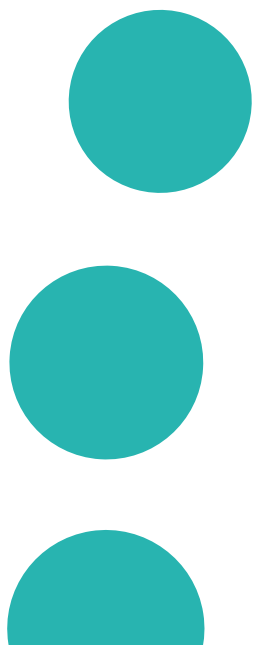
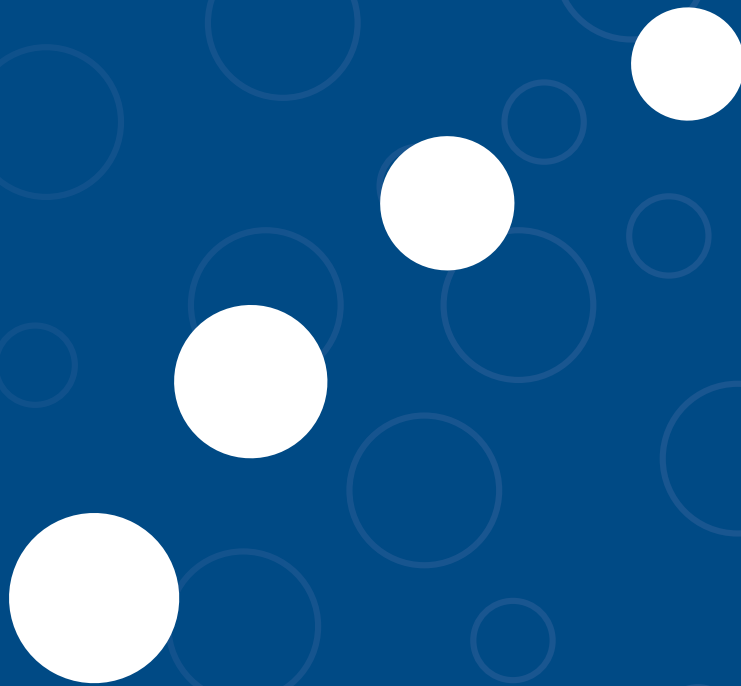


Samenvatting



Consortium



Gasunie



New
Energy
Coalition

TNO innovation
for life





De belangrijkste resultaten van het HyDelta 1-project

Dankwoord

Dit rapport is opgesteld tussen april en juni 2022 en vat de voornaamste resultaten van het HyDelta 1 project samen. Bij het opstellen van dit rapport hebben we enorm geprofiteerd van de waardevolle opmerkingen en suggesties van een groot aantal deelnemers aan het consortium, en vooral van: Frank van Alphen, Sytze Buruma, Tom Eijsackers, Tessa Hillen, Raymond van Hooijdonk, Elbert Huijzer, Udo Huisman, Johan Jonkman, Stefanie van Kleef, Johan Knijp, Pascal te Morsche en Bart Vogelzang en diverse van hun collega's.

Groningen, Nederland, juli 2022

Prof. em. Catrinus Jepma &

Dr.-Ing. Julio C. Garcia-Navarro

auteurs van dit rapport en projectcoördinatoren

Voorwoord

Dit document vat de belangrijkste bevindingen samen van HyDelta 1, een onderzoeksprogramma rond de introductie van schone waterstof als energiedrager en grondstof in Nederland en de rol van infrastructuur daarbij in het bijzonder. HyDelta 1 was het eerste deel van een gepland aantal projecten binnen het HyDelta-programma; HyDelta 2 is per 1 mei 2022 inmiddels gestart. HyDelta 1 is uitgevoerd tussen december 2020 en april 2022 en had een focus op: waterstof transport en distributie via het gasnet en veiligheidsaspecten, de kosten van waterstof waardeketens, en enkele andere factoren die dringend verduidelijking behoeven voor de daadwerkelijke implementatie van waterstof. Ook probeert het programma de onderzoeksresultaten te verbinden met beleid en regulerende maatregelen.

De meeste onderzoeksvragen zijn tot stand gekomen in nauwe samenwerking tussen de consortiumpartners die het onderzoek hebben uitgevoerd, New Energy Coalition (coördinator), DNV, TNO en Kiwa, en de financieel bijdragende consortiumpartners Gasunie en Netbeheer Nederland (NBNL), die verantwoordelijk zijn voor een groot deel van de huidige en toekomstige nationale en regionale transport- en opslagactiviteiten van gassen in Nederland. Financiering via een innovatiesubsidie van het TKI Nieuw Gas heeft daarnaast in belangrijke mate bijgedragen aan het mogelijk maken van het HyDelta 1-project.

Vanuit HyDelta 1 zijn in totaal 37 deliverables geproduceerd (Annex 1), die vanaf juni 2022 alle openbaar beschikbaar zijn op de hydelta.nl/onderzoeksprogramma website. Dit rapport is bedoeld om een totaalbeeld van de voornaamste conclusies te geven met een vrij sterke focus op de maatschappelijke impact van de onderzoeksresultaten. Lezers die een dieper begrip willen krijgen van het onderzoek, de methodologie en de gedetailleerde bevindingen worden uitgenodigd om de genoemde site te bezoeken.

Stuurgroep HyDelta

René Schutte, Gasunie

Rob Martens, Netbeheer Nederland

Jörg Gigler, TKI Nieuw Gas

Ad van Wijk, TUDelft

Lijst van afkortingen

ATEX	Atmosphères Explosibles (explosieve atmosferen)
ATR	Autothermal reforming (Autothermische hervormingreforming)
CAPEX	Capital expenditures (Kapitaaluitgaven)
CCS	Carbon capture and storage (Koolstofafvang en -opslag)
CEN	Europees Comité voor Standaardisatie
DOI	Digital Object Identifier (uniek blijvend identificatiemiddel)
DS	Districtgasstation
DSO	Distribution system operator (Distributienetbeheerder)
EU	Europese Unie
FCEV	Fuel cell electric vehicle (Brandstofcel elektrisch voertuig)
FMEA	Failure mode and effects analysis (faalmodus en effecten analyse)
FTE	Full-time equivalent (Voltijds equivalent)
GOS	Gasontvangststation
HBO	Hoger beroepsonderwijs
HTH	High temperature heat (Hoge temperatuur warmte)
HTL	High-pressure transmission line (Hogedruk transmissielijn)
ISO	Internationale Organisatie voor Standaardisatie
LEL	Lower explosion limit (Onderste explosiegrens)
LOHC	Liquid organic hydrogen carrier (Vloeibare organische waterstofdrager)
MBO	Middelbaar beroepsonderwijs
NEN	Nederlands Normalisatie Instituut
OPEX	Operational expenditures (Operationele kosten)
PE	Polyethyleen
PVC	Polyvinylchloride
QRA	Quantitative risk assessment (Kwantitatieve risicobeoordeling)
RED	Renewable Energy Directive (Hernieuwbare Hernieuwbare Energie Richtlijn)
RES	Renewable energy resources (Hernieuwbare energiebronnen)
RFNBO	Renewable fuel of non-biological origin (Hernieuwbare brandstof van niet-biologische oorsprong)
RNB	Regionale netbeheerder; zie DSO
RPS	Renewable portfolio standards (Hernieuwbare portfolio standaarden)
RTL	Regionale transmissielijn
SAF	Sustainable aviation fuel (duurzame vliegtuigbrandstof)
SMR	Steam methane reforming (Stoomreforming)
TGC	Tradable green certificate scheme (Verhandelbare groencertificatenregeling)
THT	Tetrahydrothiofeen
VWI	Veiligheidswerkinstructie
WACC	Weighted average cost of capital (Gewogen gemiddelde vermogenskosten)
WF	Wind farm

Inhoudsopgave

Voorwoord	5
Inhoudsopgave	7
Inleiding	8
1 De waterstof waardeketen	12
2 Veilige distributie	24
3 Veiligheidsnormen	40
4 Onderzoek	50
Bijlage I	54

Inleiding

Inleiding en achtergrond van het HyDelta 1-programma

Waarom de introductie van waterstof nodig is

Tijdens de eerste decennia van de energietransitie is in de EU veel aandacht besteed aan de introductie van hernieuwbare energiebronnen (RES) zoals wind en zon. Als gevolg hiervan is ongeveer 40% van de in de EU geproduceerde elektriciteit groen, d.w.z. gebaseerd op hernieuwbare energiebronnen. Daarentegen heeft iets soortgelijks nog niet plaatsgevonden met betrekking tot de energie moleculen, die ongeveer driekwart van de totale energieopname vertegenwoordigen. Er zijn enkele beleidsinitiatieven genomen om biobased gassen in het aardgassysteem te introduceren, maar in Nederland gebeurt dit slechts op vrijwillige basis. Ook is er enige verplichte brandstof bijmenging ingevoerd voor mobiliteit, maar nog steeds in relatief beperkte percentages. Ondanks dergelijke beleidsinitiatieven blijft het percentage van de energie moleculen dat als 'groen' kan worden bestempeld tot nu toe beperkt tot waarschijnlijk minder dan 5%. Ook energiedragers die als grondstof worden gebruikt in bijvoorbeeld de chemische industrie, zoals waterstof en de daarvan afgeleide producten, zijn tot nu toe nog niet (verplicht) vergroend. Daardoor zijn vrijwel alle grondstof dragers nog 'grijs', oftewel geproduceerd met een (aanzienlijke) fossiele voetafdruk.

Dit verschil in decarbonisatie in het energie-/grondstof-systeem van de EU tussen elektronen en moleculen heeft het besef doen ontstaan dat het vergroenen van de energie- en grondstof moleculen nog een grote uitdaging is die serieuze verdient. Zonder doorbraken op dit vlak lijkt het onmogelijk om tegen 2050 tot een koolstofarme EU-economie te komen, ook omdat het waarschijnlijk is dat het aandeel van energie moleculen in de totale opname van het energie- en grondstofsysteem, afhankelijk van het scenario, uiteindelijk zal stabiliseren – zelfs in een volledig groen energiesysteem – op ongeveer de helft.

De afgelopen 20 jaar heeft er een levendige discussie plaatsgevonden over de mogelijke rol van biomassa als bron van groene moleculen. De verplichte bijmengeregeling voor brandstoffen (in 2009 ingevoerd in de hele EU als aanzet tot groene mobiliteit) was bijvoorbeeld gebaseerd op de verwachting dat er voldoende biomassa beschikbaar zou zijn om fossiele brandstoffen stapsgewijs koolstofvrij te maken voor de mobiliteit. Het laatste decennium ontstonden echter discussies over de risico's van grootschalige introductie van biomassa ter vervanging van fossiele brandstoffen. Dit temperde de eerdere verwachtingen over de rol van biomassa en, belangrijker nog, versterkte het idee dat alternatieve opties moeten worden onderzocht om fossiele moleculen door andere te vervangen. Dit heeft sterk bijgedragen aan een verschuiving van de publieke aandacht naar waterstof als alternatieve bron van groene moleculen, ervan uitgaande dat waterstof op termijn geproduceerd kan worden zonder carbon footprint. In feite is het op grote schaal introduceren van schone waterstof waarschijnlijk beslissend om de hoeveelheden schone moleculen te verkrijgen die nodig is om de decarbonisatie van het energiesysteem te versnellen.

Tijdige introductie van schone waterstof

Zowel voor investeerders als beleidsmakers is het van groot belang om beter te begrijpen wat er nodig is om de schone waterstofwaardeketens van de toekomst snel en succesvol van de grond te krijgen. Tenzij op verplichte quota of command-and-control gebaseerd beleid wordt ingevoerd om de introductie van schone moleculen af te dwingen, zal de vervanging van 'grijs' door schone waterstof en waterstofdragers gebaseerd zijn op marktomstandigheden en dus op prijzen en kosten. De meeste literatuur suggereert dat de prijzen van aardgas en CO₂-emissies de belangrijkste factoren zijn die de concurrentiekracht van de productie van schone versus 'grijze' waterstof(dragers) bepalen. De bevindingen van het HyDelta 1-project suggereren in dit verband dat:

- als de CAPEX-kosten van offshore wind en elektrolyser installaties richting 2030 dalen, zoals algemeen wordt verwacht op basis van de leercurves, en als de aardgasprijzen van 2021-2022 evenals de CO₂-prijzen tegen het einde van het decennium op een dergelijk niveau blijven (respectievelijk rond de € 100/MWh en € 100/ton), dan zal groene waterstof zeer waarschijnlijk al rond 2030 kunnen concurreren met de 'grijze' (en mogelijk 'blauwe') waterstof. Voor groene ammoniak en methanol zal dit resultaat al eerder dan 2030 naar voren komen. Het is dus denkbaar dat een grootschalige rendabele introductie van schone waterstof niet meer in de verre toekomst ligt, maar – gezien de gebruikelijke aanlooptijden – eigenlijk nu al tot (voorbereidende) investeringsactiviteiten zou kunnen leiden

Dit alles zet, tezamen met de jongste beleidsacties, druk op het versnellen en opschalen van de klein- en grootschalige productie van schone waterstof en het effenen van wegen naar schoon waterstof-transport, -opslag, -distributie en de verschillende implementatiemogelijkheden. Voor dit alles moeten normen, regels en voorschriften worden opgesteld, maar daarvoor is onderzoek nodig om uit te vinden wat veilig, verantwoord en acceptabel is. Dit verklaart de sterke druk op de hiermee samenhangende onderzoeksagenda rond de waterstof waardeketen.

Het HyDelta 1-project

HyDelta 1 heeft onderzoek verricht naar een aantal van de meest urgente onderwerpen waar onderzoek onontbeerlijk is om de weg vrij te maken voor volgende stappen. Dit rapport vat de belangrijkste bevindingen samen en is als volgt opgebouwd.

Eerst zullen de belangrijkste resultaten over de volledige kostenstructuur van de waardeketen voor schone waterstof worden gepresenteerd (deel 1), waarbij zal worden verduidelijkt hoe de kosten van waardeketen componenten zich onderling verhouden en waarom de toekomst verschillende waardeketens op basis van waterstof naast elkaar zal laten zien, vaak met internationale en onderlinge verbanden. Het onderzoek zal ook aantonen dat de transport component, hoewel over het algemeen relatief bescheiden ten opzichte van de totale kosten van de waardeketen, doorgaans kan profiteren van meervoudig gebruik en regionale concentratie van waterstofactiviteit en vice versa.

Vervolgens komt in deel 2 de kern van het HyDelta 1 onderzoek aan de orde, namelijk wat er vanuit veiligheidsoogpunt nodig is om het transport van waterstof via de bestaande aardgas infrastructuur en het gebruik ervan in de gebouwde omgeving even veilig te maken als de huidige aardgastransport en -verbruik onder dezelfde voorwaarden. Welke aanpassingen zijn er nodig in de verschillende onderdelen van het distributienet en enkele specifieke onderdelen van het hogedruknet als waterstof in het bestaande transportsysteem voor aardgas komt?

In deel 3 zal de aandacht verschuiven naar de vraag welk beleid en welke maatregelen kunnen worden ingevoerd om de implementatie van waterstof te verbeteren en het in het transportsysteem te introduceren. Een optie die momenteel wordt besproken is om naast pure waterstof ook mengvarianten in te voeren om zo een stapsgewijze invoering mogelijk te maken, maar het is belangrijk om daarbij te bepalen wat nodig is om dit op een zorgvuldige manier te doen, en welke gaskwaliteits- en andere standaarden zullen moeten worden opgesteld en daarom worden onderzocht om dergelijke stappen te kunnen maken.

Tot slot worden in deel 4 enkele suggesties gedaan voor verder onderzoek dat nodig is om een verdere introductie van waterstof in de gasinfrastructuur te bevorderen.



Deel 1

De waterstof- waardeketen



1 De waterstof waardeketen

Bronnen voor dit deel

DELIVERABLE:

D7A.1 – Hydrogen value chain literature review

[Link to deliverable](#)



DELIVERABLE:

D7A.2 – Techno-economic analysis of hydrogen value chains in the Netherlands: value chain design and results

[Link to deliverable](#)



Ontwikkeling van de waterstofwaardeketens

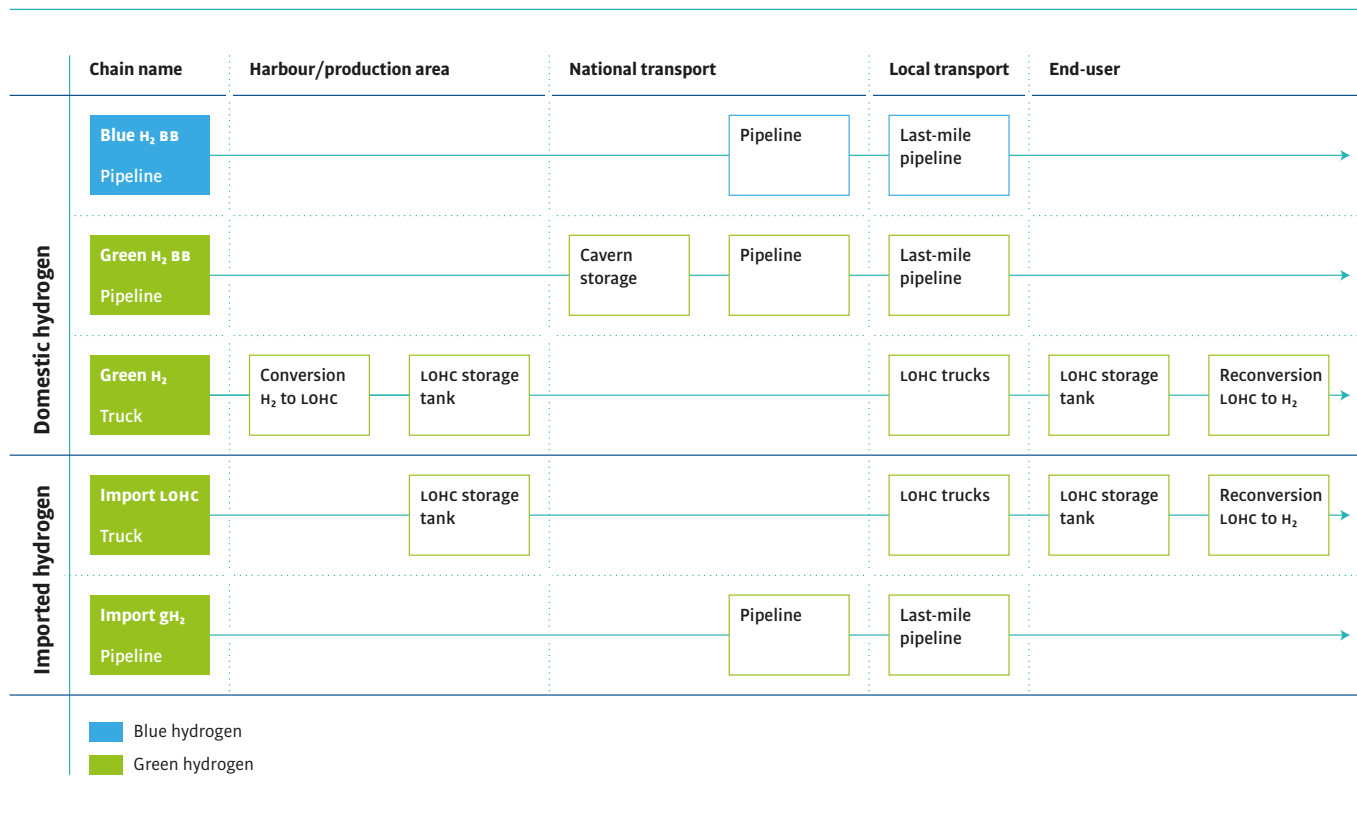
De binnenlandse waterstof waardeketens

Voor een effectieve grootschalige introductie van schone waterstof moeten alle waardeketen componenten vrijwel gelijktijdig worden opgezet en kosteneffectief worden geëxploiteerd om een economisch verantwoorde waterstoftoepassing mogelijk te maken in de verschillende eindgebruikssegmenten. Zonder dat zal het moeilijk worden om de waterstof economie van de grond te laten komen.

In de praktijk is een dergelijke gelijktijdige invoering echter complex bij gebrek aan een duidelijk coördinatiemechanisme, waardoor de waardeketen ontwikkeling verlamd kan raken doordat actoren op elkaar wachten, wat leidt tot het bekende ‘kip-en-ei’-probleem. Een verdere complexiteit is dat waterstof kan worden geïntroduceerd: in verschillende waterstofwaardeketens, op basis van verschillende productie-, transport- en opslag-wijzen, in verschillende toepassingen en zelfs in verschillende soorten waterstofdragers, zoals pure of gemengde waterstof, ammoniak, vloeibare organische waterstofdragers (LOHC) of methanol. Welke waardeketen zal onder welke omstandigheden de winnaar zijn?

Een andere complexiteit om schone waterstof waardeketens van de grond te krijgen heeft te maken met de kosteneffectiviteit en wordt de ‘valley of death’ genoemd. Ook vanwege het vroege stadium van marktpenetratie investeren investeerders in activa waarvan de kapitaaluitgaven nog relatief hoog zijn. Deze uitgaven zijn hoog vanwege de technologie die nog relatief in de kinderschoenen staat, de voorlopig lage bedrijfstijd waarmee geproduceerd wordt, en de beperkte ervaring met implementatie. Marktperspectieven zijn daarom vaak onzeker, terwijl kennisvoordelen gemakkelijk kunnen weglekken. Zolang de technologie zich in de ‘valley of death’ bevindt, zijn commerciële vooruitzichten voor schone waterstof zonder beleidsingrijpen vaak niet erg goed. Daar komt bij dat de vraagontwikkeling nog onstabiel is. Bovendien zijn (toekomstige) ondersteunende beleidsmaatregelen en maatregelen over het algemeen moeilijk te voorspellen, wat ook een uitdaging vormt voor potentiële investeerders in componenten van de waterstofwaardeketen.

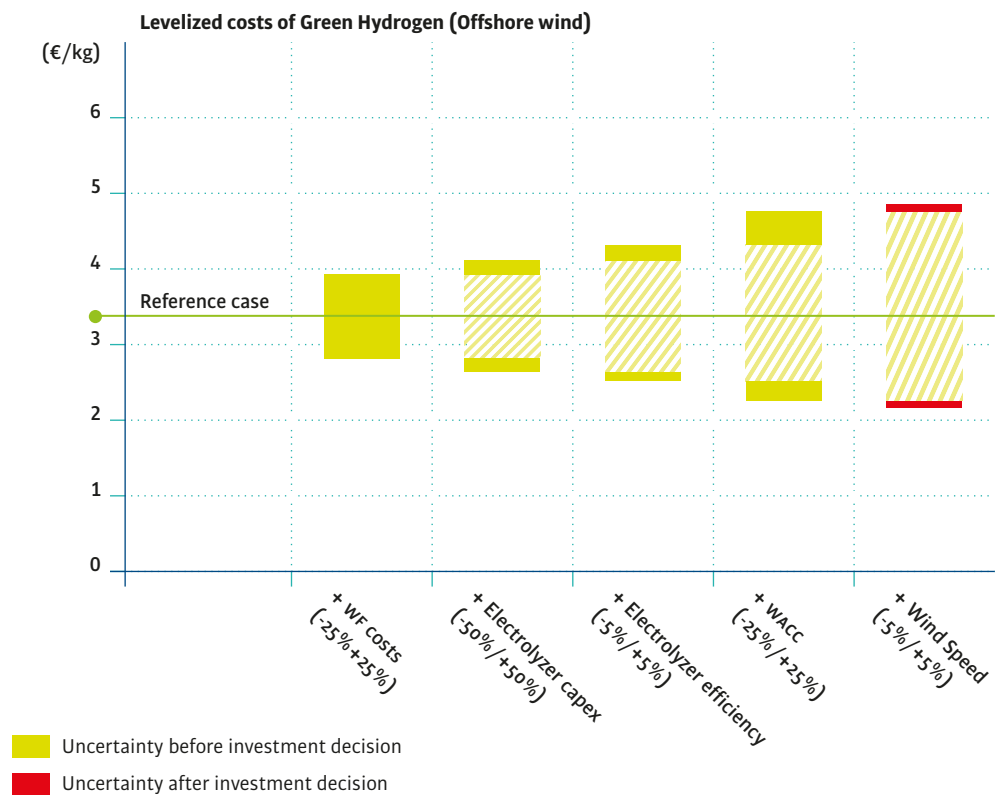
In bijna alle waterstofwaardeketens die in het HyDelta 1-project zijn geanalyseerd (zie *Figuur 1* voor een voorbeeld hiervan), nam de productiestap het grootste deel van de totale waardeketenkosten voor zijn rekening en droeg dus aanzienlijk bij aan de algehele concurrentiepositie van de ketens. Vergeleken met die kostencomponent, bleek de bijdrage van transportkosten aan de totale ketenkosten zowel internationaal als nationaal bescheiden te zijn, behoudens wanneer speciale transportmodaliteiten voor specifieke bestemmingen moeten worden geïnstalleerd).



Figuur 1. Voorbeeld van een familie van waterstofwaardeketens geanalyseerd in het HyDelta-project. Bron: D7A.2.

Voor groene waterstof geproduceerd uit windenergie uit de Noordzee, bleken de waardeketenkosten waarop de analyse was gebaseerd, de zogenaamde levelized cost of waterstof (LCOH, gedefinieerd als de gemiddelde verdisconteerde kosten om de benodigde elektriciteit op te wekken, plus de kosten om de elektriciteit naar de wal te transporteren en om de elektriciteit via elektrolyse om te zetten in groene waterstof), tegen 2030 uit te komen op ca. € 3,40/kg met een range van € 2,20 - € 4,80/kg. De belangrijkste kosten en kostenonzekerheden bleken verband te houden met kapitaalinvesteringen in windparken en elektrolyserinstallaties. Een dominante onzekerheid in deze productiekosten zijn de kapitaalkosten en de daaruit voortvloeiende impact op de LCOH. Dit verklaart ook waarom het grootste deel van de onzekerheid rond de rentabiliteit van groene waterstof betrekking heeft op de vroege investeringsfase.

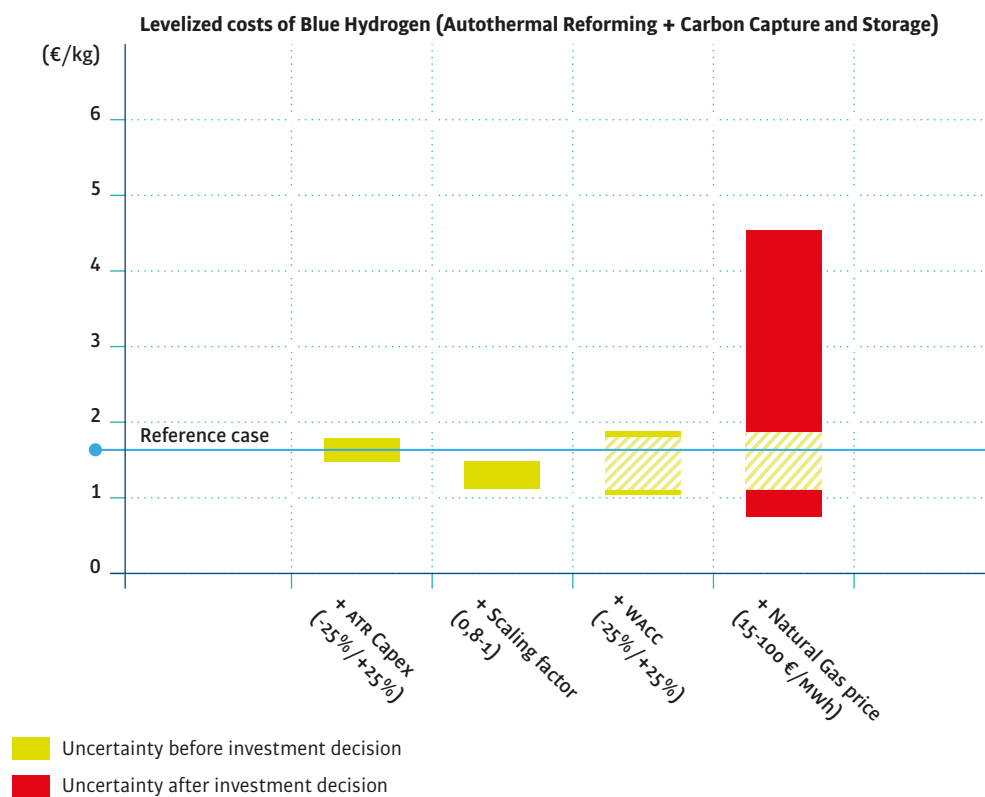
Figuur 2. Levelized Cost of Hydrogen (LCOH) van groene waterstof met productie via offshore wind van de Noordzee. WF = windpark. WACC = gewogen gemiddelde kapitaal-kosten. Bron: D7A.2.



Voor de productie van blauwe waterstof uit aardgas via AutoThermal Reforming (ATR) + Carbon Capture and Disposal (CCS) in Nederland zijn de uitkomsten voor 2030 wezenlijk anders. Hier gaf onze analyse een verwachte LCOH voor 2030 aan van € 1,95/kg (met een range van € 0,80 - € 5,10/kg), terwijl onzekerheden over de productiekosten nu doorgaans betrekking hebben op de OPEX-kostencomponenten na de investeringsfase, en met name de toekomstige aardgasprijzen. Investeerders in deze technologie worden doorgaans geconfronteerd met onzekerheden zodra de definitieve investeringsbeslissing is genomen en het systeem operationeel is: OPEX-onzekerheid beslaat ongeveer driekwart van de totale LCOH-onzekerheidsmarge. Dat dergelijke marges realistisch zijn, bleek onlangs, toen de aardgasprijzen in 2022 na het uitbreken van het conflict rond Oekraïne zeer fors stegen.

Het is belangrijk erop te wijzen dat, hoewel de verwachte gemiddelde LCOH voor blauwe waterstof in 2030 aanzienlijk lager ligt dan die van groene waterstof, dit niet noodzakelijkerwijs bepalend is voor investeringsbeslissingen. Deze zullen namelijk ook afhangen van de ontwikkeling van de commerciële haalbaarheid in de tijd. Als bijvoorbeeld, zoals de HyDelta simulaties suggereerden, groene waterstof na 2030 relatief snel de concurrentie met blauwe waterstof kan aangaan, zou de investeringshorizon van laatstgenoemde optie te kort kunnen zijn om een voldoende solide businesscase te genereren.

Figuur 3. Levelized Cost of Hydrogen (LCOH) van blauwe waterstof met behulp van productie via Autothermal Reforming (ATR) en koolstofafvang en -opslag (CCS). Bron: D7A.2.



Een andere belangrijke en opvallende conclusie uit de HyDelta kostenanalyse van de waardeketen was dat de typische 2030 LCOH van groene waterstof die is geïmporteerd uit zeven onderzochte niet-EU-bronlanden (voor meer details, zie ook de volgende sectie over 'Internationale waardeketens'), met waarden variërend tussen € 4,20 - € 11,70/kg, aanzienlijk hoger bleek te zijn dan de kosten bandbreedte van groene waterstof geproduceerd uit windenergie op de Noordzee die lag tussen de € 2,20 en € 4,80 / kg. De relatief lage waterstoftransportkosten in het Noordzeegebied ten opzichte van transport van elders bleken bepalend te zijn om de concurrentiekracht van op Noordzee wind gebaseerde groene waterstof relatief sterk te maken. Alleen in geval van import uit Marokko, uitgaande van lage transportkosten via een pijpleiding die is verbonden met de Europese waterstofbackbone, resulteerde in een iets lagere LCOH in 2030 dan de op Noordzee wind gebaseerde optie. Dus vanuit een LCOH-perspectief is het importeren van groene waterstof uit niet-EU-bronnen 'second best'.

Wanneer waterstofdragers worden geïmporteerd, zoals ammoniak of methanol, verandert bovenstaande conclusie. In die gevallen bleken de LCOH's over het algemeen vergelijkbaar te zijn tussen de niet-EU-invoer en de binnenlandse route, hoewel zelfs dan de LCOH van de binnenlandse route vrij consistent aan de onderkant van die van de invoerroute lag.

Bij het bepalen van de totale kosten van de waterstof waardeketen kunnen uitgaven voor het balanceren van intermitterende hernieuwbare stroomvoorziening en dus van de daarmee samenhangende productie van groene waterstof ook een cruciale kostenfactor zijn. Uit de verschillende kostenbeoordelingen van dergelijke flexibiliteit, met name via opslagopties, bleek dat de kosten van de verschillende opties om flexibiliteit aan te bieden tijd-, locatie- en waardeketen-specifiek zijn. Hierdoor zijn er nog geen algemene conclusies te trekken over optimale implementatie en kosten. Onze bevindingen bevestigen dat voor seizoensopslag gasvormige waterstofopslag in tanks hoogstwaarschijnlijk te duur is om een geschikte grootschalige flexibiliteitsoptie te worden, en dat daarom nationaal waterstoftransport gecombineerd met grootschalige opslag in bijvoorbeeld zoutcavernes cruciaal is.

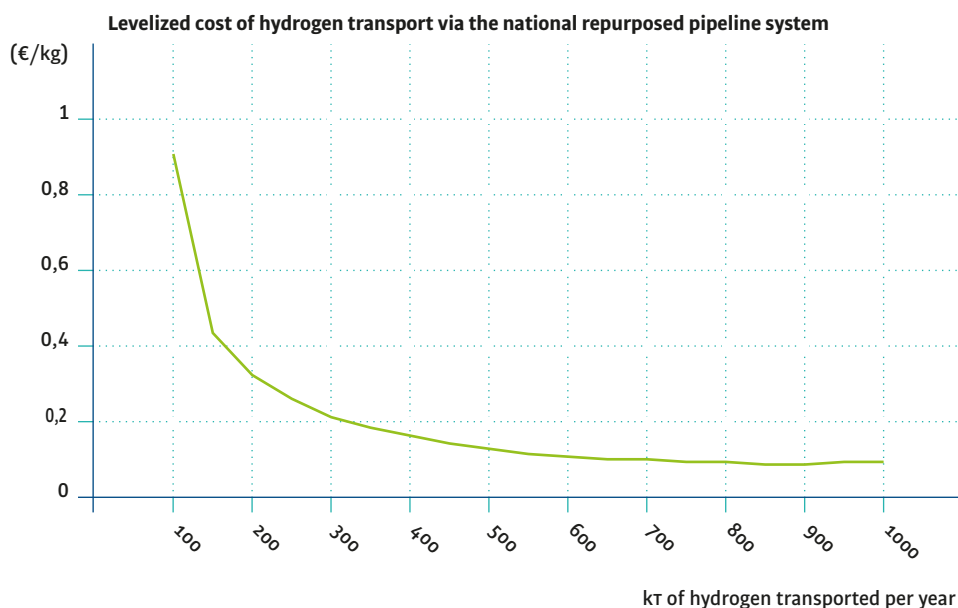
Andere onderzochte flexibiliteitsopties waren: lokale omzetting van elektriciteit in waterstof en transport en opslag daarvan; het combineren van in eigen land geproduceerde groene waterstof met productie en/of import van blauwe waterstof; en het afstemmen van het seizoensaanbodprofiel op het vraagprofiel. door bijvoorbeeld het seizoensafnameprofiel van waterstof in de gebouwde omgeving te combineren met dat van de industrie. Omdat deze opties naast elkaar kunnen bestaan, kan een combinatie ervan leiden tot een kostenoptimum in de totale waardeketen.

Zoals al eerder werd beschreven, is een factor met een grote impact op de totale kosten van een waterstofwaardeketen of de waterstof in gasvormige of vloeibare vorm wordt gebruikt, of verpakt via een drager zoals ammoniak of methanol. Daarom kan het, als vervoer nodig is voor specifieke industrieën, een kosteneffectieve optie zijn om de waterstof als ammoniak of methanol rechtstreeks van de importpunten naar de eindgebruikers te vervoeren.

Een tweede belangrijk punt is dat een eventueel parallel transportsysteem voor waterstof en waterstofdragers, elk met eigen transport- en opslagketenmodaliteiten – bijvoorbeeld waterstoftransport via pijpleidingen naast ammoniaktransport per spoor – niet alleen afzonderlijke kosten met zich meebrengt. De transport- en opslagkosten zullen elkaar door schaalfactoren e.d. ook wederzijds beïnvloeden.

Hoe, wanneer en waar waterstof op de markt wordt aangeboden, zal van invloed zijn op de ontwikkeling van transport- en opslagmodaliteiten en eindgebruik. Het omgekeerde is echter evenzeer waar: zodra de transport- en opslaginfrastructuur is geïnstalleerd, zal dit voor een groot deel bepalen welke soorten waterstofbronnen en eindgebruikers zullen worden aangetrokken door het bestaande ecosysteem van de waardeketen.

Figuur 4. Indicatieve impact van de getransporteerde hoeveelheden op de kosten van waterstoftransport via het nationale hergebruikte pijpleidingsysteem. Bron: D7A.2.



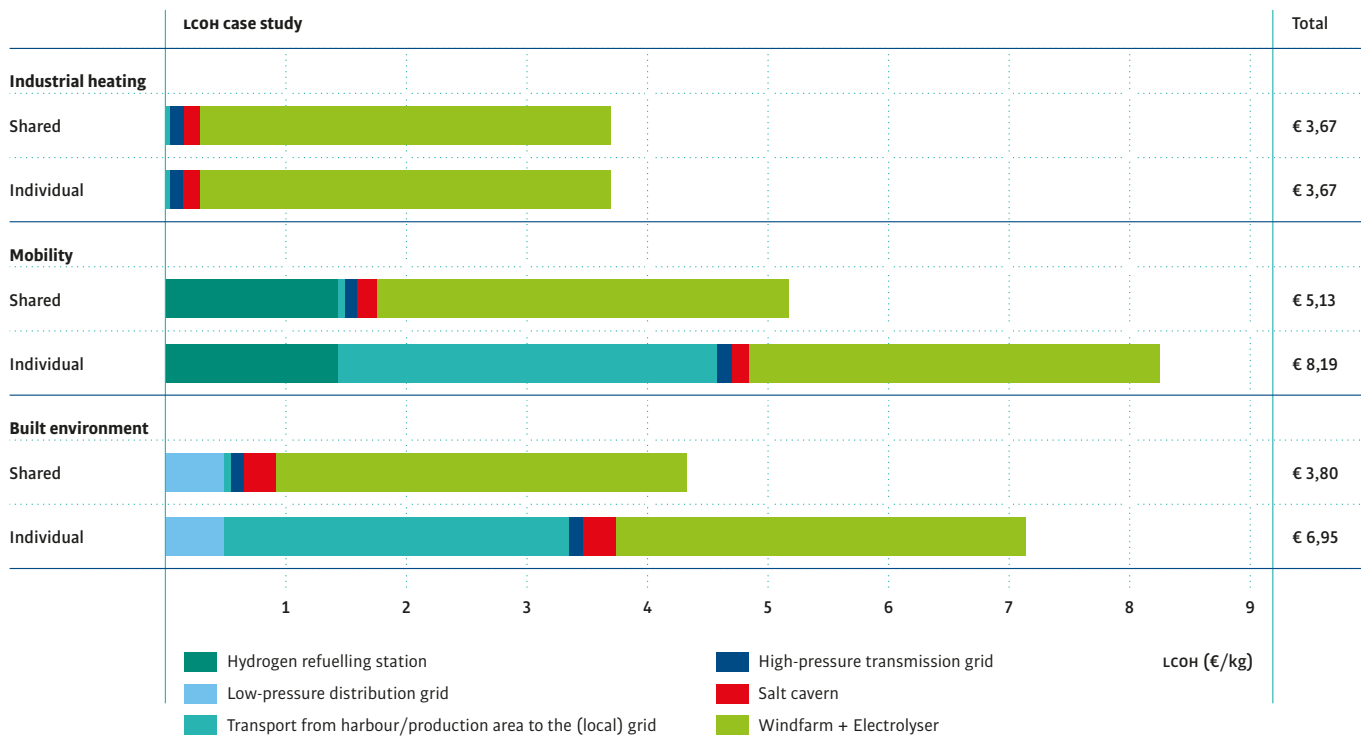
In Nederland zijn de kosten van nationaal waterstoftransport op basis van hergebruik van bestaande aardgaspijpleidingen vrijwel geheel onafhankelijk van de getransporteerde volumes. Dus hoe meer eindgebruikers en eindgebruik categorieën het systeem benutten, hoe lager de kosten per getransporteerde eenheid (zie *Figuur 4*). Om dit soort schaalvoordelen te benutten, kunnen grote industriële vraagclusters fungeren als ‘launching customers’ om het transportsysteem kosteneffectief genoeg te maken om te worden geïnitieerd, zodat daarna ook andere (kleinere) eindgebruikers categorieën van de aanwezigheid van de transportsystemen kunnen profiteren.

Een ander belangrijk HyDelta-inzicht heeft betrekking op de onderlinge relatie tussen opslag en transport van waterstof. Als in Nederland veel seizoensopslag in zoutcavernes cruciaal is om in de behoefte aan flexibiliteit op de waterstofmarkt te voorzien, heeft dat ook grote gevolgen voor de benodigde transportinfrastructuur. Omdat in het geval van Nederland dergelijke opslag naar verwachting alleen in Noord-Nederland (en mogelijk offshore) beschikbaar zal zijn, zal een nationaal transportsysteem nodig zijn om waterstofstromen heen en weer van en naar deze opslagplaatsen te laten plaatsvinden. Uit de HyDelta analyse bleek dat als de vraag naar seizoensopslag toeneemt, de behoefte aan transport ook duidelijk toeneemt. Tegelijkertijd moet worden vermeld dat de gemiddelde kosten van binnenlands grootschalig pijpleidingtransport in combinatie met seizoensopslag relatief bescheiden zijn (€ 0,20 - € 0,30/kg) vergeleken met het niveau van de 2030 LCOH voor groene waterstof van € 3,40/kg.

In het onderzoek naar waardeketens zijn drie soorten potentiële eindgebruikers onderscheiden, namelijk: industrieën die warmte op hoge temperatuur (HTH) nodig hebben; waterstoftankstations (HRS's) voor mobiliteit; en de gebouwde omgeving die waterstof vraagt voor verwarming. Het ruimtelijke profiel van de vraag van de diverse soorten afnemers zal uiteraard onderling verschillen, en de uitdaging is om te proberen slimme transport- (en opslag) combinaties te ontwikkelen voor verschillende waterstof eindgebruikers. De HyDelta-analyse heeft aangetoond dat via dergelijke slimme eindgebruikerscombinaties de transportkostenbesparingen over de 'last-mile' een aanzienlijke impact kunnen hebben op de totale kosten van de verschillende waardeketens.

Voor het nationale waterstoftransport zijn in principe twee modaliteiten te onderscheiden: via tubetrailers en per pijpleiding. Beide modi hebben hun voor- en nadelen. Tubetrailers hebben als voordeel dat relatief kleine waterstofvolumes flexibel en eenvoudig tegen acceptabele kosten vervoerd kunnen worden. Regionaal en lokaal waterstoftransport via pijpleidingen heeft daarentegen doorgaans hogere CAPEX-niveaus en zal daarom een economische optie zijn als de vervoerde volumes groot genoeg zijn. Dus, hoe groter de vraag naar waterstof in een specifieke regio, hoe kosteneffectiever het transport via waterstofpijpleidingen wordt. De over het algemeen relatief grote regionale vraagvolumes van regionale clusters van bedrijven die HTH nodig hebben, kunnen soms fungeren als een versneller van waterstofvraag van andere afnemers in dezelfde regio. Onze empirische resultaten voor de situatie in Nederland lieten duidelijk zien dat de LCOH voor de gebouwde omgeving en mobiliteit zo'n 40% kunnen dalen als hun eindgebruikers kunnen worden aangesloten op een reeds bestaande pijpleiding voor transport (zie *Figuur 5*).

Lokale en regionale leveringskosten van waterstof blijken sterk af te hangen van regionale kenmerken zoals: opties om slimme combinaties van vervoer voor eindgebruikers te creëren, het totale regionale vraagvolume van waterstof, de afstand van potentiële eindgebruikers in de regio tot een eventuele waterstofbackbone, de beschikbaarheid van restwarmte voor gevallen waarin LOHC-reconversie nodig is, of het potentieel voor lokale waterstofproductie. Daarom is bij de beoordeling van de lokale transport- (en opslag)kosten voor de introductie van waterstof een regionale benadering noodzakelijk. Zonder dat zouden de voordelen van gezamenlijk, multisectoraal gebruik van (op hergebruik gebaseerde) transport- of opslag-opties via pijpleidingen bijvoorbeeld ten onrechte kunnen worden genegeerd. Voor een goede analyse van de ontwikkeling van waardeketens moet men daarom uitgaan van het perspectief van zowel de afzonderlijke sectoren als de geografische clusters.



Figuur 5. LCOH voor de drie onderzochte cases (industrie, mobiliteit en gebouwde omgeving) waarbij de onderste balken de LCOH van waterstof vertegenwoordigen als de transportinfrastructuur slechts één bepaalde consument bedient, en de bovenste balken de LCOH als de vervoersinfrastructuur kan worden gedeeld. Bron: D7A.2.

Elke waterstofwaardeketen kan zich alleen ontwikkelen als er voldoende vraag is tegen prijzen die kunnen concurreren met de alternatieve, aanvankelijk fossiele en uiteindelijk CO₂-neutrale, opties. In de waardeketenmodellen van HyDelta 1 zijn vijf eindgebruiker/produktcombinaties onderscheiden elk met hun eigen meest logische waterstofdrager: ammoniak als grondstof voor de kunstmestindustrie; methanol als grondstof voor brandstofproductie; hoge temperatuur warmte met behulp van waterstof voor decentrale industrieën; en gasvormige waterstof voor respectievelijk tankstations voor mobiliteit en voor de gebouwde omgeving. Voor alle onderzochte toepassingen lieten de simulaties zien dat de kosten van de waardeketen met schone waterstof hoger zijn dan de fossiele opties die de samenleving op dit moment gewend is. In een aantal gevallen, zoals bij vergroening van de productie van ammoniak of methanol of voor het verwarmen van zeer lastig te isoleren woningen, zijn er, buiten schone waterstof, vrijwel geen alternatieven op een voldoende technologisch niveau en op korte termijn beschikbaar en lijkt de waterstofoptie dus onontkoombaar om te vergroenen. Hogere energie-/grondstof kostenniveaus dan in het fossiele verleden zullen dan moeten worden geaccepteerd om de klimaatdoelen te kunnen bereiken.

Bronnen voor dit deel

DELIVERABLE:

D7B.1 – Database with the filled-out factsheets about different components of the H₂ value chain elements to be modelled

[Link to deliverable](#)



DELIVERABLE:

D7B.2 – Accompanying report to D7B.1 where the factsheets are explained in more detail

[Link to deliverable](#)



DELIVERABLE:

D7B.3 – Cost analysis and comparison of different hydrogen carrier import chains and expected cost development

[Link to deliverable](#)



DELIVERABLE:

D7B.4 – A roadmap on transport and storage of hydrogen and hydrogen carriers for five sectors in the Dutch economy

[Link to deliverable](#)

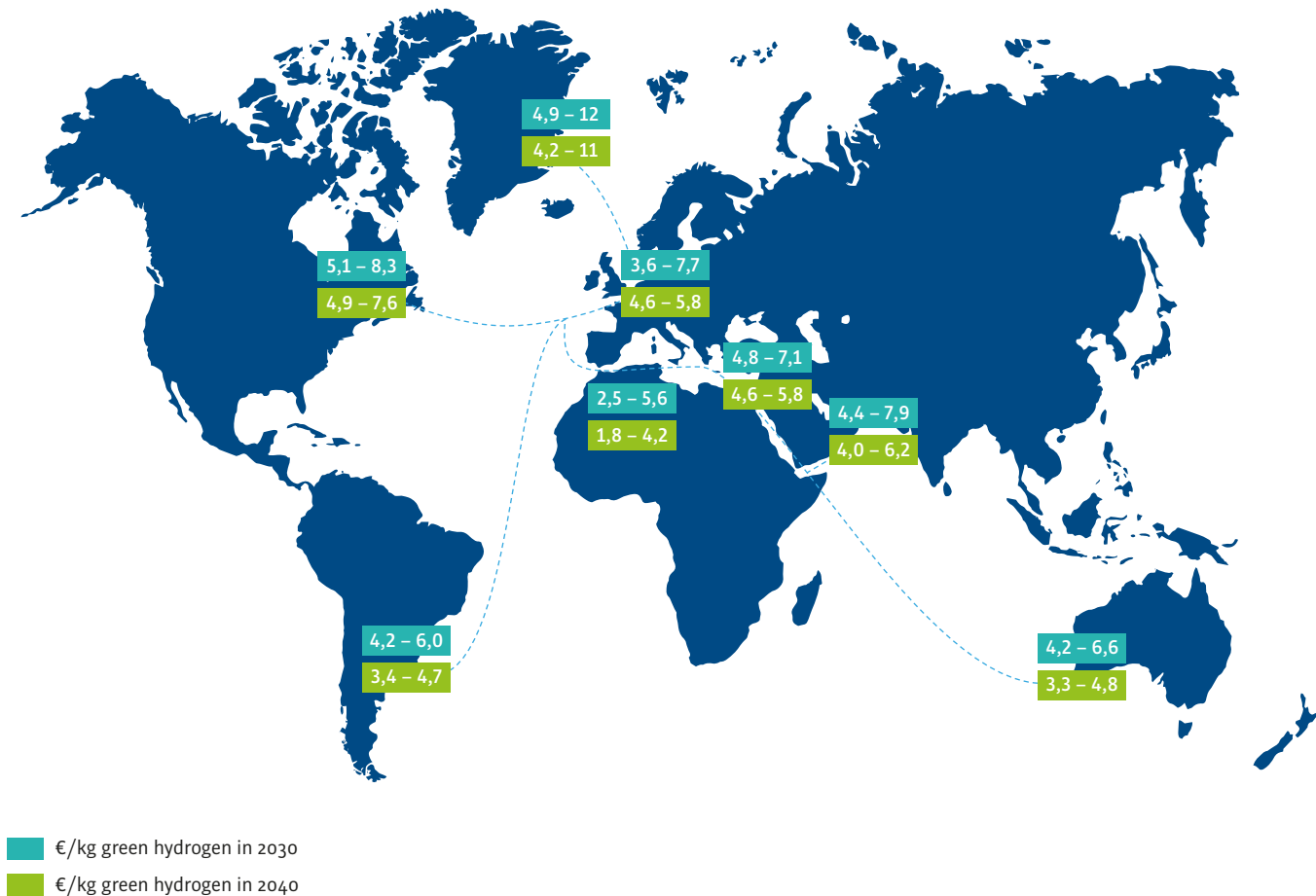


Ten slotte bleek uit de analyses dat vanuit LCOH-perspectief mobiliteit en de gebouwde omgeving vaak een serieus economisch potentieel hebben als eindgebruikers van groene waterstof. Of er een solide businesscase is, hangt echter altijd sterk af van locatiespecifieke omstandigheden. Ter illustratie: batterij-elektrische voertuigen kunnen thuis vaak relatief goedkoop worden getankt, maar als het rijbereik > 400 km is en extern elektrisch tanken alleen mogelijk is tegen het relatief hoge snellaadtarief van ongeveer € 0,55/kWh, blijkt rijden met groene waterstof vaak het meer kosteneffectieve alternatief. Voor zware mobiliteit bleek de bijbehorende break-even waterstofprijs € 6,40/kg te zijn.

Ook bleek dat als de aardgasprijs (zonder energiebelasting) boven de € 70/MWh blijft, hernieuwbare waterstof in 2030 waarschijnlijk zal concurreren met aardgas als brandstof voor de gebouwde omgeving, tenminste als de huidige energiebelasting op aardgas blijft bestaan en hernieuwbare waterstof zou profiteren van een vrijstelling van energiebelasting. Als bovendien de energiebelasting op aardgas richting 2030 met 75% stijgt ten opzichte van het huidige niveau, zoals voorzien in het Klimaatakkoord van Nederland, is slechts een aardgasprijs > € 50/MWh nodig om schone waterstof concurrerend te maken met aardgas.

Internationale waardeketens

Internationale waterstofwaardeketens op basis van import uit (niet-)EU-regio's zullen naar verwachting deel uitmaken van onze toekomst, soms uit kostenoverwegingen, maar ook vanwege onvoldoende binnenlandse productiecapaciteit van schone waterstof. Het is daarom belangrijk om de verwachte waardeketen kosten te bepalen van mogelijke toekomstige naar Nederlands te importeren waterstof en waterstofdragers vanuit wat momenteel veelbelovende locaties lijken, zoals enkele niet-EU-landen met een groot potentieel aan hernieuwbare energie. Dit is complex omdat de meeste betrokken waardeketen processen nog moeten worden ontwikkeld. De betrokken proces- en technologiesamenstellingen, de af te nemen volumes en de onderlinge afhankelijkheden tussen de elementen van de toeleveringsketens, zijn alle nog onzeker.



Figuur 6. Verwachte LCOH-ranges van groene waterstofproductie in verschillende delen van de wereld in 2030 (zwart) en 2040 (grijs). Bron: D7B.3.

1) Als algemene opmerking dient hieraan te worden toegevoegd dat de in HyDelta 1 gebruikte geraamde kostengegevens – in vergelijking met de vergelijkbare resultaten van een representatieve reeks benchmarkstudies – aan de hoge kant of althans iets boven het gevonden benchmarkbereik liggen. Dit kan verband houden met kwesties zoals zuiverheidsniveaus voor waterstof, de benuttingsgraad van de apparatuur of andere veronderstellingen. Dit is echter niet van invloed op de voornaamste andere conclusies die worden genoemd.

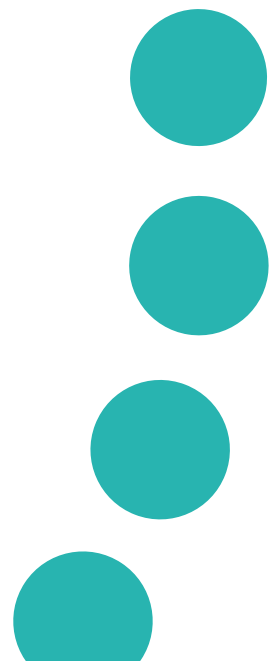
Om inzicht te krijgen in de verwachte kostenontwikkeling in 2030 en 2040 van geïmporteerde waterstof en waterstofdragers, zijn vijf opties onderscheiden: synthetische ammoniak, synthetische methanol, vloeibare waterstof, gecomprimeerde waterstof en de vloeibare organische waterstofdrager methylcyclohexaan. Daarnaast zijn – naast de binnenlandse Noordzee optie – zeven bronlanden onderscheiden: Australië, Argentinië, Marokko, IJsland, Saoedi-Arabië, Oman en het Verenigd Koninkrijk. De referentie-LCOH-schattingen en hun waarschijnlijke range zijn weergegeven in de bovenstaande Figuur. Het toont in de eerste plaats aan dat, met uitzondering van de invoer uit Marokko, de LCOH (zonder verdere conversie) op basis van windenergie uit de Noordzee lager zijn dan van alle andere bronnen, ongeacht of het internationale transport met schepen of via pijpleidingen gebeurt. Ten tweede blijkt hieruit dat de kostenmarges van de niet-EU-bronnen nog steeds te groot zijn om duidelijk de meest kosteneffectieve invoerroutes naar Nederland te kunnen onderscheiden¹.

Een verdere analyse van wat de LCOH van groene waterstof voor de verschillende landen van herkomst van de invoer bepaalt, wees uit dat de productiekosten opnieuw het belangrijkste kostenpercentage uitmaken: ketens gedomineerd door vloeibare waterstof (50%), vloeibare organische waterstof (50%), ammoniak en methanol (70%) en gecomprimeerde waterstof (90%). Hieruit bleek eens te meer dat de rol van (internationale) transportkosten in de kosten van de waardeketenbescheidener is dan die van de grondstof zelf. De kosten van de waterstofproductie bleken op hun beurt sterk gevoelig te zijn voor de lokale kosten van hernieuwbare energie en het aantal uren dat de productie- en conversie-installaties worden gebruikt.



Deel 2

Velige distributie



2 Velige distributie

Wat moet er worden gedaan om het vervoer en de distributie van waterstof even veilig te maken als het vervoer van aardgas, met gebruikmaking van de bestaande aardgasinfrastructuur?

Waterstof 100% risicoloos vervoeren is niet mogelijk: er zullen altijd risico's verbonden zijn aan het vervoer van een brandbaar gas. Dit betekent ook dat het vervoer van aardgas (of andere vormen van energie) niet 100% zonder risico is. Wanneer de veiligheid van een aardgasinstallatie (of eender welk fysisch of chemisch proces, en zelfs consumentenproducten) wordt beoordeeld, wordt meestal een risicoanalyse uitgevoerd. De benamingen van de risicoanalyses verschillen per sector en zelfs per land, met als enkele voorbeelden QRA (kwantitatieve risicoanalyse) en FMEA (faalwijze- en effectenanalyse).

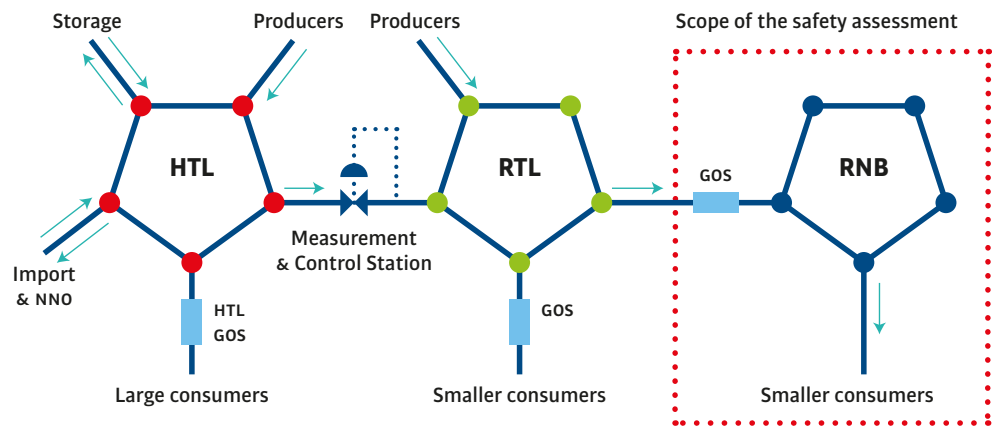
Ongeacht de aanduiding hebben alle risicoanalyses tot doel dezelfde drie hoofdvariabelen te identificeren:

- 1 de oorzaak van een veiligheidsincident
- 2 de waarschijnlijkheid dat het veiligheidsincident zich voordoet
- 3 het effect van het veiligheidsincident

De risicoanalyse identificeert vervolgens de veiligheidsincidenten die tot het grootste risico leiden en stelt risicobeperkingsstrategieën voor om die risico's te beperken tot een drempelwaarde, die typisch voortvloeit uit een overeenkomst tussen de relevante belanghebbenden. In het geval van het aardgasnet omvatten deze belanghebbenden gasnetbeheerders, onderzoeksinstituten, autoriteiten, enz. en zij bepalen welk soort risico aanvaardbaar is, alsook de aanvaardbaarheidscriteria van een bestaand risico, bijv. dat een bepaalde situatie waarschijnlijk niet zal leiden tot een catastrofaal gevolg (zoals verlies van mensenlevens).

Al met al zijn risicobeoordelingsmethodologieën niet ontworpen om een binair antwoord te geven op de vraag "is dit proces veilig of niet?", maar op de vraag "wat moet er worden gedaan om het proces ten minste even veilig te maken als vereist door de bestaande normen en voorschriften?". Een belangrijke drijfveer van het HyDelta 1-project was de gastransportindustrie (met name de netwerkexploitanten) te helpen bij de beoordeling van de veiligheidsniveaus van het transport en de distributie van waterstof in de bestaande aardgasinfrastructuur. Dit houdt in dat er een inherent risico is aan het vervoer van aardgas, en dat dit risico door de betrokken autoriteiten is aanvaard, aangezien het bestaande risico (met zeer grote waarschijnlijkheid) niet tot rampzalige gevolgen zal leiden. Bijgevolg is er een bestaand risico bij het vervoer van aardgas en zal er een risico zijn bij het vervoer van waterstof. Het doel van de beoordeling van het risico van het vervoer van waterstof is om regels en risicobeperkende strategieën vast te stellen die het risico van het vervoer van waterstof verlagen tot ten minste dat van aardgas.

Figuur 7. Overzicht van het Nederlandse aardgastransport- en distributienetwerk; in rood het bereik van de veiligheidsbeoordeling van HyDelta 1 inclusief experimenten. HTL: hoge druk (67 bar) transportnet. RTL: regionaal (40 bar) transportnet. RNB: regionaal (distributie, 8 bar) gasnet. GOS: gasontvangststation, waar de druk van het gas wordt verlaagd. NNO: Neighbouring Network Operator, de beheerder van een net dat een interconnectie deelt met de Nederlandse aardgasnetbeheerders. Bron: aangepast van D1E.1.



Eén van de mogelijke toepassingen van waterstof is de vervanging van het aardgasverbruik in de gebouwde omgeving, d.w.z. huishoudens en (commerciële) gebouwen, om de warmtevoorziening in woningen koolstofvrij te maken. Om dit te leren en te demonstreren, ontwikkelen de Nederlandse regionale netbeheerders (RNB's) zogenaamde 'waterstofpilots'. Deze waterstofpilots zijn projecten verspreid over verschillende gemeenten in Nederland waar verschillende groepen huizen die gewoonlijk aardgas gebruiken voor verwarming, in plaats daarvan waterstof krijgen geleverd. Het doel van dergelijke proefprojecten is aan te tonen dat het mogelijk is aardgas te vervangen door waterstof in de bebouwde omgeving met gebruikmaking van de bestaande infrastructuur; de Nederlandse DNB's willen inzicht krijgen in de meest kritische aspecten daarvan, waarbij de nadruk ligt op de veiligheid en de waterstofcompatibiliteit van de componenten in het aardgasdistributienetwerk.

De activiteiten met betrekking tot het technische gedeelte van het HyDelta 1-project waren bedoeld om een antwoord te geven op één cruciale vraag: wat moet er gebeuren om de distributie van waterstof even veilig te maken als die van aardgas, bij gebruikmaking van de bestaande aardgasinfrastructuur?

Binnen dit deel van het HyDelta 1-project werden vier hoofdactiviteiten uitgevoerd:

- 1 Het ontwerpen van een kwantitatieve risicobeoordelingsmethode (QRA) en het uitvoeren van een reeks experimenten om een eerste inzicht te krijgen in de potentiële risico's van waterstoflekken in het distributiesysteem en in een huis of gebouw, en hoe de ventilatie kan worden geoptimaliseerd om die risico's te beperken
 - Recente literatuur van de Britse projecten H21 en Hy4Heat is bestudeerd, en er is een vergelijking gemaakt tussen de Britse en Nederlandse aardgasdistributienetwerken en huishoudelijke installaties om de resultaten van de genoemde projecten te vertalen naar de Nederlandse situatie

- Er werd een reeks aanbevelingen gedaan voor waterstofpilots om rekening mee te houden bij de planning en uitvoering van de eerste waterstofprojecten in de gebouwde omgeving
- 2 De bestudering van onderwerpen gerelateerd aan de veiligheid van het aardgassysteem om de risico's te kunnen inschatten die verbonden zijn aan het vervoer van waterstof in het distributie- en transportnet in vergelijking met het gebruik van aardgas
 - Odorisatie van waterstof werd bestudeerd; odorisatie is een kritieke veiligheidsmaatregel omdat het een duidelijk waarneembare geur toevoegt die helpt lekken te identificeren
 - Er zijn simulaties uitgevoerd om te proberen extra situaties gerelateerd aan waterstof aan het licht te brengen die tot dusverre nog niet in de literatuur zijn gedocumenteerd, d.w.z. aan hoge stroomsnelheden gerelateerde effecten van waterstof in het aardgastransportnet
- 3 Het analyseren van de geschiktheid van de huidige hardware (d.w.z. de bestaande aardgasinfrastructuur) om zuivere (> 98% zuiverheid) waterstof naar de eindgebruikers te transporteren. De bestudeerde activa waren:
 - Pijpleidingen en pijpleidingcomponenten
 - Drukreducerstations
 - Eindverbruikersaansluitingen en toestellen in huishoudens
- 4 Het verrichten van een studie over de toekomstige vraag naar en opleidingsvereisten voor technisch personeel in de toekomstige sector van het transport en de distributie van waterstof

Waterstofgerelateerde risico's in het distributienetwerk en de gebouwde omgeving

Aangezien het veiligheidsniveau van aardgas als referentie wordt genomen, is het van belang de verschillen te kennen in waarschijnlijkheid en gevolgen van veiligheidsgereleerde gebeurtenissen tussen aardgas en waterstof. Die waarschijnlijkheid heeft met name betrekking op de mogelijkheid dat zich een gevaarlijke situatie voordoet; de gevolgen kunnen worden uitgedrukt in schade als gevolg van een brand of explosie. Mitigerende maatregelen zijn er dan op gericht de kans op het ontstaan van een gevaarlijke situatie te verkleinen. Met behulp van (bestaande) risicomodellen kunnen kansen en gevolgen kwantitatief worden gemodelleerd voor zowel aardgas als waterstof. Om de aan het begin van het project gestelde vragen te beantwoorden zijn de eerste stappen gezet naar de ontwikkeling van een QRA-model dat geschikt is voor het voorspellen van risico's bij het transport en distributie van waterstof met behulp van de bestaande Nederlandse aardgastransport- en distributie-infrastructuur, met de nadruk op het distributienet (< 8 bar) alsmede het gebruik in de gebouwde omgeving.

Sources for this section

DELIVERABLE:

D1A.1 – Report with results from Hy4Heat, H21, Hyhouse, and interviews, translated to the Dutch situation (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



Vergelijkende analyse van de resultaten van de projecten H21 en Hy4Heat voor Nederland

Gestart in 2014 en 2018 (respectievelijk), zijn H21 en Hy4Heat twee van de meest relevante waterstofgerelateerde onderzoeksprojecten in het Verenigd Koninkrijk, met totale budgetten van 25 miljoen pond per project en verschillende projectfasen. Het hoofdoel van deze projecten is de haalbaarheid te bestuderen van het vervoer van waterstof via het bestaande Britse aardgasdistributienetwerk (H21) en van de vervanging van aardgas door waterstof in de Britse gebouwde omgeving (Hy4Heat). Als zodanig vertonen beide projecten grote gelijkenis met het HyDelta 1-project, waarbij beide doelstellingen in één programma zijn gecombineerd.

Tussen eind 2020 en medio 2021 hebben de projecten H21 en Hy4Heat documenten uitgebracht over hun respectievelijke kwantitatieve veiligheidsbeoordelingen, waarin zij de belangrijkste veiligheidsaspecten lieten zien waarmee rekening moet worden gehouden bij de overstap van aardgas naar waterstof in het distributienet en de gebouwde omgeving, en waarbij ook een reeks risicobeperkende maatregelen is vermeld. Eén van de belangrijkste activiteiten in het HyDelta 1 project was het bestuderen van deze veiligheidsbeoordelingen en aanbevelingen en het vertalen van de resultaten naar de Nederlandse situatie. De doelen waren 1) het maken van een vergelijkende analyse van de Nederlandse en Britse situatie met de resultaten van H21 en Hy4Heat als uitgangspunt, en 2) het identificeren en opvullen van hiaten in de bestaande kennis met het oog op het ontwikkelen van een veiligheidsbeoordeling en het ontwerpen van een lijst van aanbevelingen voor het gasdistributienet en de gebouwde omgeving in Nederland.

Gebleken is dat het lagedruk distributienet in het VK is opgebouwd uit grotendeels dezelfde materialen als in Nederland, maar in verschillende verhoudingen wat lengte, diameter en druk betreft. Met name bestaat een groot deel van de in het VK gebruikte leidingmaterialen uit gietijzer, een materiaal dat ook voor de distributie van aardgas een risico inhoudt. In dit opzicht heeft Nederland een voordeel, aangezien in Nederland gietijzeren pijpleidingen momenteel worden vervangen en tegen de tijd dat waterstof in de bestaande infrastructuur wordt ingevoerd, zullen de resterende gietijzeren leidingen zijn vervangen. Bovendien bestaat een groot deel van het Nederlandse distributienet reeds uit polymeermaterialen, waarvan is vastgesteld dat zij waterstof even veilig kunnen verwerken als aardgas.

Ook verschilt de typische indeling van Nederlandse huizen van die in het VK; in het VK kunnen de gasmeters (d.w.z. de plaats waar de aansluiting op het aardgasnet zich bevindt) zowel binnen als buiten het huis worden aangetroffen, terwijl in Nederland de meeste meterkasten zich binnen bevinden. De plaats van de gasmeters in huizen speelt een belangrijke rol bij het bepalen van het risico in verband met waterstoflekken in huizen. Bovendien zijn er in het VK verhoudingsgewijs meer verouderde huizen dan in Nederland: slechtere isolatie, minder mechanische ventilatie en ventilatie die niet voldoet aan de bestaande voorschriften inzake bouwvoorschriften en -normen.

Onder de overige inzichten die zijn verkregen uit de vergelijkende analyse van de H21- en Hy4Heat-projecten met de Nederlandse situatie, waren er twee belangrijke inzichten die aantonen dat waterstof in de volgende opzichten inherent veiliger zou kunnen zijn dan aardgas:

- 1 Waterstofconcentraties van minder dan 10% in lucht (~2 maal de onderste explosiegrens, LEL) ontbranden minder snel dan aardgas en zelfs als ze ontbranden, lijken ze minder schade te veroorzaken dan aardgasgerelateerde explosies bij dezelfde concentratie (10% in lucht). Dit is van bijzonder belang, omdat dit betekent dat er een kleiner risico is op waterstofgerelateerde effecten dan op aardgasgerelateerde effecten, bijvoorbeeld wanneer zich kleine lekken voordoen
- 2 Het inherente voordeel van waterstof ten opzichte van aardgas is dat bij de verbranding van waterstof geen koolmonoxide (CO) vrijkomt. CO-vergiftiging is volgens de incidentenregistratie in zowel het VK als Nederland het meest voorkomende type incident met aardgas

Uit het bovenstaande blijkt dat wanneer het risico van transport en gebruik van waterstof in de gebouwde omgeving uiteindelijk op het geaccepteerde risiconiveau van transport en gebruik van aardgas wordt gebracht, het totale risico van waterstof uiteindelijk lager zou kunnen uitvallen dan van aardgas vanwege de inherente eigenschappen van waterstof als het gaat om het vermijden van CO-vergiftiging en de lagere kans op ontbranding als gevolg van lekkages. Het risico voor situaties met een concentratie van meer dan 10% waterstof in de lucht is groter dan bij een vergelijkbare concentratie aardgas in de lucht; daarom moet worden onderzocht of hiervoor aanvullende maatregelen nodig zijn.

Bronnen voor dit deel

DELIVERABLE:

D1A.2 – Report with additional questions for the Dutch situation and test program (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



Inzicht in de rol van ventilatie op de veiligheid van waterstofinstallaties binnenshuis

De meest kritische veiligheidscomponent waarvoor de Nederlandse RNB's aanvullende aanbevelingen wensten, is die van de ventilatie, d.w.z. hoe een woning naar behoren kan worden geventileerd om het risico te minimaliseren dat waterstofmengsels de LEL bereiken of overschrijden, d.w.z. de laagste concentratie waarbij een ontsteking (brand) kan plaatsvinden. De LEL van aardgas is 5% (50.000 ppm) in lucht, terwijl die voor waterstof iets lager is (4% of 40.000 ppm waterstof in lucht). Waterstofconcentraties in lucht van 10% of meer kunnen leiden tot een explosieve atmosfeer.

Het testprogramma van het HyDelta 1-project betreffende lekttests was uitsluitend gericht op kleine waterstoflekken (zoals die zich in een huishoudelijke omgeving kunnen voordoen)². De resultaten van de tests toonden aan dat zelfs in gesloten ruimten de waterstofconcentratie nooit in de buurt van de LEL kwam, wat een eerste aanwijzing geeft dat zelfs matige ventilatie in gesloten ruimten (zoals die kan worden aangetroffen in oudere huizen en gebouwen) voldoende zou kunnen zijn om te voorkomen dat zich explosieve waterstof-luchtmengsels vormen. Bovendien bleek dat de ventilatie van waterstof een vergelijkbaar patroon volgt als die van aardgas; er werden experimenten uitgevoerd met beide gassen in een gesloten ruimte, en beide gassen vertoonden dezelfde reactie op verschillende niveaus van ventilatie binnen een gesloten ruimte. Voor grotere lekken (zoals die bijvoorbeeld kunnen worden veroorzaakt door een breuk in een pijpleiding) zijn aanvullende tests nodig.

Uit de literatuur blijkt dat de standaard CO (koolmonoxide)-detectoren van consumentenkwaliteit kruisgevoelig zijn voor waterstof. Dit betekent dat het (in principe) mogelijk is de bestaande veiligheidsinfrastructuur in huizen te benutten om waterstoflekken in een vroeg stadium op te sporen. Door aan waterstof odorant toe te voegen (in het volgende deel in detail besproken) kunnen waterstofconcentraties worden gedetecteerd die buiten het detectiebereik van de CO-sensoren liggen en nog steeds lager zijn dan de LEL. Het toevoegen van consumentgerichte CO-sensoren in huishoudens kan een extra veiligheidsmaatregel zijn die als redundantie wordt gebruikt om het veiligheidsniveau van waterstof in de gebouwde omgeving verder te verhogen. Dit alles opent de mogelijkheid voor waterstof om aardgas te vervangen als brandstof in zowel bestaande als nieuwe huizen, waar het veiligheidsniveau van waterstofverbruik het huidige veiligheidsniveau van aardgasverbruik kan bereiken en tegelijk gebruik kan worden gemaakt van de bestaande veiligheidsinfrastructuur in huishoudens.

² In huishoudelijke installaties zijn de lekkages die kunnen worden verwacht van kleinere omvang dan wat kan worden verwacht in het distributienet, zoals bijv. bij een breuk in een pijpleiding

Wat betreft de veiligheidsmaatregelen die nodig zijn om waterstof in de gebouwde omgeving te introduceren, is in het HyDelta 1-project een lijst opgesteld met mitigerende maatregelen voor de waterstofpilots in de gebouwde omgeving, zodat deze proefprojecten de komende jaren veilig kunnen worden uitgevoerd. De lijst met maatregelen had betrekking op alle fasen van een project (voorbereiding, ontwerp en uitvoering); de maatregelen waren conservatief bepaald omdat het idee achter deze waterstofpilots is om vertrouwen op te bouwen in waterstoftransport en -verbruik in huishoudens en gebouwen. Aangezien de aardgasdistributie-infrastructuur al tientallen jaren in bedrijf is, is het mogelijk dat sommige aardgasinstallaties niet meer voldoen aan de meest recente veiligheidseisen. Daarom moet bij de eerste waterstofpilots aandacht worden besteed aan de vraag welke delen van het distributienet opnieuw moeten worden beoordeeld volgens de huidige veiligheidsnormen. Verwacht wordt dat, naarmate meer ervaring met deze waterstofpilots wordt opgedaan, sommige aanbevelingen kunnen worden teruggedraaid of overbodig kunnen worden geacht.

Bronnen voor dit deel

DELIVERABLE:

D2.1 – Choice for a sulphur free odorant (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



DELIVERABLE:

D2.2 – Influence of sulphur containing odorant on end-use appliances (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



DELIVERABLE:

D2.3 – Stability of odorants in hydrogen (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



DELIVERABLE:

D2.4 – Report on the risks of not odorizing hydrogen. (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



DELIVERABLE:

D2.5 – Report with advice over odorizing hydrogen including a possible choice for a defined type of odorant and its dosing (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



Verdere beperking van waterstofgerelateerde risico's

Odorisatie van waterstof

Van de voorgestelde risicobeperkende maatregelen is er één die het grootste effect heeft qua risicobeperking: het odoriseren van waterstof. De meeste aardgasdistributienetten in de wereld bevatten een odorant, d.w.z. een chemische stof die in kleine hoeveelheden (in de orde van ppm) aan het gasnet wordt toegevoegd. Geurstoffen maken gebruik van de acute reukzin van de mens om gaslekken op te sporen zonder dat daarvoor speciale hardware nodig is die anders duur zou zijn om aan te schaffen en in elk huishouden te installeren.

In navolging van de norm ISO 13734 is als geurstof voor het Nederlandse aardgasdistributienetwerk gekozen voor tetrahydrothiofeen (THT). Voordat HyDelta 1 van start ging, was de belangrijkste vraag: werkt THT met waterstof op een vergelijkbare manier als met aardgas? Het doel was dan ook aan te tonen dat de (eerder genoemde) lijst van eigenschappen van THT in aardgas ook van toepassing is op THT in waterstof. Een ander doel van dit onderzoek was om naast de evaluatie van THT een alternatieve odorant voor waterstof voor te stellen, en om na te gaan welke eindgebruikersapparatuur (bijv. brandstofcellen) onverenigbaar is met zwavelhoudende odoranten.

Uit het onderzoek is gebleken dat er geen onoverkomelijke problemen te verwachten zijn voor apparatuur voor wat betreft de verbranding van waterstof, zoals centrale verwarmings- en warmwaterketels, keukenapparatuur, sierhaarden, buitenfornuizen, terrasverwarmers en gasmotoren, bij gebruik van waterstof die is geodoriseerd met een zwavelhoudend odorant zoals THT. De aanwezigheid van zwavel in waterstof leidt tot onomkeerbare schade aan brandstofcelsystemen, zodat het odorant vóór gebruik moet worden verwijderd. Bovendien bleken alle geteste geurstoffen, d.w.z. zowel THT als zwavelvrije producten zoals Gasodor® S-Free en 2-hexyne, zich gedurende een testperiode van drie maanden stabiel te gedragen in een waterstofatmosfeer. In het geval van een gaslek van een mengsel van een geurstof in waterstof bleek er geen scheiding van de geurstof en waterstof plaats te vinden. Wat de gasverdeling in een ruimte en de geur van een gaslek betreft, is odorisatie van waterstof dus even doeltreffend als odorisatie van aardgas.

Potentiële effecten van hogesnelheids waterstof in het vervoersysteem

De volumetrische energiedichtheid van aardgas is ~3 maal hoger dan die van waterstof, d.w.z. bij dezelfde bedrijfsdruk moet waterstof drie maal zo snel stromen als aardgas om een consument van dezelfde hoeveelheid energie te voorzien. Deze hogere stroomsnelheid kan een beperking vormen bij het optimaliseren van de gastransportinstallaties voor waterstof. Voor aardgas wordt gewoonlijk een snelheidslimiet van 20 m/s vastgesteld, maar voor waterstof moet deze limiet op 60 m/s worden gesteld om de bestaande gastransportcapaciteit in termen van energie te behouden.

Sources for this section

DELIVERABLE:

D1E.1 – Impact of high-speed hydrogen flow on system integrity and noise (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



De verhoogde snelheid van waterstof ten opzichte van aardgas zou in theorie potentiële problemen kunnen veroorzaken waarvan bekend is dat ze zich niet voordoen in het bestaande aardgasnet, zoals stromingsgeïnduceerde risicopulsaties, trillingen, problemen in apparatuur zoals thermowells en andere binnendringende apparatuur, en erosie, om er maar een paar te noemen. Deze problemen zouden moeten worden onderzocht indien zij zich onder waterstof blijken voor te doen.

Wat het effect van het vervoer van waterstof op het geluid betreft, is uit de studie gebleken dat waterstof die met hogere snelheden stroomt lagere geluidsniveaus kan veroorzaken, maar dat de frequentie van dit geluid ongeveer 3 keer hoger zal zijn dan bij aardgas. Bovendien kan de hogere frequentie van het geluid onder bepaalde omstandigheden geluidsproblemen veroorzaken. Dit alles betekent dat maatregelen nodig kunnen zijn om de trillingen tot een aanvaardbaar niveau te beperken of om geluiddemping in te voeren voor de infrastructuur voor de distributie van waterstof.

Erosie lijkt het meest onzekere mechanisme te zijn dat problemen kan veroorzaken bij transport en distributie van waterstof in de bestaande aardgastransportinfrastructuur. In het algemeen zal het vervoer van dezelfde hoeveelheid energie als waterstof in plaats van als aardgas er, als hiervoor werd opgemerkt, toe leiden dat waterstof met hoge snelheden stroomt (~60 m/s). Dit kan zich op zijn beurt vertalen in een erosiepotentieel dat een orde van grootte hoger is dan bij stromend aardgas (dat met 20 m/s stroomt om dezelfde hoeveelheid energie te leveren). Een belangrijke parameter is het verontreinigingsniveau van vaste deeltjes in de gasstroom, dat onzeker is. Er zijn filters aanwezig om deze verontreiniging te voorkomen. Uitgaande van momenteel aanvaardbare grenswaarden (d.w.z. voor aardgas) zou dit al leiden tot onaanvaardbare erosieniveaus (d.w.z. voor waterstof). Verder onderzoek naar stromingsgeïnduceerde effecten wordt aanbevolen om erosie als potentieel risico volledig te kunnen uitsluiten, of om een overeenkomstige risicobeperkende strategie te ontwerpen. Aanbevolen wordt verder onderzoek naar erosie te doen op de volgende wijze:

1. Onderzoek naar de prestaties van filters in de verschillende delen van de aardgas-transportnetsystemen (hoge druk, regionaal transport en distributienetwerken) met een snelle waterstofstroom. Dit moet een beter onderbouwde keuze voor de vaste lading in de gasstroom mogelijk maken
2. Speciale stromingssimulaties uitvoeren om de slechtst denkbare erosiesnelheden in de RNB-systemen te karakteriseren, in combinatie met geschikte materiaalconstanten (bijv. voor PVC-buizen en materialen zoals staal en PE), waarvoor tests nodig kunnen zijn

Het is belangrijk te vermelden dat in het huidige distributiesysteem voor aardgas geen significante erosieniveaus zijn vastgesteld.

Geschiktheid van de huidige hardware voor het vervoer van waterstof

Het Nederlandse RNB-net telt meer dan 125.000 km pijpleidingen en ongeveer 8 miljoen aansluitingen op huizen en gebouwen. Wijzigingen in de bestaande componenten kunnen gevolgen hebben voor de kosten, verstoringen van de gaslevering en mogelijke capaciteitsbeperkingen door de beschikbaarheid van technisch personeel. Daarom is het van het grootste belang te onderzoeken of er in het huidige aardgasdistributienetwerk componenten bestaan die ook geschikt zijn voor waterstof. De componenten in de lagedrukgasnetten in Nederland die in het HyDelta 1-project zijn bestudeerd, kunnen in de volgende groepen worden ingedeeld:

- 1 Pijpleidingen en pijponderdelen: met inbegrip van de pijpen zelf, maar ook fittingen, lassen, pakkingen, veiligheidsuitrusting, enz.
- 2 Gasdrukreducerstations: dit zijn punten waar de gasdruk wordt verlaagd (bijv. vanaf de RTL, zie *Figuur 7*) en verdeeld over een groep huizen die erop zijn aangesloten.
- 3 Eindverbruikersaansluitingen en -toestellen: voornamelijk drukregelaars, gasdebitmeters en toestellen (ketels, fornuizen, enz.)

Leidingen en leidingcomponenten

Uit eerder onderzoek in binnen- en buitenland is gebleken dat de materialen die gebruikt worden voor lagedruk distributieleidingen (voornamelijk polymeren, d.w.z. PVC en PE) ook geschikt zijn om waterstof te transporteren, zodat binnen HyDelta 1 de geschiktheid van leidingmaterialen om waterstof te transporteren niet onderzocht hoefde te worden. Het onderzoek van de leidingcomponenten in HyDelta 1 was er vooral op gericht het volgende te bepalen:

- 1 Of de lekdichtheidseisen die gelden voor aardgasdistributiepijpleidingen ook kunnen worden toegepast op waterstof
- 2 In hoeverre het bestaande aardgasnet de kwaliteit van waterstof beïnvloedt door desorptie van H_2 en door permeatie van zuurstof, stikstof en water
- 3 De risico's van huishoudelijke installaties na de overschakeling van aardgas op waterstof
- 4 Of noodafsluiters in het hogedruk-aardgastransportnet geschikt zijn voor hergebruik in een waterstofnet

Bronnen voor dit deel

DELIVERABLE:

D1C.1 – Purging of natural gas pipelines with H_2 (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



DELIVERABLE:

D1C.1a – Entry of air into a hydrogen pipeline in case of a pipe rupture (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



DELIVERABLE:

D1C.2 – Leak-tightness of distribution pipes (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



DELIVERABLE:

D1C.3 – The influence of the existing natural gas distribution networks on the purity of hydrogen (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)

**DELIVERABLE:**

D1C.4 – Domestic pressure regulators (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)

**DELIVERABLE:**

D1C.5 – Insights in the risks to convert the current gas installations to 100% H₂ and determining mitigation measures for these risks (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)

**DELIVERABLE:**

D1C.6 – Development of 100%-hydrogen compatible domestic components (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)

**DELIVERABLE:**

D1F.1 – Hydrogen compatibility of ball valves from the natural gas transmission grid (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



Wat de lekdichtheidseisen betreft, werden vier soorten aansluitingen beoordeeld: primaire aansluitingen (d.w.z. aansluitingen tussen het netwerk en een huis), nieuwe huishoudelijke aansluitingen (d.w.z. naar de ketel in een nieuw gebouwde huis), bestaande huishoudelijke aansluitingen, en de aansluitingen van een gasdebietmeter. Op basis van de bereikte resultaten werd een voorstel gedaan om de Nederlandse norm NEN 7244-7 voor de beoordeling van de lekdichtheidseis voor bestaande aansluitleidingen bij het vervoer van waterstof aan te passen, om ervoor te zorgen dat alle vier soorten aansluitingen binnen aanvaardbare leksnelheden blijven wanneer waterstof wordt verbruikt, bijvoorbeeld in een huis.

Verder is gebleken dat de waterstofzuiverheid wordt beïnvloed door desorptie van TH₁ en door permeatie van zuurstof, stikstof en water door de (polymeer)buiswand. In het onderzoek zijn kernparameters bepaald aan de hand waarvan kan worden berekend in welke mate deze componenten in de waterstof terecht zullen komen en hoeveel de zuiverheid van de waterstof daardoor zal afnemen.

Wat betreft de risico's van een binneninstallatie (in de Nederlandse context) bij overschakeling van aardgas op waterstof geldt dat: terwijl de kans op koolmonoxidevergiftiging tot nul daalt en de kans op verwondingen door kleine gaslekken (< 1 l/u) uiterst klein blijft, de kans op verwondingen bij grotere gaslekken (> 10 l/u) toeneemt bij het verbruik van waterstof in plaats van aardgas. Om deze kans te verkleinen, worden in het desbetreffende verslag risicobeperkende maatregelen beschreven (zie ook Inzicht in de rol van ventilatie op de veiligheid van waterstofinstallaties binnenshuis).

Voorts werd in het HyDelta 1-project een aanzienlijk aantal afsluitkleppen (d.w.z. kogelkranen) getest; de selectie van de te testen kleppen geschiedde in coördinatie met de Gasunie (de beheerder van het hogedruknet en het regionale transportnet). Het grootste deel van de afsluiters werd getest met zowel aardgas als waterstof, en er werden geen externe lekken gevonden. Bovendien werden geen andere punten gevonden die een eventueel hergebruik van de kleppen in een waterstofnet onmogelijk maken.

Samenvattend kan worden gesteld dat de bestaande leidingen en leidingcomponenten voor het vervoer van aardgas naar verwachting zonder problemen met waterstof kunnen werken. Het voorbehoud blijft dat men vasthoudt aan de gewoonte om oude of beschadigde onderdelen te vervangen voordat op waterstof wordt overgeschakeld; terugkerende vervangingen zijn gebruikelijk in de bestaande aardgasinfrastructuur, met andere woorden in dit opzicht wordt geen afwijking van de standaardwerkwijzen van de Nederlandse aardgasnetbeheerders voorgesteld.

Bronnen voor dit deel

DELIVERABLE:

D1B.1 – Operation of gas stations with spring loaded regulators with hydrogen (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



DELIVERABLE:

D1B.2 – Safety during maintenance works for hydrogen gas stations (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



DELIVERABLE:

D1B.3A – Ventilation in gas stations (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



DELIVERABLE:

D1B.3B – Preliminary work plan for explosion testing in gas stations (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



DELIVERABLE:

D1B.4 – Dust transport properties of hydrogen and natural gas in filters of gas stations (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



Gasdrukregelstations in het lage druk gasnet (distributie)

Eén van de belangrijkste onderdelen van de aardgastransport en -distributieinfrastructuur zijn de gasreducerstations, aangezien zij de belangrijkste verbindingpunten vormen tussen de verschillende delen van het gasnet (zoals te zien is in *Figuur 7*). De voornaamste functie van een gasreducerstation is de druk van het inkomende gas te verlagen tot de bedrijfsdruk van de stroomafwaartse leidingen. Om de continuïteit van de gasvoorziening voor de consument te waarborgen, is het van belang na te gaan of de huidige gasdrukreducerstations compatibel zijn met waterstof. Het onderzoek met betrekking tot gasdrukreducerstations was er daarom vooral op gericht de waterstofcompatibiliteit van deze installaties te beoordelen, en in het bijzonder:

- 1 De correcte werking van districtstations (d.w.z. die de druk verlagen van 8 bar tot 100 mbar) onder een waterstofatmosfeer en met een verhoogd (d.w.z. driemaal) debiet
- 2 De veiligheidsprocedures bij het uitvoeren van (routine)onderhoud en het overschakelen van aardgas op waterstof
- 3 Aangezien de volumestroom (d.w.z. Nm^3/h) van waterstof moet worden verdrievoudigd ten opzichte van aardgas om dezelfde energie (d.w.z. MWh/h) te leveren, werd in het werkpakket het risico beoordeeld van een mogelijke toename van het meenemen van stof door de gasflow waardoor de stoffilters in gasstations kunnen verstopten
- 4 Is er voldoende ventilatie van de behuizing van een districtstation (DS) in geval van een waterstoflek en hoe verhoudt zich dat tot de werking met aardgas?

Wat de correcte werking van districtstations betreft, is gebleken dat de geteste districtstations (het meest voorkomende type gasstations in het Nederlandse gasnet) zonder aanpassingen voor waterstof kunnen worden gebruikt.

Wat de veiligheidsprocedures voor het werken met waterstof betreft, werd aanbevolen de bestaande procedures voor aardgas te blijven toepassen, zoals beschreven in de veiligheids-werkinstructies (zie VW1 7244-7); daarnaast werd de aanbeveling gedaan enkele veiligheidsstappen toe te voegen voor het werken met waterstof, zoals het gebruik van vlamdovers en het dubbel controleren en verwijderen van obstakels (zoals sowieso voor aardgas zou worden gedaan).

De resultaten van de experimenten over het stoftransport tonen aan dat meer stoftransport kan worden verwacht wanneer de distributienetten worden omgeschakeld van aardgas naar waterstof, maar dit hangt af van het soort stof dat reeds in de pijpleidingen aanwezig is. Bovendien werd aanbevolen meer onderzoek te doen naar het meenemen van stof door de gasflow bij hogere drukken om de mogelijke risico's van het stoftransport bij de distributie van waterstof (bij een hogere stroomsnelheid dan aardgas) met zekerheid te kunnen uitsluiten.

Bronnen voor dit deel

DELIVERABLE:

D1D.1 – Hydrogen flow metering for the built environment (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



Wat tenslotte de ventilatie betreft, werd vastgesteld dat bij de gekozen lekomvang waterstoflekken eerder een explosieve atmosfeer zullen vormen dan aardgaslekken in de behuizing van een tankstation. Dit gezegd zijnde, en na besprekingen met zowel deskundigen van de distributienetbeheerders als van de industrie, blijkt dat de gekozen lekomvang aanzienlijk groter is dan wat redelijkerwijs in de praktijk kan worden verwacht. Daarom is de aanbeveling gedaan meer experimenten uit te voeren en daarbij een lekomvang te kiezen die representatiever is voor de ervaringen uit het verleden met aardgas en met de huidige methode voor het maken van veiligheidsanalyses bij de ontwikkeling en installatie van gasstations.

Binnenshuis aansluitingen en componenten

Huishoudens, met ca. 8 miljoen aansluitingen, zijn de grootste verbruikers van aardgas in Nederland (1 miljoen aansluitingen bevinden zich in commerciële gebouwen). Een typische huishoudelijke gasaansluiting bestaat onder meer uit twee hoofdcomponenten: een drukregelaar (om de druk te verlagen van 100 mbar naar 30 mbar) en een gasdebietmeter (om het verbruik te meten). Beide componenten werden ontwikkeld om te functioneren met aardgas, zodat in het HyDelta 1-project de compatibiliteit van deze componenten met waterstof werd onderzocht.

Bovendien zijn er drie belangrijke toepassingen van aardgas in huishoudens: koken, ruimteverwarming en warm water. Deze laatste twee toepassingen worden gerealiseerd met één enkel toestel, namelijk een (hoogrendements combiketel). Hoewel het HyDelta 1-project geen directe activiteiten ontplooit rond de ontwikkeling van huishoudelijke gastoestellen, is het van belang inzicht te krijgen in de stand van de ontwikkeling van dergelijke toestellen, d.w.z. een vroegtijdige identificatie uit te voeren van potentiële gevaren en compatibiliteitsproblemen met het distributienet.

In het HyDelta 1-project werd onderzoek gedaan naar eindverbruikersaansluitingen en -toestellen om vast te stellen:

- 1 Wat de ontwikkelingen zijn op het gebied van waterstofcomponenten en waterstofapparaten voor consumenten
- 2 Wat de risico's zijn in de situatie dat een huisdrukregelaar niet wordt vervangen bij de omzetting van aardgas naar waterstof
- 3 Wat de geschiktheid is van aardgasstroommeters voor waterstof

Gebleken is dat bestaande drukregelaars die bedoeld zijn voor aardgas, ook blijken te werken voor waterstof. Op basis van diverse gesprekken met de Nederlandse gasnetbeheerders werd een reeks criteria opgesteld die de netbeheerders kunnen gebruiken om te beslissen of een drukregelaar voor huishoudelijk gebruik moet worden vervangen.

Bovendien wordt verwacht dat in 2022 componenten en gastoestellen voor huishoudelijke toepassingen die geschikt zijn voor gebruik op 100% waterstof, als prototypes beschikbaar zullen zijn. Combiketels die voor waterstof worden ontwikkeld, zijn momenteel niet geschikt om op korte termijn op aardgas te werken, maar er worden centrale verwarming combiketels ontwikkeld die op aardgas kunnen werken en gemakkelijk kunnen worden omgebouwd om op waterstof te kunnen werken, de zogenoemde H₂-ready ketels.

Wat de gasmeters betreft, werd de geschiktheid van meetprincipes voor kleinverbruikmeters (d.w.z. huishoudelijke meters) die waterstof kunnen meten, onderzocht op basis van de gaseigenschappen, de meettechnologie en de beschikbaarheid. Waterstof heeft een 9 maal lagere dichtheid dan aardgas, zodat de huidige technologie (gebaseerd op de beweging van een membraan) ongeschikt is voor waterstof. Gebleken is dat de huidige technologie voor de debietmeting van aardgas ongeschikt is voor waterstof vanwege de lagere dichtheid van waterstof in vergelijking met aardgas.

De beschikbaarheid van alternatieve gasmeters voor waterstof werd onderzocht aan de hand van gesprekken met meterleveranciers. Ultrasonische meters en thermische massastroommeters (mass-flow meters) lijken op korte termijn de voorkeursopties te zijn voor huishoudelijke waterstofmeters. Dit gezegd zijnde, kan de zuiverheid van waterstof van distributiekwaliteit (> 98% zuiver) tot 2% gasvormige onzuiverheden bevatten (de voornaamste verwachte onzuiverheden zijn stikstof, kooldioxide, methaan en zuurstof). Aangezien zowel de thermische geleidbaarheid als de geluidssnelheid van deze onzuiverheden aanzienlijk verschillen van die van waterstof, kan de aanwezigheid van dergelijke onzuiverheden een grotere impact hebben op de nauwkeurigheid van dergelijke gasmeters dan wat momenteel wordt aanvaard op basis van de bestaande normen inzake gasmeters. Wanneer waterstofmeters door gasnetwerkexploitanten worden geëvalueerd, is het nuttig de bovengenoemde aspecten nader te onderzoeken.

Bronnen voor dit deel

DELIVERABLE:

D4.1 – The requirements for technical personnel and advice for reinforcing education on the subject of hydrogen (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



Toekomstige vraag naar en opleidingsvereisten voor technisch personeel in de toekomstige waterstoftransport- en -distributie-industrie

Om voorbereid te zijn op de toekomstige waterstofeconomie, moet men klaar zijn om toekomstig technisch personeel op te leiden dat de taak krijgt om de bestaande transport- en distributienetten om te bouwen van aardgas naar waterstof. Daarom is in dit onderdeel van het HyDelta 1-project de potentiële vraag naar MBO-opgeleid technisch uitvoerend personeel voor de ombouw, het onderhoud en de exploitatie van het waterstoftransport- en -distributienetwerk in kaart gebracht. Daarnaast is een inventarisatie gedaan naar het huidige opleidingsaanbod op MBO-niveau in verschillende delen van Nederland.

De meeste van de momenteel beschikbare e-learning en fysieke cursussen, workshops en masterclasses gaan over de basisprincipes van waterstof en waterstoftoepassingen en zijn vooral bedoeld voor MBO+ en HBO-niveaus. Daarnaast zijn de beschikbare opleidingen vooral gericht op mobiliteit. Het beperkte aanbod van waterstofopleidingen en het ontbreken van adequate opleidingen voor MBO-opgeleid technisch personeel in de infrastructuur- en distributiesector baart zorgen.

Geschat werd dat de toekomstige vraag naar technisch personeel in Nederland tegen 2050 tussen 3500 en 7000 FTE's (voltijdsequivalenten) zal bedragen. Relevante studies op dit detailniveau konden slechts in beperkte mate worden gevonden; er bestaat dus vrij veel onzekerheid bestaat over de genoemde waarden.

Daarnaast kwamen uit het onderzoek de volgende punten naar voren als noodzakelijke acties op het gebied van onderwijs en opleiding van technisch personeel:

- 1 Ontwikkel adequaat MBO-onderwijs op het gebied van waterstof in de infrastructuur en technologie sector, inclusief de relevante curricula en leerdoelen. Hiertoe zijn in dit onderzoek eerste voorstellen gedaan
- 2 Trek voldoende MBO-personeel en docenten aan. Momenteel is er een grote schaarste op de arbeidsmarkt en een dringende behoefte aan vakmensen (zowel technici als leidinggevend) die zijn opgeleid in relevante waterstofonderwerpen



Deel 3

Veiligheidsnormen



3 Veiligheidsnormen

Veiligheidsnormen, mengen, beleid, normen, enz.

In dit deel wordt een aantal HyDelta 1-onderzoekspunten behandeld die alle te maken hebben met randvoorwaarden die moeten worden verduidelijkt en vervuld, wil waterstof in de bestaande infrastructuur kunnen worden ingevoerd. Vervolgens komen de belangrijkste bevindingen van HyDelta aan bod over: welke normen dringend moeten worden ingevoerd, met name wat de veiligheidsvoorwaarden betreft; welke mate van overheidssteun nodig is om voldoende vooruitgang te boeken bij de invoering van waterstof; en hoe verplichte bijmeng quotaregelingen nieuwe perspectieven voor de marktintroductie beginnen te scheppen.

Stand van de normen inzake waterstof (veiligheid)

Er wordt momenteel veel onderzoek gedaan naar de manier waarop waterstof en aardgas-waterstofmengsels op grotere schaal in het energiesysteem kunnen worden geïntroduceerd. Veel van de resultaten van dat onderzoek zullen uiteindelijk worden verwerkt in nieuwe of bestaande gasnormen. In feite wordt er zowel in Nederland als in de EU al hard gewerkt aan een dergelijke normalisatie. Om inzicht te krijgen in welke leemten in de gasnormalisatie nog (dringend) moeten worden opgevuld om waterstof op te nemen, heeft HyDelta 1, met de hulp van diverse deskundige stakeholders, een overzicht gemaakt van normalisatieprojecten die momenteel lopen en hun status, om te zien wat er nog ontbreekt. Op basis hiervan is een gap-analyse uitgevoerd met betrekking tot een zeventigtal onderwerpen die verband houden met het beheer van het gasnet. Voor elk onderwerp is nagegaan welke leemten in de kennis er zijn om te bepalen welke normen of normaanpassingen het dringendst aandacht behoeven; de lijst moet in de toekomst regelmatig worden bijgewerkt. De volgende zeven onderwerpen bleken de hoogste prioriteit te hebben om te worden onderzocht met het oog op opname in (nieuwe) gasnormen voor waterstoftransport via het bestaande aardgasdistributienet:

- 1 Druktests voor gasleidingen
- 2 Gasvolumemetingen
- 3 Snelle meting van gassamenstelling
- 4 Veiligheid
- 5 ATEX-classificatie
- 6 Eisen inzake lekdichtheid en lekttests
- 7 Voorschriften voor toelaatbare gaslekken

De uitbreiding van normen voor waterstof gebeurt gewoonlijk op NEN-, CEN- en ISO-niveau. Voor al deze processen is het van belang dat de beste nationale deskundigen worden afgevaardigd naar de (inter)nationale normcommissies, en dat de onderwerpen met de vastgestelde hoogste en gemiddelde prioriteit dienovereenkomstig worden behandeld.

Bronnen voor dit deel

DELIVERABLE:

D3.1 – Development of standards for hydrogen with a focus on hydrogen transport (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



Tabel 1. Steunintensiteiten die nodig zijn om waterstof-waardeketens concurrerend te maken ten opzichte van het fossiele alternatief, voor ammoniak en methanol als waterstofdragers (boven), en industriële verwarming en de gebouwde omgeving als eindverbruikers (onder). De cijfers in de tabel zijn afgeleid uitgaande van: een aardgasprijs van € 50/MWh, een CO₂-emissierechtenprijs van € 60/ton, en de LCOH's van de basisscenario's van WP7A & 7B. Bron: D7A.3.

Steun intensiteit	Ammonia			Methanol		
	Blauw	Groen	Groen geïmporteerd	Blauw	Groen	Groen geïmporteerd
€ /ton of product	52	142	153	94	207	250
€ /kg H ₂	0.29	0.80	0.86	0.47	1.04	1.25
€ /ton CO ₂ verlaagd	31	81	87	49	106	128

Steun intensiteit	Industriële verwarming			Gebouwde omgeving	
	Blauw	Groen	Groen geïmporteerd	Groen (zonder belasting differentiatie)	Groen (met belasting differentiatie)
€ /MWh	42	64	83	70	23
€ /kg H ₂	1.25	1.90	2.49	2.11	0.69
€ /ton CO ₂ verlaagd	64	96	126	107	35

Bronnen voor dit deel

DELIVERABLE:

D7A.3 – Summary for policymakers: hydrogen value chains in the Netherlands (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



DELIVERABLE:

D8.1 – Admixing literature review (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



DELIVERABLE:

D8.2 – Assessment of admixing schemes (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



Algemeen beleid voor de introductie van waterstof

HyDelta heeft voor een groot aantal waterstofwaardeketens (of combinaties van eindgebruik en waterstofbronnen) geanalyseerd welke (in geld uitgedrukte) overheidssteun nodig zou zijn om schone waterstof concurrerend te maken ten opzichte van fossiele alternatieven (zie Tabel 1). Uit de resultaten blijkt in de eerste plaats dat in alle onderzochte gevallen de geïmporteerde waterstof meer ondersteuning nodig heeft om te kunnen concurreren met fossiele alternatieven dan binnenlands geproduceerde waterstof(dragers). Met andere woorden, op wellicht enkele uitzonderingen na is de invoer van groene waterstof(dragers) alleen economisch aantrekkelijk voor zover de binnenlandse productieniveaus ontoereikend blijven om aan de nationale vraag te voldoen.

Uit de tabel blijkt ook dat schone waterstof voor de productie van ammoniak de laagste financiële steunintensiteit vereist van de vier onderzochte opties. Zo is per ton verminderde CO₂-uitstoot een totaal steunniveau van € 142/ton nodig om binnenlands geproduceerde groene ammoniak concurrerend te maken ten opzichte van fossiele ammoniak. Dit resultaat is vooral zo omdat het effect van de aardgasprijs en de prijs van CO₂-emissierechten op de kosten van fossiele ammoniak het grootst is in vergelijking met de andere waterstoftoepassingen (dit verklaart waarom het effect van de prijzen van CO₂-emissierechten minder groot is voor de 'grijze' methanolwaardeketen, aangezien een deel van de koolstof wordt gebruikt

DELIVERABLE:

D8.3 – Pilots for introducing hydrogen blending quota (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)

**DELIVERABLE:**

D8.4 – Economic analysis of potential market development of hydrogen certificate markets (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)

**DELIVERABLE:**

D8.5 – Mandatory blending of hydrogen: summary for policymakers (ook beschikbaar in het Nederlands)

[Link to deliverable](#)



voor de productie van methanol). Ten slotte vereist schone waterstof die wordt gebruikt voor verwarming (zowel in de industrie als in de gebouwde omgeving) meer steun om de keten concurrerend te maken dan wanneer deze als grondstof wordt gebruikt.

De rol van bijmenging bij de lancering van schone waterstof

Om waterstof te introduceren zijn bijvoorbeeld subsidies nodig om waterstoftechnologieën door de 'valley of death' te loodsen en de opschaling en versnelling van de schone waterstofproductie op gang te brengen. Het op gang brengen van de vraag is echter even belangrijk als van het ontstaan van aanbod. Hiertoe komt de invoering van verplichte bijmengingsquota (fysieke of virtuele bijmenging, of beide) van waterstof³ in het gassysteem mogelijk in beeld, ook omdat dit de vraag naar schone waterstof onmiddellijk op gang brengt.

Verplichte fysieke bijmenging schrijft voor dat een *bepaald* percentage van een mix van fossiele gassen of brandstoffen wordt vervangen door koolstofneutrale waterstof(dragers); indien verplichte virtuele bijmenging van toepassing is, worden certificaten aanvaard als een manier om aan de bijmengverplichting te voldoen. Zo'n verplichte bijmenging is een uitdaging, want als het op een verkeerde manier wordt uitgevoerd, kan het de introductie van waterstof zelfs vertragen. In HyDelta 1 zijn de volgende vijf belangrijke uitdagingen voor de invoering van dit beleidsinstrument geïdentificeerd, die kort zullen worden besproken.

Virtuele vs. fysieke vermenging

Een fundamentele conceptuele kwestie met betrekking tot bijmenging is het onderscheid tussen fysieke en virtuele bijmenging. Fysieke bijmenging betekent dat schone waterstof daadwerkelijk wordt bijgemengd in de bestaande stromen van fossiele gassen of vloeistoffen; virtuele bijmenging betekent dat aan een bijmengverplichting wordt voldaan met behulp van certificaten die bewijzen dat de waterstof ergens anders fysiek in het energiesysteem is ingebracht. Een partij met een quotumverplichting kan deze alleen met certificaten voldoen als andere partijen in de regeling hun verplichting overtreffen; anders zou er sprake zijn van dubbeltelling of "greenwashing". Introductie via certificaten kan alleen werken als de handel in certificaten goed functioneert en er garanties bestaan dat de certificaten worden ondersteund door echte niet-verplichte decarbonisatie activiteit. Dit vereist regels en voorschriften die ervoor zorgen dat de regelingen als betrouwbaar, waterdicht en veilig worden ervaren. Als het werkt, levert het voordelen op ten opzichte van een regeling die alleen fysieke bijmenging toestaat, omdat het bijmengen dankzij de handelsoptie wordt geconcentreerd daar waar dat het meest kosteneffectief kan gebeuren.

3) Andere terminologieën zijn: verplichte quota, quotumverplichtingen, bindende quota-doelen, bijmengregelingen, normen voor hernieuwbare energiebronnen (RPS), of regelingen inzake verhandelbare groene certificaten (TGC's).

Een virtueel mengschema vereist een fysiek mengschema, maar fysieke menging is daarentegen mogelijk zonder virtuele menging. Bij een verplichting van zuiver fysieke menging lijkt het instrument relatief eenvoudig. Een keerzijde is echter dat fysieke menging moet worden gemeten en verantwoord hetgeen praktisch complex is, en dat de regeling minder kosteneffectief is. Daarom bevatten de meeste verplichte bijmengregelingen in de praktijk een combinatie van fysieke en virtuele menging. Een uiterst geval van een gecombineerde regeling is wanneer de stromen in een deel van het fossiele energiesysteem fysiek volledig worden vervangen door een schoon alternatief, terwijl het overschot aan certificaten van die omschakeling wordt gebruikt om een ander deel van het energiesysteem virtueel koolstofvrij te maken. Bijvoorbeeld de 'grijze'waterstof die naar chemische fabrieken wordt vervoerd wordt vervangen door (bijna 100%) zuivere schone waterstof, terwijl de (overtollige) certificaten allemaal worden verkocht aan eigenaars van tankstations om te voldoen aan hun verplichting om hun brandstoffen te vergroenen.

Een interessante kwestie bij fysieke menging van meerdere gassen en/of fluctuerende/oplopende concentraties in het openbare net is welke technische aanpassingen en kosten nodig zijn om de veiligheid van het net en de aangesloten apparaten te garanderen. Als bijvoorbeeld de veiligheidsgerelateerde kosten van netaanpassing en/of aanpassingen van aangesloten apparaten sterk stijgen zodra de bijgemengde waterstofniveaus bepaalde grenzen overschrijden, kan men om technisch-economische redenen besluiten het aanvaarde fysieke bijmengingspercentage tot een vooraf bepaalde grens te maximaliseren, maar hogere bijmengingsniveaus alleen door virtuele bijmenging te aanvaarden. Als men de bijmengingspercentages nog hoger zou willen maken, zou men zelfs rechtstreeks op zuivere waterstofsysteem kunnen overschakelen.

Een ander punt in verband met fysieke menging is de meting en facturering van gas. Momenteel gebeurt de meting van gasstromen per volume gas. Omdat waterstof en aardgas verschillen in energiedichtheid per volume, kan het nodig zijn de volumemeting aan te passen, vooral als de gemengde volumes in de loop van de tijd schommelen.

Differentiatie van de quota

Een specifieke ontwerpkeuze van verplichte bijmenging is of er onderscheid wordt gemaakt tussen specifieke technologieën voor de productie van waterstof. Dit houdt verband met het feit dat schone waterstof met verschillende technologieën kan worden geproduceerd. Een optie is de productie van 'groene' waterstof met elektrolyse-installaties die elektriciteit uit duurzame energiebronnen omzetten in waterstof; een andere optie is 'blauwe' waterstof waarbij meestal methaanreforming met stoom (SMR) wordt gebruikt om aardgas te splitsen in waterstof en koolstof- en zuurstofcomponenten, en de koolstof meestal ondergronds wordt opgeslagen. Andere manieren om schone waterstof te produceren zijn via pyrolyse, eventueel gecombineerd met CCS, of door kernenergie als input te gebruiken. Beleidsmakers kunnen de voorkeur geven aan technologie-neutraliteit door het aan de markt over te laten om de schone waterstof op de meest kosteneffectieve wijze te produceren.

Een alternatief beleidsperspectief is dat men de technologie zodanig wil sturen dat sommige technologieën een goede kans hebben om zich te ontwikkelen (en dus lock-in wordt voorkomen). Dit vraagt om een gedifferentieerd quotum, bijvoorbeeld door voor te schrijven dat x % wordt gehaald met technologie A, y % met technologie B, enz. Voorstanders van technologie-neutraliteit voeren over het algemeen aan dat de markt het best weet hoe de uitstoot het meest kosteneffectief kan worden beperkt. Tegenstanders voeren aan dat zonder nadere specificatie veelbelovende groene technologieën ten onrechte zullen worden uitgesloten omdat tijd- en schaalafhankelijkheid van technologieën de vroege kosteneffectieve technologieën bevoordelen ten koste van de 'latere'.

Opzet van de certificatenmarkt

De handel in certificaten kan bij het publiek de verdenking opwekken dat deze gemakkelijk kan worden misbruikt door fraude, gebrek aan controle of 'greenwashing': wie garandeert dat het certificaat echt staat voor mitigatie en dat de handel niet wordt gemanipuleerd? Overheden moeten er daarom op toezien dat certificaten en de bijbehorende handelsregeling betrouwbaar, transparant en zorgvuldig gecontroleerd zijn. Daarvoor zijn instellingen nodig die zorgen voor de checks and balances en de regels en voorschriften die de kwaliteit van het systeem garanderen. Het zorgvuldig testen hiervan vergt tijd en geld, en kan de feitelijke bijmenging verhinderen om snel tot volwassenheid te komen. Ook zijn kopers en verkopers van certificaten over het algemeen huiverig voor te veel papierwerk en de kosten daarvan; handelaren willen doorgaans aanvaardbare handelsmarges genereren en tegelijkertijd vrij zijn van allerlei beperkingen om bijv. de transparantie en liquiditeit van de markt te bevorderen. De uitdaging bestaat erin de volwassenheid van de certificatenmarkt snel genoeg te laten ontstaan om menging tot een succes te maken, en tegelijkertijd te voorkomen dat particuliere belanghebbenden gefrustreerd raken en niet blijvend deelnemen aan de markt. Proefprojecten zijn nuttige instrumenten bij het zoeken naar het juiste evenwicht (zie ook Volatiliteit van de certificaatprijzen).

Volatiliteit van de certificaatprijzen

Een belangrijke uitdaging van verplichte bijmenging is de juiste stimulansen te vinden voor investeerders in schone waterstof om hun volumes daadwerkelijk te verhogen. Kenmerkend voor bijmengquota is dat de certificaatprijs aan de markt wordt overgelaten, zodat het op voorhand onduidelijk is hoe deze prijzen zich zullen gedragen. Modelleren van toekomstige certificaatprijzen heeft geleerd dat het zeer moeilijk is betrouwbare voorspellingen te doen, waardoor investeringen worden ontmoedigd. Voor beleidsmakers bestaat de uitdaging er daarom in om op de een of andere manier (enige) zekerheid te verschaffen over de waarschijnlijke prijstrend van certificaten, alsmede over volatilitetsmarges. Dit is echter problematisch omdat de beleidsmakers dan op de een of andere manier zouden moeten ingrijpen in de markt, wat voor de marktdeelnemers weer risico's van speculatie en percepties van regelgevingsonzekerheid met zich meebrengt. De ervaring met andere quotaregelingen leert dat een evenwichtig systeem van minimum- en maximumprijzen voor certificaten, enige flexibiliteit bij de toewijzing van quota, de invoering van een reservefaciliteit voor marktstabiliteit en eventueel een soort bufferfonds, de certificaatmarkt zou kunnen stabiliseren.

Import van waterstof

Ruwe ramingen van de toekomstige behoefte aan groene stroom in de EU lijken erop te wijzen dat de EU voorlopig niet genoeg kan opwekken om ook in de volledige behoefte aan groene stroom voor groene waterstof (dragers) te voorzien. Het is dus mogelijk dat een deel van de benodigde energiemoleculen moet worden geïmporteerd. Dit maakt import tot een waarschijnlijk onderdeel van bijmengregelingen voor schone waterstof. De vraag is dan hoe dergelijke geïmporteerde stromen in de bijmengregelingen van de EU kunnen worden opgenomen. Tot dusver is in de literatuur weinig aandacht besteed aan deze kwestie, bijvoorbeeld hoe dit van invloed kan zijn op de beleidsinstrumenten gericht op investeringen in binnenlandse productie, enz.

Introductie van waterstofmenging via pilots in Nederland

De introductie van waterstof met behulp van verplichte bijmengquota als grondstof of als energiedrager kan verstrekkende commerciële gevolgen hebben voor alle betrokken belanghebbenden. Daarom zijn proefprojecten als eerste stap onontbeerlijk om na te gaan hoe dergelijke regelingen in de praktijk uitpakken. Er kan ook veel worden geleerd van vergelijkbare verplichte bijmengregelingen die in andere sectoren zijn ingevoerd, maar niets kan het in de praktijk testen van beleidsmaatregelen voor specifieke marktomstandigheden vervangen. Proefprojecten met verplichte bijmenging zijn dus van cruciaal belang om allerlei hindernissen, hobbels en gedragscomplicaties die in de praktijk aan het licht zouden kunnen komen, uit de weg te ruimen.

Bij het opzetten van pilots moet men daarom zorgvuldig quotaregelingen selecteren, zodanig dat pilots de beste kansen hebben om realistisch, effectief en uiteindelijk succesvol te zijn. Ook moeten pilots goed worden voorbereid, omdat het tijd kost voor de verschillende betrokken partijen om zich voor te bereiden op de nieuwe mogelijkheden om fossiele brandstoffen te vervangen door koolstofneutrale alternatieven. In de geest van recente beleidsvoorstellen worden de volgende vroege pilots voorgesteld.

Een eerste proefproject: Invoering van een quotum voor industriële toepassingen van waterstof. Uit onderzoeksanalyse blijkt dat pilots met verplichte bijmengquota relatief gemakkelijk kunnen worden opgestart in gevallen waarin het aantal belanghebbenden relatief klein is en waarin een traditie van rechtstreeks gebruik van waterstof bestaat, zoals bijv. in de chemische industrie. Men zou dus om te beginnen en in nauw overleg met de belangrijkste industriële en andere belanghebbenden kunnen nagaan hoe een toenemend percentage schone waterstof, waar dit nu nog 'grijs' is, stapsgewijs door schone waterstof kan worden vervangen. Daarbij moet men zich er uiteraard van vergewissen dat dergelijke hoeveelheden inderdaad kunnen worden geleverd en dat het transportsysteem daarvoor aanwezig is. Zo'n proef zou wel eens ingewikkeld kunnen worden – en in feite voorafgegaan kunnen worden door een proef 'op papier' – doordat de volledige waardeketen van waterstof voldoende ontwikkeld moet worden en binnen hetzelfde tijdsbestek. Als de proef echter voor een aantal demonstratieprojecten werkt, zal het de rest van de industrie laten zien dat het mogelijk en uitvoerbaar is. De proef met verplichte quota moet voldoende aantrekkelijk worden gemaakt voor de deelnemende bedrijven om mee te doen en moet ook van nabij worden gevolgd. Daarbij mag het effect van het proefproject op de publieke opinie niet worden onderschat; zowel een geslaagd als een mislukt resultaat kan de publieke perceptie van de doeltreffendheid van het instrument bepalen.

Een tweede pilot: brandstoffen. Een andere voor de hand liggende proef inzake bijmenging is om een bestaande verplichte bijmengregeling uit te breiden met waterstof. De enige verplichte regeling die momenteel in de EU van kracht is, is gebaseerd op RED II en schrijft voor dat brandstoffen voor mobiliteit op de een of andere manier tot een bepaald percentage koolstofvrij moeten worden gemaakt. Een verplichte invoering van schone waterstof of daarvan afgeleide producten in de brandstofmix, naast biogebaseerde brandstoffen, kan de vergroening van brandstoffen uitbreiden zonder de bestaande regeling fundamenteel te wijzigen. Het is daarom voorstelbaar dat proefprojecten voor fysieke en virtuele bijmenging in mobiliteit worden opgezet door de brandstofmix uit te breiden met waterstof – zowel zuiver geleverd als via de zogenaamde 'raffinaderijroute' – onder het in de huidige regeling onderscheiden subquotum 'geavanceerd'.

Tabel 2. Voorgestelde wijzigingen van verschillende juridische bepalingen en verder beleid in Nederland en de EU die ruwweg overeenkomen met de voorstellen voor de uitrol van verplichte waterstofverbruiksquota door pilots als voorgesteld in HyDelta 1.

Voorgestelde wijziging van	Beschrijving van de wijziging
RED II (2021/0218), artikel 22 bis	“De lidstaten zien erop toe dat de bijdrage van hernieuwbare brandstoffen van niet-biologische oorsprong die voor energie- en niet-energiedoeleinden worden gebruikt, uiterlijk in 2030 50% bedraagt van de waterstof die voor finale energie- en niet-energiedoeleinden in de industrie wordt gebruikt.” (met uitzondering van “waterstof gebruikt als tussenproduct voor de productie van conventionele transportbrandstoffen”).
RED II (2021/0218), artikel 25 ter	Er wordt een subdoelstelling voor voor vervoer gebruikte RFNB's ingevoerd: “..., en het aandeel van hernieuwbare brandstoffen van niet-biologische oorsprong bedraagt ten minste 2,6% in 2030.”
ReFuelEU (2021/0205), artikel 4 en bijlage I	“De leveranciers van vliegtuigbrandstoffen zien erop toe dat alle vliegtuigbrandstof die op elke luchthaven van de Unie aan de exploitanten van luchtvaartuigen ter beschikking wordt gesteld, een minimumaandeel duurzame vliegtuigbrandstof (SAF) bevat, met inbegrip van een minimumaandeel synthetische vliegtuigbrandstof, overeenkomstig de in bijlage I vermelde waarden en toepassingsdata.” (“Vanaf 1 januari 2030 een minimumaandeel van 5% SAF, waarvan een minimumaandeel van 0,7% synthetische luchtvaartbrandstoffen.”)
Verordening gasmarkten en waterstof (2021/0424), artikel 20, lid 1	“Transmissiesysteembeheerders aanvaarden vanaf 1 oktober 2025 gasstromen met een waterstofgehalte tot 5% van het volume op interconnectiepunten tussen lidstaten van de Unie in het aardgassysteem, behoudens de in artikel 19 van deze verordening beschreven procedure.
Nederlandse nationale bijmengverplichting voor transportbrandstoffen op basis van RED II (2018/2001) (herzien vanaf januari 2022, na publicatie van gerelateerde HyDelta 1 rapport)	Met inbegrip van hernieuwbare brandstoffen van niet-biologische Oorsprong (RFNB) onder de categorie “geavanceerde hernieuwbare brandstofentiteit”. Juridische invoering van waterstof als voorgestelde proefbrandstof is dus al mogelijk

Een derde proef: generieke gasmix. Een andere bijmengproef betreft het geleidelijk toevoegen van kleine percentages waterstof aan het aardgasmengsel waarbij dit een tussenstap kan zijn naar volledige omschakeling. Dergelijke proefprojecten zijn complexer dan de eerder genoemde, omdat het aantal eindgebruikers en hun toestellen veel groter is dan in beide voorgaande pilots, en de hoeveelheden waterstof die in het net moeten worden gebracht wellicht ook. Het voordeel van zo'n proef is echter dat het laat zien dat vergroening van gas voor openbaar gebruik mogelijk is.

De drie bovengenoemde proefopties sluiten aan bij enkele recente voorstellen van de Europese Commissie en enkele nationale overheden om verplichte bijmengquota in te voeren (zie tabel 2). Het lijkt dan ook raadzaam dat de Nederlandse autoriteiten zich nu al voorbereiden op een tijdige bijmenging van waterstof.





Deel 4

Onderzoek



4 Onderzoek

De noodzaak van meer onderzoek naar vervoer, opslag en distributie van waterstof

Zoals eerder op verschillende punten werd opgemerkt, is verder onderzoek nodig om de nog resterende kennislacunes met betrekking tot de invoering van waterstof in de (bestaande) transport-, opslag- en distributie-infrastructuur op te vullen. Een aantal van de kwesties die nader onderzoek verdienen, zullen worden opgepakt in het HyDelta 2-project, dat in mei 2022 van start is gegaan en volgens planning in de zomer van 2023 zal worden afgerond:

- 1 Modelling van de dynamiek van de waterstofmarkt in een geïntegreerd energiesysteem
- 2 Risico's, onzekerheid en samenwerking in de waardeketen op waterstofbasis
- 3 Waterstofbijmenging en congestiebeheer
- 4 Veilige exploitatie van het (hogedruk)transportnet
- 5 Veiligheid van waterstof in het distributienet en de gebouwde omgeving
- 6 Compatibiliteit van activa en werkmethoden in het distributienet en de gebouwde omgeving
- 7 Analyse van de omschakeling van een aardgasdistributienet op waterstof
- 8 Analyse van de digitalisering van het netwerkbeheer
- 9 Implicaties van het gebruik van waterstof bij verbranding: NO_x-effecten
- 10 Maatschappelijke aanvaarding van vervoer en opslag van waterstof
- 11 Gevolgen van waterstof voor de arbeidsmarkt en opleiding

Daarnaast lijkt er dringend behoefte te bestaan aan meer inzicht in kwesties zoals:

Infrastructuur

- 1 de noodzakelijke technische aanpassingen van de verschillende delen van het bestaande gasnet (transport en distributie), optimale beheers- en onderhoudsstrategieën, alsmede optimale bedrijfsomstandigheden (bijv. drukkiveaus) en gaskwaliteitseisen te bepalen voor verschillende eindgebruikers van waterstof
- 2 de huidige kennisbasis over het optimale geografische profiel van toeleveringspotentieel uitbreiden en een geïntegreerde geoptimaliseerde waterstoftransportstrategie bepalen waarbij pijplijninfrastructuur wordt gekoppeld aan fijnmaziger distributie en lokale productie

Veiligheid

De bestaande aardgasnormen aanvullen met veiligheidsvoorschriften voor waterstof (bijv. in samenwerking met het wVIP H₂-platform).

Opschaling

- 1 Analyseren hoe de succesvolle ontwikkeling en onderlinge koppeling van regionale waterstof(drager)productiehubbs in het Noordzeegebied kunnen worden geoptimaliseerd, en hoe synergiefactoren en veelbelovende co-locatieopties in en tussen regionale waterstofhubbs kunnen worden bepaald
- 2 Het bestuderen van het potentiële effect van waterstofdragers op een versnelde invoering van waterstof en op de behoefte aan specifieke vervoers- en opslaginfrastructuur voor dergelijke dragers

Offshore productie, opslag en vervoer van waterstof naar het vasteland

- 1 verdere concepten te analyseren als locaties voor offshore-energieomzetting en andere economische activiteiten (bijvoorbeeld platforms, energie-eilanden en andere drijvende constructies), en de optimale internationale energietransportconfiguraties te bepalen, gegeven de bestaande netwerksystemen voor het transport van offshore-energie naar de kust
- 2 Optimale offshore of nearshore opslagmodaliteiten voor waterstof en waterstofdragers bestuderen, zowel vanuit nationaal als internationaal perspectief, met daarbij tevens een analyse van de rol van havengebieden voor industriële clustering

Opslag

- 1 de optimale technische en economische voorwaarden te bepalen voor de ontwikkeling van ondergrondse of bovengrondse opslag van waterstof, met de nadruk op zoutcavernes of uitgeputte gasvelden voor grootschalige opslag van waterstof
- 2 de rol van waterstofopslag analyseren bij het in evenwicht brengen van de elektriciteits- en de gasmarkt, als instrument voor netwerkflexibiliteitsdiensten en als middel om congestieproblemen op het elektriciteitsnet te verlichten

Maatschappelijke acceptatie

Bestuderen van de acceptatie door het publiek en daaraan gekoppelde regelgevingskwesties in verband met alle onderdelen van de waardeketen van waterstof, met name transport, opslag en distributie

De onderzoeksagenda in het kader van het nationale waterstofprogramma Groenvermogen (<https://www.groenvermogen.nl.org/>), en met name werkpakket 2 daarvan dat betrekking heeft op het vervoer, de opslag en de distributie van waterstof, is ontworpen om bovengenoemde kwesties te analyseren en zal naar verwachting vanaf 2023 worden uitgevoerd, mogelijk tot het einde van het decennium.





Bijlage I

Lijst van publicaties



Bijlage I

Lijst van publicaties van het HyDelta 1 project

Het HyDelta 1-project heeft geleid tot een totaal van 42 publicaties, als volgt verdeeld:

- 1 37 resultaten, waarbij alle onderzoeksresultaten zijn gepubliceerd
- 2 4 plenaire presentaties, waar de bij het HyDelta 1-project betrokken onderzoekers de voortgang van de verschillende werkpakketten bespraken
- 3 1 samenvattend verslag, nl. dit document

Alle publicaties van het HyDelta 1-project zijn openbaar en te vinden op de website [hydela.nl/research-programme](https://www.hydelta.nl/research-programme). Om de traceerbaarheid en vindbaarheid van alle publicaties te vergroten, bijv. om geciteerd te kunnen worden of opgenomen te worden in verder onderzoek binnen en buiten het HyDelta programma, verkreeg elke publicatie een Digital Object Identifier (DOI), d.w.z. een identifier die uniek verwijst naar elke publicatie. Hieronder volgt een lijst van alle publicaties en hun respectieve DOI's, waaraan de informatie en inzichten zijn ontleend die in dit samenvattende verslag zijn opgenomen.

DOI	Publication
https://doi.org/10.5281/zenodo.6598258	D0.3 – Summary of the references used in the HyDelta 1 project
https://doi.org/10.5281/zenodo.6598279	D1A.1 – Report with results from Hy4Heat, H21, Hyhouse, and interviews, translated to the Dutch situation
https://doi.org/10.5281/zenodo.6598307	D1A.2 – Report with additional questions for the Dutch situation and test program
https://doi.org/10.5281/zenodo.6469611	D1B.1 – Operation of gas stations with spring loaded regulators with hydrogen
https://doi.org/10.5281/zenodo.6469666	D1B.2 Safety during maintenance works for hydrogen gas stations
https://doi.org/10.5281/zenodo.6566429	D1B.3A – Ventilation in gas stations
https://doi.org/10.5281/zenodo.6541887	D1B.3B – Preliminary work plan for explosion testing in gas stations
https://doi.org/10.5281/zenodo.6483247	D1B.4 – Dust transport properties of hydrogen and natural gas in filters of gas stations
https://doi.org/10.5281/zenodo.5142228	D1C.1 – Purging of natural gas pipelines with H ₂
https://doi.org/10.5281/zenodo.5707275	D1C.1a – Entry of air into a hydrogen pipeline in case of a pipe rupture
https://doi.org/10.5281/zenodo.5901917	D1C.2 – Leak-tightness of distribution pipes
https://doi.org/10.5281/zenodo.6513377	D1C.3 – The influence of the existing natural gas distribution networks on the purity of hydrogen
https://doi.org/10.5281/zenodo.5902014	D1C.4 – Domestic pressure regulators
https://doi.org/10.5281/zenodo.6566493	D1C.5 – Insights in the risks to convert the current gas installations to 100% H ₂ and determining mitigating measures for these risks
https://doi.org/10.5281/zenodo.5902088	D1C.6 – Development of 100%-hydrogen compatible domestic components
https://doi.org/10.5281/zenodo.6424111	D1D.1 – Hydrogen flow metering for the built environment
https://doi.org/10.5281/zenodo.5901833	D1E.1 – Impact of high-speed hydrogen flow on system integrity and noise
https://doi.org/10.5281/zenodo.6504400	D1F.1 – Hydrogen compatibility of ball valves from the natural gas transmission grid
https://doi.org/10.5281/zenodo.5707271	D2.1 – Choice for a sulphur free odorant
https://doi.org/10.5281/zenodo.5902157	D2.2 – Influence of sulfur containing odorant on end-use appliances
https://doi.org/10.5281/zenodo.6504435	D2.3 – Stability of odorants in hydrogen
https://doi.org/10.5281/zenodo.6566517	D2.4 – Report on the risks of not odorizing hydrogen
https://doi.org/10.5281/zenodo.6598333	D2.5 – Report with advice over odorizing hydrogen including a possible choice for a defined type of odorant and its dosing
https://doi.org/10.5281/zenodo.6382535	D3.1 – Development of standards for hydrogen with a focus on hydrogen transport

https://doi.org/10.5281/zenodo.6372782	D4.1 – The requirements for technical personnel and advice for reinforcing education on the subject of hydrogen
https://doi.org/10.5281/zenodo.5591962	D7A.1 – Hydrogen value chain literature review
https://doi.org/10.5281/zenodo.6477440	D7A.2 – Techno-economic analysis of hydrogen value chains in the Netherlands: value chain design and results
https://doi.org/10.5281/zenodo.6523339	D7A.3 – Summary for policymakers: hydrogen value chains in the Netherlands
https://doi.org/10.5281/zenodo.6469569	D7B.1 – Database with the filled-out factsheets about different components of the H ₂ value chain elements to be modelled
https://doi.org/10.5281/zenodo.6469593	D7B.2 – Accompanying report to D7B.1 where the factsheets are explained in more detail
https://doi.org/10.5281/zenodo.6514173	D7B.3 – Cost analysis and comparison of different hydrogen carrier import chains and expected cost development
https://doi.org/10.5281/zenodo.6598363	D7B.4 – A roadmap on transport and storage of hydrogen and hydrogen carriers for five sectors in the Dutch economy
https://doi.org/10.5281/zenodo.5142247	D8.1 – Admixing literature review
https://doi.org/10.5281/zenodo.5566782	D8.2 – Assessment of admixing schemes
https://doi.org/10.5281/zenodo.6044859	D8.3 – Pilots for introducing hydrogen blending quota
https://doi.org/10.5281/zenodo.6420995	D8.4 – Economic analysis of potential market development of hydrogen certificate markets
https://doi.org/10.5281/zenodo.6425267	D8.5 – Mandatory blending of hydrogen: summary for policymakers
https://doi.org/10.5281/zenodo.5079095	HyDelta 1.0 First plenary progress meeting – 30-06-2021
https://doi.org/10.5281/zenodo.5079070	HyDelta 1.0 Kick-off meeting – 19-01-2021
https://doi.org/10.5281/zenodo.5779888	HyDelta 1.0 Second plenary progress meeting – 07-12-2021
https://doi.org/10.5281/zenodo.6598382	HyDelta 1.0 Third plenary progress meeting – 17-06-2022
https://doi.org/10.5281/zenodo.6598395	Summary report HyDelta 1