een benzine- of batterijauto. Naarmate er meer gereden wordt, stijgt het voordeel van de batterijauto. Dat wordt veroorzaakt door de relatief lage energiekosten tijdens het gebruik.

TCO particulier gebruik in 2020 en 2030 (5 jaar en 10.300 km/jaar)



De overheid stimuleert het elektrisch rijden door voor de aanschaf van nieuwe- en tweedehandsauto's subsidies te verstrekken. Deze subsidies zijn populair. Het budget van 2021 voor particulieren was in de loop van 2021 al uitgeput. Voor 2022 geldt een nieuwe subsidieregeling. Ook hoeft voor elektrische auto's tot 2025 geen wegenbelasting betaald te worden. Zakelijke rijders krijgen geen subsidie bij aankoop, maar hebben het voordeel van lagere bijtelling. Berekeningen van **Milieu Centraal** en **ANWB** (2021) laten duidelijk zien dat de totale kosten van elektrisch rijden lager zijn dan van rijden op benzine, zelfs als er geen aanschafsubsidie wordt gegeven. Maar deze subsidie

kan er wel toe leiden dat mensen eerder een elektrische auto aanschaffen.

De sterke stijging van de elektriciteitsprijzen in 2022 leidt ertoe dat elektrisch rijden duurder wordt, maar het is nog wel goedkoper dan rijden op benzine (RTL nieuws, 31 augustus 2022). De ANWB heeft een rekentool (ANWB Autokostentool) ontwikkeld waarmee een actuele vergelijking gemaakt kan worden tussen de kosten van een elektrische auto en een vergelijkbare auto op benzine. Sterke stijgingen van de elektriciteitsprijzen kunnen ertoe leiden dat elektrisch rijden duurder is dan rijden op benzine.

8.5 Samenvatting

Auto's mogen in de toekomst geen uitlaatgassen meer uitstoten. Er zijn twee soorten auto's op het gebied van elektrisch rijden die dat kunnen realiseren: waterstofauto's en batterijauto's. Het voordeel van de batterijauto boven de waterstofauto is de hogere efficiëntie. Bij een batterijauto is geen omzetting nodig van elektriciteit naar waterstof, waardoor er bij batterijauto's voor het afleggen van dezelfde afstand 2 tot 3 keer minder elektriciteit nodig is. Ook is er in Nederland een snelle uitbouw van elektrische laadstations, terwijl er maar weinig waterstoftankstations zijn. Bovendien kunnen mensen thuis, bij het werk en bij winkelcentra laden. Daarnaast zijn de voordelen van batterijauto's de lagere aanschafprijs, meer keuzemogelijkheden en de lagere brandstofprijs. Als voordelen van waterstof staan daar tegenover het sneller tanken, het afleggen van langere afstanden met een volle tank, het lagere gewicht, de ongevoeligheid voor koud weer en het gebruik van minder schaarse materialen.

Pas op langere termijn zijn er kansen voor waterstofauto's als bij kostenberekeningen ook de uitbreidingskosten van het elektriciteitsnet worden meegenomen. De totale investeringskosten voor de ontwikkeling van een waterstofinfrastructuur kunnen wel eens veel lager uitvallen dan voor uitbreiding van het elektriciteitsnetwerk. Ook worden door innovatie en schaalvergroting waterstofauto's kosteneffectiever. Waterstofauto's en batterijauto's worden eerder als complementair gezien dan als concurrerend. Batterijauto's zijn een goed alternatief voor benzineauto's en waterstof is interessant voor dieselveertuigen. Er zijn vooral kansen voor waterstof in het niet-personenvervoer: bestelauto's, vrachtwagens, hefvoerwerktuigen, vuilnis- en veegwagens, scheepvaart en het openbaar vervoer.

Waterstof gaat belangrijk worden in de energietransitie. De sectoren die niet geëlektrificeerd kunnen worden, moeten daarbij het eerst aan bod komen. Personenauto's kunnen dan beter op batterijen rijden dan op waterstof. Bovendien is dat efficiënter.

Een stilstaande elektrische auto kan ingezet worden als powerplant en elektriciteit leveren aan een net, een woning of een bedrijfsgebouw en kan daardoor een rol spelen bij stroomstoringen, het opvangen van pieken en dalen in het net en zodoende bijdragen aan netstabilisatie.

Als in de logistieke sector wagens continu op de weg moeten kunnen zijn, is het nadelig dat het laden van batterijen veel tijd kost. Waterstof is dan een interessante optie.

Het regeringsbeleid gaat tot 2030 uit van beperkte inzet van waterstof in personenauto's. Het accent ligt voor de overheid op het verduurzamen van de eigen vloot en op het OV-busvervoer. De regering houdt zo de opties voor waterstof voor de langere termijn open, met het gevaar dat investeren in waterstof de overgang naar batterijrijden belemmert. Nederland kan de ambitie uit het Klimaatakkoord halen dat in 2030 alle nieuw verkochte auto's elektrisch zullen zijn; dat zullen vooral batterijauto's zijn. In de Europese Unie is de ambitie dat vanaf 2035 geen fossiele auto's meer verkocht mogen worden.

Het aantal laadstations voor batterij- en waterstofauto's groeit in Nederland en het buitenland.

Steeds meer Nederlanders rijden elektrisch. Toch is nog maar een half procent van de Nederlandse auto's elektrisch en hiervan is het aantal waterstofauto's nog geen half procent.

Meer dan driekwart van de Nederlanders is ervan overtuigd dat in de toekomst alleen nog elektrisch

gereden wordt. De belangrijkste reden om elektrisch te rijden is het milieu en de reden dat automobilisten niet elektrisch rijden zijn de hoge (aanschaf)kosten en de beperkte actieradius. Subsidies hebben een positief effect op het kopen van elektrische auto's. Ondanks hogere aanschafprijzen zijn de totale kosten van batterijrijden lager dan die van benzinerijden door lagere onderhoudskosten en vrijstelling van belastingen. Elektrisch rijden is vooral aantrekkelijk voor mensen die thuis kunnen laden. Sterke stijgingen van elektriciteitsprijzen maken het minder aantrekkelijk om elektrisch te rijden..

Waterstof kan een waardevolle rol spelen bij vergroenen van lange-afstandsvrachtwagens met een zware lading. Autofabrikanten zullen hierop inspelen. In verschillende Europese landen zijn plannen voor de aanleg van netwerken van waterstoftankstations. Holthausen is in Nederland gestart met de productie van waterstoftrucks.

Wetenschappelijk onderzoek laat zien dat elektrisch batterijrijden gunstig is voor klimaatverandering en grondstofuitputting, zelfs als de elektriciteit met fossiele energie wordt opgewekt. En dat wordt de komende jaren steeds gunstiger, doordat steeds meer groene stroom beschikbaar komt.

Waterstofrijden blijft voorlopig nog wel duurder dan benzinerijden en verder zijn de gevolgen voor klimaat en grondstofuitputting gunstiger voor batterijrijden dan voor rijden op waterstof.

9 Waterstof in de woonomgeving

9.1 Inleiding

Waterstof is een mogelijkheid om aardgas te vervangen in de woonomgeving. In plaats van aardgas stroomt dan waterstof door de gasleidingen. Eerst wordt gekeken naar de risico's van het gebruik waterstof en vervolgens naar de daarmee samenhangende kosten. Deze kosten hebben niet alleen betrekking op de productiekosten van waterstof maar op de totale nationale kosten die nodig zijn om de overstap te maken van aardgas naar waterstof in de gebouwde omgeving. Onderzocht wordt of waterstof een interessante optie is op korte termijn of eerder voor de verdere toekomst. De uitkomsten van onderzoek naar de kansen voor een waterstofwijk in Hoogeveen worden gepresenteerd. Verder wordt het draagvlak voor aardgasvrije wijken geanalyseerd en komt de vraag aan de orde of de woonlasten van de bewoners zullen stijgen of dalen door de overgang van aardgas naar waterstof en wat hiervan de gevolgen zijn voor het draagvlak.

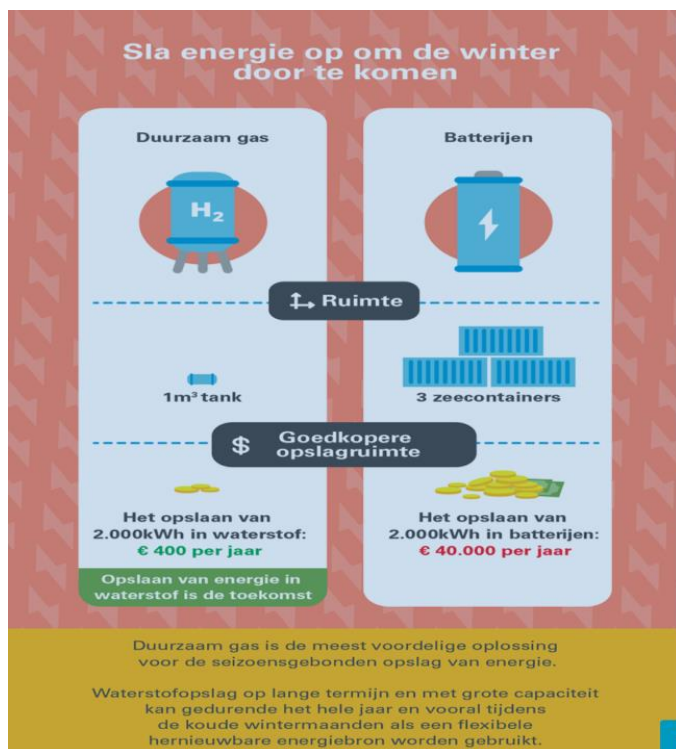
9.2 Waterstof als vervanging voor aardgas

Bij het verbruik van aardgas wordt het broeikasgas CO₂ uitgestoten. In Europa is afgesproken de CO₂-uitstoot fors terug te brengen om de aarde niet te veel te laten opwarmen. Ook Nederland heeft zich aan dit doel gecommitteerd. Daarom is in het Klimaatakkoord afgesproken om tot 2050 alle 7 miljoen huizen in Nederland van het aardgas af te halen.

Waterstof kan aardgas vervangen in de woonomgeving voor verwarming en warm water. Het huidige aardgasnet kan met weinig aanpassingen geschikt gemaakt worden voor waterstof: 'aardgas eruit en waterstof erin'. Het **Kiwa** (2015) heeft onderzocht dat de risico's voor een significante brand of explosie in een woonhuis op de gezondheid van de bewoners vergelijkbaar zijn bij een groot aardgas- of waterstoflek. Bij kleine lekkages is de schade bij waterstof kleiner dan bij aardgas. Waterstof geeft dus geen grotere risico's dan aardgas. Ook kan volgens het **Kiwa** (2018) het Nederlandse gasnet eenvoudig en met beperkte kosten geschikt worden gemaakt voor de distributie van waterstof. Hiervoor zijn wel maatregelen nodig, zoals de ontwikkeling van nieuwe cv-ketels of hybride warmtepompen die geschikt zijn voor waterstof. Er moeten nieuwe gasmeters komen en waterstof moet een herkenbare geur krijgen.

Het **Instituut voor Fysieke Veiligheid** (2020) heeft een handreiking geschreven over het veilig gebruiken van waterstof in een besloten ruimte, zoals een woning. Hierin wordt antwoord gegeven op vragen die gaan over de veiligheidsaspecten van waterstof bij het verwarmen van woningen.

Kiwa (2020) heeft verder berekend dat het opslaan van 2.000 kilowattuur energie in een batterij € 40.000 per jaar kost; honderd keer duurder dan het bewaren van diezelfde hoeveelheid energie in de vorm van waterstof. De batterij is zo groot als drie zeecontainers. Voor dezelfde energiehoeveelheid waterstof volstaat een tank van één kubieke meter (zie onderstaand plaatje).



In Rozenburg (Rotterdam), Hoogeveen, Stad aan het Haringvliet, Lochem en Wagenborgen vinden experimenten plaats met verwarming op waterstof. Er zijn inmiddels cv-ketels ontwikkeld die op waterstof werken. In Stad aan 't Haringvliet wordt gekeken naar de inzet van een 'waterstofturbine'. Dat is een windturbine met een elektrolyser die de geproduceerde elektriciteit direct omzet in waterstof. De stroom gaat dan niet het elektriciteitsnet op en dat voorkomt transportverlies. De kosten van waterstof zouden hierdoor kunnen dalen tot onder de € 2 per kilogram (Energieia 2020).

9.3 Waterstofprijs in vergelijking met aardgasprijs

Zoals in vorige hoofdstukken is aangegeven, is er in Nederland nog nauwelijks groene waterstof en is er ook nog geen markt waarop de prijs van waterstof wordt bepaald. Een waterstofprijs van € 2,50 per kg ofwel € 0,22 per m³ betekent een prijs van € 0,68 per m³, omdat er drie keer zoveel waterstof nodig is als aardgas om dezelfde energieopbrengst te hebben. De huidige (2020) kale aardgasprijs is volgens Milieu Centraal € 0,32 per m³ (inclusief energiebelasting en ODE is de consumentenprijs € 0,814). De prijs van waterstof is dan het dubbele van de huidige aardgasprijs. Door toename van isolatiemaatregelen zal het energiegebruik dalen en zal een prijsstijging deels gecompenseerd worden. De vergelijking met aardgas is in de fossielvrije toekomst niet meer relevant. Het is dus noodzaak om waterstofprijzen te vergelijken met andere duurzame opties. De uiteindelijke prijs van waterstof zal afhangen van de markt, van de netwerkkosten en van de belastingen en heffingen die de overheid gaat heffen. Een nadeel van waterstof blijft het efficiency-verlies dat optreedt als van elektriciteit eerst waterstof gemaakt wordt en vervolgens waterstof weer wordt omgezet in elektriciteit. Elektriciteit kan dan beter direct zonder de waterstofomweg worden ingezet. Maar voor verwarming in de winter is opgeslagen elektriciteit nodig en gezien de beperkte mogelijkheden van opslag in batterijen kan waterstof toch weer een interessante optie zijn.

Het Planbureau voor de Leefomgeving (2020b) heeft een inschatting gemaakt van de nationale kosten (exclusief subsidies en belastingen) bij gebruik van waterstof in de gebouwde omgeving. Het gaat dan om de kosten voor de Nederlandse samenleving als geheel. Voor een fossielvrije toekomst wordt in de waterstofstrategie aardgas vervangen door klimaatneutrale waterstof. Bij toepassing in

de gebouwde omgeving worden gebouwen extra geïsoleerd om het energieverbruik te reduceren, worden de cv-ketel en de hybride warmtepomp geschikt gemaakt om waterstof te kunnen verbranden en wordt het gasnet aangepast om voldoende waterstof te kunnen transporteren. Naast de private productiekosten van waterstof wordt ook rekening gehouden met de kosten van transport en opslag zodat op nationaal niveau een realistische vergelijking kan worden gemaakt tussen de verschillende energievormen. Het Planbureau raamt voor 2030 de nationale kosten van blauwe waterstof op € 3,61 per kg met een bandbreedte van € 2,40 - € 5,27 per kg. Dat is ruwweg vier keer duurder dan aardgas. Voor groene waterstof met productie van elektriciteit uit windparken op de Noordzee komt PBL op een prijs van € 3,83 met een bandbreedte van € 2,80 - € 5,38. Het Planbureau verwacht dat na 2040 de kostenverschillen tussen blauwe en groene waterstof verdwijnen. Verder bezorgen aanpassingen van het netwerk en in de woningen (zoals vervanging van gasmeters en elektrisch koken) de omschakeling van aardgas naar waterstof een jaarlijkse extra kostenpost van € 212 per woning met een bandbreedte van € 180 tot € 243. Waterstof is dus voor toepassing in de woonomgeving aanzienlijk duurder dan aardgas. PBL heeft de extra kosten per woning uit verschillende bronnen samengevat in onderstaande tabel:

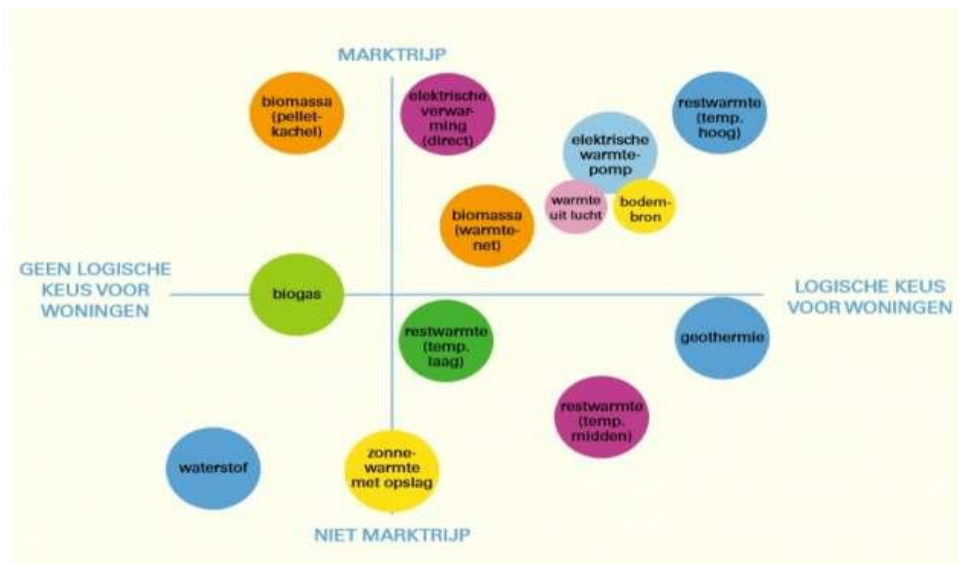
Bandbreedte van extra kosten per woning door overschakelen op waterstof.

	Type	laag	middel	hoog	bron data
		(€/woning)			
Kosten gasleverancier					
Enmalige netkosten	Eenmalig	200	200	200	Kiwa 2018
Aanpassen gasmeters	Eenmalig	150	173	251	Hazenberg 2020
Geannualiseerde netkosten	Jaarlijks	18	19	23	3% over 30 jaar
Extra netbeheer jaarlijks	Jaarlijks	5	10	20	Kiwa 2018
Subtotaal extra H2-netkosten	<i>Jaarlijks</i>	23	29	43	
Overheadkosten gasleveranciers	Jaarlijks	68	68	68	MilieuCentraal
Kosten gebouweigenaar					
Aanpassing CV-ketel	Eenmalig	0	300	500	Stedin zegt 300
Elektrisch koken	Eenmalig	1000	1000	1000	PBL 2019
Subtotaal eenmalige kosten	<i>Eenmalig</i>	<i>1000</i>	<i>1300</i>	<i>1500</i>	
Enmalige kosten geannualiseerd	Jaarlijks	84	109	126	3% over 15 jaar
Waterstofdetectie met CO-meter	Jaarlijks	6	6	6	3% over 10 jaar
Totaal extra kosten per aansluiting	Jaarlijks	180	212	243	
Vgl. Kosten huidig distributienet	Jaarlijks	100	125	150	Kiwa 2018

Bron: PBL 2020b.

9.4 Kansen voor waterstof in de woonomgeving

De Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (2018) vindt groene waterstof een 'onlogische' oplossing voor de verwarming van woningen. De Raad vraagt zich af of er voldoende waterstof beschikbaar is om aan de toekomstige vraag te voldoen. In onderstaande tekening is voor verschillende verwarmingsopties aangegeven of deze al dan niet marktrijp zijn en een logische keuze zijn. De Raad ziet voor duurzame gassen (waterstof en groen gas) nog geen grootschalige toepassing van de grond komen voor de verwarming van woningen. De kansen voor groene waterstof en andere duurzame gassen ziet de Raad vooral in andere sectoren, zoals de industrie en de transportsector. Tot 2030 verwacht zij daarom geen inzet van duurzame gassen voor verwarming van woningen.



Van Wijk (2019) vindt waterstof voor verwarming van bestaande woningen wel een serieuze optie. Niet zozeer voor nieuwbouw, omdat daar verwarming door aardgas prima vervangen kan worden door warmtepompen, maar met name voor oudere woningen, omdat hiervoor de kosten van elektrificatie hoog zijn. Verder is het kostbaar om elektriciteitsnetten te versterken, om ook op de koudste dagen voldoende elektriciteit te krijgen. Het gasnet is geschikt voor de distributie van waterstof. Waterstof-cv-ketels komen beschikbaar en aanpassingskosten achter de voordeur (nieuwe cv-ketel, fornuis, gasmeter en arbeidsloon) bedragen zo'n € 3500. Het niveau van isolatie kan minder zijn dan bij elektrische verwarming.

Van Wijk vindt dat hiermee een aantrekkelijk beeld ontstaat om waterstof voor verwarming van gebouwen te gaan gebruiken. Zeker als er geen andere opties geschikt zijn, zoals in oude binnensteden, in dorpen met veel oudbouw en op het platteland. Waterstof is verder ook nodig voor de (piek)aanvulling bij elektrische oplossingen en bij rest- en aardwarmtegebruik. In een recentere publicatie komt Van Wijk met Hellinga tot de conclusie dat er mogelijkheden zijn voor 500.000 woningen op waterstof in 2030 (Hellinga, Wijk van, 2021).

Over waterstof in de woonomgeving heeft **Stedin** (2020a) een working paper geschreven. Aan de hand van uitgebreid onderzoek wordt geconcludeerd dat waterstof de komende tien jaar in de gebouwde omgeving nog geen significante rol zal gaan spelen. Beschikbare waterstof zal allereerst in andere sectoren, zoals de industrie, worden gebruikt. Ook het nog beperkte aanbod en de kostprijs maken waterstof voorlopig geen aantrekkelijke optie. De rol van waterstof in de gebouwde omgeving voor de periode 2030-2050 omgeving is nog onduidelijk.

Maar ook al is de rol van waterstof beperkt, dan nog is er behoefte aan nieuwe kennis, technologie, processen en wet- en regelgeving. Waterstof kan wel een oplossing zijn voor woningen die niet aardgasvrij kunnen worden gemaakt met een warmtenet of warmtepomp of groen gas. Daarnaast wil Stedin de toekomst van waterstof zelf vorm geven door te experimenteren en te laten zien wat er kan en hoe het kan. Dat inspireert anderen weer om ook te innoveren.

TNO (2020a) constateert dat waterstof nodig kan zijn voor aardgasvrije woningen, maar dat er nog veel vragen zijn. Waterstof is in principe net zo veilig te gebruiken als aardgas. Het gasnet kan met beperkte kosten geschikt te maken voor waterstof. Installaties voor productie van warmte met waterstof komen beschikbaar. Waterstof kan ingezet worden op woningniveau en via collectieve warmtesystemen. De productiekosten van waterstof zijn vergelijkbaar met de prijs van aardgas voor kleinverbruikers inclusief netwerkkosten en belastingen. Het is waarschijnlijk dat de prijs van waterstof hoger zal liggen dan die van aardgas, maar door isolatie kunnen de brandstofkosten voor

bewoners per saldo gelijk blijven.

Waterstof is een alternatief in de gebouwde omgeving wanneer andere opties als 'all-electric' en warmtenetten tekortschieten. Hierbij kan waterstof ook worden ingezet om te voorzien in de piekvraag.

Er is echter nog maar weinig groene waterstof beschikbaar. Voor groene waterstof zijn wind- en zonneparken nodig die een aanzienlijke ruimtelijke impact hebben. Verder zijn elektrolyzers en faciliteiten voor buffering en opslag nodig om verschillen in zon- en windaanbod en warmtevraag op elkaar af stemmen. Blauwe waterstof kan een zinvolle tussenstap zijn. Vergeleken met de directe inzet van aardgas is voor inzet van blauwe waterstof met CCS extra aardgas nodig en zijn er kosten voor afvang, transport en opslag van CO₂. Voor de vervanging van aardgas is het belangrijk om door isolatie de warmtevraag te verminderen en zoveel mogelijk elektriciteit direct in te zetten vooral met warmtepompen.

Op korte termijn verwacht TNO geen grootschalige inzet van waterstof. Doordat er nog weinig ervaring is met gebruik van waterstof in de woonomgeving ontbreekt het aan allerlei benodigde normstelling en regelgeving. Waterstof wordt 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.

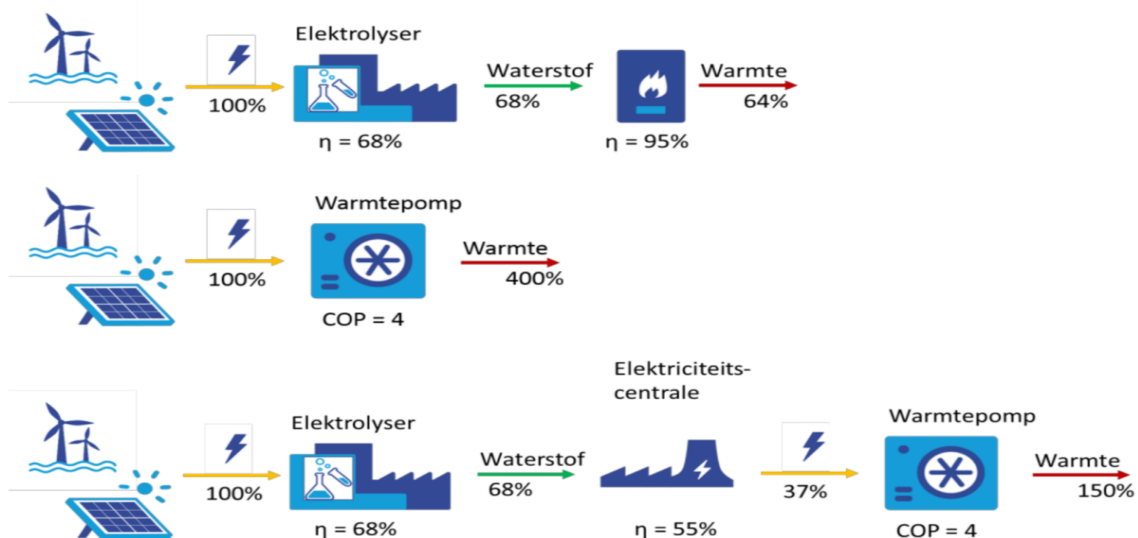
TKI Nieuw Gas (2020) werkt aan een onderzoeksprogramma met thema's als:

gashoeveelheidsmeting, energiebepaling en verrekening; 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. TKI Nieuw Gas wil met een programmatische aanpak condities creëren waaronder waterstof veilig, betrouwbaar en efficiënt kan worden ingezet in de woonomgeving.

Volgens de **Hydrogen Council (2020)** is waterstof in de gebouwde omgeving in 2030 een concurrerende optie in vergelijking met andere duurzame opties als geheel elektrisch en een warmtenet. Maar de onzekerheidsmarges zijn groot. De uiteindelijke keuze hangt af van lokale omstandigheden (bevolkingsdichtheid, type en bouwjaar huizen, aanwezigheid warmtebronnen en infrastructuur).

CE Delft (2020a) laat aan de hand van onderstaande tekening zien waarom het toepassen van waterstof in een woonwijk energetisch weinig aantrekkelijk is:

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



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

Op basis van energie-efficiëntie kan groene elektriciteit het beste direct met een warmtepomp een huis verwarmen. Dat geeft een veel hoger rendement (400%) dan verwarmen met waterstof (60%). Dus zo'n zes keer beter. Zelfs bij gebruik van waterstof als seizoensopslag is het veel efficiënter om eerst van waterstof weer elektriciteit te maken en met deze elektriciteit een warmtepomp aan te drijven, want dat geeft een rendement van 150%.

Om woningen duurzaam te verwarmen zijn verschillende mogelijkheden: elektrische warmtepompen, warmtenetten, groengas, waterstof en biomassa. Ondanks het lage ketenrendement kan waterstof aantrekkelijk zijn, omdat de bestaande infrastructuur nauwelijks aangepast hoeft te worden. Hierdoor kunnen huizen die niet of tegen hoge kosten geïsoleerd moeten worden toch goed verwarmd worden. Zo kunnen bijvoorbeeld monumentale panden niet goed verwarmd worden met een warmtepomp. Ook verwarming via een warmtenet kan niet overal. Het is duur of onmogelijk in historische binnensteden en in dunbevolkte buitengebieden. De uiteindelijke keuze wordt bepaald door beschikbaarheid, transportcapaciteit en andere transitiekosten. De goedkoopste optie verschilt per woningtype en hangt af van factoren als het bouwjaar, de aanwezige isolatie, de ligging, de reeds aanwezige infrastructuur en of een woning een monumentaal pand is. Ook hebben de prijzen van de verschillende warmtetechnieken een groot effect op de totale kosten. Per wijk kan de goedkoopste warmtetechniek verschillen. Volgens CE Delft zullen de kosten in alle gevallen hoger liggen dan in de huidige situatie met verwarming op aardgas. Het **Planbureau voor de Leefomgeving** (2020b) constateert dat er nog veel onduidelijk is over de toekomstige toepassing van waterstof in het Nederlandse energiesysteem en in de gebouwde omgeving. Afhankelijk van het tempo waarin de productie mondiaal wordt uitgebreid zullen de kosten van waterstof op termijn dalen. Onduidelijke is hoe snel dat gaat gebeuren. Voor de productie van blauwe waterstof is voldoende opslagcapaciteit voor CO₂ in lege gasvelden aanwezig. De vraag is of hiervoor draagvlak is. Ook is er voldoende ruimte beschikbaar voor windmolens op de Noordzee om in de nationale behoefte aan waterstof te voorzien. Verder kan er waterstof worden geïmporteerd als de lagere productiekosten in het buitenland de hoge transportkosten compenseren. Er komen dan wel vragen aan de orde over de geopolitieke stabiliteit van de regio's waarvan de Nederlandse energievoorziening dan afhankelijk wordt.

Het is efficiënt waterstof in Nederland te benutten voor CO₂-reductie in de industrie, bij het wegtransport en in de luchtvaart, maar niet (of heel beperkt) in de gebouwde omgeving. Toch kan in specifieke situaties toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving aantrekkelijk zijn als de kosten van alternatieve technieken hoger zijn.

Het Planbureau acht het dan ook niet waarschijnlijk dat waterstof vóór 2030 op enige schaal van betekenis zal worden toegepast voor verwarming van gebouwen. Het kan wel ná 2030, maar dat is sterk afhankelijk van kostendalingen en productie-uitbreidingen die gerealiseerd worden, van de kosten van alternatieven en van beslissingen over energienetwerken voor gas, elektriciteit en warmte. Er is nog veel onzeker maar gezien de mogelijke toekomstige beschikbaarheid van waterstof, vindt het PBL het verstandig om het huidige aardgasnet (dat tegen lage kosten geschikt gemaakt kan worden voor waterstof) voorlopig nog niet te verwijderen.

Squarewise (2019) heeft de potentiële Nederlandse groene waterstof productiecapaciteit in 2050 onderzocht en gekeken of dit voldoende is voor een totale overstap op groene waterstof van de gebouwde omgeving. Er blijkt geen realistisch scenario te zijn waarin er voldoende groene waterstof in Nederland geproduceerd kan worden. Alleen wanneer alle beschikbare ruimte wordt ingezet voor de productie van hernieuwbare elektriciteit én inzet van waterstof in de gebouwde omgeving voorkeur krijgt boven inzet voor lage temperatuurwarmte in de industrie, land- en tuinbouw, inzet voor non-energetische toepassingen in de chemie en inzet voor commercieel en internationaal transport, is een nationaal waterstofnet mogelijk. Er zijn sectoren waarin waterstof sneller rendeert. Die zullen dus prioriteit krijgen als groene waterstof beschikbaar komt. Er is tot 2030 zeker geen

waterstof beschikbaar voor de verwarming van gebouwen en pas tien of twintig jaar later is toepassing op een zekere schaal mogelijk.

De regering (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat 2020a) ziet voor de lange termijn kansen voor waterstof en andere duurzame gassen in de gebouwde omgeving. Bijvoorbeeld voor de verwarming van de oude binnensteden. Verwarming met duurzaam gas, zoals waterstof, is hier een optie die vergeleken moet worden met andere opties, zoals het gebruik van restwarmte of aardwarmte.

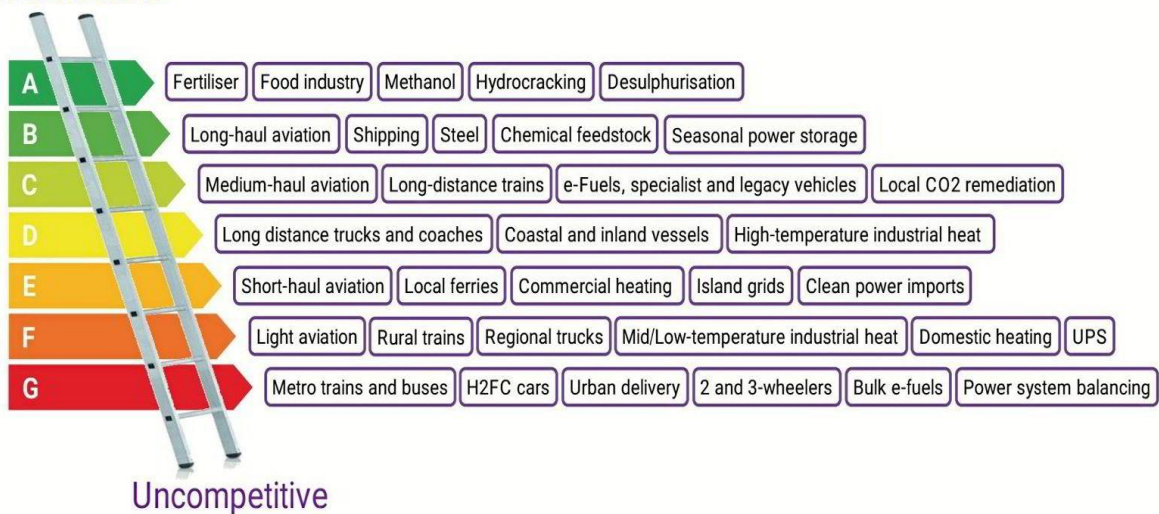
Het **Waterstoflab** (2021) ziet een belangrijke rol voor waterstof in de energietransitie maar geen rol voor waterstof in nieuwbouwhuizen. Waterstof zal in de gebouwde omgeving voorlopig alleen in een beperkt aantal gecontroleerde praktijkprojecten worden toegepast. Er is nog nauwelijks groene waterstof, waterstof moet net als andere opties concurreren met goedkoop aardgas en er is er nog onvoldoende kennis en ervaring om waterstof op grotere schaal en voor onbepaalde tijd binnen de vereiste veiligheidsnormen in de gebouwde omgeving toe te passen. De tijd zal leren of en hoeveel waterstof er nodig is in de gebouwde omgeving. In bestaande bouw moet allereerst ingezet worden op isolatie en op efficiënte systemen. De meest efficiënte vorm van verwarming in bestaande bouw is de elektrische warmtepomp waarbij lage temperatuur omgevingswarmte wordt opgewerkt tot hogere temperatuurwarmte. Een hybride warmtesysteem is in veel gevallen een goed alternatief. Hierbij dekt een elektrische warmtepomp standaard de warmtevraag en de gasketel springt bij op piekmomenten. In situaties waar een overgang naar all-electric of een warmtenet vooralsnog geen haalbare optie is, blijft een warmtevoorziening met gas (groen gas of waterstof) noodzakelijk al dan niet in combinatie met gedeeltelijke elektrificatie door toepassing van hybride warmtepompen. Voor de benutting van zon en wind is zowel elektriciteit als waterstof nodig. Hierbij kan het beste elektriciteit direct worden gebruikt door het conversieverlies dat optreedt als elektriciteit wordt omgezet in waterstof.

Liebreich (2021) laat aan de hand van zijn waterstof-ladder zien dat waterstof geen rol gaat spelen bij de verwarming van huizen. Waterstof is vooral nodig en onvermijdbaar in de industrie en lucht- en scheepvaart.

Hydrogen: The Ladder

Liebreich Associates

Unavoidable



Source: Liebreich Associates Concept: Adrian Hiel/Energy Cities

Rosenow (2022) concludeert aan de hand van 32 relevante internationale studies dat er geen rol voor waterstof is weggelegd bij de verwarming van woningen vanwege de inefficiëntie, de hoge

kosten en de beschikbaarheid van alternatieven zoals warmtepompen en warmtenetten. Het **Fraunhofer Instituut** (2022) vindt dat groene waterstof het beste kan worden gebruikt om grijze waterstof in de industrie te vervangen. Het levert daar een veel grotere CO₂-reductie op dan wanneer het gebruikt wordt in de woonomgeving. Het plan van de EU om waterstof bij te mengen in de bestaande gasinfrastructuur is niet efficiënt en leidt tot hogere kosten voor de gebruikers. Woningen kunnen efficiënter verwarmd worden met elektrische warmtepompen en het is technisch beter en goedkoper om alleen een industrieel waterstofnetwerk te ontwikkelen dan om de hele gasinfrastructuur geschikt te maken voor waterstof. Bovendien wordt er de komende jaren nog maar weinig groene waterstof geproduceerd in de EU. Volgens de **Routekaart Waterstof (NWP 2022)** is de rol voor waterstof in de gebouwde omgeving als vervanging van aardgas tot 2030 beperkt. Het betreft vooral onderzoek en pilots om kennis en ervaring op te doen. Op langere termijn is nog veel onduidelijk. Daarbij spelen verschillende factoren een rol, zoals de prijs en de beschikbaarheid van groene waterstof, het hergebruik van het bestaande aardgasnet, de omvang van het gebruik in andere sectoren en de mogelijkheden om alternatieven, zoals warmtepompen en warmtenetten, in te zetten.

9.5 Waterstofwijk in Hogeveen

De gemeente Hogeveen wil aardgas vervangen door waterstof in 80 tot 100 nieuwbouwwoningen in de nieuwe wijk Nijstad-Oost. In het kader van het demonstratieproject Hogeveen (Project consortium Waterstofwijk Hogeveen, 2020) is een waterstof-cv-ketel geproduceerd en een ontwerp gemaakt van een waterstofketen, vanaf het moment dat waterstof is geproduceerd tot het moment van verbranding in de waterstof-cv-ketel. Om zo te laten zien dat het mogelijk is waterstof in bestaande gasleidingen aan te voeren en met een waterstof-cv-ketel de huizen te verwarmen en van warm water te voorzien. Het doel is om met de opgedane kennis en ervaring 427 woningen in de naastgelegen bestaande wijk Erflanden over te schakelen van aardgas naar waterstof. De bouw van Nijstad-Oost zou starten in 2021 en de omschakeling in Erflanden in 2022. Maar het project heeft vertraging opgelopen.

In het demonstratieproject dat eind 2020 is afgerond werkten meer dan twintig organisaties samen die de hele keten omvatten. Het betrof overheden, kennisinstellingen en bedrijven.

De aanvoer van groene waterstof kent meerdere fasen. Voor de Nijstad-Oost zal waterstof eerst vanuit de Gasunielocatie in Zuidwending worden aangevoerd met tubetrailers. Waterstof wordt opgeslagen aan de rand van de wijk. In de volgende fase is aanvullend waterstof nodig voor de ombouw van de ruim 400 huizen in de bestaande wijk Erflanden. Aanvoer van waterstof met tubetrailers is niet meer mogelijk, omdat dit zou leiden tot een onwenselijk hoog aantal verkeersbewegingen van de tubetrailers. Ook worden de kosten voor de back-upmogelijkheid van opslag gedurende één koude winterweek te hoog. Daarbij zou de opslag zo groot worden dat strengere milieu- en veiligheidsvoorwaarden gaan gelden. Voor Erflanden wordt daarom uitgegaan van lokale elektrolyse met groene stroom van zonneweides in de omgeving. De waterstof is op deze manier 100% groen en lokaal.

De belangrijkste conclusie van het onderzoeksrapport is dat waterstof een alternatief is voor gangbare duurzame alternatieven, zoals warmtenetten en (hybride) warmtepompen, en dat het een belangrijke bijdrage kan leveren aan het verduurzamen van de warmtevoorziening van bestaande woningen. Ook kan de waterstofketen gerealiseerd worden binnen de ruimte die de bestaande regelgeving biedt. Wel vraagt de wet- en regelgeving bij afwijking van de bestaande situatie soms om nader onderzoek voor onderbouwing, specifieke afspraken of langere doorlooptijden. Door zoveel mogelijk aan te sluiten op de werkwijzen en procedures die bij aardgas gebruikelijk zijn, wordt de introductie van waterstof hanteerbaar. In Nederland is immers al kennis van en ervaring met veiligheidsprocedures, vergunningverlening, praktische uitvoering en organisatie op het gebied van

aardgas.

Hazenberg (2021) heeft een indicatieve maatschappelijke kosten-baten analyse (MKBA) voor de Erflanden uitgewerkt, waarbij vijf alternatieven bekeken zijn:

- groen gas: woningen gaan van aardgas over op groen gas,
- waterstof-cv-ketel: woningen krijgen een waterstof-cv-ketel in plaats van de huidige cv-ketel,
- hybride waterstof: naast de waterstof-cv-ketel wordt ook een hybride warmtepomp geplaatst,
- all-electric: woningen worden uitgerust met een all-electric warmtepomp,
- thermische energie uit oppervlaktewater (TEO): huizen worden aangesloten op een warmtenet, dat warmte onttrekt aan oppervlaktewater.

In de MKBA is groen gas de voordeligste optie en zijn de beide waterstofopties goedkoper dan all electric en TEO. De hogere kosten van all electric worden vooral veroorzaakt door de inzet van batterijen als er geen groene elektriciteit beschikbaar is, door hogere isolatiekosten en door meer ruimtebeslag. Omdat er weinig groen gas beschikbaar is, gaat de voorkeur uit naar waterstof. Dit wordt verder ondersteund door extra niet-gemonetiseerde baten op het gebied van werkgelegenheid, exportmogelijkheden, imago, CO₂-reductie, fijnstof-uitstoot, welbevinden-gedoe-overlast, sociaal kapitaal en kennisontwikkeling.

Meeuwissen (2019) heeft onder de bewoners van de Erflanden een onderzoek naar draagvlak voor de waterstofwijk uitgevoerd. Na een oproep in de Hoogeveense Courant, hebben 112 personen een vragenlijst ingevuld. Een overweldigende meerderheid van de respondenten (91%) is van mening dat de energietransitie nodig is. Over het algemeen staat men positief ten opzichte van waterstof. Ruim 90% van de respondenten geeft aan dat ze van de plannen afwisten. Een meerderheid vindt de gemeente Hoogeveen hierin vooruitstrevend en daardoor zijn ze trots op hun gemeente. Slechts een kwart (27%) van de respondenten heeft er vertrouwen in dat de gemeente dit project met succes kan uitvoeren. Van de respondenten denkt 30% dat hun woning geschikt is voor waterstof en 29% van de respondenten denkt dat waterstof wel erg duur is.

Van de respondenten is 40% het eens met de keuze voor waterstof en 25% niet. Een aanzienlijk deel (35%) is neutraal. Bij de vraag naar veiligheid ziet 34% waterstof als een veilige optie en 20% niet. Opvallend hierbij is dat de grootste groep neutraal is: 46%. Dat betekent dat er draagvlak, interesse en een positieve grondhouding is voor waterstof bij de respondenten, maar dat er ook nog heel veel vragen leven over de toepasbaarheid, de veiligheid en de kosten die gemoeid zijn met waterstof. Bewoners hebben behoefte aan gerichte informatie over deze drie elementen van de overgang naar waterstof. Daarnaast is het natuurlijk van belang dat het project alleen maar met groene waterstof wordt uitgevoerd. Het valt namelijk niet uit te leggen dat fossiele brandstoffen wordt vervangen door andere fossiele brandstoffen, zoals de productie van waterstof door middel van aardgas. Daarom moet in de communicatie en informatievoorziening aandacht besteed worden aan hoe het waterstof wordt geproduceerd, om alle mogelijke sceptische reacties op deze manier van tevoren weg te nemen.

Onderzoekers van de **Hanzehogeschool Groningen** hebben in 2021 opnieuw een enquête gehouden naar de acceptatie van waterstof bij de bewoners van de Hoogeveense wijk Erflanden. Aan de enquête hebben bewoners van 128 woningen meegedaan ofwel 30% van de 427 woningen. De invullers waren vooral mannen en de gemiddelde leeftijd was 55 jaar.

Van de respondenten was 58% voor en 42% tegen. De tegenstanders waren zekerder van hun mening dan de voorstanders. Bij beide groepen zag ongeveer 40% mogelijkheden om hun mening te veranderen. Een derde van de respondenten zei goed op de hoogte te zijn van waterstof en de voor- en nadelen van de waterstofwijk, een derde matig, en een derde slecht. Een kwart van de respondenten vond dat ze niet voldoende worden geïnformeerd en dat er niet voldoende ruimte is voor inspraak. Driekwart was hierover wel positief of neutraal. Slechts 15% van de respondenten had vertrouwen in de beslissingen van de gemeente, en maar 25% in de goede uitvoering van het project.

Bijna 70% van de respondenten voelde iets voor een lokale energiecoöperatie.

Bij verder analyse van aangevoerde argumenten door voor- en tegenstanders bleek dat beide groepen zich zorgen maken over het klimaat en de noodzaak zien van innovatie bij de overstap naar duurzame energie. Bij voorstanders was het leveren van een bijdrage aan de energietransitie het belangrijkste thema was. Andere belangrijke thema's waren het gemak van de overstap met deze subsidiekans en de kans om een innovatief project op te starten. Bij tegenstanders waren vooral thema's rond kosten, onduidelijkheid en onzekerheden belangrijk. Tegenstanders betwijfelden ook of er voldoende groene waterstof is om huizen mee te verwarmen en of waterstof wel echt duurzaam is.

De twee onderzoeken naar draagvlak in 2019 en 2021 laten ruwweg dezelfde uitkomsten zien: zo'n 60% van de bewoners is voorstander van de waterstofplannen en 40% is tegen. Maar een kwart is echt tegen en van de overige drie kwart is de ene helft echt voor en de andere helft weet het niet zeker of is neutraal.

De bewoners zijn goed op de hoogte van de plannen en slechts een kwart van de bewoners heeft er vertrouwen in dat de gemeente het project goed kan uitvoeren. Bewoners maken zich zorgen om het klimaat en zien dat de energietransitie nodig is. Ze vinden dat er nog veel onduidelijk en onzeker is bij de praktische uitwerking en hebben veel vragen over de kosten van het project.

In de loop van 2022 bleek dat in het waterstofproject Hoogeveen de waterstofprijs berekend moet worden inclusief opslag duurzame energie- en klimaattransitie (ODE) en energiebelasting (EB). Het verschil tussen de waterstofprijs en de gasprijs wordt dan hoger, waardoor per woning meer subsidie betaald moet worden. Daarom is de omvang van het project terug gebracht van 427 naar 100 woningen. Onduidelijk is nog wat de gevolgen zijn van de sterke stijging van de energieprijzen in 2022 op het project en op het draagvlak van de bewoners.

9.6 Draagvlak

Uit onderzoek van het **Sociaal en Cultureel Planbureau** (SCP 2020) blijkt dat driekwart van de Nederlanders een hoog probleembesef heeft ten aanzien van de klimaatverandering. Ze vinden dat de klimaatverandering wordt veroorzaakt door de mens, ze maken zich er zorgen om en zien het belang van de omschakeling van fossiele naar groene energie. Dat betekent niet dat voor specifieke maatregelen dezelfde steun bestaat. Zo staat maar ongeveer de helft van de Nederlanders positief tegenover de plannen van de regering om woningen aardgasvrij te maken en is iets meer dan een kwart negatief.

De eigen financiële situatie is één van de belangrijkste redenen voor het wel of niet steunen van het beleid. Mensen die aangeven (zeer) makkelijk rond te komen zijn positiever over het gasvrij maken van hun huis dan mensen die aangeven zeer moeilijk rond te komen. Voor een deel hangt dat samen met het feit dat mensen die (zeer) makkelijk kunnen rondkomen meer vertrouwen hebben in de regering en zich ook minder zorgen maken over de impact van het klimaatbeleid op hun manier van leven (moet ik anders gaan leven?) dan mensen die zeer moeilijk kunnen rondkomen. Mensen die al geldzorgen hebben zullen zich waarschijnlijk ook sneller zorgen maken over wat het klimaatbeleid voor hen betekent.

Verder spelen leeftijd, opleiding en geslacht een rol: mensen tot 34 jaar zijn positiever dan ouderen tussen de 45 en 54 en 65+'ers; hoger opgeleiden en vrouwen zijn positiever dan lager opgeleiden en mannen. Hoger opgeleiden en vrouwen zijn vaker bereid iets te doen tegen klimaatverandering. Afstappen van aardgas kan voor mensen een flinke renovatie van hun huis betekenen. Voor zo'n verbouwing is draagvlak noodzakelijk. Het Planbureau heeft mensen met een koopwoning en een cv-ketel of gaskachel gevraagd in hoeverre zij overwegen een aardgasvrij alternatief aan te schaffen als hun gasketel vervangen moet worden. Hierbij maakt het Planbureau onderscheid in drie groepen: voorlopers (52%; waarvan 6% overtuigde voorlopers en 46% voorzichtige voorlopers); twijfelaars

(19%) en achterblijvers (28%; waarvan 25% aarzelende achterblijvers en 3% afkeurende achterblijvers).

De meeste ondervraagden zijn voorzichtige voorlopers, twijfelaars en aarzelende achterblijvers. Deze grote middengroep heeft weinig vertrouwen in de aardgasvrije technologie, vindt het moeilijk om te bepalen wat een goed alternatief is voor de cv-ketel en wacht liever tot de overheid met plannen komt. Overigens is het verschil tussen deze groepen erg klein; vaak bepaalt de houding van mensen of ze een voorzichtige voorlopers of een aarzelende achterblijvers zijn. Als ze bereid zijn tot actie en/of ze hebben ze een hoog probleembesef dan vallen ze eerder in de categorie voorzichtige voorlopers.

De conclusies van het **Sociaal en Cultureel Planbureau** sluiten aan op eerder onderzoek (SCP, 2019) waarbij het draagvlak voor aardgasvrij wonen “beperkt” werd genoemd. Mensen leggen zich grotendeels neer bij de transitie naar aardgasvrij wonen. Ze zijn afwachtend, omdat ze onzeker zijn over de kosten en de techniek. Ook in een recenter rapport (SCP, 2021) constateert het Planbureau dat ongeveer een kwart van de woningeigenaren bezig is (geweest) met woningverduurzaming, maar dat meer dan de helft nog niet of nauwelijks in beweging is gekomen. Er is sprake van een attitude-behaviour gap. Men is wel gemotiveerd om maatregelen te nemen, maar men gaat toch niet tot actie over door allerlei barrières op het gebied van financiën, informatie en besluitvorming. Verder spelen er gedragsmatige mechanismen en barrières bij de adoptie van nieuwe energietechnologie (zie hoofdstuk 6.4).






In het Klimaatakkoord is woonlastenneutraliteit het uitgangspunt. Dat betekent dat de woonlasten ten gevolge van de energietransitie niet mogen stijgen. Het **Economisch Instituut voor de Bouw** (EIB 2018, 2019) berekende dat de investeringskosten om een woning energieneutraal te maken gemiddeld € 40.000 bedragen en dat minder dan de helft wordt terugverdiend door een lagere energierekening. Het **Planbureau voor de Leefomgeving** (PBL 2020a) constateert dat woonlastenneutraliteit een illusie is: de besparing in energielasten weegt zelfs onder de meest optimistische omstandigheden niet op tegen de investering in de verduurzaming van de woning. Zonder subsidie is de energietransitie voorlopig niet woonlastenneutraal en zeker niet rendabel te maken. Dat lijkt gezien de hoge prijs van waterstof in vergelijking met die van aardgas zeker van toepassing voor een waterstofwijk. **I&O Research** (2021) constateert in een onderzoek onder huiseigenaren dat de hoge kosten de belangrijkste belemmering zijn om te isoleren. Meer dan 80% van eigenaren met een niet-geïsoleerde woning overweegt wel te isoleren als de overheid meer subsidie geeft.

De Nederlandsche Bank (2022) heeft onderzocht dat 80% van huiseigenaren de verduurzaming van hun woning zelf kan betalen uit spaargeld (50%) of door de hypotheek te verhogen (30%) en dat 20%, dus één op de vijf, zo'n investering niet kan bekostigen. Vier op de vijf huiseigenaren hebben voldoende financiële middelen maar toch investeren ze niet, omdat er te weinig financiële prikkels zijn. Het is niet rendabel en bovendien is het voor veel huizenbezitters onduidelijk wat er precies van hen wordt verwacht. De overheid moet met heldere transitiepaden, duidelijke voorlichting en normen, meer duidelijkheid creëren voor huizenbezitters en andere gebouweigenaren. Het beleid moet bestaan uit een combinatie van beprijzing, subsidiëring en normering. Door de belasting op aardgas te verhogen en de belasting op elektriciteit op hetzelfde moment te verlagen worden aardgas besparende investeringen aantrekkelijker. Ook kunnen (langlopende) subsidieregelingen huiseigenaren meer zekerheid bieden. Voor de huiseigenaren die niet genoeg geld hebben om duurzaam te investeren moet de overheid aanvullende maatregelen treffen, omdat zij vaak wonen in “sociaaleconomische en/of ruimtelijke aandachtsgebieden”.

Volgens **Natuur&Milieu** (2020) gaat waterstof een belangrijke rol spelen bij de verduurzaming van het Nederlandse energiesysteem. Omdat groene waterstof schaars is moeten er slimme keuzes gemaakt worden over hoe en waar waterstof wordt gebruikt. Allereerst in sectoren,

zoals zware industrie, waar groene waterstof de enige manier om te verduurzamen. Maar voor verwarmen, douchen, koken en vervoeren is waterstof geen efficiënte oplossing. Daar zijn betere alternatieven voor. In onderstaande waterstofladder worden de prioriteiten voor gebruik aangegeven: essentieel, belangrijk, mogelijk, beperkt en gering. Er is dus geen draagvlak bij Natuur&Milieu voor het gebruik van waterstof in de woonomgeving.

WATERSTOFLADDER

 ESSENTIEEL	 BELANGRIJK	 MOGELIJK	 BEPERKT	 GERING
Dit zijn de meest prioritaire toepassingen van waterstof, waar op termijn geen duurzame alternatieven voor zijn.	De alternatieven, die op termijn beschikbaar komen, zijn in de meeste gevallen niet meer geschikt dan waterstof.	De alternatieven die op termijn beschikbaar komen, kunnen in gevallen meer geschikt zijn dan waterstof, in andere gevallen zal waterstof de meest geschikte toepassing zijn.	De alternatieven die op termijn beschikbaar komen, zijn in de meeste gevallen meer geschikt dan waterstof.	Voor deze toepassingen bestaan al geschikte duurzame alternatieven.
Toepassing	Toepassing	Toepassing	Toepassing	Toepassing
<ol style="list-style-type: none"> 1 Grondstof productie kunstmest 2 Zeer hoge temperatuur industriële proceswarmte 	<ol style="list-style-type: none"> 1 Grondstof in plastic- en staalindustrie ter vervanging van fossiele grondstof 2 Balansfunctie energie-infrastructuur (bufferfunctie) 3 Intercontinentaal vliegen en varen 	<ol style="list-style-type: none"> 1 Niches gebouwde omgeving 2 Binnenvaart 3 Continentaal vliegen 	<ol style="list-style-type: none"> 1 Hoge temperatuur industriële proceswarmte 2 Internationaal wegvervoer 	<ol style="list-style-type: none"> 1 Lage temperatuur industriële proceswarmte 2 Verwarmen, douchen, koken 3 Regionaal en nationaal wegvervoer 4 Treinen, regionale bussen, personenvervoer
Mogelijke alternatieven	Mogelijke alternatieven	Mogelijke alternatieven	Mogelijke alternatieven	Mogelijke alternatieven
<ol style="list-style-type: none"> 1 Geen alternatief 2 Geen reële grootschalige alternatieven 	<ol style="list-style-type: none"> 1 Recycling 2 Batterijopslag; Netverzwaringen; Afschakelen hernieuwbare productie 3 Geen grootschalige alternatieven 	<ol style="list-style-type: none"> 1 Elektrisch verwarmen, warmtenetten 2 Elektrische scheepvaart 3 Elektrisch vliegen, trein 	<ol style="list-style-type: none"> 1 Hoge temperatuur warmtepompen 2 Elektrisch vervoer 	<ol style="list-style-type: none"> 1 Elektrisch verwarmen 2 Elektrisch verwarmen 3 Elektrisch vervoer 4 Elektrisch vervoer

Bron: Natuur&Milieu (2020)

De inzet van waterstof in een wijk of buurt wordt uiteindelijk bepaald door de maatschappelijke voor- en nadelen van de verschillende opties. De overheid kan daarbij sturen met wetgeving, belastingen, heffingen, vergunningen en voorzieningen (fabrieken, overslagfaciliteiten, transport- en distributienetten): de kosten van waterstof laag houden door geen belasting te heffen en subsidie te geven voor de bouw van waterstofinstallaties en de aanleg van een waterstofnetwerk.

De **Raad voor Leefomgeving en Infrastructuur** (2021) wijst op het belang van draagvlak in de energietransitie. De raad vindt dat de overheid de burgers erop moet voorbereiden dat waterstof een integraal onderdeel wordt van de maatschappij. In de overgangsfase van een fossiele naar een

duurzame toekomst zal blauwe waterstof tijdelijk nodig zijn en zal er onvermijdelijk sprake zijn van hogere kosten. Ook bij de inzet van waterstof in de gebouwde omgeving zal hierover duidelijk moeten worden gecommuniceerd. Hierbij is het cruciaal dat er geen te rooskleurige voorstelling wordt gegeven over de kosten en dat transparant wordt hoe de extra kosten worden verdeeld tussen bevolkingsgroepen onderling en tussen burgers en bedrijven.

De sterke stijging van de energieprijzen in 2022 maakt het aantrekkelijk om huizen te isoleren en zonnepanelen aan te schaffen. Ook zorgen hogere elektriciteitsprijzen voor hogere prijzen van groene waterstof. Dit betekent meer onzekerheid over de rol van groene waterstof in de woonomgeving.

9.7 Samenvatting

Waterstof kan aardgas vervangen bij verwarmen, koken en voorzien in warm water. Met beperkte kosten is het huidige aardgasnet geschikt te maken voor waterstof. Waterstof geeft geen grotere risico's dan aardgas.

In Nederland is nog onvoldoende waterstof beschikbaar om in de totale toekomstige vraag te voorzien.

De noodzaak voor groene waterstof en andere duurzame gassen is vooral in de industrie groter dan in de gebouwde omgeving. In de gebouwde omgeving zijn goedkopere alternatieven, zoals warmtepompen, warmtenetten met restwarmte, warmte- en koudeopslag en geothermie. Deze alternatieven zijn er niet in de industrie waar waterstof een duurzame grondstof is en een optie voor hogetemperatuur warmte.

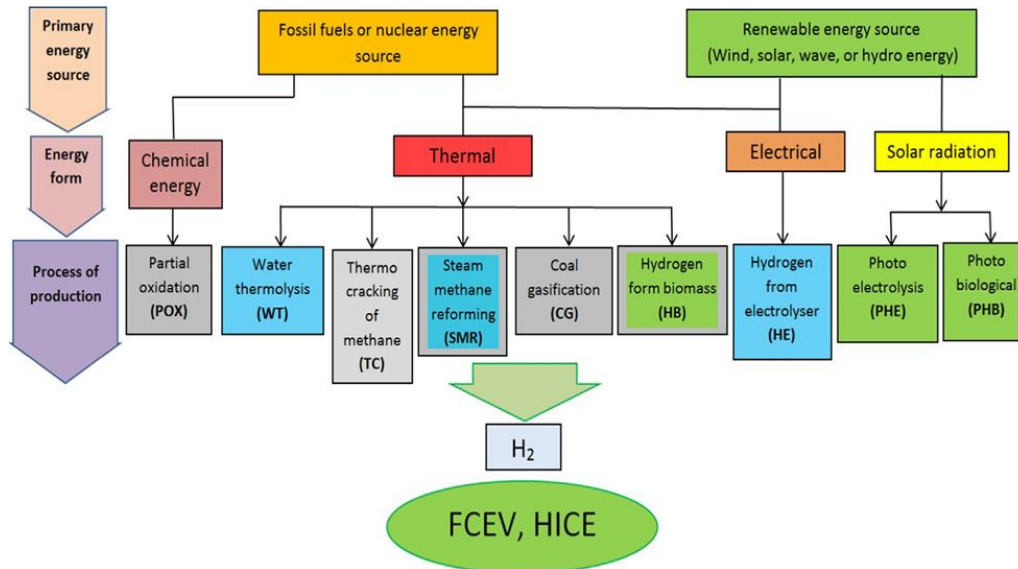
Maar als er geen andere mogelijkheden zijn voor verwarming van gebouwen en wanneer opslag nodig is voor de (piek)aanvulling bij elektrische oplossingen en bij rest- en aardwarmtegebruik, komt waterstof toch weer in beeld. Voorlopig is de rol van waterstof in de gebouwde omgeving voor de periode tot 2030 beperkt tot experimenten en voor de langer termijn (2030-2050) nog onduidelijk. Een groot deel van de Nederlandse bevolking vindt de klimaatverandering problematisch, maar tegelijkertijd is de steun voor specifieke maatregelen, zoals het aardgasvrij maken van woningen, beperkt. Dat heeft te maken met financiën en onzekerheid over de verschillende technieken om aardgas te vervangen. Het financiële draagvlak is groter bij hogere inkomensgroepen dan bij lagere. In principe zijn mensen niet negatief maar er is nog veel onduidelijkheid over de techniek, de toepasbaarheid, de veiligheid en de kosten. Hierdoor zijn mensen vooral afwachtend en is er geen actieve betrokkenheid. Ook bij onderzoek naar draagvlak onder bewoners van een mogelijke waterstofwijk in Hoogeveen blijkt er nog veel onzekerheid te zijn.

Door isolatiemaatregelen daalt het energiegebruik waardoor hogere prijzen voor duurzame energie gecompenseerd kunnen worden en de totale energierekening gelijk kan blijven. Investerings in isolatie blijken echter meer te kosten dan ze opleveren. De energietransitie in de woonomgeving is voorlopig niet woonlasten neutraal en zeker niet rendabel. De overheid moet niet alleen subsidiëren maar ook een helder en duidelijk transitiepad uitzetten voor woningbezitters.

De hoge energieprijzen zijn een stimulans om woningen beter te isoleren. Maar het leidt ook tot meer onzekerheid en uitstelgedrag om over te stappen op duurzame bronnen om het huis te verwarmen.

10 Bijlage

Verschillende technieken om waterstof te produceren (Alazemi & Andrews):



Elektrische personenauto's in Nederland

Top 10 elektrische auto's
Bron: RVO, juli 2022

Elektrische auto		Plugin hybride auto	
Merk	Aantal	Merk	Aantal
Tesla Model 3	42.081	Mitsubishi Outlander	21.549
Kia Niro	17.787	Volvo V60	12.193
Hyundai Kona	16.312	Volkswagen Golf	9.262
Volkswagen ID.3	15.402	Volvo XC40	8.119
Renault ZOE	12.370	Volvo XC90	8.058
Nissan Leaf	11.982	Volkswagen Passat	6.974
Tesla Model S	11.525	Audi A3 E-Tron	6.264
Volkswagen Golf	10.416	Lynk&Co Lynk & Co 01	5.659
Audi E-Tron	10.020	Volvo XC60	5.648
Skoda EnyaQ	9.671	Mercedes Benz C-Klasse	5.629

Ontleend aan Zelf energie produceren <https://www.zelfenergieproduceren.nl/nieuws/bijna-half-miljoen-elektrische-autos-op-de-weg>. Augustus 2022.

11 Literatuur

A

- Achterberg Peter, Houtman Dick, Bohemen van Samira, Manevska Katerina. Unknowing but supportive? Predispositions, knowledge, and support for hydrogen technology in the Netherlands. *International journal of hydrogen energy* 35 (2010) 6075-6083.
- Achterberg Peter. The changing face of public support for hydrogen technology explaining declining support among the Dutch (2008-2013). *International journal of hydrogen energy* 39 (2014) 18711-18717.
- Alazemi Jasem, Andrews John. Automotive hydrogen fuelling stations: An international review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45 (2015) 483-499.
- ANWB. De Elektrisch Rijden Monitor. 2017 – 2021. <https://www.anwb.nl> › Duurzaam
- Aué Jan-Jaap. De rol van waterstof binnen de Energietransitie: “Waterstof als innovatiemotor”. Lectorale rede. 21 februari 2018. Hanzehogeschool, Groningen.
- Aurora Energy Research. Hydrogen in the Northwest European energy system. 2020.
- Autoriteit Consument en Markt. Ontwikkeling en regulering van waterstofinfrastructuur. 2021.
- Berenschot & TNO. CO₂-vrije waterstof uit gas: fundamentele stap naar duurzaam energiesysteem. 24-11-2017.

B

- Batel Susana, Devine-Wright Patrick, Tangeland Torvald. Social acceptance of low carbon energy and associated infrastructures: A critical discussion. *Energy Policy*. Volume 58, July 2013.
- Batel Susana. Research on the social acceptance of renewable energy technologies: Past, present and future. *Energy research & social science*. Volume 68. October 2020.
- BDH, Enduso, Gasunie, Gemeente Groningen, Liander en Stedin. Staalkaart groene waterstof. <https://staalkaartwaterstof.nl/> 2021
- Berenschot en Kalavasta. Klimaatneutrale energiescenario's 2050. Scenariostudie ten behoeve van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050. 2020a.
- Berenschot en Kalavasta. Uitrolpaden voor het waterstofsysteem in Nederland in 2050. 2020b.
- Berenschot en Kalavasta. Klimaatneutrale Energiescenario's 2050. Waterstof. 2020c.
- BloombergNEF. Hydrogen Economy Outlook. March 30, 2020.
- Bockris John, O.M. The hydrogen economy: Its history. *International Journal of Hydrogen Energy*.2 Volume 38, Issue 6, Pages 2579-2588 27 February 2013.
- Botelier Ralf. Het is tijd om de mens te herwaarderen. *Volkskrant* 3 april 2021.
- Bracht van Mart, Braun Jan. Eindrapportage: Joint Fact Finding: CO₂-afvang en –opslag. Achtergrondnotitie ten behoeve van de sectortafel Industrie. 7 december 2018
- Brandweer Amsterdam-Amstelland Sector Expertise en Regie. Handreiking voor optreden tijdens incidenten met waterstoftoepassingen.
- Bruijn de Frank, Steen Marc. Waterstof op weg naar de praktijk. Verslag van de dag “Waterstof voor Bestuurders en Beleidsambtenaren” georganiseerd door ECN en JRC-IE op 6 april 2006 te Petten.
- Bunzeck Ingo, Backhaus Julia, Hoevenaars Bart. Building a hydrogen refuelling infrastructure in the Netherlands: influencing factors from the car drivers' perspective. Essen/ Germany. 2010 <https://www.researchgate.net/publication/48693523>

C

- CE Delft. Klimaatbeleid voor mobiliteit op de kaart. Februari 2017a.
- CE Delft. Net voor de Toekomst. Achtergrondrapport. 22 november 2017b.
- CE Delft. Waterstofroutes Nederland. Blauw, groen en import. Juni 2018a.
- CE Delft. Werk door groene waterstof. Eerste verkenning naar behoud van werkgelegenheid en creëren van nieuwe banen door grootschalige uitrol groene waterstof in Nederland. 2018b.

- CE Delft. Waterstof voor de gebouwde omgeving. Document voor de gemeente Nijmegen. Februari 2020a.
- CE Delft. LCA drie typen personenauto's. Een vergelijking van een benzineauto, batterij-elektrische auto en waterstofauto. Mei 2020b.
- CE Delft. Kosteneffectieve alternatieven voor CCS. Een analyse van de mogelijke rol van CCS in vier industriële sectoren. Oktober 2020c.
- Clark II Woodrow W. The green hydrogen paradigm shift: Energy generation for stations to vehicles. Utilities Policy 16 (2008) 117-129.
- Clean Energy Partnership. <https://cleanenergypartnership.de/en/home/> 2020
- Clingendael International Energy Programme (CIEP). Kijken in een spiegel van de toekomst. Twee verhaallijnen over geopolitieke ontwikkelingen en de invloed op het energie- en klimaatbeleid. CIEP 2019a.
- Clingendael International Energy Programme (CIEP). Van onzichtbare naar meer zichtbare hand? Waterstof en elektriciteit: naar een nieuwe ruggengraat van het energiesysteem. 2019b.
- Coalitieakkoord 2021 – 2025. Omzien naar elkaar, vooruitkijken naar de toekomst. VVD, D66, CDA en ChristenUnie. 15 december 2021.

D

- Dagblad van het Noorden. Ton Voermans. Elektrische auto maakt weer eindspurt. 31 december 2020.
- Dagblad van het Noorden. Groene waterstof tanken op campus Century Autogroep. Holthausen Energy Points neemt eerste openbare vulstation in Groningen in gebruik. 3 november 2021.
- Dagblad van het Noorden. Stroom nieuw windpark voor waterstoffabriek Eemshaven. 12 november 2022.
- De Nederlandsche Bank. Financiering voor de verduurzaming van de woningvoorraad. 2022.
- Derempouka E, Skjold T, Haarstad H and Nja O. Examining the role of safety in communication concerning emerging hydrogen technologies by selected groups of stakeholders. Ebook-ICHs 2021.
- Devine-Wright P. Reconsidering public attitudes and public acceptance of renewable energy technologies: a critical review. University of Manchester. 2007.
- DNV GL. Power-to-Hydrogen IJmuiden Ver. Final report for TenneT and Gasunie. 06 juli 2018.
- DNV GL. Hydrogen in the electricity value chain. Group technology & research, position paper 2019.
- DNV. Heading for hydrogen. 2020.
- DNV GL. Gedrag van waterstof bij lekkages in het gasdistributiesysteem. 2020.
- DNV GL. Groene waterstof en hergebruik bestaande gasleidingen als oplossing voor congestieproblematiek. Haalbaarheidsonderzoek naar groene waterstof als mogelijke oplossing voor congestieproblematiek in het lokale elektriciteitsnetwerk in de regio Emmen. 2020.
- DNV. Rising to the challenge of a hydrogen economy. 2021.
- DNV. Hydrogen forecast to 2050. Energy Transition Outlook. 2022a.
- DNV. Energy transition outlook 2022. A global and regional forecast to 2050. 2022b
- Drenthe in transitie. Vijf vragen én antwoorden over de waterstofwijk in Hoogeveen. <https://www.drentheintransitie.nl/initiatieven/2019/vijf-vragen/>
- Drift. Hydrogen for the Port of Rotterdam in an International Context. A plea for leadership. 18 juni 2020.
- Duurzaam bedrijfsleven. Auto's op waterstof: de toekomst of achterhaald? <https://www.duurzaambedrijfsleven.nl/mobiliteit/32127/waterstofauto-toekomst>

E

- Ecorys, TNO. Waterstoftransport – verkenning marktordeningsalternatieven. Eindrapport. Opdrachtgever: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Rotterdam/Delft, 31 mei 2018.

- EIB. Economisch Instituut voor de Bouw. Klimaatbeleid en de gebouwde omgeving. Van ambitie naar resultaat. Mei 2018.
- EIB. Economisch Instituut voor de Bouw. Klimaatbeleid tegen het licht. Commentaar op de doorrekening van het Klimaatakkoord voor de gebouwde omgeving en mobiliteit. Juli 2019.
- Ekinetix. Vergunningproces waterstoftankstations. Praktische handleiding. 23 Maart 2020.
- Elektrochemische Conversie & Materialen. Naar een CO₂-neutrale energievoorziening in 2050. <https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/Algemeen/ECCM%20rapport.pdf>
- Emodi Nnaemeka Vincent, Lovell Heather, Levitt Clinton, Franklin Evan. A systematic literature review of societal acceptance and stakeholders' perception of hydrogen technologies. International journal of hydrogen energy 46 (30669- 30697) 2021.
- Energieia. Hans van der Lugt. Ook RWE en Innogy onderzoeken waterstof. 18 juni 2019a.
- Energieia. Lugt van der Hans. Waterstof Coalitie: overheid moet investeren in groene waterstof. 14 november 2019b.
- Energieia. Westerveld Joep. Onderzoek van start naar productie waterstof op Goeree-Overflakkee. 8 september 2020.
- Energieia. Ronde de Katrijn. Gebouwde omgeving domineert toekomst Utrechtse energie-infrastructuur. 22 februari 2022a.
- Energieia. Lugt van der Hans. OCI investeert verder in blauwe ammoniak. 12 september 2022b.
- Energieia. Lugt van der Hans. Frans bedrijf Lhyfe wil elektrolyser van 200 MW neerzetten in Delfzijl. 10 oktober 2022c.
- Energie-Nederland. Europese waterstofstrategie geconcretiseerd voor Nederland. <https://www.energie-nederland.nl/europese-waterstofstrategie-geconcretiseerd-voor-nederland/> 9 juli, 2020.
- Enpuls, TNO, DNV GL. Waterstof uit elektrolyse voor maatschappelijke verantwoord netbeheer. Resultaten van een door TNO en DNV, GL voor Enpuls uitgevoerd onderzoek. 23 november 2018a.
- Enpuls, TNO, DNV GL. Technologiebeoordeling van groene waterstof. 29 november 2018b.
- European Commissie. Een waterstofstrategie voor een klimaatneutraal Europa. 8 juli 2020.
- Europese Commissie. Fit for 55: het EU-klimaatstreefdoel voor 2030 bereiken op weg naar klimaatneutraliteit. 14 juli 2021.
- EnTranCe waterstofmonitor <https://www.en-tran-ce.org/custom/uploads/2021/02/Whitepaper-publieksmonitor-waterstof-GWB.pdf> 2021.
- European Zero Emission Technology and Innovation Platform. Claude Heller (Air Liquide), Guido Magneschi (GCCSI), Kristin Jordal (SINTEF). Commercial Scale Feasibility of Clean Hydrogen. ZEP. 2017.

F

- Farla Jacco, Alkemade Floortje, Suurs Roald A.A. Analysis of barriers in the transition toward sustainable mobility in the Netherlands. Technological Forecasting & Social Change 77 1260–1269 (2010).
- FD. Hoe een Groningse waterstoftruck de wereld verovert. 31 maart 2021a.
- FD. Tata aast op subsidie en steun van overheid om sneller te vergroenen. 15 september 2021b. .
- FD. Timmermans: Nederland kan beter inzetten op groene waterstof. 7 oktober 2021c.
- FD. Beleggers beleven nieuwe sof met producent van waterstoftrucks. 14 augustus 2022.
- FME. Waterstof: kansen voor de Nederlandse industrie. Reijerkerk Jaco, Rhee van Gigi. Oktober 2019.
- Fraunhofer Institute for Energy Economics and Energy System Technology (IEE). The limitations of hydrogen blending in the European gas grid. A study on the use, limitations and cost of hydrogen blending in the European gas grid at the transport and distribution level. 2022.

G

- Gasunie. <https://www.dewereldvanwaterstof.nl/gasunie/infrastructuur/> 2019.
- Gasunie New Energy <https://www.gasunienewenergy.nl/projecten/hystock> 2019.
- Gasunie and TenneT. Phase II - Pathways to 2050. A joint follow-up study by Gasunie and TenneT of the Infrastructure Outlook 2050. 2020
- Gawalo. Waterstofketel versus warmtepomp. www.gawalo.nl 2019.
- Gelderlander; <https://www.gelderlander.nl/arnhem/arnhem-opent-waterstoftankstation~a78d4ab2/>. Februari 2017.
- Gemeente Groningen. Routekaart Groningen CO₂-neutraal 2035. Strategie 2023 en eindbeeld 2035. 2018.
- Gemeynt de, CE Delft en Margriet Kuijper Consultancy. Routekaart CCS: CO₂-afvang en -opslag, een ongemakkelijk maar onmisbaar onderdeel van de energietransitie. Maart 2018.
- Gemeynt de. Green Liaisons. Hernieuwbare moleculen naast duurzame elektronen. Contouren van een routekaart Hernieuwbare Gassen 2050. April 2018.
- Goeree-Overflakkee https://www.goeree-overflakkee.nl/duurzaam-go/waterstof_46733/item/h2go-programma_232204.html. 2020
- Greenpeace. Ons klimaat verdient echte oplossingen, geen CO₂-opslag. <https://www.greenpeace.org/nl/klimaatverandering/18531/co2-opslag/> 6 juni, 2019.

H

- H₂Platform. Waterstof in parkeergarages. <https://opwegmetwaterstof.nl/waterstof-in-parkeergarages/> .2020.
- H₂Platform. Kostenaspecten bij waterstof voor de mobiliteit. <https://opwegmetwaterstof.nl/kostenaspecten-bij-waterstof-voor-de-mobiliteit/> .2021.
- H₂Platform. <https://opwegmetwaterstof.nl/eind-2021-12-tot-14-waterstoftankstations-operationeel/>. 15 juli 2021.
- Handelsblatt. Daimler und Volvo paktieren bei Brennstoffzellen für Lkw. <https://www.handelsblatt.com/technik/thespark/gemeinschaftsunternehmen-daimler-und-volvo-paktieren-bei-brennstoffzellen-fuer-lkw/25758528.html> 21.04.2020.
- Hanzehogeschool Groningen. Waterstofwijk Hoogeveen: peiling bewonersopinie.2021.
- Hazenberg Willem. Indicatieve maatschappelijke kosten baten analyse waterstofwijk Hoogeveen. https://www.researchgate.net/publication/350353695_Indicative_Social_cost_benefit_analysis_Hydrogen_heating_MKBA_Hydrogen_City_Hoogeveen_the_Netherlands.
- Hellinga C, Wijk van A.J.M. Waterstof voor gebouwverwarming: Naar 500.000 woningen op waterstof in 2030. Delft University of Technology. 2021.
- Hienuki Shunichi, Hirayama Yoshie, Shibutani Tadahiro, Sakamoto Junji, Nakayama Jo and Miyake Atsumi. How knowledge about or experience with hydrogen fueling stations improves their public acceptance. www.mdpi.com/journal/sustainability. 12 November 2019. Sustainability 2019, 11, 6339; doi:10.3390/su11226339.
- Hinkley Jim, Hayward Jenny, McNaughton Robbie, Gillespie Rob, Matsumoto Ayako, Watt Muriel, Lovegrove Keith. Cost assessment of hydrogen production from PV and electrolysis. CSIRO, Australia. 2016.
- Hoogeveen <https://www.hoogeveen.nl/waterstof> 2020.
- Hoogma R.J.F. Dwarsverband. Overzicht van Nederlandse waterstofinitiatieven, -plannen en -toepassingen Input voor een Routekaart Waterstof. Opdrachtgever RVO / TKI Gas Periode: september – oktober 2017.
- Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/maatregelen-om->

- overstromingen-te-voorkomen/hoogwaterbeschermingsprogramma.aspx. 2021.
- Horlings Jeroen. De grote belofte van waterstof Het alternatief voor elektrisch rijden. <https://tweakers.net/reviews/6449/de-grote-belofte-van-waterstof-het-alternatief-voor-elektrisch-rijden.html> 03-11-2018.
 - Huétink Floris J, Vooren van der Alexander, Alkemade Floortje. Initial infrastructure development strategies for the transition to sustainable mobility *Technological Forecasting & Social Change* 77 1270–1281 (2010).
 - Huijts N.M.A, Molin E.J.E, Steg L. Psychological factors influencing sustainable energy technology acceptance: a review-based comprehensive framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 p.525-531, 2012. Dit is hst 3 in het proefschrift.
 - Huijts N.M.A, Groot de J.I.M, Molin E.J.E & Wee van B. Intention to act towards a local hydrogen refueling facility: moral considerations versus self-interest. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 48: 63–74. Dit is hst 4 in het proefschrift. 2013a.
 - Huijts N.M.A, Molin E.J.E, Wee van B. Hydrogen refueling facility acceptance: a structural equation model based on the technology acceptance framework. 2013b. Dit is hst 5 in het Proefschrift.
 - Huijts Nicole M.A. Sustainable Energy Technology Acceptance: a psychological perspective. Delft University of Technology. Proefschrift. 2013c.
 - Huijts N.M.A, Wee van B. The evaluation of hydrogen fuel stations by citizens: The interrelated effects of socio- demographic, spatial and psychological variables. *International journal of hydrogen energy* 40 p10367-10381. 2015.
 - Huijts Nicole M.A. The emotional dimensions of energy projects: Anger, fear, joy and pride about the first hydrogen fuel station in the Netherlands. *Energy Research & Social Science* 44 p138–145. 2018.
 - Huijts, Nicole; de Vries, Gerdien; Molin, Eric. A positive shift in the public acceptability of a low-carbon energy project after implementation. The case of a hydrogen fuel station. Delft 2019.
 - Hulshof, D; Mulder, M; Perey, P. Giving hydrogen a jump start: lessons learned from Dutch policies in other industries. (CEER Policy Paper; No. 9). Centre for Energy Economics Research (CEER). 2021.
 - HyDelta. Summary for policymakers: hydrogen value chains in the Netherlands. 2022.
 - Hydrogen Council. Path to hydrogen competitiveness. A cost perspective. 2020.
 - Hydrogen Incidents and Accidents Database (HIAD) <https://odin.jrc.ec.europa.eu/giada/> 2019
- I**
- I&O Research. Isolatiebeleid woningen. Onderzoek onder woningeigenaren. 2021.
 - IEA. The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. 2019.
 - IEA. Energy Technology 2020 Perspectives. 2020.
 - IEA. Global hydrogen review. 2021.
 - IEA. Global Energy Review: CO₂ emissions in 2021. Flagship report. March 2022a.
 - IEA. World Energy Outlook 2022b.
 - Ingaldi Manuela and Klimecka-Tatar Dorota. People's attitude to energy from hydrogen. From the point of view of modern energy technologies and social responsibility. *Energies* 2020.
 - Instituut Fysieke Veiligheid. Waterstof als brandstof voor voertuigen: aandachtspunten voor incidentbestrijding. 2018.
 - Instituut Fysieke Veiligheid (IFV). Bestuurlijke handreiking vergunningverlening waterstoftankstations.2019.
 - Instituut Fysieke Veiligheid. Veiligheidsaspecten van waterstof in een besloten ruimte. 2020.
 - IPCC. Sixth Assessment Reports: Climate Change 2021: The Physical Science Basis; Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability; Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>
 - IRENA. Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition. 2018.

- IRENA. Hydrogen: A renewable energy perspective. 2019a.
- IRENA. Global energy transformation. A roadmap to 2050. 2019b.
- IRENA. Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal. 2020.
- ISPT. Institute of Sustainable Process Technology. HyChain 1, 2 & 3. 2019.

J

- Jepma Catrinus J, Spijker Eise, Hofman Erwin. The Dutch Hydrogen Economy in 2050 An exploratory study on the socio-economic impact of introducing hydrogen into the energy system of the Netherlands. 2019.
- Johnson Gerry, Scholes Kevan, Whittington Richard. Exploring Corporate Strategy. 7th edition. 2005.

K

- Kalavasta. Notitie CCS: Aanbevelingen succesvolle en kosteneffectieve implementatie CCS in Nederland. Opdrachtgever Greenpeace. 2018.
- Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM). Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Met de stroom mee Het stimuleren van elektrisch rijden. 2020.
- Kiwa. Inventarisatie risico's rijden met waterstofvoertuigen. 2011.
- Kiwa Gastec, Department of Energy & Climatechange. Energy Storage Component Research & Feasibility Study Scheme. HyHouse. Safety Issues Surrounding Hydrogen as an Energy Storage Vector. 2015.
- Kiwa. In opdracht van Netbeheer Nederland. Toekomstbestendige gasdistributienetten. 2018.
- Kiwa. Gasdistributie-incidenten jaaroverzicht 2018. 2019.
- Kiwa. In opdracht van Netbeheer Nederland De impact van het bijmengen van waterstof op het gasdistributienet en de gebruiksapparatuur. 2020.
- Klimaatcrisis Beleid Team (KBT). Rapport. <https://ce.nl/publicaties/klimaatcrisis-beleid-team-kbt/2021>.
- Koninklijke Nederlandsche Automobielen Club (KNAC) en Bovag. De waterstofauto en de automobilist" <https://www.knac.nl/wp-content/uploads/2020/11/De-waterstofauto-en-de-automobilist.pdf>. 2020.
- Knobloch Florian, Hanssen Steef V, Lam Aileen, Pollitt Hector, Salas Pablo, Chewprecha Unnada, Huijbregts Mark A. J and Jean-Francois Mercure. Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time. Nature sustainability.2020 <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0488-7>
- Korea Harold The. Hydrogen tank explosion kills 2 in Gangneung. By Yonhap . May 23, 2019.
- KPMG. Global Automotive Executive Survey 2018. January 2018 www.kpmg.com/GAES2018

L

- Laak van der Wouter, Neis Stefan, Honselaar Michel. Waterstofregio 2.0. Workshop vergunningen voor waterstoftankstations in Vlaanderen en Nederland. Helmond 25 november 2019. https://www.waterstofnet.eu/_asset/_public/Waterstofregio20/1-Wouter-van-der-Laak.pdf
- Lebutsch P, M. Weeda. THRIVE: Study on roll-out of Fuel Cell Electric Vehicles and Hydrogen Refuelling Infrastructure for the Netherlands. ECN-E--11-005. January 2011.
- Liebreich Michael. The Clean Hydrogen Ladder: an introduction. Version 4.1a. 15 August 2021. https://drive.google.com.mcas.ms/file/d/1X-oH04NH1477eig_BmYjtD9mHyTcoiVc/view.

M

- Martin Elliot, Shaheen Susan, Lipman Timothy. Behavioral response to hydrogen fuel cell vehicles and refueling: results of California drive clinics. International Journal of Hydrogen Energy 34 8670-

8680. 2009.

- Martin V, Ashworth P. Exploring the Australian public's response to hydrogen. Ebook-ICHS 2021.
- Meeuwissen Thijs. Public support for hydrogen-powered housing. Bachelor thesis. Hanzehogeschool Groningen. 2019.
- Milieu Centraal. Subsidie elektrische auto. <https://www.milieucentraal.nl/duurzaam-vervoer/elektrische-auto/subsidie-elektrische-auto/> November 2021.
- Ministerie van Economische Zaken. Energierapport - Transitie naar duurzaam. 2016.
- Ministerie van Economische Zaken. Energie-agenda- Naar een CO2-arme energievoorziening. 2016.
- Ministerie van Economische Zaken. DNV GL. Verkenning waterstofinfrastructuur. 2017.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Publiekmonitor klimaat en energie 2019.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Rol van gas in het energiesysteem van nu en in toekomst. Kenmerk DGKE / 20062063. 30 Maart 2020a.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Routekaart Groen Gas. Brief Tweede Kamer. Kenmerk: DGKE-WO / 200885. 30 Maart 2020b.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Kabinetsvisie waterstof. Brief Tweede Kamer. Kenmerk: DGKE / 20087869. 30 Maart 2020c.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Voortgang beleidsagenda kabinetsvisie waterstof. December 2020d.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Kamerbrief betreffende voorlopige resultaten SD++2020 en voortgang SDE++2021. 8 Juni 2021a
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Brief Tweede Kamer betreffende Ontwikkeling transportnet voor waterstof. 30 Juni 2021b.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Kamerbrief over rapport 'Ondergrondse energieopslag in Nederland 2030-2050.' 12 oktober 2021c.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Kamerbrief betreffende Contouren Nationaal plan energiesysteem. 10 juni 2022a.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Kamerbrief windenergie op zee 2030-2050. 16 september 2022b.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Concept-Klimaatnota. September 2022c.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Aanbiedingsbrief concept-klimaatnota, compenserende maatregelen kolencentrales en platform voor maatschappelijke dialoog en reflectie. 20 september 2022d.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. Een duurzame brandstofvisie met LEF. De belangrijkste uitkomsten uit het SER-visietraject naar een duurzame brandstoffenmix in Nederland. 2014.
- Motivaction, Ministerie van Economische Zaken. Energievoorziening 2015-2050: publieksonderzoek naar draagvlak voor verduurzaming van energie. 2015.
- Motivaction. Opinieonderzoek Klimaatakkoord. Beknopt rapport. Natuur & Milieu. 2018.
- Motivaction. Effectieve gedragsbeïnvloeding via bewuste én onbewuste routes. Waar moet je op letten? 2019.
- Mouter Niek, Beek van Lisette, Ruijter de Annamarie, Hernandez Jose Ignacio, Schouten Schoutje, Noord van Linde, Spruit Shannon. Brede steun voor ambitieus klimaatbeleid als aan vier voorwaarden is voldaan. Resultaten van een raadpleging onder meer dan 10.000 Nederlanders over het Nederlandse klimaatbeleid. 2021.
- Mulder Machiel, Moraga Jose Luis, Peter Perey Peter. Outlook for a Dutch hydrogen market: economic conditions and scenarios. Centre for energy economics research, CEER policy papers 5. University of Groningen. 2019a.
- Mulder Machiel, Perey Peter. Groene waterstof laat zich lastig rendabel maken. ESB 28-11-2019b.
- Mumford J. and Gray D.E. 'Reconciling conflicting interpretations of risk: a case study about the

siting of a hazardous plant'. *Journal of Communication Management* 13(3), 233-249. 2009.

N

- Nationaal Deltaprogramma. www.deltaprogramma.nl/deltaprogramma. 2021
- Natuur & Milieu, Milieudefensie en Greenpeace. Mobiliteitsvisie. Op weg naar een duurzame vervoerssector in 2030. 2017.
- Natuur en Milieu. Brandstofranking personenauto's. 2017.
<https://www.natuurenmilieu.nl/wp-content/uploads/2017/02/NM-Brandstofranking-personenautos.pdf>.
- Natuur&Milieu. Mythe: De elektrische auto is tijdelijk, uiteindelijk gaan we allemaal op waterstof rijden. <https://rijelektrisch.natuurenmilieu.nl/mythes/waterstof/> 2019.
- Natuur&Milieu. Waterstof: de waterstofladder.
https://www.natuurenmilieu.nl/themas/energie/projecten-energie/waterstof/waterstof-de-waterstofladder/?utm_source=Nieuwsbrief%20mei%202020&utm_medium=e-mail&utm_campaign=nieuwsbrief. 20 mei 2020.
- Navigant. Wouter Terlouw, Daan Peters, Juriaan van Tilburg, Matthias Schimmel, Tom Berg, Jan Cihlar, Goher Ur Rehman Mir, Matthias Spöttle, Maarten Staats, Ainhoa Villar Lejaretta, Maud Buseman, Mark Schenkel, Irina van Hoorn, Chris Wassmer, Eva Kamensek, Tobias Fichter. Gas for Climate. The optimal role for gas in a net-zero emissions energy system. Utrecht. 18 March 2019
- Nel ASA: Status update #5 regarding incident at Kjørbo. <https://news.cision.com/nel-asa/r/nel-asa-status-update--5-regarding-incident-at-kjorbo,c2852275>, June 27, 2019.
- Netbeheer Nederland. Het Energiesysteem van de Toekomst Integrale Infrastructuurverkenning 2030 -2050. April 2021.
- Netbeheer Nederland. Quicksan coalitieakkoord energiesysteem. April 2022.
- Netinform <https://www.netinform.de/H2/H2Stations/H2Stations.aspx?Continent=EU&StationID=-1>. 2019.
- Nikolaidis Pavlos, Poullikkas Andreas. A comparative overview of hydrogenproductionprocesses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67,597–611. 2017.
- NIPV. Nederlands Instituut Publieke Veiligheid. Incidenten met alternatief aangedreven voertuigen. Jaarrapportage 2021. April 2022.
- NOS Nieuws. Hulpdiensten beducht voor ongelukken met elektrische auto's. Joséphine Truijman 28-09-2019.
- NOS Nieuws. Economie. 22 december 2019.
- NSEC. Members of the North Seas Energy Cooperation grasp historic opportunity to accelerate Europe's move towards energy independence. September 12, 2022.
https://ec.europa.eu/info/news/members-north-seas-energy-cooperation-grasp-historic-opportunity-accelerate-europes-move-towards-energy-independence-2022-sep-12_en
- NT Nieuwsblad Transport <https://www.nieuwsbladtransport.nl/wegvervoer/2019/06/17/ondanks-explosies-blijft-waterstof-brandstof-van-de-toekomst/?gdp=accept> 2019
- Nikolamotor <https://nikolamotor.com> 2019.
- NRC <https://www.nrc.nl/nieuws/2017/10/12/co2-opslag-het-kan-een-stuk-slimmer-13453608-a1576917> 2017.
- Nuffield Council on Bioethics. Public health: Ethical issues. Cambridge: Nuffield Council on Bioethics. 2007.
- NWP. Nationaal Waterstof Programma. Routekaart Waterstof. 2022.

O

- O'Garra Tanya, Mourato Susana, Pearson Peter. Analysing awareness and acceptability of hydrogen vehicles: A London case study. *International Journal of Hydrogen Energy* 30 (2005) 649-659.

- O'Garra Tanya, Mourato Susana, Pearson Peter. Investigating attitudes to hydrogen refuelling facilities and the social cost to local residents. *Energy Policy* 36 (2008) 2074-2085.
- Oltra, C., E. Dütschke, R. Sala, U. Schneider and P. Upham. 2017. "The public acceptance of Hydrogen Fuel Cell applications in Europe". *Revista Internacional de Sociología* 75 (4): e076. doi: [http:// dx.doi.org/10.3989/ris.2017.75.4.17.01](http://dx.doi.org/10.3989/ris.2017.75.4.17.01)
- Ono Kyoko , Kato Etsuko, Tsunemi Kiyotaka. Does risk information change the acceptance of hydrogen refueling stations in the general Japanese population? *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 44, Issue 31, pages 16038-16047. 2019.
- OOG TV. Nieuwe waterstoftankstation geopend in Stad, met nieuwe waterstofbussen voor Qbuzz. <https://www.oogtv.nl/2021/06/nieuwe-waterstoftankstation-geopend-in-stad-met-nieuwe-waterstofbussen-voor-qbuzz/> 11 juni 2021.
- Ouden den Bert, Graafland Peter, Warnars Jan. Elektronen en/of Moleculen. Twee transitiepaden voor een CO2-neutrale toekomst. Berenschot. 2018a.
- Ouden den Bert, Warnars Jan, Bianchi Rutger, Lintmeijer Niki. Het "warmtescenario": Beelden van een op warmte gerichte energievoorziening in 2030 en 2050. Scenariostudie ten behoeve van het Klimaatakkoord. Eindrapport. 2018b.
- Ouden den B. Een Waterstofbeurs voor het Klimaat. Een eerste verkenning. Eindrapport 24-9-2020.
- Ouden den B. Definition Study "HyXchange": Summary of Results Project. 2021.

P

- Perlaviciut Goda, Steg Linda. Contextual and psychological factors shaping evaluations and acceptability of energy alternatives: Integrated review and research agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 35 p361-381. 2014.
- PGS 35. Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 35. Waterstof: afleverinstallaties van waterstof voor wegvoertuigen. Versie april 2015 en april 2020.
- Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Analyse van het voorstel voor hoofdlijnen van het klimaatakkoord. 2018.
- Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Conceptadvies SDE++ CO₂-reducerende opties: Grootschalige waterstofproductie via elektrolyse. 2019.
- Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Maatschappelijk draagvlak voor transitiebeleid. Een verkennend onderzoek naar de legitimiteit van transitiebeleid rond energie en circulaire economie. 2019
- PBL, TNO, CBS en RIVM. Klimaat- en Energieverkenning 2020. 2020.
- Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Woonlastenneutraal koopwoningen verduurzamen: verkenning van de effecten van beleids- en financieringsinstrumenten. 2020a.
- Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Waterstof voor de gebouwde omgeving; operationalisering in de Startanalyse 2020. 2020b.
- Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Regionale energiestrategieën. Een tussentijdse evaluatie. 2020c.
- Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Eindadvies basisbedragen SDE++ 2021. 2021a.
- Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Grote opgaven in een beperkte ruimte. Ruimtelijke keuzes voor een toekomstbestendige leefomgeving. Den Haag, 2021b.
- Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Nederland fit for 55? Mogelijke gevolgen van het voorgestelde EU-klimaatbeleid. 2021c.
- Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Klimaat- en Energieverkenning 2021. 2021d.
- PBL Planbureau voor de Leefomgeving. Reflectie op de leefomgevingsthema's in het coalitieakkoord 2021-2025. 2021e.
- Pondera Consult en Arcadis. Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Verkenning aanlanding netten op zee 2030. Samenvatting en tussentijdse notitie. 2018.

- PwC. De haalbaarheid van 28 miljard elektrische autokilometers in 2030. <https://www.pwc.nl/nl/assets/documents/pwc-onderzoek-elektrisch-rijden.pdf>. Maart 2021.
- PwC/Strategy&. HyWay 27: waterstoftransport via het bestaande gasnetwerk? Eindrapport voor het ministerie van Economische Zaken en Klimaat. 2021.
- Pricewise. Bijna helft Nederlanders kiest portemonnee boven duurzame vaste lasten. 24 oktober 2020. <https://www.pricewise.nl/blog/helpt-nederlanders-kiest-portemonnee-boven-duurzame-vaste-lasten/>
- Project consortium Waterstofwijk Hoogeveen. Waterstofwijk. Plan voor waterstof in Hoogeveen. 2020.

R

- Raad van State. Concept Klimaatnota 2021. 2021.
- Raad voor de leefomgeving en infrastructuur. Warm aanbevolen. CO₂-arme warmte in de gebouwde omgeving. 2018.
- Raad voor Leefomgeving en Infrastructuur. Waterstof. De ontbrekende schakel. 2021.
- Rijksoverheid. Omgevingswet. <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/omgevingswet>
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. RVO. De milieuprestatie van openbaar vervoer bussen en ontwikkelingen rondom elektrische openbaar vervoer bussen in Nederland. 2018.
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. RVO. Eerste pilot offshore groene waterstofproductie start bij Scheveningen. 2021.
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. RVO. Nationaal Laadonderzoek 2021. Laden van EV's in Nederland. Ervaringen en meningen van EV-rijders. 2021.
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. RVO. Nieuwe routekaart windenergie op zee. <https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/duurzame-energie-opwekken/windenergie-op-zee/nieuwe-routekaart>. 7 maart 2022.
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. RVO. Cijfers elektrisch vervoer. Ontleend aan Zelf energie produceren <https://www.zelfenergieproduceren.nl/nieuws/bijna-half-miljoen-elektrische-autos-op-de-weg>. Augustus 2022.
- Rijpert K, Groenhuisen A. A convenient truth, de visie van de Rabobank op de elektrische auto. Rabobank Utrecht. 2016.
- RIVM. Signalering leefomgeving en gezondheid. <https://signaleringleefomgevingengezondheid.nl/signalen/multifuel-tankstations-20-01-2020>
- Robinius Martin, Linßen Jochen, Grube Thomas, Reuß Markus, Stenzel Peter, Syranidis Konstantinos, Kuckertz Patrick and Stolten Detlef. Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles. Forschungszentrum Jülich GmbH Institut für Energie- und Klimaforschung. Schriften des Forschungszentrums Jülich. Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment. Band / Volume 408 ISSN 1866-1793. 2018.
- Rogers, E.M. Diffusion of innovations. The Free Press. Fifth edition. 1983.
- RTL nieuws. Hoge energieprijzen. Elektrisch rijden voor paar pechvogels peperduur (maar meerderheid is goedkoper uit). 31 augustus 2022
- Rosenow Jan. Is heating homes with hydrogen all but a pipe dream? An evidence review. Joule 6, 2219–2239, October 19, 2022.
- Ryszka Karolina. Gebruik van waterstof in elektriciteitssector voorlopig onnodig en inefficiënt. ESB 25 juni 2020.

S

- Schmidt Adriane, Donsbach Wolfgang. Acceptance factors of hydrogen and their use by relevant stakeholders and the media. International journal of hydrogen energy 4509-4520. 2016.
- Schönauer Anna-Lena, Glanz Sabrina. Hydrogen in future energy systems: Social acceptance of the

- technology and its large-scale infrastructure. International Journal of Hydrogen Energy. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.160>
- Schrödl Manfred. Wasserstoffautos keine Alternative zur E-Mobilität.
<https://www.leadersnet.at/news/38786,wasserstoffautos-keine-alternative-zur-e-mobilitaet.html>
 TU Wien 27.08.2019
 - Schweizer-Ries. Social aspects of regional energy concepts. Forschungsgruppe Umweltpsychologie. Leipzig. 2011.
 - Segreto Marco, Principe Lucas, Desormeaux Alexandra, Torre Marco, Tomassetti Laura, Tratzi Patrizio, Paolini Valerio and Petracchini Francesco. Trends in social acceptance of renewable energy across Europe. A literature review. International journal of environmental research and public health. 2020.
 - Shell hydrogen study. Energy of the future. Sustainable mobility through fuel cells and H2. Hamburg 2017.
 - Shell; <https://www.shell.nl/media/2018-media-releases/shell-is-building-network-of-hydrogen-stations.html>. 21 augustus 2018.
 - Shell. Groene waterstof <https://www.shell.nl/energie-en-innovatie/waterstof.html> 2022
 - Sinigaglia Tiago, Lewiski Felipe, Santos Martins Mario Eduardo, Mairesse Siluk Julio Cezar. Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications. A review. International Journal of Hydrogen Energy 42 (2017) 24597-24611.
 - Sociaal Economische Raad. Energieakkoord voor duurzame groei. 2013.
<https://www.energieakkoordser.nl>.
 - Sociaal Economische Raad. Klimaataakkoord. 2019. <https://www.ser.nl/nl/thema/energie-en-duurzaamheid/energieakkoord/klimaataakkoord>.
 - Sociaal en Cultureel Planbureau. Woningeigenaren en hun afwegingen voor aardgasvrije alternatieven. 2019.
 - Sociaal en Cultureel Planbureau. Op weg naar aardgasvrij wonen De energietransitie vanuit burgerperspectief. 2020.
 - Sociaal en Cultureel Planbureau. Woningverduurzaming: willen en kunnen betekent nog niet doen. Drijfveren en ervaren barrières bij woningeigenaren. 2021.
 - Soetaert Wim. Waterstofhype 2.0. Agro & Chemie. September 2019.
 - Spoorpro <https://www.spoorpro.nl> Falstoms-waterstoffrein-rijdt-mee-in-dienstregeling-in-duitsland. 2018a.
 - Spoorpro <https://www.spoorpro.nl> Groningen en Friesland experimenteren met duurzame treinen. 2018b.
 - Squarewise. Pahud de Mortanges Sophie. Het potentieel van groene waterstof voor de gebouwde omgeving. 2019.
 - Stedin. Waterstof in de gebouwde omgeving. Working paper. 2020a.
 - Stedin. Bouwstenen voor een betaalbare warmtetransitie in de gebouwde omgeving. Discussiepaper. 2020b.
 - Stedin. Met duurzame gassen het gasnet verduurzamen. Discussiepaper. 2020c.
 - Steinbuch Maarten. Water stof tot nadenken. FD 1 dec 2018.
 - Stern Jonathan. Narratives for natural gas in decarbonising European energy markets. Oxford Institute for Energy Studies. 2019.
- T**
- Tarigan Ari K.M, Bayer Stian B, Langhelle Oluf, Thesen Gunnar. Estimating determinants of public acceptance of hydrogen vehicles and refuelling stations in greater Stavanger. International Journal of Hydrogen Energy 37 p6063-6073. 2012.
 - Taskforce Infrastructuur Klimaataakkoord Industrie. Advies aan de minister van Economische Zaken

en Klimaat. 2020.

- TenneT: na succesvolle pilots door met Blockchain. News 28-01-19.

<https://www.tennet.eu/nl/nieuws/nieuws/tennet-na-succesvolle-pilots-door-met-blockchain/>

- Thesen Gunnar, Langhelle Oluf. Awareness, acceptability and attitudes towards hydrogen vehicles and filling stations: A Greater Stavanger case study and comparisons with London. International Journal of Hydrogen Energy 33 p5859-5867. 2008.

- TKI Nieuw Gas. Topsector Energie. Gigler Jörg, Weeda Marcel. Contouren van een Routekaart Waterstof. 2018.

- TKI Nieuw gas. Topsector Energie. Gigler Jörg, Weeda Marcel, Hoogma Remco, Boer de Jort. Waterstof voor de energietransitie. Een programmatische aanpak voor innovaties op het thema waterstof in Nederland voor de periode 2020 – 2030. 2019.

- TKI Nieuw gas. Topsector Energie. Peter de Laat. Overview of hydrogen projects in the Netherlands. 2021.

- TNO, Berenschot. Eindrapportage CO₂-vrije waterstofproductie uit gas. 24 november 2017.

- TNO <https://www.tno.nl/nl/over-tno/nieuws/2019/3/startschot-voor-ontwerp-gigawatt-elektrolysefabriek/>; maart 2019.

- TNO. Waterstof als optie voor een klimaatneutrale warmtevoorziening in de bestaande bouw. 2020a.

- TNO. Large-Scale Energy Storage in Salt Caverns and Depleted Fields (LSES) – Project Findings Date. 2020b.

- TNO. Wat is het maatschappelijk draagvlak voor klimaatbeleid? Onderzoek naar beleidsopties van de studiegroep Invulling klimaatopgave Green Deal. 2021a.

- TNO. Op weg naar een groene toekomst. Deel 1: hoe grondstoffenschaarste onze ambities voor groene waterstof en de energietransitie als geheel kan belemmeren. 2021b.

- TNO, EBN. Ondergrondse energieopslag noodzakelijk voor toekomstig energiesysteem. Opslag garandeert leveringszekerheid en flexibiliteit. 2021c.

- TNO. Een klimaatneutraal energiesysteem voor Nederland. Nieuwe verkenning toont grenzen mogelijkheden. Whitepaper. 2022a.

- TNO, EBN. Haalbaarheidsstudie offshore ondergrondse waterstofopslag. 2022b.

- Transport & Environment. How European transport can contribute to an EU-55% GHG emissions target in 2030. March 2020.

https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020_02_TE_EGD_vision_How_EU_transport_can_contribute_minus_55.pdf

- Transport & Environment. Comparison of hydrogen and battery electric trucks Methodology and underlying assumptions. June 2020.

U

- UN environment programme. The Closing Window. Climate crisis calls for rapid transformation of societies. Emissions Gap Report 2022.

V

- Vermeulen Ulco. Waterstof maakt opgang. <https://www.shell.nl/media/venster/eerder-verschenen/hydrogen-makes-progression.html> 2019

- Verwey-Jonker Instituut. Casusonderzoek maatschappelijke onrust Noord-Nederland bij overheidsbeslissingen. <https://www.verwey-jonker.nl/publicatie/casusonderzoek-maatschappelijke-onrust-noord-nederland-bij-overheidsbeslissingen/>

- Visser Martien. Waterstof: cruciaal voor behalen klimaatdoelen. Energiepodium 11 februari 2020.

- Volkens Bernard. Waarom de elektromotor qua efficiency de beste is. Autoweek 28, 24 juli 2021.

Vertaling Albert-Jan Cornelissen.

- Volkskrant. Achtergrond waterstof. Ineens lijkt waterstof het antwoord op alle energieproblemen – waar komt al dat enthousiasme vandaan? 11 juli 2018.
- Volkskrant. Vergroening van industrie stagneert door subsidieregels. 21 november 2020. 2020a.
- Volkskrant. Holthausen Clean Technology. Groot denken in waterstof: het Groningse familiebedrijf wil de Tesla van waterstoftrucks worden. 28 december 2020. 2020b.
- Volkskrant. Steden weren vanaf 2025 vervuilend vrachtvervoer. 10 februari 2021. 2021a.
- Volkskrant. Reportage. Protest rivierenland. Ze plempen een plan over je heen. 22 juni 2021. 2021b.
- Volkswagen. Battery or fuel cell, that is the question. <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/stories/battery-or-fuel-cell-that-is-the-question-5868>. 12 maart, 2020.

W

- Waterstof Veiligheid Innovatie Programma <https://opwegmetwaterstof.nl/2018/07/17/waterstof-veiligheid-innovatie-programma/>. 17 juli 2018.
- Waterstofcoalitie. Manifest waterstof coalitie. Waterstof essentiële bouwsteen energietransitie. 2018.
- Waterstofcoalitie. Een waterstofpact voor een nieuw kabinet. 2021.
- Waterstoflab. Waterstof in de gebouwde omgeving. Thematiek. 2021.
- Wattisduurzaam. Brinck ten Thijs. 11 peperdure misverstanden over wondermiddel waterstof. <https://www.wattisduurzaam.nl/15443/energie-beleid/tien-peperdure-misverstanden-over-wondermiddel-waterstof/>- 22 augustus 2018.
- Weeda Marcel. Waterstof maakt opgang. <https://www.shell.nl/media/venster/eerder-verschenen/hydrogen-makes-progression.html> 2019.
- Wiekens C.J, Harmelink M, Beeksma J, Heijne L.J.M, Klarenbeek J.M.E & Poelarends P. Maatschappelijk draagvlak voor biovergisters: De casussen Coevorden en Foxhol. 2016.
- Wijk van Ad. Waterstof is een serieuze optie voor ruimteverwarming. <http://profadvanwijk.com/waterstof-is-een-serieuze-optie-voor-ruimteverwarming/> 11 april 2019
- Wijk van & Wouters. Hydrogen, The Bridge between Africa and Europe. 2019.
- Witteveen+Bos, ECN & TNO. Cost Evaluation of North Sea Offshore Wind Post 2030, On behalf of the North Sea Wind Power Hub Consortium. 2019.
- World Energy Council Netherlands. Hydrogen – industry as catalyst. Accelerating the decarbonisation of our economy to 2030. Tilburg 2018.
- Wüstenhagen Rolf, Wolsink Maarten and Bürer Mary Jean. Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. Energy Policy 35 p2683-2691. 2007.

Y

- Yetano Roche M, Mourato S, Fishedick M, K. Pietzner K, P. Viebahn (2010): Public Attitudes Towards and Demand for Hydrogen and Fuel Cell Vehicles: A Review of the Evidence and Methodological Implications. Energy Policy 38 (10) (2010): 5301-5310.

Z

- Zachariah-Wolff JL, Hemmes K. Public acceptance of hydrogen in the Netherlands: two surveys that demystify public views on a hydrogen economy. Bull Sci Technol Soc 2006;36(4):339-345.
- Zimmer Rene, Welke Jorg. Let's go green with hydrogen! The general public's perspective. International Journal of Hydrogen Energy Volume 37 (2012) 17502-17508.
- Zon van Hans. Waterstof maakt inhaalslag, maar ultieme energiebron heeft één nadeel. AD 15-02-20.