H2@Home

Openbaar eindrapport

ontwerp, installatie en monitoring van een
functionele waterstof-binnenhuisinstallatie met aansluiting op netwerk
in een bewoond jaren 70-huis

deelnemers

partners

locatie

Uitgevoerd met Topsector Energiesubsidie van het Ministerie van Economische Zaken

Versie 2023-01

Inleiding

De waterstofeconomie: de nieuwsberichten en onderzoeksrapporten hierover buitelen de laatste jaren over elkaar heen. Vaak voorgespiegeld als de heilige graal van de energietransitie: pieken en dalen in de opwekking van duurzaam opgewekte energie kunnen erdoor worden vereffend en het is bruikbaar voor industrie, transport en huishoudens. Tegengeluiden zijn er uiteraard ook: het rendement van de omzetting is nog zo laag, er zijn betere alternatieven en is het niet gevaarlijk?

Het doel van het consortium H2@Home is niet om antwoord te geven op bovenstaande discussie. De deelnemers zijn vooral nieuwsgierig: áls je een huis verwarmt met waterstofgas, op dezelfde wijze als we nu gewend zijn met aardgas, wat gebeurt er dan eigenlijk? Kan alles hetzelfde blijven, zowel wat betreft de lay-out van de installatie als wat betreft de werkwijzen eromheen? Zijn er effecten waar niemand vooraf aan had gedacht en die je pas ziet als je er mee bezig bent?

Vanuit die nieuwsgierigheid zijn de deelnemers in 2019 gestart met het consortium H2@Home. Na de eerste mijlpaal, het verkrijgen van subsidie voor het project, is veel tijd besteed aan de voorbereiding en aan het verkrijgen van toestemming om daadwerkelijk operationeel te gaan. Gaandeweg haakten ook enkele andere partijen aan bij het project. Net voor kerst 2021 is de installatie voor het eerst in gebruik genomen. Met enkele onderbrekingen is de installatie succesvol in bedrijf geweest tot in juni 2022. Zoals het een goed project betaamt moeten de activiteiten tenslotte een keer te stoppen en moet de balans worden opgemaakt.

Die balans vindt u in dit rapport. Er valt veel over het project te vertellen. We hebben ons best gedaan om de meest essentiële zaken te vermelden. Desondanks kan het voorkomen dat u als lezer precies die ene vraag die u had, niet beantwoord ziet. Aarzel dan niet om contact op te nemen met de deelnemers, de contactgegevens staan bij ‘publicaties en contact’ genoteerd. Als we iets geleerd hebben van dit project dan is het wel dat je samen verder komt dan alleen, we delen onze inzichten en ervaringen daarom graag.

Graag uiten we tenslotte onze speciale dank aan degenen die het uitvoerende werk hebben gedaan. Zij stonden wat minder in de spotlights maar zonder hen was dit project niet eens van de grond gekomen. Dus Jaap, Timo, Jan, Rutger, Eric, Tim, Joop, Tim, Jean-Paul, John, Paolo, Ed, Roland, Chantal, Kees, Marcel, Mike, Patrick, Leon en Michael: bedankt voor jullie inzet en betrokkenheid!

Daarnaast veel dank aan de bewoners van het huis waarin onze installatie in gebruik is geweest, voor hun eindeloze geduld, optimisme en welkome ontvangst.

We hopen dat onze ervaringen bruikbaar zijn voor u als lezer en dat het tot een mooi vervolg mag leiden.

De deelnemers aan H2@Home.

Samenvatting

Het H2@Home bestond uit het ontwerpen, realiseren en beheren van een binnenhuisinstallatie voor waterstofgas, waarmee een bewoonde jaren 70-woning werd verwarmd en tapwater werd opgewarmd. Deze binnenhuisinstallatie is aangesloten op de WaterstofStraat, een lokaal netwerk met niet-geodoriseerd waterstofgas.

Doel en deelnemers

Het project is opgestart in 2019. Verschillende producenten van onderdelen voor aardgas-binneninstallaties en onderdelen voor warmtevoorzieningen en netbeheerder Enexis namens Liander en Stedin deel in het consortium hebben zich in het voorjaar van 2019 verenigd in het consortium H2@Home. De doelen waren meerledig:

- onderzoek van het gedrag en de bruikbaarheid van installatie-onderdelen bij toepassing van waterstof in een reële gebruiksomgeving;
- onderzoeken van de toepasbaarheid van een automatisch afsluitende drukregelaar bij calamiteiten;
- onderzoeken of er voor een waterstofgas-binneninstallaties zelf of voor de werkmethoden eromheen aanpassingen nodig zijn ten opzichte van installaties voor aardgas.

Gedurende het project hebben zich ook een ketelleverancier, een kennisinstituut en een installateur aangesloten. Na een intensief traject waarin risico-inventarisaties en ontwerpen zijn gemaakt, onderlinge afspraken zijn opgesteld en uiteindelijk een vergunning is verkregen, is de installatie in december 2021 voor het eerst in gebruik genomen.

Installatie

De gebruikte installatie wijkt af van een gebruikelijke aardgasinstallatie op globaal de volgende punten:

- leidingdelen zijn dubbel uitgevoerd ten behoeve van het onderzoek;
- diverse meetapparatuur is aangebracht ten behoeve van het onderzoek;
- de inlaat kan worden afgesloten door een magneetventiel. Dit wordt aangestuurd vanuit een centraal veiligheidssysteem waarop onder andere H_2-sensoren en een brandalarm zijn aangesloten;
- op diverse plaatsen zijn spoelpunten aangebracht. De installatie is bij in- en uitgebruikname steeds gespoeld met stikstof om te voorkomen dat zich een brandbaar mengsel zou kunnen vormen.

Bevindingen

De installatie is succesvol in bedrijf genomen. De installatie is meerdere keren uit bedrijf geweest. De oorzaken hiervoor waren oplosbaar en verklaarbaar. De belangrijkste bevindingen waren:

- spoelen vereist goede apparatuur, goede procedures en gedegen opleiding;
- er is geen verschil geconstateerd in bewonersbeleving, noch in het ervaren comfort noch met betrekking tot stromingsgeluiden;
- alle gebruikte materialen en appendages functioneerden naar behoren, ook de afsluitbare regelaar;
- het toetreden van lucht in het systeem vraagt nader onderzoek.

Naast deze bevindingen van technische aard noemen we graag enkele projectmatige bevindingen:

- het verkrijgen van een vergunning voor een pilotproject kan moeizaam zijn en de vaart uit een project halen. Het is goed hier vooraf rekening mee te houden.
- het is van groot nut geweest dat zeer diverse partijen in dit project hebben samengewerkt: installateurs, leveranciers van alle onderdelen, netbeheerders, kennisinstituten: samen waren we in staat de puzzelstukjes bij elkaar te leggen.

Vervolg

In dit project is de eerste stap gezet voor de overschakeling van aardgas naar waterstof voor de verwarming in de bebouwde omgeving. Het toont aan dat het mogelijk is. Wel zijn er enkele bijzonderheden te onderzoeken en beslissingen te maken voordat het tot een grootschalige uitrol kan komen.

Inhoudsopgave

Inleiding ... 2
Samenvatting ... 3
Inhoudsopgave ... 4
Aanleiding, doelstelling en uitgangspunten H2@Home ... 6
1. Aanleiding ... 6
Aanleiding ... 6
2. Doelstellingen ... 8
Doel van het project ... 8
Expertise, rol en doelstellingen per betrokken partij ... 8
3. Uitganspunten ... 11
Veiligheid en kennisvergaring versus representativiteit ... 11
Projectuitvoering ... 11
Resultaten ... 12
1. Organisatorisch ... 12
Eerste gebruiker van de WaterstofStraat ... 12
Milieuvergunning ... 12
Risico-inventarisatie ... 12
2. Documentatie: Risicoanalyse / FMEA ... 13
Beknopt overzicht veiligheidsmaatregelen H2@Home ... 13
Ontstaan en ontsteking van een waterstof-lucht-mengsel buiten de installatie ... 15
Overige maatregelen ... 15
3. Technisch: de installatie in de woning ... 16
Waterstofgasinstallatie in de woning ... 17
Meterkastopstelling ... 17
Meet en regelapparatuur ... 18
Veiligheidsinstallatie ... 18
Ontwikkeling van de ESV (afsluitunit op de regelaar) ... 19
Aarding van de gasleiding ... 19
Bouwkundig ... 19
4. Procedureel: werkprocedures ... 20
Spoel- en lektest procedure ... 20
Uit bedrijf, weer in bedrijf. ... 20
Monitoring op afstand, onbelemmerde warmtelevering ... 20
Vergelijking met aardgas ... 21
5. Resultaten pilotfase ... 22

Beschrijving gebeurtenissen sinds ingebruikname ... 22
Reflectie op de storingen ... 28
Analyse meetresultaten installatie algemeen ... 29
Testresultaten binnenhuis installatie algemeen. ... 29
Functioneren van de afsluit-inrichting ... 29
Gebruik van gasmeterdata voor lekdetectie ... 30
Resultaten vanuit netbeheerperspectief ... 32
Knelpunten, lessons learned en vervolgonderzoek ... 33
Geleerde les nr 1: Het kan! ... 33
Geleerde lessen procedureel ... 33
Geleerde lessen installatie ... 33
Lay-out van de installatie ... 33
Spoelen ... 34
Lekdichtheidsbeproeving ... 34
Leveringszekerheid ... 34
Ontwikkeling van de ESV ... 35
Toetreden lucht bij afsluiten ... 35
Demarcatiepunt ... 35
Waterstofnet ... 36
Bijdrage aan waterstofeconomie ... 38
Kennisdeling ... 38
Bijdrage aan onderwijs- en onderzoeksactiviteiten ... 38
Bijdrage aan ontwikkeling waterstofnet ... 38
Betrokkenheid gehele keten ... 39
Lessons-learned: toepassing voor andere projecten ... 39
Representatieve situatie ... 39
Subsidie-doelstellingen ... 39
Spin off binnen en buiten de sector ... 41
Kennisoverdracht / link met pilotprojecten op grotere schaal ... 41
Onderzoek efficiënte warmtevoorziening ... 41
Publicaties en contact ... 42
Publicaties H2@Home ... 42
Contactpersonen ... 42
Literatuurlijst / leessuggesties ... 43
Bijlage A Installatie H2@Home: gasvoerende delen ... 43
Bijlage B Installatie H2@Home: veiligheidssysteem ... 48
Bijlage C: spoelinrichting ... 51

Aanleiding, doelstelling en uitgangspunten H2@Home

In 2019 heeft Aalberts hydronic flow control gereageerd op het verzoek van de netbeheerders (project "WaterstofStraat" op The Green Village) met het aanvragen van een waterstof project met als doel een test uit te voeren door middel van het aansluiten van een woning op de WaterstofStraat en te voorzien van een verwarmingssysteem dat volledig draait op waterstof.

Op hetzelfde moment heeft ook gAvilar zich gemeld bij The Green Village met het verzoek een pilot uit te kunnen voeren met een nieuwe toevoeging op de gebruikelijke gasdrukregelaar. Deze afsluiter of ESV sluit de toevoer naar de woning af in geval van alarm.

Omdat beide projecten eerder aanvullend dan concurrerend zijn, heeft he Green Village deze partijen bij elkaar gebracht en was de vorming van het consortium H2@Home een feit. Het consortium is een samenwerking van van meerdere bedrijven uit de Aalberts NV groep te weten Flamco, Comap, VSH, HSF (inmiddels Isiflo) en daarnaast Beutech, Enexis Netbeheer (als afvaardiging ook namens Alliander en Stedin),, Het Internet Huis, PIA, gAvilar en Apator Metrix. In de loop van het project zijn The Green Village, Remeha en Breman woningbeheer aangesloten en is veel contact geweest met netbeheerder Stedin en met KIWA.

De aanleiding voor en het globale doel van het project zijn beschreven in §1 van dit hoofdstuk. De diverse partijen hebben vanuit hun expertise elk hun eigen rol en redenen om deel te nemen, deze zijn nader geduid in § 2. De consortiumbrede uitgangspunten voor het project komen in § 3 aan de orde.

1. Aanleiding

Aanleiding

Om de doelstellingen uit het klimaatakkoord van Parijs te behalen, wil Nederland in 2050 de uitstoot van koolstofdioxide in de gebouwde omgeving terugbrengen naar 0%. Om deze doelstelling te bereiken zien we momenteel een drietal oplossingsrichtingen in de markt verschijnen, te weten:

A) elektrificeren (veelal toepassing van warmtepompen);
B) gasvormingen (niet zijnde aardgas maar waterstof, groen gas, synthetisch gas etc.)
C) rest,- of duurzame warmtenetten.

Niet overal in Nederland zullen we dezelfde oplossingsrichting (kunnen) kiezen. Zo is restwarmte niet overal beschikbaar, kan een warmtepomp niet overal worden geplaatst en bereikt ook ons elektriciteitsnet haar capaciteitsgrenzen.

Met de uitfasering van aardgas lijkt groene waterstof een kosteneffectieve oplossing voor het kunnen blijven benutten van het bestaande aardgasinfrastructuur in Nederland, kan de maatschappelijke impact bij de eindgebruikers beperkt blijven en worden lokale elektriciteits-netwerken minder zwaar belast. Bij toepassing van waterstof in ons bestaand aardgasinfrastructuur praten we feitelijk over een gaswissel, waarbij gerichte en inmiddels bekende aanpassingen noodzakelijk zijn in het landelijk distributienetwerk.

De afgelopen jaren is zowel in Nederland als daarbuiten veel onderzoek gedaan naar het kunnen hergebruiken van de bestaande gasinfrastructuur in Nederland door o.a. KIWA, DNV, TNO etc., HyDelta, Netbeheer Nederland, Gasunie, energiebedrijven en vele ander bedrijven.

Een goede praktijkcase van een binnenhuis gasinstallatie gevuld met 100% waterstof in een bestaande en in gebruik zijnde woning was bij aanvang van deze pilot nog niet eerder uitgevoerd in Nederland. Met deze pilot is de verwachting dat we antwoord kunnen geven of en welke aanpassingen in een bestaande woning noodzakelijk zijn.

The Green Village in Delft bood de gelegenheid om in een bestaande jaren zeventig rijtjeswoning een tijdelijke installatie aan te brengen, waarbij diverse materialen en oplossingen getest konden worden gedurende een jaar in een veilige proeftuin van de Technische Universiteit Delft. Het H2@Home pilotproject sluit aan op het (proef)project van de netwerkbedrijven Alliander, Enexis Groep en Stedin op dezelfde locatie. Zij hebben een conventioneel aardgasnet gebouwd om onderzoek mogelijk te maken naar de toepassing van waterstof, de WaterstofStraat. Het lokale en standalone netwerk is

aangelegd met de huidige aardgas-eisen, normen, materialen en componenten. Het bouwen, testen en demonstreren van dit om te bouwen aardgasnet levert de netwerkbedrijven en de ketenpartijen kennis, praktijkervaring en samenwerking op over de distributie van waterstof via de bestaande infrastructuur.

De netbeheerders onderzoeken het gedrag van gasstations en gasmeters en de benodigde veiligheidsmaatregelen zoals nieuwe werkmethoden en gereedschappen. Dit gasnet is daarom als testbed beschikbaar voor andere partijen om onderzoek te doen naar bijvoorbeeld producten zoals waterstofketels of naar het verbruik van waterstof

Fig. 1 foto van de invoedinstallatie van de WaterstofStraat. Bron: gAvilar

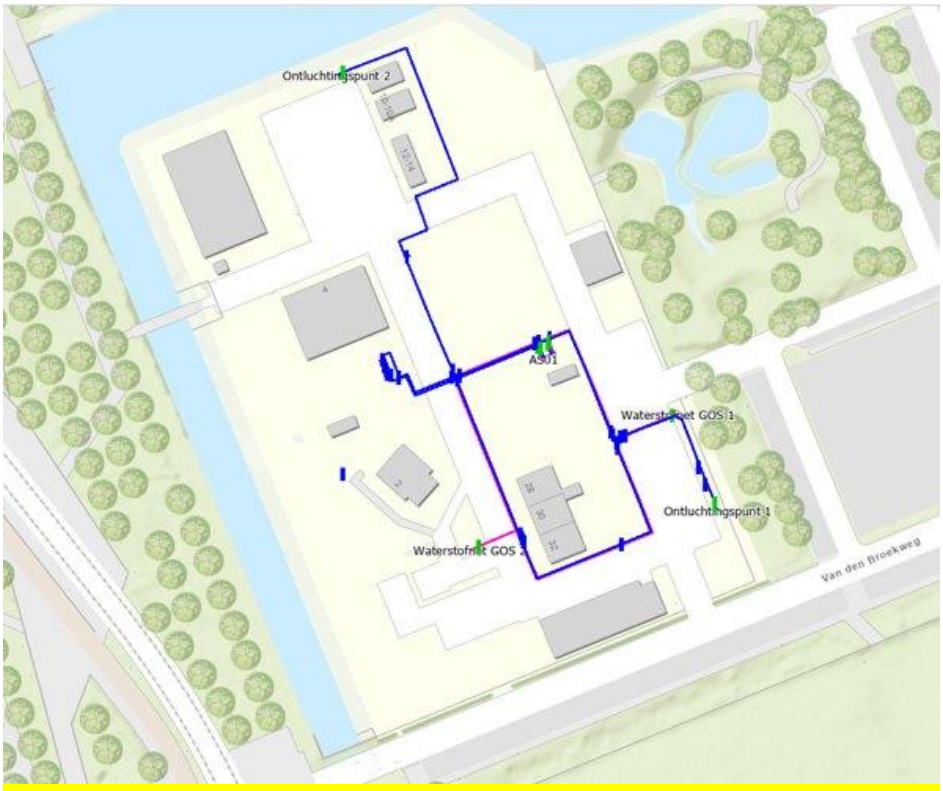


Fig. 2 terreintekening WaterstofStraat en pilotlocatie H2@Home. Bron: Stedin Netbeheer

In verband met andere onderzoeken met waterstof op de locatie van The Green Village, waarbij zuivere waterstof nodig is zonder zwavelverbindingen, is hier gekozen om te werken met ongeodoriseerd waterstof (geurloze waterstof). Voor het project H2@Home hield dit in dat er waterstofdetectiesystemen in de modelwoning aangebracht moest worden. In andere pilotprojecten in Nederland wordt er wel geodoriseerd waterstof toegepast met de voor Nederland specifieke aardgasgeur (THT). Ook naar odoranten wordt uitgebreid onderzoek gedaan in de zoektocht een geurstof te vinden welke geen zwavel bevat waardoor waterstof direct te gebruiken is in o.a. brandstofcellen etc. Op www.HyDelta.nl treft u hier nadere informatie over aan.

2. Doelstellingen

Doel van het project

Het doel van de pilot is het ontwerpen, realiseren en testen van een binnenhuis (waterstof)gasinstallatie op basis van reeds bestaande producten welke vrij verkrijgbaar zijn op de Nederlandse markt en gebruikelijk zijn voor aardgasinstallaties. De pilot omvat de leidingen en appendages vanaf de aansluiting op het hoofdnet tot de ketel, dus inclusief de PEKO, gasmeter en drukregelaar.

Hierbij moet rekening gehouden worden met randvoorwaarden en omstandigheden die verschillen met die van een aardgasinstallatie, zoals :

- De geleverde waterstof wordt zonder odorisatie-geur aangeleverd.
- Daarnaast heeft waterstof een lagere energiedichtheid dan aardgas (circa 1/3 van aardgas), waardoor bij gebruik van bestaande infrastructuur de stroomsnelheid verhoogd moet worden om aan dezelfde energievraag te kunnen voldoen. Deze hogere snelheden en volumes kunnen mogelijk resulteren in geluidsoverlast en onwenselijke resonanties in de binnen installatie.
- Bovendien is waterstof zeer licht ontvlambaar en kleur- en reukloos; eigenschappen die vragen om extra veiligheids- en beheersmaatregelen voor de maatschappelijke inbedding van waterstof.

In de uitvoering moet met al deze factoren rekening worden gehouden, waarbij tegelijk de installatie zoveel mogelijk praktisch toepasbaar moet blijven en bij voorkeur zoveel mogelijk overeenkomt met een gebruikelijke aardgasinstallatie.

Expertise, rol en doelstellingen per betrokken partij

Iedere partij die betrokken is geweest bij H2@Home heeft haar eigen expertise, rol en doelstelling. Veel van de betrokken partijen hebben expertise op het gebied van binnenhuis aardgasinstallaties. Doordat deze installaties aan de orde van de dag zijn en vrijwel volledig genormaliseerd, is er normaliter weinig overleg nodig tussen deze partijen. Eén van de succesfactoren van H2@Home is echter geweest dat deze partijen voor dit project gezamenlijk opnieuw hebben nagedacht over nut en noodzaak van de diverse onderdelen van de installatie én over de benodigde procedures en taakverdeling. Het heeft veel tijd gevraagd en er is veel onderling overleg tussen de betrokken partijen nodig geweest om tot een optimaal concept te komen. Dit heeft er wel toe geleid dat mogelijke (rest)risico's tot een minimum zijn beperkt.

In onderstaande tabel is per partij beknopt aangegeven welke expertise de partij met zich mee heeft gebracht, welke rol ze had in het project en wat de doelstelling is geweest bij deelname aan H2@Home.

Naam deelnemer	Expertise	Rol	Doelstelling
Beute B.V.	Kunststof delen: productie en bewerking. Levert onder ander kunststof vloerplaten voor meterkasten	Leveren van kunststof delen voor o.a. prototype afsluit-inrichting	Opdoen van kennis m.b.t. behoeften aan onderdelen binnenhuis waterstofinstallatie

Naam deelnemer	Expertise	Rol	Doelstelling
Het Internethuis B.V.	IoT, communicatie, sensor-uitlezing en dataplatform	Ontwikkelaar communicatie-hard- en software veiligheidssysteem en afsluit-inrichting	Opdoen van kennis m.b.t. behoeften aan veiligheidssystemen binnenhuis waterstofinstallatie
Enexis Netbeheer B.V.	Netbeheerder (samenwerkingspartner mede namens Alliander N.V, Stedin B.V.).	Eindgebruiker – partner namens netbeheerders – eisen, wensen en faciliterende rol.	Opdoen van praktische kennis m.b.t. aansluiten van woningen op een waterstofnet
Flamco B.V. (onderdeel van Aalberts NV)	Ontwikkeling en productie van componenten en systemen voor verwarming en koeling	Producent en ontwikkelaar waterstof leiding vanaf het distributienet tot waterstofketel. Mede-projectleider.	Opdoen van veldervaring met de gebruikte leidingen en meterbeugel.
HSF (tegenwoordig Isiflo) (onderdeel van Aalberts NV)	ontwikkeling, productie en verkoop van dienstleidingen en appendages voor transport en distributie van gas.	Producent en ontwikkelaar waterstof leiding vanaf het distributienet tot de gasmeter	Opdoen van veldervaring met de gebruikte leidingen en meterbeugel.
Comap (onderdeel van Aalberts NV)	ontwikkeling, productie en verkoop van kwaliteitscomponenten voor warmte-, ventilatie- en koeling-toepassingen.	Producent en ontwikkelaar waterstof leiding vanaf de gasmeter tot aan de waterstofketel	Opdoen van veldervaring met de gebruikte leidingen (kunststof) en pers-fittingen (messing)
VSH (onderdeel van Aalberts NV)	ontwikkeling, productie en verkoop van kwaliteitscomponenten voor warmte-, ventilatie- en koeling-toepassingen.	Producent en ontwikkelaar waterstof leiding vanaf de gasmeter tot aan de waterstofketel	Opdoen van veldervaring met de gebruikte leidingen (koper) en knel-fittingen (messing
gAvilar B.V.	Producent en ontwikkelaar van gasdrukregelapparatuur en -veiligheden.	Levering drukregelaar, meetapparatuur en veiligheden. Mede-projectleider	Opdoen van veldervaring met (gekeurde) drukregelaar, testen van prototype afsluit-inrichting
PIA Automation B.V.	Ontwikkeling en realisatie van automatiserings-oplossingen	Hard- en software-engineering afsluit-inrichting	Opdoen van kennis m.b.t. behoeften aan onderdelen binnenhuis waterstofinstallatie
Apator Metrix S.A.	ontwikkeling, productie en verkoop van onder meer gasmeters	Leveren van een slimme gasmeter.	Opdoen van veldervaring met waterstof-gasmeter
Stedin Netbeheer B.V.	netbeheerder (samenwerkingspartner via Enexis B.V.)	Installatie-verantwoordelijke voor de WaterstofStraat, het waterstofnet waar de installatie van H2@Home op aansluit	Opdoen van praktische kennis m.b.t. aansluiten van woningen op een waterstofnet
Liander N.V.	netbeheerder (samenwerkingspartner via Enexis B.V.)	Faciliterend op het gebied van kennis.	Opdoen van praktische kennis m.b.t. aansluiten van woningen op een waterstofnet

Naam deelnemer	Expertise	Rol	Doelstelling
Stichting The Green Village (TGV)	proeftuin voor duurzame innovatie op de campus van de TU Delft.	Bieden van een geschikte locatie inclusief vergunning, verbinden van de partijen, bieden van externe communicatie.	Faciliteren van een geschikte plaats voor de veldtest, gebruik van de ervaringen voor volgende projecten, publicatie van mogelijkheden
DreamHûs (WoonFriesland, Bouwgroep Dijkstra Draisma, Bewonersraad Friesland, TGV)	Betaalbare verduurzaming bestaande bouw	Beschikbaar maken van een replica van een jaren 70-woning voor experimenten zoals H2@Home	Testen van innovaties op het gebied van duurzaamheid, zodat deze op grotere schaal kunnen worden toegepast.
Breman	Aanleg en beheer van binnenhuis-installaties, o.a. voor aardgas	Installatie en beheer van de gehele installatie (installatie-verantwoordelijke)	Opdoen van veldervaring met ontwerp, installatie en beheer van binnenhuis waterstofinstallaties.
Remeha	ontwikkeling, productie en verkoop van onder meer ketels	Leveren en onderhouden van een waterstofketel	Opdoen van veldtestervaring met een niet commerciële verkrijgbare waterstof cv-ketel.

3. Uitganspunten

Veiligheid en kennisvergaring versus representativiteit.

Bij het ontwerp van de installatie speelden drie conflicterende belangen een rol:

- In het gehele project heeft het onderwerp veiligheid een prominente rol gespeeld omdat het de voortgang van waterstofprojecten in het algemeen negatief zou beïnvloeden als zich in dit project een incident zou voordoen. Elk mogelijk veiligheidsissue moest daarom vooraf worden herkend en worden voorkomen of gemitigeerd. Met name het feit dat alleen niet-geodoriseerd waterstofgas beschikbaar was heeft ertoe geleid dat extra veiligheidsmaatregelen noodzakelijk waren, meer dan in het geval van geodoriseerd gas nodig zouden zijn.

- Daarnaast wilden de partners graag van deze installatie leren en veel data over het functioneren ervan verkrijgen. Dit resulteerde in de wens om de installatie gedeeltelijk dubbel of zelfs driedubbel uit te voeren en meetapparatuur te plaatsen voor druk en temperatuur.

- Hiertegenover stond de wens om de installatie zo veel mogelijk hetzelfde te houden als een binnenhuis aardgasinstallatie, zodat niet onnodig het beeld zou ontstaan dat een binnenhuis-waterstofgasinstallatie heel veel duurder, ingewikkelder en/of onveiliger zou zijn dan een binnenhuis aardgasinstallatie.

In het ontwerp van de installatie is aan de veiligheid geen concessies gedaan. Het aantal meetpunten is vooral om praktische redenen beperkt gebleven, maar voldoende om een goed beeld te krijgen van het functioneren. Om de beeldvorming in goede banen te leiden is een ‘show-meterkast’ op het terrein van The Green Village geplaatst. In deze meterkast is een deel van een waterstof-installatie nagebouwd zoals wij denken dat deze in de toekomst bruikbaar én veilig zal zijn, zonder dat dit er heel ingewikkeld of duur uitziet. Zie figuur 3.

Projectuitvoering

Overige projectmatige uitgangspunten met betrekking tot bijvoorbeeld intellectueel eigendom, verantwoordelijkheden en publicaties zijn vastgelegd in een samenwerkingsovereenkomst en een NDA.

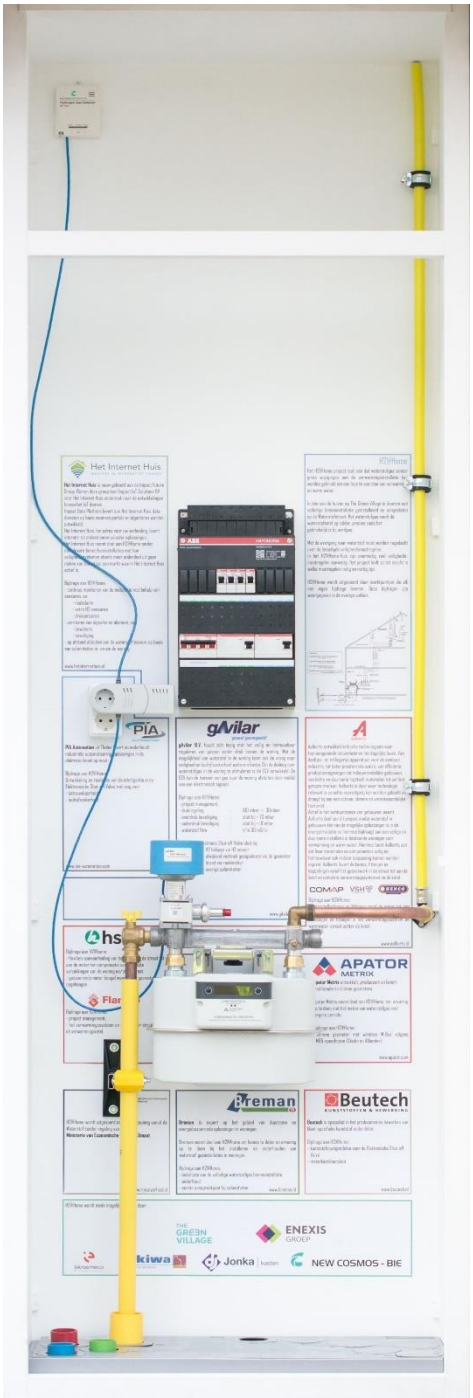


Fig.3: show-meterkast: realistische weergave mogelijke standaardmeterkast.
Bron: gAvilar

Resultaten

1. Organisatorisch

Eerste gebruiker van de WaterstofStraat

Drie netwerkbedrijven (Alliander, Enexis Groep en Stedin) hebben bij The Green Village in Delft een platform gecreëerd waar testen en onderzoeken uitgevoerd kunnen worden, de WaterstofStraat. Daar doen de genoemde netwerkbedrijven o.a. praktisch onderzoek naar de rol van waterstof in de bebouwde omgeving als duurzaam alternatief voor aardgas. Bij de WaterstofStraat doen de drie netbeheerders kennis en ervaring op met het beheer en onderhoud van een waterstofnet in een gebied waar mensen wonen en werken. Andere partijen zoals bedrijven, wetenschappers en consortia zijn welkom om het platform te gebruiken voor onderzoek, tests of trainingen met waterstof.

H2@Home was de eerste gebruiker van deze WaterstofStraat. H2@Home heeft samen met The Green Village en de netbeheerders de nodige uitdagingen moeten overwinnen en vele uren overleg moeten voeren om te komen van een gezamenlijke intentie tot een project in uitvoering. Denk daarbij in de eerste plaats aan het verkrijgen van toestemming vanuit de milieuvergunning om een experiment met waterstof uit te voeren.

Daarnaast het opstellen van alle benodigde overeenkomsten (consortiumovereenkomst, overeenkomst tussen consortium en The Green Village, overeenkomst tussen consortium en de netbeheerders voor gebruik van de WaterstofStraat). Tot slot de afstemming die nodig was met diverse stakeholders, zoals de Veiligheidsregio en TU Delft campus security. Gedurende de looptijd van het project is ook veel tijd besteed aan onderlinge afstemming over uitvoering van werkzaamheden en vorm en inhoud van communicatie over het project.

Milieuvergunning

The Green Village kreeg in juli 2020 de milieuvergunning die nodig was om de WaterstofStraat in gebruik te mogen nemen. In de periode januari tot en met augustus 2021 is door de projectgroep, The Green Village, de betrokken omgevingsdienst en de gemeente hard gewerkt om de uitvoering van project H2@Home mogelijk te maken, gebruikmakend van de bestaande vergunning. De opmerkingen en bedenkingen van de vergunningverlener zijn opgepakt, onzekerheden weggenomen en vragen beantwoord.
Het resultaat hiervan is een solide plan van aanpak, een weloverwogen risicoanalyse en overeenstemming tussen alle partijen medio september 2021

Risico-inventarisatie

Door de vertragingen als gevolg van de ontbrekende vergunning, is wel meerdere malen kritisch door het team naar de veiligheidsmaatregelen gekeken (hoe kunnen we de vergunningverlener “over de streep trekken” en overtuigen dat wat we doen echt veilig en verantwoord is?). Uiteindelijk heeft dit geleid tot een zeer uitgebreide risico-inventarisatie die ook door ander partijen inmiddels wordt gebruikt.
Bij het opstellen van de risico-inventarisatie is het voordeel van het brede deelnemersveld en het totaal omvattende project, duidelijk naar voren gekomen. Deze integrale aanpak heeft ertoe geleid dat er geen optimalisaties hebben plaatsgevonden die andere delen van de installatie negatief beïnvloedden.

2. Documentatie: Risicoanalyse / FMEA

Tijdens het ontwerp van de installatie voor H2@Home is een risicoanalyse gemaakt in de vorm van een ontwerp- en een proces-FMEA. Deze documenten bevatten de resultaten van een kwalitatieve risico-inventarisatie voor het H2@Home-project. Waar mogelijk is de risico-inventarisatie gebaseerd op algemene installaties zoals die voor aardgas gebruikelijk zijn, waar nodig is de risico-inventarisatie toegespitst op de specifieke installatie die op het terrein van The Green Village wordt gerealiseerd.

De faalmechanismen die in dit document worden benoemd zijn een samenvoeging van de faalmechanismen die ook voor de installatie zouden gelden als zij voor aardgas gebruikt wordt, en de faalmechanismen die specifiek bij de toepassing van waterstof horen. Deze faalmechanismen zijn gebaseerd op de onderstaande fault-tree analyse, gekopieerd uit het HyIndoor rapport '*Work Package 5: Widely accepted guidelines on Fuel Cell indoor installation and use - Hyindoor- Pre-normative research on safe indoor use of fuel cells and hydrogen systems, Technical Report, January 2015, Simon Jallais, Elena Vyazmina et al.*

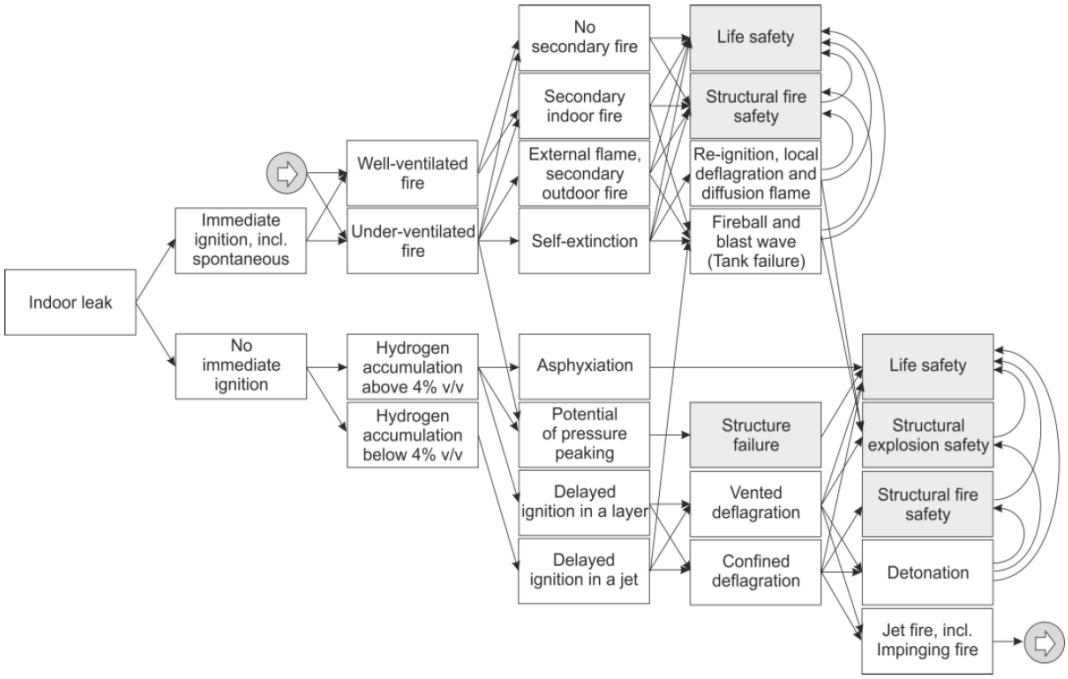


Fig.4: fault-tree analyse. Bron: zie 'literatuurlijst/leestips', ref.nr. 3

Deze fault-tree wordt in de risicoanalyse van links naar rechts doorlopen; als de kans op een gebeurtenis is weggenomen door passende maatregelen worden de volgende stappen niet meer onderzocht. Met andere woorden: het begint met lekpreventie. Als dat niet volledig kan worden uitgesloten, wordt nagegaan of ontsteking kan worden voorkomen, et cetera. Deze maatregelen worden hieronder specifiek voor de H2@Home-installatie in grote lijnen toegelicht.

Beknopt overzicht veiligheidsmaatregelen H2@Home

Alvorens in te gaan op mogelijke veiligheidsrisico's van waterstof is het goed om eerst de verschillen tussen aardgas en waterstof scherp op het netvlies te hebben, zie tabel 1. Deze tabel gaat met name in op de verschillen tussen de verbranding van aardgas en waterstof. De voornaamste verschillen zijn: calorische waarde, ontstekingsenergie en explosiegrenzen. Met name de laatste twee genoemde zullen we regelmatig terugzien in de risicoanalyses.

Kenmerk	Dimensie	Waterstof	Gronings aardgas	Opmerking
Calorische waarde onderwaarde	MJ/m3	10,8	31,7	Er is 3x zoveel waterstof nodig voor evenveel energie als bij aardgas
Calorische bovenwaarde	MJ/m3	12,7	35,2	
Dichtheid	kg/m3	0,09	0,83	H_2 is 14x lichter dan lucht
Geur		geurloos	geurloos	Er is odorisatie nodig om de gassen te kunnen waarnemen
Verbrandings-eigenschappen		**onzichtbare** vlam	zichtbare vlam	
Rookgas-dauwtemperatuur	°C	circa 71	circa 57	Snellere condensatie rookgassen bij H_2
Zelfontbrandings-temperatuur	°C	560	670	
brandbaarheidsgrens	Vol %	4	5	Waterstof heeft een aanzienlijk groter ontstekingsgebied dan aardgas
Bovenste explosiegrens	Vol %	75	16	
Ontstekingsenergie bij stoichiometrische verhouding gas/lucht	mJ	0,02	0,28	Bij lage percentages (< ~10%) is de ontstekingsenergie vergelijkbaar met die van aardgas.
Brandsnelheid	m/s	2,6 - 3,2	0,4	Waterstof heeft een 8x snellere verbranding dan aardgas
Kookpunt	°C	-252	-161	Het kookpunt van waterstof is extreem laag
Vlamtemperatuur	°C	2045	1960	Met waterstof kan een hogere verbrandingstemperatuur worden bereikt
Emissies:				
Koolstofmonoxide CO		Nee	Ja	
Koolstofdioxide CO2		Nee	Ja	

Tabel 1: verbrandingseigenschappen van waterstofgas en aardgas. Bron: Remeha

Hieronder worden de veiligheidsonderwerpen die regelmatig in de risico-inventarisatie voorkomen opgesomd, samen met de maatregelen om deze te voorkomen en de effecten te mitigeren. Dit is slechts een deel van de totale risico-inventarisatie.

Ontsteking van waterstof-lucht-mengsel in de installatie zelf.

Mogelijk gevolg: de druk kan bij ontsteking van een waterstof-luchtmengsel oplopen tot ongeveer 20 bar. Hier is de installatie niet tegen bestand.

a) voorkomen

i) **spoelen**: de installatie wordt gespoeld nadat deze drukloos is geweest en de kans bestaat dat er lucht in het systeem zit. Eerst wordt gespoeld met stikstof tot het percentage zuurstof minder is dan 0,4%, zodat er geen brandbaar mengsel kan ontstaan (met veiligheidsfactor 10). Daarna wordt er gespoeld met waterstof.

ii) **afsluiten:** de installatie wordt automatisch afgesloten bij ongecontroleerde omstandigheden (stroomuitval, verlies van druk), zodanig dat handmatig ingrijpen door een bevoegd persoon nodig is om te herstarten. Bij werkzaamheden wordt de installatie handmatig afgesloten.

iii) **vlaminslag**: de ketel bevat een gekeurde voorziening ter voorkoming van vlaminslag.

iv) **ontstekingsbronnen:** bij werkzaamheden worden ontstekingsbronnen vermeden dan wel alleen gebruikt nadat is gecontroleerd dat ze veilig kunnen worden gebruikt.

v) **aarding**: de installatie wordt geaard om ontsteking door statische elektriciteit te voorkomen.

vi) **lekgaatje gasgebrekbeveiliging:** de gasgebrekklep in de regelaar heeft geen lekgaatje. Dit lekgaatje zorgt er normaliter voor dat de gasgebrekkbeveiliging automatisch opent in een veilige situatie, maar zou er nu ook toe kunnen leiden dat er een gas-luchtmengsel ontstaat. Men kan

niet garanderen dat de WaterstofStraat geen lucht zal bevatten ten gevolge van bijvoorbeeld calamiteiten of werkzaamheden.

Ontstaan en ontsteking van een waterstof-lucht-mengsel buiten de installatie

Mogelijk gevolg: verwonding, schade aan inboedel, woning en omgeving

a) voorkomen

i) **lektest:** de installatie wordt bij ingebruikname en na iedere wijziging in het gasvoerende deel met een druktest beproefd op lekkage, zowel met stikstof als met waterstofgas als drukmedium.

ii) **materialen:** alle gebruikte gasvoerende materialen zijn geschikt voor waterstof bij de voorziene drukken en temperaturen. Hierbij worden dezelfde voorziene drukken en temperaturen als bij aardgas-installaties aangehouden.

iii) **ontstekingsbronnen:** er bevinden zich geen (vaste) ontstekingsbronnen in de directe omgeving van de installatiedelen.

iv) **ventilatie:** ruimten met een verhoogde kans op lekkage (meterkast, stookruimte) worden overmatig geventileerd.

v) **detectie:** er worden vier voorzieningen getroffen / getest om eventueel lekkage te detecteren. Automatische actie wordt ondernomen zodra één van de sensoren 10% LFL detecteert en als het rookalarm afgaat:

- een industrieel (beproefd) systeem van waterstofdetectoren en besturingskast, verbonden met de hoofdafsluiter.
- een systeem van waterstofdetectoren en besturing met TRL 6. Deze sluit de regelklep van de huisdrukregelaar in geval van calamiteit
- gebruik van tape rond de koppelingen, dat verkleurt als het in contact komt met waterstof (werkt vanaf zeer kleine lekken, alleen nuttig bij periodieke inspectie). Rond werkzaamheden wordt ook gebruik gemaakt van snuffelaars.
- de gasgebrekklep in de huisdrukregelaar sluit óók bij ongebruikelijk hoge flow (> plm 12 m3/h lucht / plm 30 m3/h waterstof) . Automatisch ingrijpen op flow kan niet bij lagere flow omdat het maximale verbruik van de ketel iets onder deze waarde ligt.

b) mitigeren

i) **afsluiten:** bij detectie van waterstof (boven een bepaald level) wordt de toevoer afgesloten en worden bewoners gewaarschuwd door middel van geluid- en lichtsignalen.

Overige maatregelen

a) **normen:** de installatie wordt uitgevoerd conform de geldende wet- en regelgeving en richtlijnen voor aardgasinstallaties in woningen, tenzij er redenen zijn om hiervan af te wijken. Deze redenen worden onderbouwd in de risicoanalyse

b) **brand:** bij brand in de woning wordt de toevoer van het waterstofgas afgesloten.

c) **hoge druk**: omdat het voedende net geen standaard net is wordt ter bescherming van de installatie tegen te hoge inlaatdrukken een veiligheidsklep geplaatst vóór de huisdrukregelaar.

d) **lage druk:** de waterstof cv-ketel van Remeha heeft een interne vlamterugslagbeveiliging welke de ketel afschakelt bij het passeren van een minimale gasdruk ter voorkoming dat de vlam de gasleiding “inkruipt” en elders tot een explosie kan leiden.

De ontwerp- en proces FMEA met bovenstaande én andere maatregelen zijn op te vragen bij de projectpartners en kunnen vervolgens onder voorwaarden worden gedeeld.

3. Technisch: de installatie in de woning

Een afbeelding van de installatie inclusief een lijst met de gebruikte onderdelen staat in bijlage A (gasvoerende delen) en bijlage B (veiligheidssysteem). Hieronder wordt met name vanuit het oogpunt van een installateur beschreven welke onderdelen de installatie bevat en waarom. Figuur 5 bevat de schematische voorstelling van de installatie die ook in bijlage B staat. De installatie wijkt om twee redenen af van een normale aardgasinstallatie:

1. Door de onbekendheid met het gebruik van waterstofgas in een binnenhuisinstallatie zagen we ons verplicht elk mogelijk risico, hoe hypothetisch en klein ook, weg te nemen of de gevolgen te verzachten. Dit heeft geleid tot een zeer uitgebreid veiligheidssysteem.
2. Deze pilot geeft uitgelezen kansen voor monitoring van bijvoorbeeld temperatuur en gasdruk. Dit heeft geleid tot diverse meetapparatuur en tot dubbel uitgevoerde leidingdelen, met kranen aan weerszijden om leidingdelen af te kunnen sluiten.

De omschrijving van de installatie is makkelijker te lezen met figuur 5 of bijlagen A en B bij de hand.

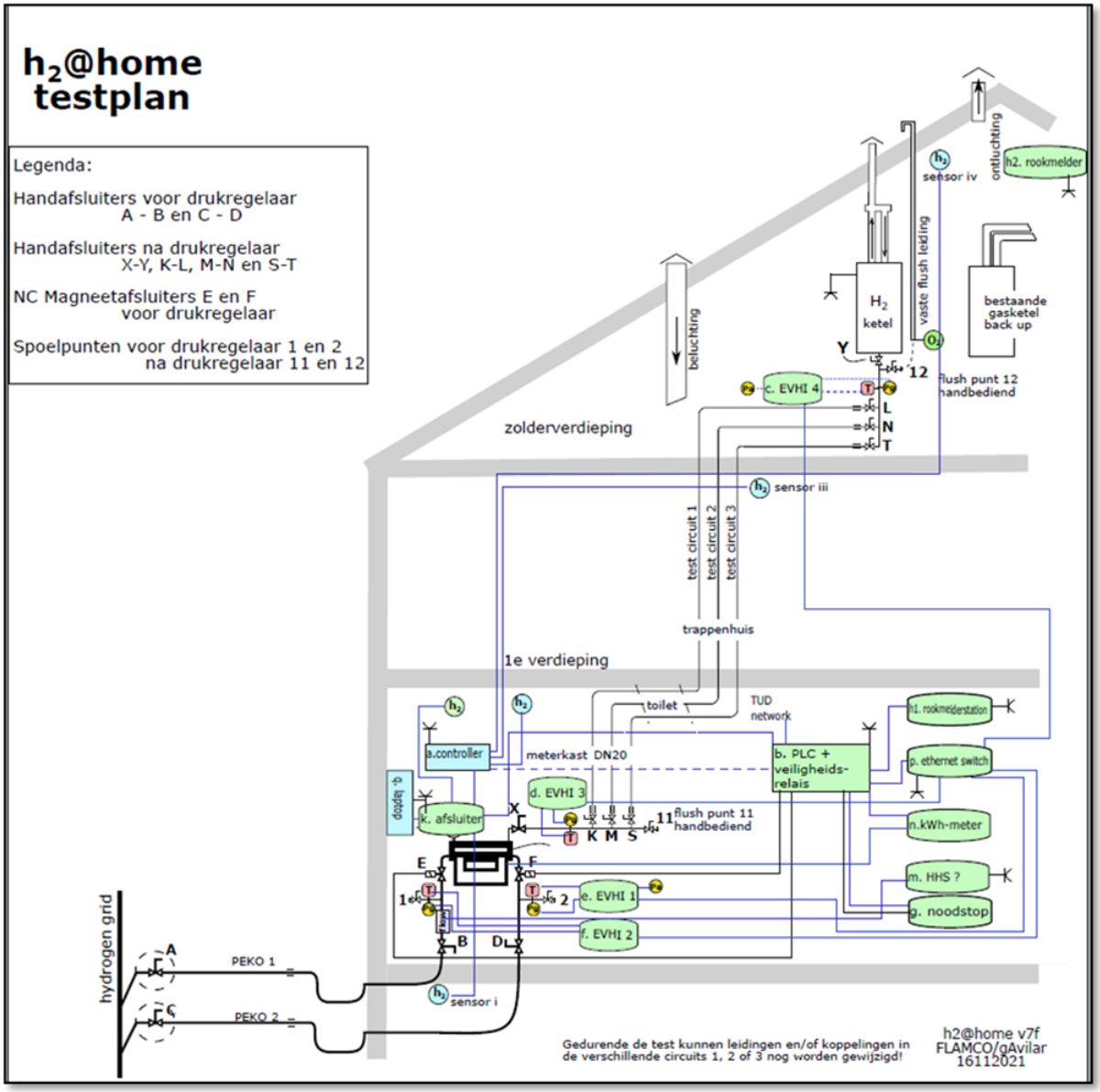


Fig.5: schematische weergave installatie. Bron: H2@Home

Waterstofgasinstallatie in de woning

De totale waterstofgasinstallatie van het project H2@Home in de 70'er jaren woning op The green Village is een samenstelling van een cv-ketel inclusief verbrandingslucht toevoer en rookgasafvoer, een gas binnenhuisinstallatie, de meterkastopstelling en de invoerleidingen.
De cv-ketel is gesitueerd op de zolder, op de plek waar de bestaande aardgas cv-ketel was aangebracht. Hierdoor is de opstelling van de waterstofgas cv-ketel gelijkend aan de opstelling die met aardgasgestookte cv-ketel gebruikelijk is. Het aansluiten van de waterstofgas cv-ketel op de verwarmingsleidingen, de warmtapwater leidingen, de verbrandingsluchttoevoer en rookgasafvoer is niet anders dan met een aardgasgestookte cv-ketel. Er is, ter voorkoming van mogelijke ophoping van ontsnapt waterstofgas, een extra natuurlijke ventilatievoorziening gemaakt op zolder. Dit is uitgevoerd middels een kruislings aangebrachte natuurlijke beluchting en ontluchting. In de gas-aansluitleiding onder de cv-ketel is een spoelaftakking gemaakt voorzien van afsluiter en spoelleiding, De spoelleiding mondt bovendaks uit.

De gas-binnenhuisinstallatie bestaat uit een samenstelling van buizen inclusief verbindingen, aangevuld met meet,- regel,- en beveiligingsapparatuur.
Vanaf de meteropstelling tot aan de cv-ketel zijn er een drietal gas-binnenleidingen aangebracht, gesitueerd door de toiletruimte, de trapopgang en de zolder. (zie figuur 5)
Voor de drie binnenleidingen zijn de volgende merken/soorten buismateriaal gebruikt:

- Comap (MultiSkin perskoppelingen perslucht en gas)
- Henco (PEXc/AL/PEXc Gasbuis)
- VSH (Koperen leidingen met VSH Super knelfittingen)

Naast de verschillen in materiaal hebben deze leidingen ook drie verschillende diameters om hiervan het effect te kunnen analyseren (het waterstofgas stroomt in vergelijking met aardgas tenslotte sneller door de leidingen bij eenzelfde energievraag van de ketel).
Door het toepassen van de verschillende materialen worden ook meerdere bestaande situaties nagebootst. In bestaande woningen zijn ook verschillende materialen in de gasinstallatie aanwezig.

Conclusie:
Het monteren van de waterstofgasleidingen is niet anders gebleken dan het monteren van aardgasleidingen. Het materiaal, de wijze van bewerken, verbinden en bevestigingen behoren tot de standaard van de huidige montage werkzaamheden als zijnde het een aardgasleiding was geweest.

Meterkastopstelling

De meterkastopstelling bestaat uit (vanaf het net, richting de ketel):

- Twee invoerleidingen ("Peko").
- In beide invoerleidingen een hoofdafsluiter, handbediend.
- In de linker invoerleiding een flowsensor.
- In beide invoerleidingen een T-stuk met een spoelaansluiting (met kraan én dop).
- In beide invoerleidingen een dubbel T-stuk voor temperatuur- en (absolute) drukmetingen, verbonden met een EVHI voor de uitlezing.
- Één losse (absolute) druksensor voor de atmosferische druk, verbonden met één van de EVHI's voor de uitlezing.
- In beide invoerleidingen een magneetafsluiter (NC).
- Een meterbeugel waar beide invoerleidingen op uitkomen (in dezelfde ruimte).
- Een combinatieregelaar:
    - Instelwaarde plm 27,5 mbar, idem aan aardgasinstallaties.
    - Gasgebrekklep (vroeger: b-klep) zónder lekgaatje, deze opent dus niet automatisch.
    - Met ssv; een mechanische beveiliging die de inlaat van de regelaar afsluit als de druk in de binnenleiding (bij de uitlaat van de regelaar) te hoog wordt.
- Een G4 balgengasmeter (prototype voor waterstof).
- Een handbediende uitlaatkraan.
- Een T-stuk met een spoelaansluiting (met kraan én dop).
- Een dubbel T-stuk voor temperatuur- en (absolute) drukmetingen, verbonden met een EVHI voor de uitlezing.

- Een verdeelstuk zodat de drie leidingen naar de ketel alle drie gevoed kunnen worden. Deze hebben alle drie een handbediende kraan direct stroomafwaarts van het verdeelpunt.

Meet en regelapparatuur

Ten behoeve van het automatisch doen afsluiten bij calamiteiten, het doen van metingen en het bewaken op afstand zijn in de waterstofgasinstallatie een viertal druk- en temperatuursensoren opgenomen. Een drietal is gesitueerd in de meterkastopstelling en één nabij de cv-ketel op zolder. Onder de gasmeter, direct na de invoerleidingen zijn magneetafsluiters geplaatst. Deze sluiten, bij afschakeling, de waterstofgastoevoer af.

Om de terrein – en invoerleidingen en de binnenhuisinstallatie te kunnen spoelen zijn ter hoogte van de gasmeter meerdere spoelaftakkingen gemaakt.

De samenstelling van de meet- en regelapparatuur, de magneetafsluiters en de spoelaftakkingen leidde tot een zorgvuldige indeling van de beperkte ruimte in de meterkast. Opgemerkt wordt dat de bestaande aardgasmeter gehandhaafd bleef in de meterkast en er dus twee gasmeteropstellingen in een beperkte ruimte waren opgesteld. Het groot aantal verbindingen tussen leidingdelen, meet- en regelapparatuur, magneetafsluiters en spoelaftakkingen leidde tot extra zorg over de lekdichtheid van de vele verbindingen. Uiteraard zijn deze verbindingen uitvoerig op lek getest, ook na wijzigingen.

De cv-ketel en de magneetafsluiters zijn voorzien van een geschakelde elektrische voeding. De sensoren zijn aangesloten met meetkabels.

In de woningen zijn op een viertal plekken waterstofgasdetectiesensoren geplaatst en wel in de kruipruimte, de meterkast, de trapopgang en nabij de cv-ketel op zolder.
Voor de start van de werkzaamheden zijn de detectiesensoren en de gehele veiligheidsprocedure functioneel getest. Dat wil zeggen dat er daadwerkelijk waterstofgas, gecontroleerd en in een veilige mengverhouding met stiktof, bij de detectie sensoren is aangeboden en de veiligheidsprocedure stap voor stap is gecontroleerd.

Bediening van de cv-ketel door de gebruiker ging op de gebruikelijke wijze met de bekende kamerthermostaat in de woonkamer. Warmtapwater werd, zoals gebruikelijk is, bereid bij het openen van de warmwaterkraan. Het gasfornuis in de keuken bleef aangesloten op de aardgasinstallatie.

Veiligheidsinstallatie

In het project is extra zorg besteed aan de veiligheid. Veiligheid is een belangrijk aspect, vooral bij het gebruik van waterstofgas in woningen waar bewoners in verblijven. Bij de aanvang van dit project was er nog weinig kennis van het gebruik van waterstof in een bewoonde woning. Hierdoor was het moeilijk om in te schatten en te onderbouwen welke maatregelen wél en welke niet zinvol zijn. Onderstaande beschrijving kan het idee geven dat waterstof in huis gevaarlijker is dan aardgas. Over de vraag of dat zo is, lopen veel discussies. Het is echter niet de reden voor deze uitgebreide veiligheidsmaatregelen. Deze zijn genomen omdat het gebruik van waterstof onbekender is in deze toepassing dan het gebruik van aardgas.

In dit huis zijn twee normally closed (nc) magneetventielen geplaatst in de aansluitingen op de hoofdleiding, die de uitstroom van gas stoppen in geval van schade aan de binnen installatie. Er zijn ook speciale waterstofsensoren in de meterkast, de trapdoorgang en bij de cv-ketel geplaatst die een mogelijk gaslek detecteren en ervoor zorgen dat de gastoevoer wordt afgesloten. Andere sensoren meten onder meer de druk en de temperatuur en ook op basis van die informatie kan de toevoer van waterstof worden afgesloten of de cv-ketel worden uitgezet. Voor de bewoners is een drukknop geplaatst welke, na het indrukken ervan, de gehele installatie afsluit en de cv-ketel uitzet. Zo wordt voorkomen dat het systeem leegloopt en is een handmatige opstartprocedure niet nodig als er niets aan de hand blijkt te zijn.
Het beschreven veiligheidssysteem is ontwikkeld door het Nederlandse bedrijf Impact IoT Solutions (voorheen Het Internet Huis) en is gebaseerd op de KUNBUS RevPi Core 3+ en een digitale I/O-uitbreidingsmodule. Dit systeem controleert en bewaakt de gehele installatie en de omschakeling naar waterstof wordt een fluitje van een cent. De RevPi stuurt alle verzamelde gegevens naar een portal in de cloud. Dit geeft de beheerder de mogelijkheid om de installatie in real time te monitoren, en zo ook

te voldoen aan de veiligheidseisen van de eindgebruikers. Als extra functionaliteit is in de portal ook de mogelijkheid gemaakt om de installatie op afstand uit te zetten. Dit kan zorgen voor extra veiligheid mocht er om de woning een calamiteit plaats vinden welke aanleiding geeft om de toevoer van waterstof te stoppen.

Ontwikkeling van de ESV (afsluitunit op de regelaar)

Binnen het waterstofproject is door PIA elektronica ontwikkeld voor de ESV die geplaatst wordt op de gasdrukregelaar van gAvilar en de toevoer van waterstof kan stoppen bij een alarm. Het inperken van risico's is de centrale leidraad in de ontwikkeling van de elektronica. Het doel was een veilige testopstelling en een marktklaar product welke zonder (specialistische) technische kennis door elke installateur op een bestaande gasdrukregelaar bevestigd kon worden. Dit zou voorkomen dat voor elke aansluiting een dure specialist ter plaatse moest komen waardoor het product economisch niet haalbaar zou zijn. Hiervoor is de elektronica in zeer compacte wijze ontworpen en heeft gAvilar voor deze toepassing de aan te sturen mechanica samengesteld en gemaakt die door de elektronica wordt aangestuurd. Dit zijn onder meer een pompje en een speciaal voor dit doel ontwikkeld ventiel met drie standen.Dit geheel is bovenop elke gasdrukregelaar van gAvilar te plaatsen, waarbij middels het creëren van onderdruk de regelaar uit haar natuurlijke (veer) balans gebracht wordt en dicht of open gestuurd kan worden. Een accu zorgt tijdens spanningsuitval dat de regelaar voor een bepaalde tijd veilig kan werken.

Alternatieve concepten als een magneetklep of met een miniatuur elektromotor werden technisch, dan wel economisch (dure installatietechniek) niet haalbaar geacht.

Daar in het begin veel onduidelijk was over wetgeving en normering, is door PIA een RI&E opgezet voor de ESV waarin middels brainstormen alle mogelijke facetten qua veiligheid genoemd zijn, met een beheersmaatregel- en risico-evaluatie. Deze onzekerheid resulteerde in een niet af te kaderen start van het project, waarbij alle opties qua aansluiting en aansturing op de elektronica aanwezig dienden te zijn. Dit heeft geleid tot een uitdagende en zeer compacte printplaat.

Tijdens de ontwikkeling zijn door opgedane ervaring en toenemende inzichten diverse concepten gewijzigd waarbij uiteindelijk een opstelling gekozen is met een 'voedingsadapter' met daarin de voeding voor de elektronica op de gasdrukregelaar. Tevens functioneerde deze voedingsadapter als interface voor domotica. Dit concept is verder uitgewerkt en enkele hardwareversies zijn ontwikkeld.

Aarding van de gasleiding

Op de waterstofgas binnenleiding en alle aangesloten elektrische apparaten is een aardingsvoorziening aangebracht ter voorkoming van vonkvormig door potentiaal verschillen.

Bouwkundig

Sparingen rondom bestaande en nieuw aangebrachte leidingen zijn gas belemmerend afgedicht, evenals openingen en sparingen in de meterkast. Op deze wijze is voorkomen dat eventueel ontsnapt waterstofgas zou ophopen in holtes of andere ruimten zonder H_2-sensoren.

Rondom de Remeha waterstofgas cv-ketel op zolder was een gaasafzetting met afgesloten toegangsdeur aangebracht als fysieke drempel tegen onbevoegde toegankelijkheid tot de apparatuur. Daarnaast was de waterstofketel op vier hoekpunten van een slot voorzien om fysieke toegang tot de ketel te voorkomen. In de NDA met H2@Home was hier specifiek om gevraagd. De reden hiervoor is dat er een nog niet commercieel verkrijgbare pilotketel is gebruikt en om te voorkomen dat intellectuele eigendomsrechten geschonden kunnen worden door ongewenste toegang.

4. Procedureel: werkprocedures

Spoel- en lektest procedure

Ter voorkoming van het ontstaan van een brandbaar mengsel van waterstofgas en zuurstof wordt de gasinstallatie voor het toelaten van waterstofgas eerst gespoeld met stikstof. Dat stikstof wordt eveneens gebruikt om de eerste lektest te doen.

Lektesten bij een waterstofgas binnenhuisinstallatie is anders dan bij een aardgas binnenhuisinstallatie. Bij een nieuw aangebrachte aardgasleiding is het gebruikelijk om deze aan beide uiteinde af te doppen en vervolgens een drukstoottest uit te voeren. Bij de waterstofgasinstallatie is de lektest uitgevoerd met alle meet- en regelapparatuur aangesloten, een drukstoottest was daardoor niet meer mogelijk. Dit zou de meet- en regelapparatuur onherstelbaar hebben beschadigd.

Alvorens de lektest uit te voeren, is de binnenhuisinstallatie eerst gespoeld met stikstof, ter verdrijving van de aanwezige lucht (zuurstof). Gezien alle aangesloten apparatuur dient het stikstof geleidelijk en gecontroleerd te worden ingevoerd, dat wil zeggen op nagenoeg dezelfde druk en snelheid als de toevoer van waterstofgas tijdens bedrijf.

De invoer van stikstof geschiede met een daarvoor ontwikkelde spoelinrichting (zie bijlage C). Vanuit de spoelaansluiting in de meterkast werd stikstof ingevoerd en middels de uitmonding bovendaks werd nabij de cv-ketel de lucht uit de leidingen verdreven. Ter controle werd in de afblaasleiding gemeten op de afwezigheid van zuurstof.

Nadat ieder leidingdeel was gespoeld en de afwezig van zuurstof enige tijd is gemeten, werd de leiding naar de uitmonding bovendaks gesloten en de waterstofgas binnenhuisinstallatie op een stabiele (werk) druk gebracht. Na het bereiken van de gewenste (werk) druk werd de stikstof invoer gestopt. Middels een stabiel blijvende druk meting was de afwezigheid van een lek aangetoond en kon de gas binnenhuisinstallatie gevuld worden met waterstofgas.

Het invoeren van waterstofgas heeft plaatsgevonden vanuit de leidingen van de WaterstofStraat. Deze waren daarvoor door de Netwerkbeheerders gevuld met waterstofgas.

Het verdrijven van de aanwezige stikstof (en daarmee het laten vollopen van de binnenhuisinstallatie met waterstofgas) gebeurt ook middels de bovendakse afblaas. Bij voldoende aanwezigheid van waterstofgas werd de leiding naar de uitmonding bovendaks gesloten en de binnenhuisinstallatie op een stabiele (werk) druk gebracht. De waterstofgas invoer werd gestopt en met een stabiel blijvende druk meting was de afwezigheid van een waterstofgaslek aangetoond.

Uit bedrijf, weer in bedrijf.

De waterstofgasinstallatie is voor verschillende modificaties enige keren buiten bedrijf geweest. Alvorens leidingdelen open te maken, is eerst het aanwezige waterstofgas uit de leidingen verdreven. Dit werd gedaan om te voorkomen dat er tijdens werkzaamheden enig waterstofgas in de woningen vrij zou komen. De leidingdelen waaraan werkzaamheden moesten worden uitgevoerd, werden eerst gespoeld met stikstof. Ook hier is gekozen voor een geleidelijk invoer van stikstof via de spoelpunten in de meterkast en het verdrijven van het waterstofgas met de leiding naar de uitmonding bovendaks. Na afronden van de werkzaamheden werd de toegetreden lucht (zuurstof) uit de leidingen verdreven en werd getest op lekkage met de eerder omschreven spoel- en lektest procedure.

Als door onderbreking van het waterstofgas vanuit de invoer, bijvoorbeeld door het sluiten van magneetventielen, de druk in de waterstofgas binnenhuisinstallatie was gedaald tot onder 10 mbar, werd de spoel, - en lektestprocedure ook gevolgd.

Monitoring op afstand, onbelemmerde warmtelevering

Bij het (tijdelijk) uitvallen van de waterstofgasinstallatie was het nodig dat de warmtelevering aan de bewoners, de woning is bewoond, zo snel mogelijk weer op gang komt. Met het bewaken van de waterstofgasinstallatie op afstand (24 uur per dag) kreeg de dienstdoende monteur een melding bij het uitvallen ervan. Ter plaatste was het mogelijk om met de aanwezige aardgasgestookte cv-ketel de warmte toevoer en het bereiden van het warme tapwater eenvoudig en snel te continueren.

Vergelijking met aardgas

De normeringen voor het installeren van een aardgas binnenhuisinstallatie zijn niet geheel toepasbaar op een waterstofgas binnenhuisinstallatie. De eigenschappen van waterstofgas zijn significant anders dan de gassen waarop de bekende installatienormeringen zijn gebaseerd. De installatierichtlijnen, de Nederlandse normeringen NEN 1078, 8078, NPR 3378 en de NEN 7244 voor meteropstellingen zijn gebaseerd op de zogenaamde gasfamilie 2 en 3, het methaanachtige aardgas, butaan en propaan. Deze zijn slechts beperkt te koppelen aan een waterstofgas binnenhuisinstallatie.

De grootse zorg in de voorfase van het H2@Home was de kans en mate van mogelijk vrijkomen van waterstofgas door lekkage in de binnenhuisinstallatie. Al dan niet tijdens of direct na werkzaamheden aan de binnenhuisinstallatie, maar ook bij normaal gebruik. Daarbij was het ontbreken van geur aan het gebruikte waterstofgas een extra aandachtspunt. Hierdoor zal de aanwezigheid van waterstofgas in de lucht niet door de menselijke neus worden gedetecteerd. Iets wat we met aardgas zo gewend zijn.

Door het ontbreken van deze natuurlijke signaalfunctie is er voor gekozen om de detectie van mogelijke waterstof in de ruimte uit te voeren met sensoren.

In de werkprocedure heeft de afwezigheid van een geur er toe geleidt dat we alleen waterstofgas in de installatie konden toelaten als de waterstofgasdetectie operationeel was. Voor de start van de werkzaamheden zijn de detectiesensoren en de gehele veiligheidsprocedure functioneel getest. Dat wil zeggen dat er daadwerkelijk waterstofgas, gecontroleerd, bij de detectie sensoren is aangeboden en de veiligheidsprocedure stap voor stap gecontroleerd.

Bij een aardgasinstallatie zijn we gewend om door middel van standaard richtlijnen te bepalen of een gasinstallatie voldoende lekdicht is. De verhouding tussen toegestaan lekverlies en het voorkomen van een brandbaar mengsel hebben geleid tot algemeen aanvaarde richtlijnen waarin een minimaal drukverlies over een vaste tijd als voldoende lekdicht wordt gezien. (1 mbar drukdaling in 3 minuten). Bij de waterstofgasinstallatie hebben wij gekozen geen drukverlies te accepteren. Daarbij hebben wij, om de invloed van temperatuurverandering tot een minimaal te beperken, de tijdsduur waarin geen drukdaling mag plaatsvinden verlengd naar 30 minuten. (Bij aardgas is dit 3 minuten voor een soortgelijke binnenhuisinstallatie).

Voor alle denkbare situaties waarin er werkzaamheden aan de gas binnenhuisinstallatie kunnen plaatsvinden, te weten: bij eerste aanleg, bij modificatie, bij uit bedrijf name, zijn er werkinstructies gemaakt waarin stapsgewijs de werkvolgorde wordt beschreven. Deze zijn specifiek voor H2@Home geschreven en daarom minder geschikt om te delen. Meer informatie kan worden gegeven door dhr. Sprenkels van de firma Breman (zie ‘contactpersonen’).

5. Resultaten pilotfase

Beschrijving gebeurtenissen sinds ingebruikname

Nadat de leidingen op lekdichtheid zijn getest en de veiligheidsinstallatie volledig functioneel is getest, is de installatie in gebruik genomen volgens de procedures die daarvoor zijn opgesteld. Vanaf dat moment zijn er verschillende momenten geweest waarop er bijzonderheden waren aan de installatie. Deze zijn hieronder beschreven. De grafieken van de temperaturen, drukken en H_2-sensorwaarden zijn als volgt genummerd (zie ook de schematische weergave van de installatie in bijlagen A en B):

Temperaturen en drukken:

- EVHI 1: rechter inlaat PEKO
- EVHI 2: linker inlaat PEKO
- EVHI 3: stroomafwaarts van de gasmeter
- EVHI 4: direct vóór de ketel

H_2-sensorwaarden:

- BH50 #1: kruipruimte
- BH50 #2: meterkast
- BH50 #3: trappenhuis
- BH50 #4: zolder, naast de ketel

<u>Vrijdag 10 december 2021: poging tot ingebruikname</u>

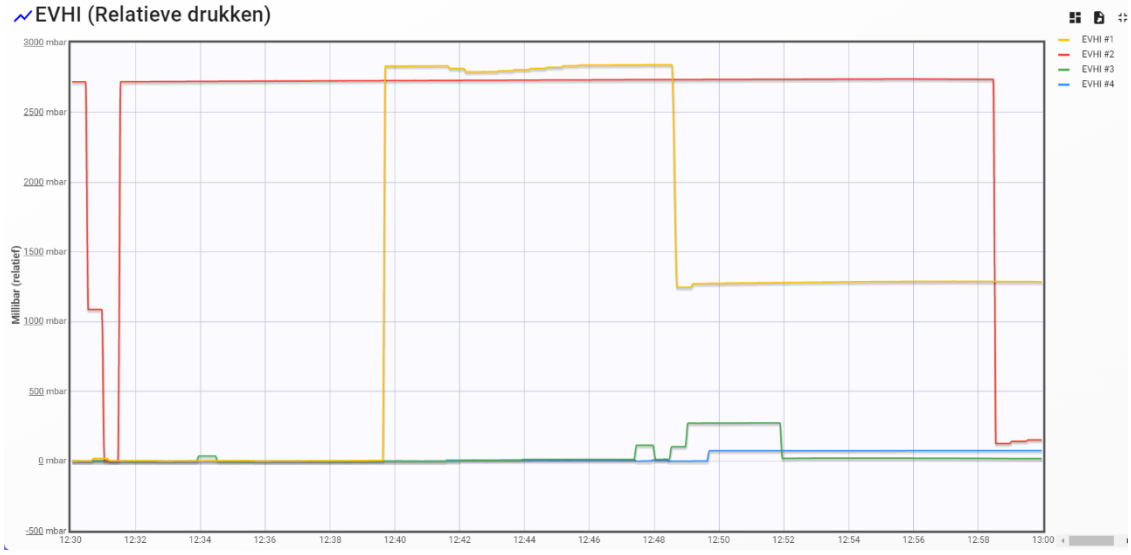
Omschrijving: de ingebruikname is afgebroken, de drukregelaar is inwendig kapot.

Oorzaak: de drukregelaar is bezweken onder te hoge inlaatdruk vanuit de stikstoffles.

Veiligheid: de ssv op de inlaat van de regelaar is geactiveerd op het moment dat de drukregelaar bezweek. Hierdoor is de druk in de binneninstallatie beperkt gebleven tot iets minder dan 300 mbar. Zonder de ssv zou de installatie serieus beschadigd zijn, waarschijnlijk met persoonlijk letsel van de monteurs tot gevolg.

Vervolg: de regelaar is vervangen. Alle apparatuur die op te hoge druk heeft gestaan is gecheckt op lekdichtheid en functioneren. Om veilig te kunnen spoelen is een spoelinstallatie ontwikkeld, inclusief veiligheden. Deze is sindsdien gebruikt bij het spoelen.

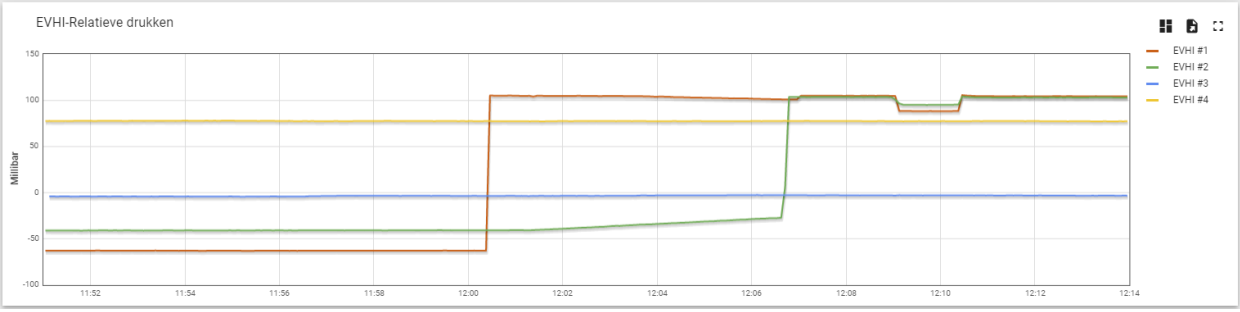
Relatieve drukken (de druksensoren zaten buiten meetbereik, de druk kan hoger zijn geweest)



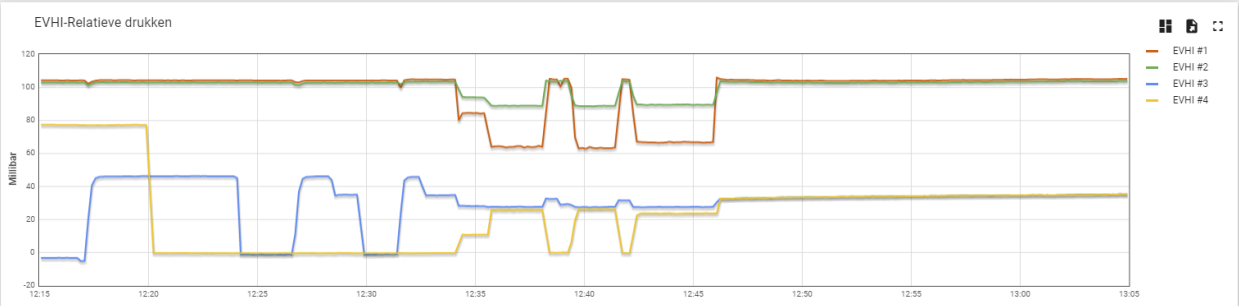
Woensdag 22 december 2021: in gebruik name (1)

Omschrijving:	de installatie is gespoeld en in gebruik genomen. Tijdens het in gebruik nemen van de ketel is een kortstondig lek ontstaan waarop het veiligheidssysteem aansprak en de toevoer heeft afgebroken.
Oorzaak:	bij het opstarten van de ketel heeft de monteur de druk bij de ketel wat willen verlagen. Zoals gebruikelijk bij aardgas is een klein volume daarbij drukloos gemaakt. Dit was echter genoeg om de H_2-sensor die erboven hangt te activeren.
Veiligheid:	gezien het kleine volume aan ontsnapt waterstofgas is er geen gevaar geweest voor de veiligheid
Vervolg:	direct na het in bedrijf nemen is de installatie weer uit gebruik genomen tot 10 januari omdat de ketelleverancier de ketel gedurende die periode niet kan monitoren.

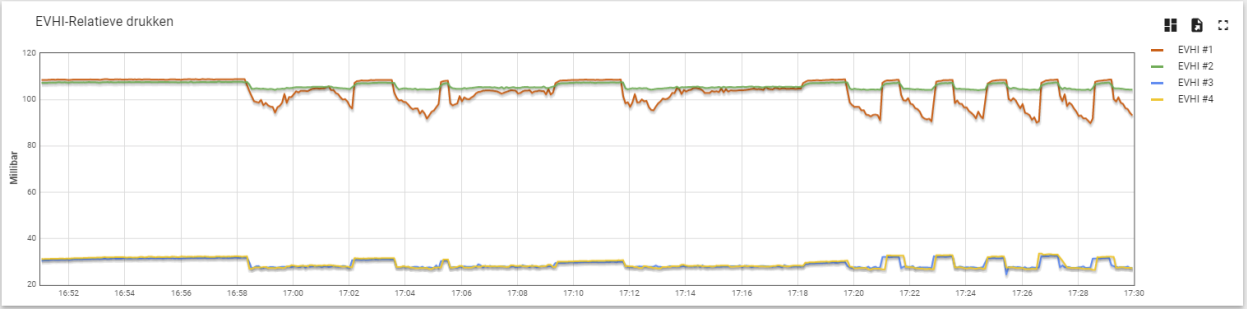
Spoelen en lektesten van de PEKO's op 100 mbar (stikstof):



Spoelen van de drie parallelle leidingen naar de ketel (stikstof):



Installatie komt in bedrijf op waterstof:



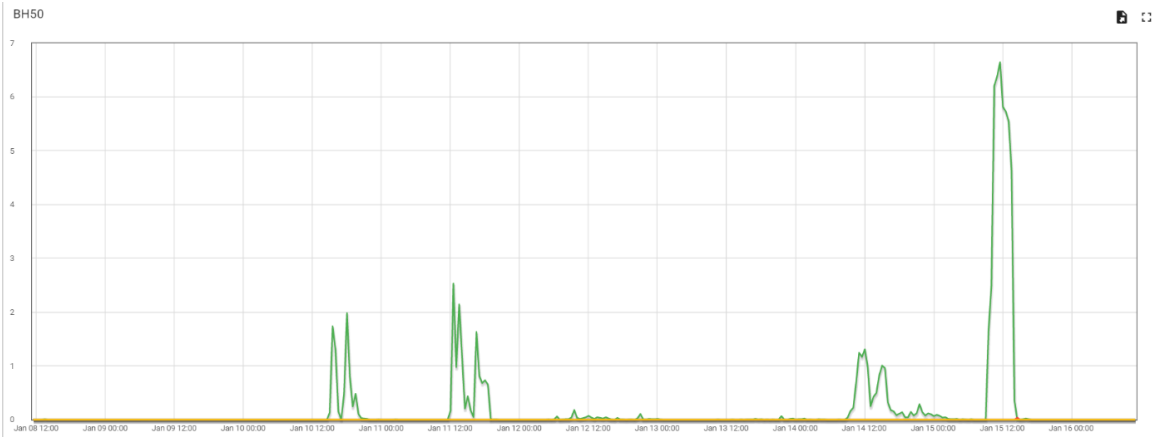
Maandag 10 januari 2022: vervangen gasmeter, ingebruikname installatie (2)

Omschrijving: de gasmeter is vervangen omdat het niet lukte deze digitaal uit te lezen (dit lag achteraf niet aan de meter). De installatie is vooraf eerst gespoeld met stikstof. Vervolgens is de installatie gespoeld met waterstof en in gebruik genomen.
Oorzaak: n.v.t.
Veiligheid: n.v.t.
Vervolg: de installatie is operationeel.

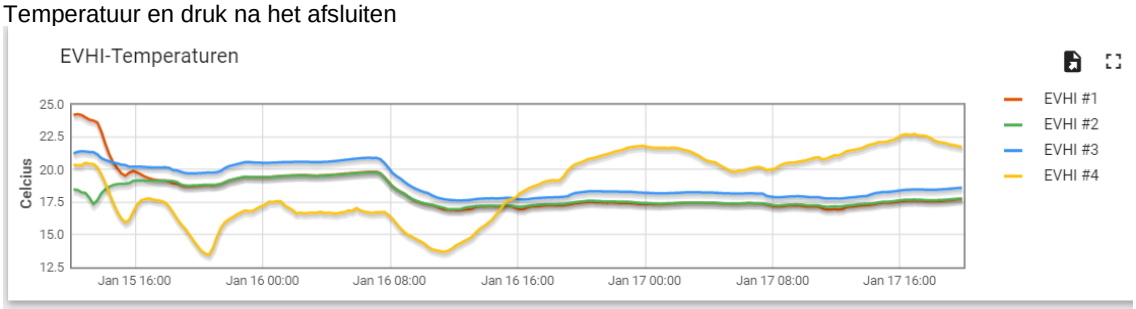
Zaterdag 15 januari 2022

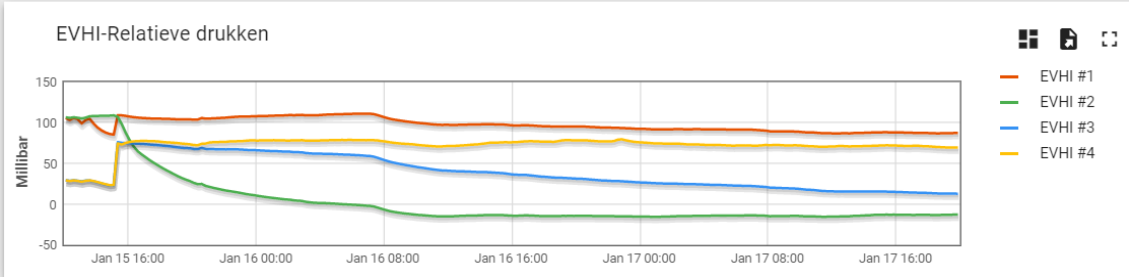
Omschrijving: de installatie is afgesloten doordat de sensor in de meterkast meer dan 10 ppm waarnam.
Oorzaak: achteraf is het waarschijnlijk dat een lek over een lijmverbinding bij de magneetventielen de sensor heeft getriggerd. Ook zou het zo kunnen zijn dat de pakkingen lekten, deze waren bij de reparatie niet vervangen. Er waren op dat moment voor zover bekend geen bijzondere omstandigheden aanwezig in het huis.
Veiligheid: 11 ppm ligt ver onder de onderste LFL van waterstof, er is geen gevaar geweest voor de veiligheid.
Vervolg: de installatie is operationeel.

Het verloop van het gemeten lek in de meterkast vanaf enkele dagen vóórdat de grens van 10 ppm is bereikt:



Temperatuur en druk na het afsluiten





Donderdag 20 januari 2022

Omschrijving: de pakkingen zijn vervangen, de lekken zijn naar het zich laat aanzien nu weg. Tijdens de werkzaamheden werden meermaals elektrische schokken ervaren door de monteurs. De installatie is niet in gebruik genomen.

Oorzaak: het eerste vermoeden was dat zich statische spanning had opgebouwd tijdens het spoelen. Na nader onderzoek is echter geconstateerd dat de aarding van de magneetventielen niet goed was uitgevoerd.

Veiligheid: dit falen had in combinatie met een ontbrandbaar mengsel van waterstof en lucht kunnen leiden tot schade en/of ongevallen.

Vervolg: de hele installatie is gespoeld met stikstof. Na diverse dagen van onderzoek door onder anderen een aardingsexpert is de aarding van de magneetventielen hersteld en is de installatie weer in gebruik genomen op 17 maart 2022.

Vrijdag 18 maart 2022:

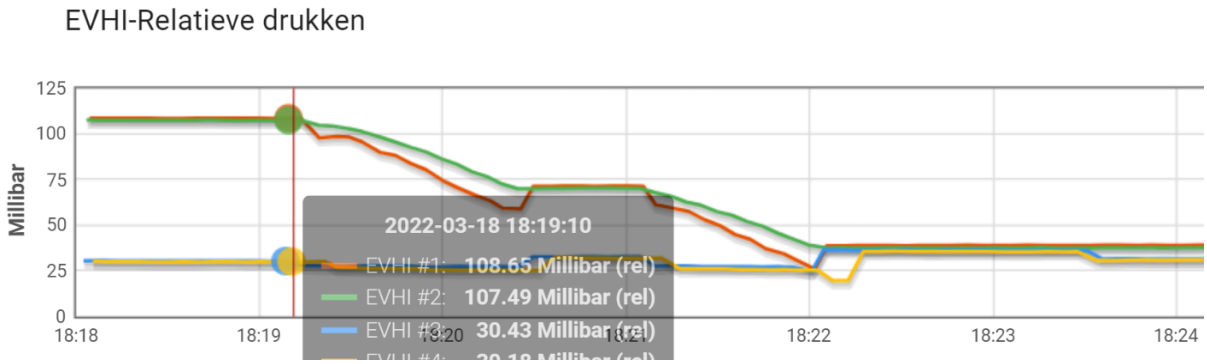
Omschrijving: de toevoer is afgesloten doordat de op het terrein van The Green Village de rode knop van de WaterstofStraat is ingedrukt.

Oorzaak: een bezoeker van het terrein heeft de noodknop van de WaterstofStraat waarschijnlijk aangezien voor een knop om het hek mee te openen en deze ingedrukt. Hierdoor sluit de WaterstofStraat de toevoer naar het net af. Door afname daalde de druk in het systeem tot deze onder de kritische grens kwam.

Veiligheid geen bijzonderheden.

Vervolg: na het spoelen van de WaterstofStraat kan de installatie weer in gebruik worden genomen.

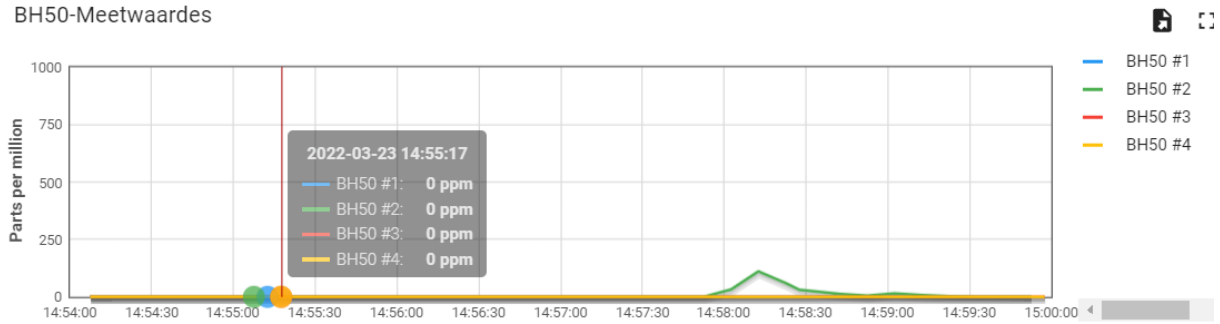
Afname van de toevoerdruk:



Woensdag 23 maart 2022: weer in gebruik

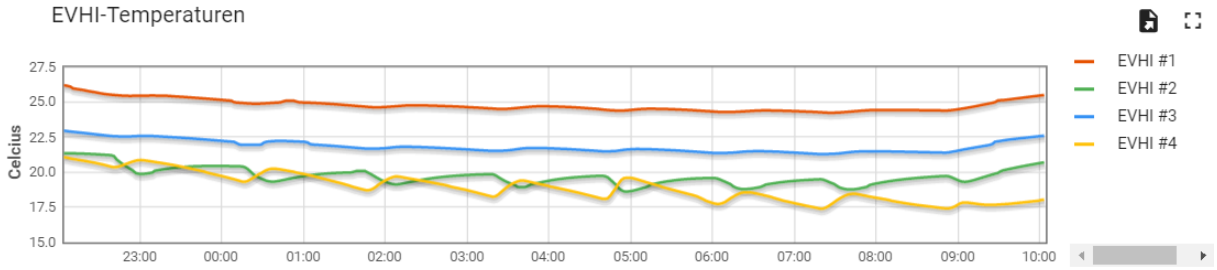
Omschrijving: Het systeem is weer in gebruik genomen. De onderste alarmgrens voor H2 is nu 100 ppm, dit is ook getest (onder 100 ppm komt er geen alarm, daarboven wel). De grens voor de inlaatdruk (EVHI 1 en EVHI 2) is verhoogd naar 50 mbar. Dit voorkomt dat er weer gespoeld moet worden als de druk in het net wegvalt.

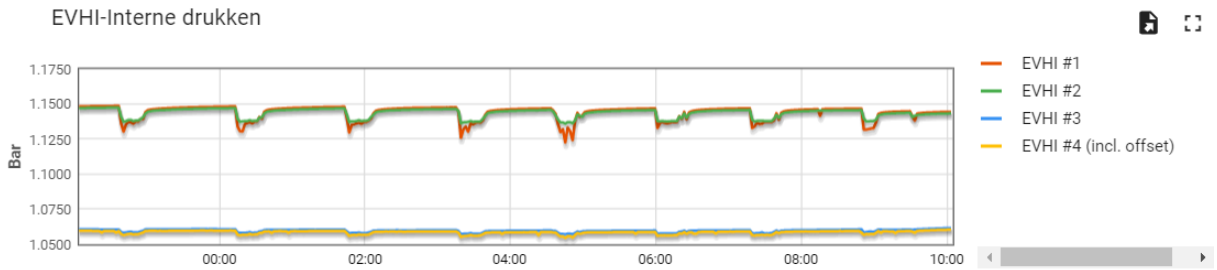
In onderstaande grafiek is te zien dat de H2-sensor in de meterkast is getest. Eerst is getest of er een melding kwam en werd afgesloten bij waarden boven de 100 ppm (dat gebeurde) en vervolgens of die melding en actie niet meer optraden bij een waarde tussen 10 en 100 ppm (en dat gebeurde inderdaad niet):



<u>Donderdag 24 maart 2022: in gebruik</u>

Omschrijving: een willekeurige dag waarop de drukken en temperaturen in het systeem een mooi patroon laten zien. Bij verbruik daalt de temperatuur van de open invoerleiding (EVHI2) door het koude gas dat uit de grond komt. Tegelijk stijgt de temperatuur van EVHI4, die op zolder direct voor de ketel meet.





<u>Woensdag 19 april 2022</u>

Omschrijving: de magneetventielen zijn gesloten doordat zich een stroomstoring voordeed op The Green Village.

Oorzaak: werkzaamheden van een andere partij hebben ertoe geleid dat meerdere huizen geen stroomtoevoer meer hadden.

Veiligheid de installatie is automatisch afgesloten en kon alleen weer worden gereset door de IV-er (= InstallatieVerantwoordelijke, in dit geval Stedin voor de WaterstofStraat en Breman

voor de H2@Home-installatie). Deze heeft de drukken gecontroleerd en de installatie vervolgens opnieuw opgestart.

Vervolg: geen bijzonderheden.

Dinsdag 25 april 2022

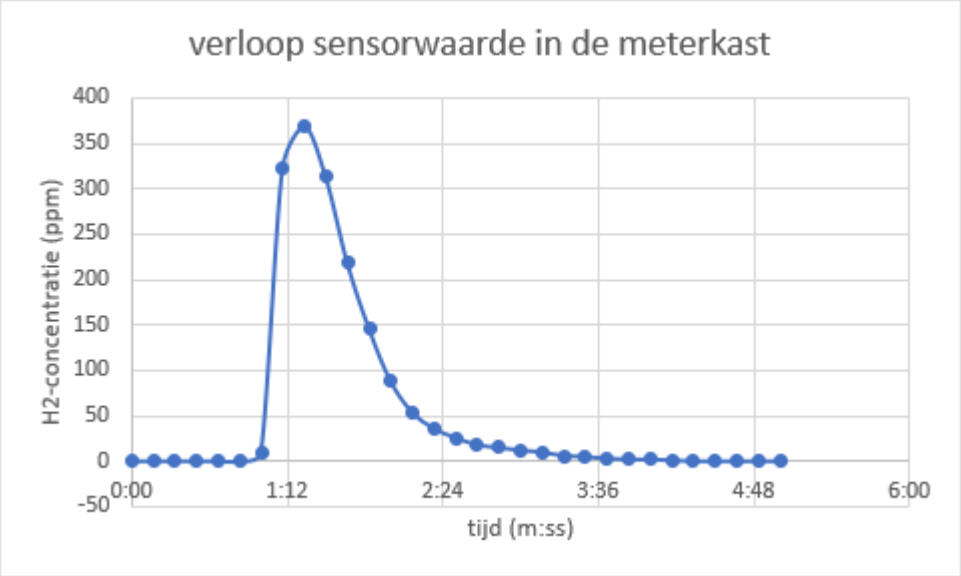
Omschrijving: de installatie is afgesloten doordat de sensor in de meterkast meer dan 100 ppm waarnam (de hoogste concentratie was 323 ppm).

Oorzaak: achteraf waarschijnlijk veroorzaakt door een lek in de lijmverbinding bij de magneetventielen. Bij beide magneetventielen lekt de verlijmde koppeling naar de aluminium verloopnippel. Aan de zijde waar een messing verloopnippel is gelijmd is er geen lek. Wij vermoeden dat door de verschillen in lineaire uitzettingscoëfficiënt tussen messing en aluminium én de opwarming ter plaatse veroorzaakt door het voortdurend bekrachtigen van het magneetventiel de lijmverbinding is gaan lekken.

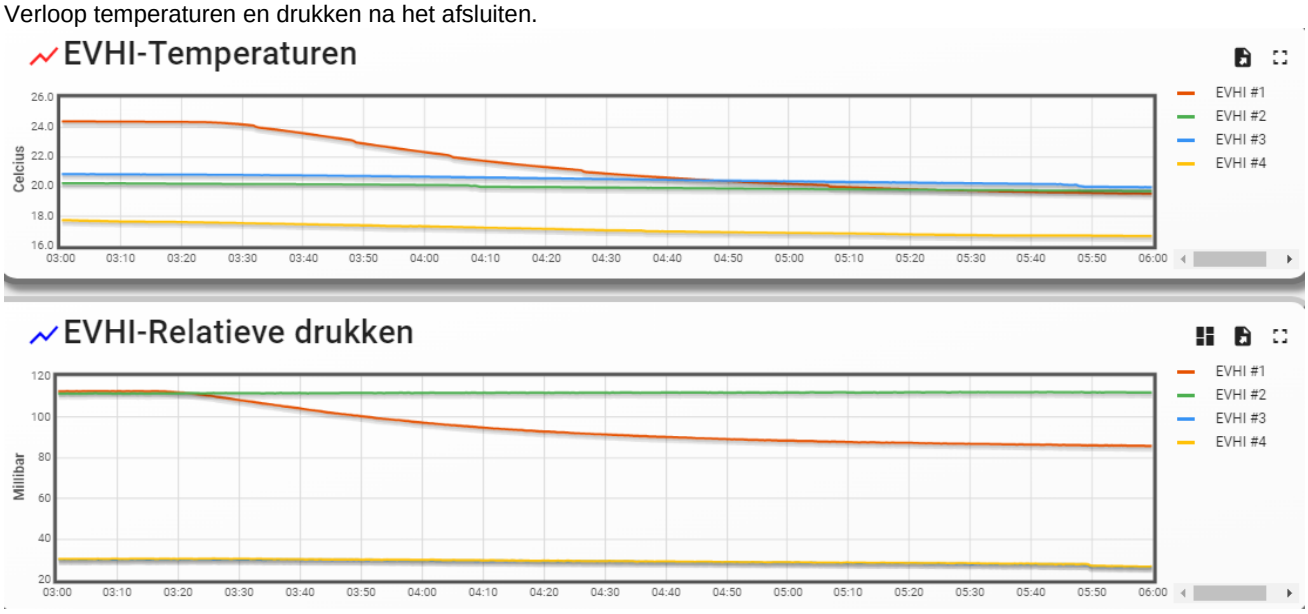
Veiligheid: 323 ppm ligt ook nog ver onder de onderste LFL van waterstof, er is geen gevaar geweest voor de veiligheid.

Vervolg: eerst moet de oorzaak van dit lek worden gevonden.

In de grafiek hieronder zijn de meetwaarden van de H2-sensor in de meterkast weergegeven. Tien seconden na de meting van 323 ppm was de meetwaarde 370 ppm, daarna zakken de meetwaarden binnen 3 minuten terug naar 0 ppm. In de gehele tijd dat de installatie weer in gebruik is (23-3-2022, een maand geleden dus), is de meetwaarde van sensor 2 niet meer geweest dan 4 ppm.



Verloop temperaturen en drukken na het afsluiten.



<u>Woensdag 11 mei 2022</u>

Omschrijving: de installatie is met nieuwe (messing) koppelingen en lijmverbindingen weer in gebruik genomen.

Reflectie op de storingen

Tijdens de pilotfase van het project, sinds de installatie voor het eerst operationeel was, is de installatie vaak buiten bedrijf geweest door diverse oorzaken. De grondoorzaken hiervoor komen neer op:

- Gebruik van onderdelen waar geen ervaring mee is in deze context waardoor gemakkelijk fouten gemaakt worden bij aanleg en gebruik.
- Te nauwe veiligheidsgrenzen.
- Gebruik van veel veiligheidsmaatregelen. Enerzijds zijn deze nuttig gebleken, anderzijds maakt het systeem complex om mee te werken.
- Afhankelijkheid van andere systemen, zoals het lichtnet en de WaterstofStraat.

Analyse meetresultaten installatie algemeen

Testresultaten binnenhuis installatie algemeen.

Uit de testen is gebleken dat met de bestaande materialen een veilige installatie te realiseren is. Gebruikte materialen geven geen problemen met lekkage of anderszins.
Ook is gebleken dat er een minimaal verschil in geluid is ten gevolge van het stromen van het waterstofgas door de leidingen tussen de verschillende materialen en diameters. Ook vergeleken met aardgas is het extra geluid beperkt.

Ondanks het feit dat de leidingen duidelijk zichtbaar waren in het trappenhuis hebben de bewoners aangegeven zich geen moment onveilig te hebben gevoeld. Met voldoende uitleg en onder normale gebruiksomstandigheden is hierin geen verschil met een binneninstallatie voor aardgas.

Functioneren van de afsluit-inrichting

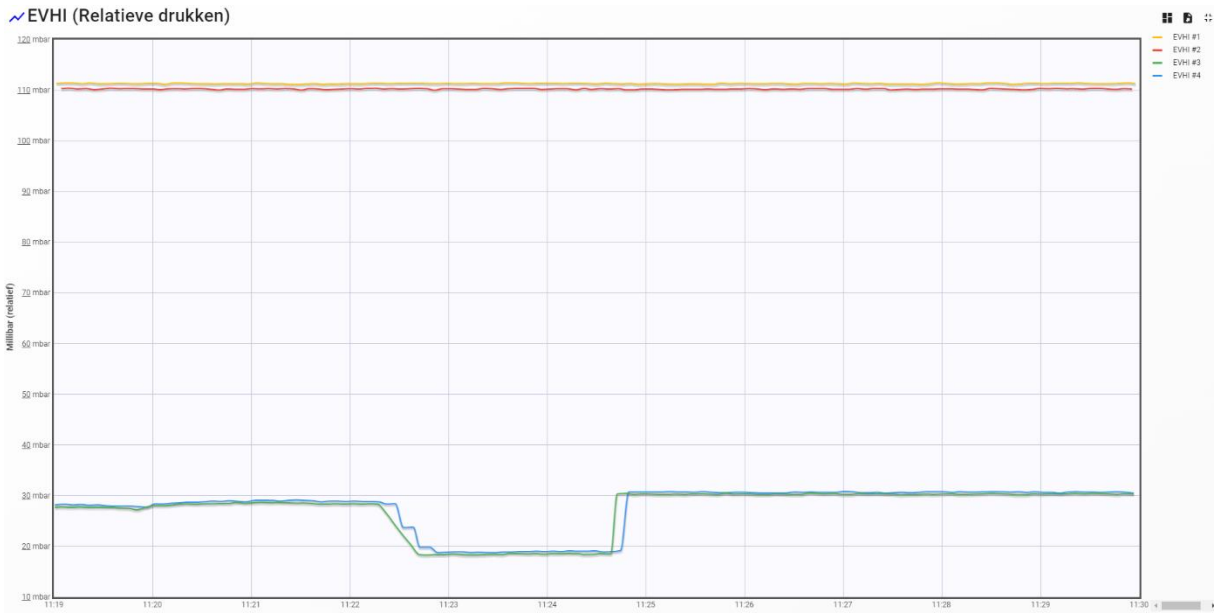
De afsluit-inrichting (verder: ESV) is een add-on voor de drukregelaar. Als de ESV wordt getriggerd, zal een klep in de regelaar sluiten. De ESV kan op een bestaande regelaar worden aangebracht zonder het gasvoerende deel drukloos te hoeven maken.

Invloed op het functioneren van de regelaar
De ESV wordt over de ademopening van de regelaar geplaatst. Dit zou het functioneren van de regelaar kunnen beïnvloeden. Bij lab-testen is geen negatieve invloed gebleken, een belangrijke vraag tijdens de pilotfase was of dat ook voor de praktijk zou gelden. De ESV heeft daarom gedurende het grootste deel van de pilotfase ‘uit’ gestaan. Daarnaast zou het werken met de installatie zijn bemoeilijkt als de ESV ook bij elk alarm zou sluiten. Gedurende de hele periode dat de installatie heeft gefunctioneerd, zijn geen afwijkingen geconstateerd aan het functioneren van de regelaar.

Werking van de ESV
Op 22 juni 2022 is de afsluit-functie van de ESV als volgt getest:

1. Aan de sensor die is verbonden met de ESV is een mengsel van 99% N_2 en 2% H_2 aangeboden zodat het alarm hiervan geactiveerd werd.
2. De licht-indicatie op de ESV gaf aan dat het signaal was ontvangen en dat de regelaar was gesloten.
3. Om te controleren of de doorvoer echt was afgesloten is stroomafwaarts van de regelaar een leiding met een restrictie (22 l/h H_2) op de spoelleiding aangesloten. Deze is korte tijd geopend zodat de druk langzaam kon dalen tot ongeveer 18 mbar. Daarna is dit lek weer gesloten.
4. Nu kon op twee manieren worden gecontroleerd of de regelaar inderdaad is afgesloten:
    a. De druk herstelde niet vanzelf naar ongeveer 30 mbar maar bleef constant op ongeveer 18 mbar.
    b. Er was geen dip in de inlaatdruk te zien, die normaliter wel te zien is als de druk stroomafwaarts daalt.
5. Na het resetten van de ESV opende de regelaar weer. De druk herstelde zich nu wel naar ongeveer 30 mbar.

De drukken horend bij bovenstaand proces staan in de grafiek hieronder weergegeven. Het gedrag van de druk stroomafwaarts van de regelaar (de blauwe en de groene lijn) komen overeen met het gedrag dat bij punt 4 van bovenstaande werkwijze is vermeld.



Op basis van bovenstaande test en de gehele projectperiode kunnen de volgende conclusies worden getrokken over de ESV:

- Technisch gezien werkt ESV naar behoren.
- De kostprijs is op dit moment waarschijnlijk niet laag genoeg om dit prototype daadwerkelijk toe te passen op grotere schaal.
- Er is een technische uitdaging in het goed lekdicht krijgen van de elektronica op de gasdrukregelaar om afdoende vacuüm te kunnen leveren.
- De (achteraf te~) uitgebreide opties op de printplaat leidden tot de keuze van compactere connectoren en aansluitingen waardoor deze in de praktijk niet afdoende robuust is gebleken
- Veranderde politieke opvattingen in binnen- en buitenland omtrent veiligheid van waterstof geven minder nadruk op veiligheid, waardoor de regelprint eenvoudiger, goedkoper en robuuster gemaakt kan worden
- Een heroverweging met betrekking tot de complexiteit van de ESV is op zijn plaats, mede doordat ook de omstandigheden (energiemarkt, houding ten opzichte van waterstof, ..) zijn veranderd in de loop van het project.

Gebruik van gasmeterdata voor lekdetectie

De ESV in dit pilotproject werd getriggerd door een H_2-sensor. Onderdeel van de pilot is echter ook het onderzoeken van de mogelijkheid om gasmeterdata te gebruiken voor de detectie van lekken. Dit kan op twee manieren:

1. De gasmeterdata vergelijken met de data van de ketel of thermostaat; als de ketel niet aan is, zou er geen gasflow moeten zijn.
2. De gasmeterdata an sich analyseren. De ketel heeft een minimaal verbruik, lekken die kleiner zijn dan dit minimale verbruik zouden moeten opvallen.

Er kleven enkele praktische nadelen aan deze methoden:

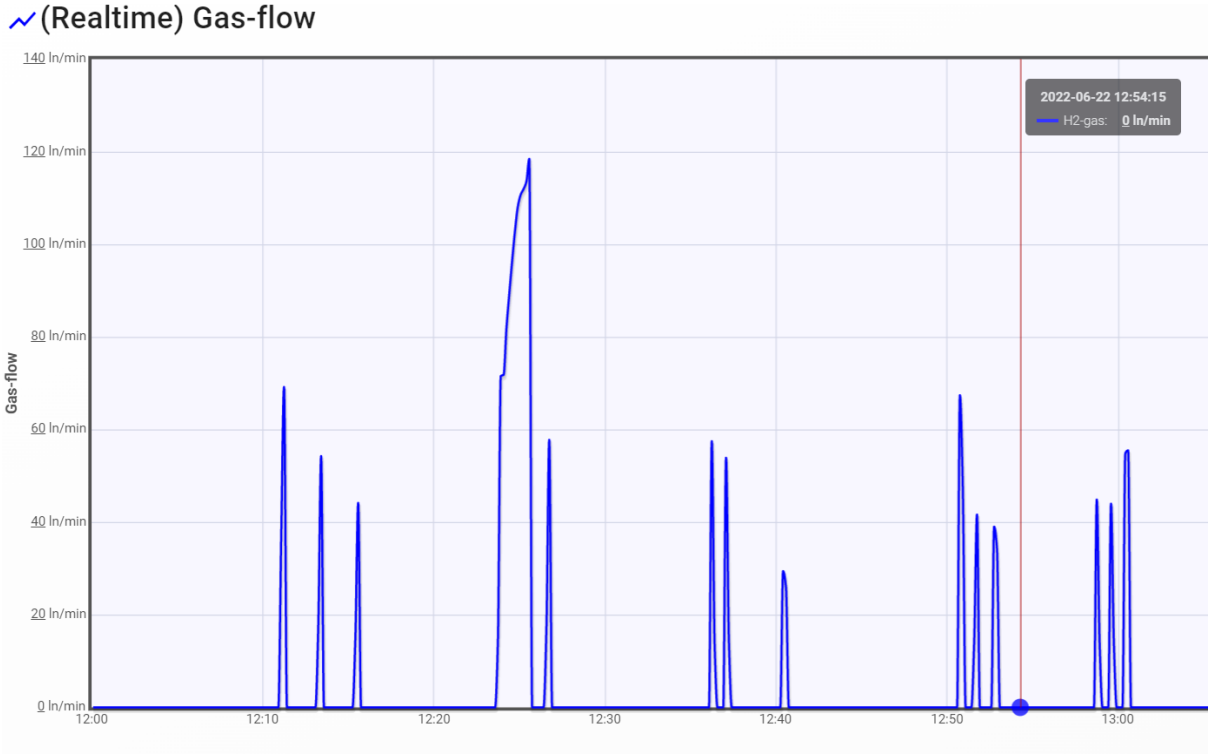
- Voor beide methoden geldt dat door atmosferische drukverhoging of door temperatuurveranderingen in het systeem de gasmeter de stand ook iets kan verhogen. Hier zal rekening mee moeten worden gehouden door bijvoorbeeld niet na één ‘verdachte’ puls al direct in te grijpen.
- De meterdata worden in Nederland normaliter per 15 minuten doorgegeven. Er zal 15 minuten geen verbruik van gas moeten zijn om een kleine verhoging van de meterstand te kunnen zien. Bij methode 2 geldt dan dat het lek alleen opvalt als het lek niet te groot is, anders is het niet te onderscheiden van kort aanslaan van de ketel.

- Voor methode 1 geldt dat er een koppeling moet zijn met de thermostaat/ ketel. Dit bleek bij het pilotproject dermate ingewikkeld, dat alleen methode 2 is onderzocht.
- Bij methode 2 kunnen alleen kleine lekken worden gedetecteerd, lekken die overeenkomen met normaal verbruik zullen niet opvallen.

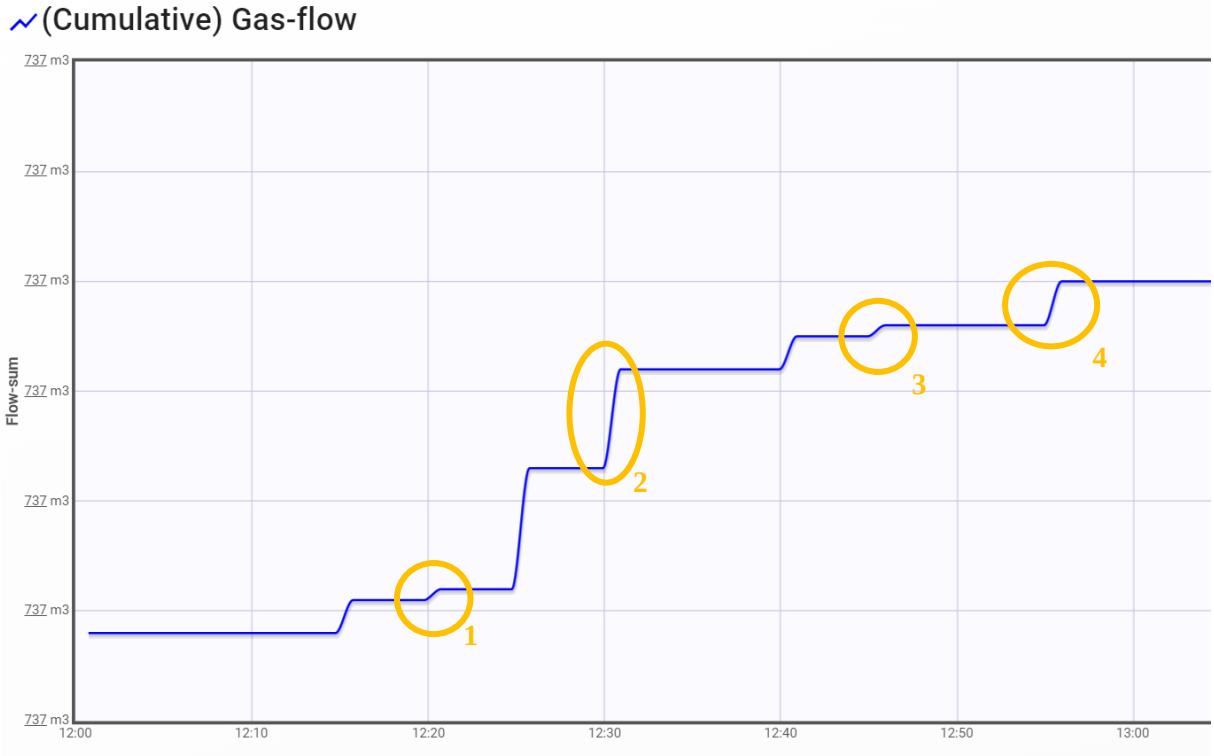
Test
Om te testen of methode 2 inderdaad werkt, is stroomafwaarts van de meter een klein variabel lek aangebracht. Dit lek liep via de spoelaansluiting via een leiding naar buiten. Voor lekwaarden van achtereenvolgens 22,4 l/h, 26 l/h, 30,5 l/h en 44 l/h is vervolgens steeds de volgende procedure gevolgd:

- Stap 1: de restrictie voor het lek is geopend. Zodra op het telwerk van de meter zelf de tellerstand veranderde, werd de restrictie gesloten.
- Stap 2: om minimaal verbruik na te bootsen, is vervolgens 3 maal achter elkaar de warmwaterkraan net zolang geopend dat de ketel aansloeg. Zodra de ketel aan ging, is de warmwaterkraan weer gesloten.

In onderstaande grafieken zijn de data weergegeven voor de realtime gasflowmeting (met een flowsensor) en de data vanuit de gasmeter.
Realtime flow: metingen met de flowsensor



De gasmeterstand zoals weergegeven op het dashboard. De oranje cirkels geven aan op welke momenten het lek was geopend.



De kleine toename in de gasmeterstand bij cirkels 1 en 3 onderscheiden zich qua grootte duidelijk van de andere toenames. Bij de cirkels 2 en 4 is dat niet zo, hier is de gasmeterstand verhoogd door zowel het lek als de afname door de warmwatervraag.

Conclusie: het is technisch mogelijk om op basis van de gasmeterdata lekken te detecteren, maar er zijn wel enkele praktische belemmeringen voor een betrouwbare uitvoering van deze methode.

Resultaten vanuit netbeheerperspectief

Het project H2@home was voor de netbeheerders een aanvulling op het project 'De WaterstofStraat op The Green Village'. De combinatie van deze twee projecten hebben inzicht verschaft in het gedrag van waterstofgas door een regulier (aard)gasnetwerk en binneninstallatie. Daarbij is het samenspel en de afstemming tussen netbeheerder en installateur op het gebied van techniek en veiligheid een belangrijk item geweest in dit project.

In dit project hebben de netwerkbedrijven ervaring opgedaan in het veilig in- en uitbedrijf nemen en beheren van de binnen installatie en het reguliere gasnetwerk. Hierbij is veel geleerd van het spoelen met een inert gas om de leidingen te ontluchten of te ontgassen. Dit heeft tot diverse inzichten geleid wat hiervoor nodig is en hoe dit op een veilige en betrouwbare manier kan worden uitgevoerd. Deze ervaringen zijn bijzonder waardevol voor de vervolgprojecten van de netbeheerders en de verdere uitrol van waterstofdistributie en gebruik.

Knelpunten, lessons learned en vervolgonderzoek

Geleerde les nr 1: Het kan!

Belangrijke uitkomst van dit project is dat het dus kan: een binneninstallatie die vergelijkbaar is met een aardgasinstallatie via een waterstofgasnetwerk voeden met waterstof en dat vervolgens in een H2-ketel verbranden. Ondanks dat de installatie vaak uit bedrijf is geweest door grotere en kleinere storingen, is hiermee aangetoond dat het kan.

Geleerde lessen procedureel

Voor vele instanties is waterstof een betrekkelijk nieuw fenomeen ondanks het feit dat waterstof in de industrie al jaar en dag wordt gebruikt. Besluitvorming van het verlenen van vergunningen (zowel lokaal als provinciaal) kan daardoor langer op zich wachten en worden er meer zekerheden en studierapporten verlangd van de indiener. Dit is een algemeen gevolg van het ontbreken van wet- en regelgeving, normen en best practices. Het is aan de ene kant begrijpelijk en aan de andere kant frustrerend als men een pilotproject wil uitvoeren met waterstof. Juist dit soort pilotprojecten dragen bij aan de maatschappelijk acceptatie van waterstof. Zoals hiervoor omschreven zijn er vele extra maatregelen genomen om maximale veiligheid te waarborgen. Met de opgedane kennis kunnen toekomstige (pilot)projecten eenvoudiger en sneller worden gerealiseerd.

Omdat er rondom het gebruik van waterstof in de bebouwde omgeving (nog) geen wet- en regelgeving bestaat, in combinatie met de perceptie dat waterstof gevaarlijk is, is er bij vergunningverleners onvoldoende vertrouwen. Hier ben je, logischerwijs, afhankelijk van het inschattingsvermogen en de perceptie van de vergunning verlener/ambtenaar. Dit traject heeft dus tijd nodig.

Het is gebleken dat de hogere gemeentelijke, provinciale en landelijke politici waterstof projecten willen stimuleren, maar lokale ambtenaren vanwege het ontbreken van duidelijke richtlijnen, veel tijd nodig hebben.

Door de vertraging ivm de vergunning is er meer tijd en energie gestoken in de risico-inventarisatie. De les hiervan is dat, zeker als je met een dergelijk breed consortium dit aanpakt, meerdere sessies een beter resultaat leveren.

Geleerde lessen installatie

Lay-out van de installatie

De installatie van de waterstofgas leidingen in de woning was gelijk aan de werkzaamheden van een aardgasleiding. Het monteren en aansluiten van de cv-ketel en het rookgasafvoersysteem was gelijk aan die voor aardgas. Voor een gas technisch installateur zijn de benodigde competenties, kennis van de materialen en het gebruik van gereedschappen gelijk.

De extra meetapparatuur en veiligheidsmaatregelen maakte de installatie ingewikkeld. Door het ontbreken van geur aan het gebruikte waterstofgas is de lekdetectie via het menselijk reukorgaan weggenomen. Dit zorgt voor het aanbrengen van extra detectiesensoren en een automatisch veiligheidssysteem. Voor een testfase is dit nog wel te doen, maar bij een grote uitrol van waterstofgas in de gebouwde omgeving zal het ontbreken van een odorant leiden tot vertraging in installatietijd en verhoging van de installatiekosten. Daarnaast zal gekeken moeten worden naar de blijvende betrouwbaarheid van de detectieapparatuur op langer termijn.

Het advies in deze is, daar waar mogelijk, altijd een odorant aan het waterstof toe te voegen, zodat bij vrijkomen van waterstof in de omgeving een alarmerende functie ontstaat voor de mens. Dit is dan gelijk aan de huidige situatie met geodoriseerd aardgas.

Wat eveneens helpt voor hulpverleners (zoals de brandweer) en installatiemedewerkers is dat zij bij aankomst en binnenkomst van de woning kunnen zien dat het object wordt verwarmd middels een alternatief duurzaam gas, in dit geval waterstof. Zo zijn zij op de hoogte van de aanwezigheid van dit alternatieve gas in de gasinstallatie en kan men met de juiste maatregelen de werkzaamheden aanvangen.

Het advies is om een waarschuwingssticker op de gasmeter aan te brengen dat er waterstof in de woning aanwezig is en tevens op de in zicht zijnde waterstofleidingen leidingstickers en/of een markering aan te brengen. Zo ook dient op de cv-ketel duidelijk waarneembaar te zijn dat het gaat om een waterstof cv-ketel en in eerste instantie enkel toegankelijk is voor gecertificeerd opgeleid personeel. Dit alles om zo veilig mogelijk bij eerste aanleg, gedurende de levensduur van de verwarmingsinstallatie, bij modificatie en uitbreiding van de gasleiding alsook bij het verwijderen van de verwarmingsketel dan wel installatie te kunnen werken.

Spoelen

Ter voorkoming van een (brandbaar) waterstofgas/lucht mengsel in de gasleidingen, hebben wij stikstof gebruikt om lucht of waterstofgas uit de leidingen te verdrijven. Dit spoelen van de gas binnenhuisinstallatie zijn werkzaamheden die niet tot de standaard werkzaamheden van de gemiddelde installateur behoren. Het invoeren van stikstof is een lastige klus gebleken, vooral omdat dit geleidelijk moet gebeuren onder de juiste druk en de juiste hoeveelheid. gAvilar heeft, gedurende dit project, een spoelinrichting ontwikkeld dat het spoelen enorm heeft vereenvoudig. Dit neemt niet weg dat het spoelen van de binnenhuisinstallatie tijdrovend is en vraagt om specifieke kennis en vaardigheden van de monteurs. Voor een testfase is dit nog wel te doen, maar bij een grote uitrol van waterstofgas in de gebouwde omgeving zal het spoelen van de binnenhuisinstallatie leiden tot toename van de installatietijd en verhoging van de installatiekosten. Daarnaast zal gekeken moeten worden naar een vorm van certificering en de aantoonbare competenties van de monterende bedrijven en zijn medewerkers. Medewerkers dienen geschoold te worden en de geschikte apparatuur aangeschaft en periodiek gekeurd te worden. Het zorgt voor een beperking van het aantal bedrijven en personen die werkzaamheden aan waterstofgasinstallaties mogen uitvoeren. En er moet voldoende stikstof op het werk aanwezig zijn.

Lekdichtheidsbeproeving

Ter controle op de lekdichtheid van de waterstofgasinstallatie ontbreken richtlijnen. Dit zorgt ervoor dat we op meerdere momenten en met verschillende mediums (stikstof en waterstofgas) een dichtheidstest hebben gedaan. Dit is tijdrovend en leidt tot hogere installatiekosten.

Daarnaast hebben wij geen drukstoot tijdens de dichtheidstest kunnen uitvoeren, wat bij aardgas wel gebruikelijk is. Bij een nieuwe aardgasleiding wordt alle meet- en regelapparatuur afgekoppeld en een drukstoot gegeven, waarna enige tijd wordt gemeten om de druk stabiel blijft. Nadat de druk stabiel is gebleven wordt de meet- en regelapparatuur aangesloten en een tweede dichtheidstest gedaan met de normale werkdruk. Bij de waterstofgas leiding zal het aansluiten van meet- en regelapparatuur, na de drukstoot, leiden tot zuurstof toetreding in de leidingen, waarna er gespoeld moeten worden met stikstof. Het risico dat tijdens die handelingen, het plaatsen van het meet- en meetregelapparatuur en het spoelen alsnog een lekkage zal kunnen ontstaan lijkt ons groter dan het voordeel van de drukstoot. Mede ook omdat er geen verbindingen zijn gebruikt (vetten of pasta's) die bij een drukstoot zouden bezwijken.

Voor een testfase, waarin er extra veiligheidsmaatregelen waren opgenomen is deze afwijking van de richtlijn verklaarbaar, maar bij een grote uitrol van waterstofgas in de gebouwde omgeving zal onderzocht moeten worden welke voor- en nadelen kleven aan het geven van een drukstoot in een nieuwe waterstofgasbinnenleiding.

Leveringszekerheid

De waterstofgas installatie op de The Green Village was voor bijna alle betrokkenen een test/pilotfase. Dit zorgde ervoor dat de betrouwbare en onbelemmerde levering van warmte en warmtapwater minder hoog is dan we gewend zijn met een aardgasgestookte cv-ketel. Het aantal malen dat er geen warmte kon worden geleverd, doordat ergens in de keten een onvolkomenheid heeft opgetreden is veel hoger dan we gewend zijn. Dit zorgde ervoor dat onze dienstdoende monteur, soms buiten werktijden, een aantal keren de noodvoorziening in bedrijf heeft moeten stellen. Bij een vervolgpilot zal extra gekeken

moeten worden naar het beperken van de leveringsuitval en er moet minstens een achterwacht met noodvoorziening paraat staan.

Ontwikkeling van de ESV

De onbekendheid van waterstof en daarmee samenhangende normen en regelgeving remden de opstart van het project. Toepassing van de elektronica en delen van de print zouden we nu achteraf anders doen.
Het afkaderen van de projectgrenzen heeft in de eerste fase veel tijd gekost. Samenwerking binnen de diverse facetten in dit projectteam en het delen van expertise van de verschillende partijen vergde enige gewenning. Beter en eerder toegankelijk maken van beschikbare kennis en het openlijk delen van (kostbare) kennis zou het projectresultaat positief hebben beïnvloed.
Het ontwikkelen van een robuuste industriële print heeft veel inzichten gegeven in componentkeuzes en ontwikkeltechnieken
De slechte leverbaarheid van componenten heeft de ontwikkeling vertraagd doordat door lange levertijden de print een aantal keer is aangepast met andere componenten die beter leverbaar waren. Het beter inspelen op deze markt zou de ontwikkeling verbeteren.

Toetreden lucht bij afsluiten

Tijdens één van de keren dat de installatie opnieuw in bedrijf werd gesteld, werd tijdens het spoelen van een leiding die tijdens uit bedrijf name met stikstof gevuld was achtergelaten, zuurstof gemeten. Het vermoeden is dat er lucht binnendringt op momenten dat een afgesloten gedeelte van de installatie op onderdruk staat ten opzichte van de atmosferische druk. Deze onderdruk kan ontstaan door temperatuurschommelingen en variaties in de atmosferische druk. Getolereerde lekken van het systeem liggen in de orde van grootte van tientallen cc per uur. Over enkele dagen verspreid kan dit theoretisch genoeg zijn om lucht in het systeem binnen te laten dringen.
Vanwege dit fenomeen zijn aanvullende proeven gedaan met alle 3 leidingen individueel en is gekeken naar de drukval over een bepaalde periode. Hierbij zijn de afzonderlijke leidingen bij de gasmeter en de ketel afgesloten. Uit de tests komt naar voren dat de positie van de leidingen en het materiaal een grote invloed hebben op het verloop van de druk in de tijd bij stilstand. Temperatuur invloeden, variërend over het leiding tracé, in combinatie met de verschillende leiding diameters, bepalen het drukverloop in de leiding. Waar de geconstateerde zuurstof vandaan komt en hoe deze in de leiding komt, dient nader onderzocht te worden.
Waterstof heeft een UEL van 76%. Dit is veel hoger dan bij aardgas (16%). Dit betekent dat bij waterstof door toetreding van lucht eerder een brandbaar mengsel zal ontstaan. Dit mengsel kan echter alleen ontbranden als het wordt ontstoken (of zeer sterk verhit). Drie vragen dienen zich daardoor aan:

1. Komt dit inderdaad algemeen voor of is er iets anders aan de hand geweest ?
2. Hoe snel verloopt het proces van toetreding van lucht, wat zijn de invloedfactoren en kan dit bijvoorbeeld ook optreden als het gas op druk staat ?
3. Kan een gas worden ontstoken in een dichte installatie ?

Het beantwoorden van deze vragen valt niet binnen de scope van het H2@Home-project en geeft aanleiding tot nader onderzoek. Het verdient de aanbeveling voor andere projecten om alert te zijn op dit mogelijke fenomeen.

Voor verder onderzoek zullen de gedemonteerde leidingen verder getest worden op een andere locatie onder laboratorium omstandigheden, met het doel hier verdere conclusies aan te kunnen verbinden.

Demarcatiepunt

In Nederland zijn heldere afspraken gemaakt over verantwoordelijkheden bij het gebruik van aardgas. In de meeste gevallen is de gasmeter het koppelvlak. Tot en met de gasmeter is het de verantwoordelijkheid van de netbeheerder en na de gasmeter (bv. de huisinstallatie) is het de verantwoordelijkheid van de huis- of gebouweigenaar. Dat heeft jarenlang goed gefunctioneerd omdat enerzijds de installatie eenvoudig was en anderzijds er een aantal grote installatiebedrijven waren die het installeren van de huisinstallaties uitvoerden. Deze grotere leveranciers stellen eisen aan de kennis en kunde van hun personeel.

Naar onze mening zijn er twee grote veranderingen gaande Ten eerste dat door de energietransitie worden de huisinstallaties steeds complexer worden. Een tweede grote verandering is de opkomst van heel veel kleine zelfstandigen.
Kijkend naar de eerste verandering kan worden gesteld dat, in tegenstelling tot één enkele cv-ketel, er nu een veelvoud van technieken worden gebruikt. Zonnepanelen, warmte terugwin installatie, diverse manieren om energie op te slaan zijn hiervan enkele voorbeelden. Een bijkomend probleem is dat alle leveranciers op hun eigen wijze het beheer met diverse apps regelen waardoor er ook een lappendeken van beheertoepassingen ontstaat.
Met de opkomst van het grote aantal kleine zelfstandigen is er druk op het behalen van de juiste certificaten ontstaan. Zonder deze groep tekort te willen doen zijn er toch een behoorlijk aantal 'cowboys' die installatie werkzaamheden verrichten zonder te beschikken over de juiste papieren. Dit wordt mede veroorzaakt doordat de opdrachtgevers, in veel gevallen particuliere huiseigenaren, eerder kijken naar een lage prijs dan naar gekwalificeerd personeel.
Gelet op de deze twee grote veranderingen is op basis van de opgedane ervaringen in dit project een heroriëntering over verantwoordelijkheden van de gehele installatie het overwegen waard.

Waterstofnet

De regionale netwerkbedrijven in Nederland zien de waarde van waterstof in de energietransitie.
Waterstof is een energiedrager en een duurzame brandstof die onder andere kan worden ingezet in de industrie, voor mobiliteit en in de gebouwde omgeving. Ook kan waterstof een systeemfunctie vervullen binnen het energiesysteem zelf, bijvoorbeeld bij de omzetting van elektriciteit naar gas. De netbeheerders hebben samen met de overheid en andere Klimaatakkoord-partners uitgesproken dat ze waterstof vanaf 2030 als mogelijke extra oplossing willen kunnen inzetten voor het duurzaam verwarmen van woningen en bedrijfspanden. Dat is de reden dat de zij zich gezamenlijk ten doel hebben gesteld om op tijd klaar te zijn om waterstof op een veilige en betrouwbare wijze te kunnen distribueren door de bestaande (aard)gasnetten.

Om dit doel te kunnen halen hebben de regionale netwerkbedrijven via Netbeheer Nederland de handen in een geslagen om samen over waterstof(distributie) meer kennis en ervaring op te doen. Hiervoor is met elkaar een onderzoeksroadmap opgesteld. In deze roadmap zijn onderzoeksvragen geclusterd in vier hoofdcategorieën:

- Klant en Product
- Infrastructuur
- Omschakelen (van aardgas naar waterstof)
- Marktsamenwerking

De hoofdonderzoeksvragen zijn in deze clusters benoemd en in de tijd uitgezet. Per hoofdonderzoeksvraag zijn deelvragen benoemd die samen de hoofdvraag beantwoorden.

Om versnelling te brengen in het uitvoeren van de onderzoeken, zijn de Netwerkbedrijven aangesloten bij het waterstofonderzoeksprogramma Hydelta. De onderzoeken bestaan uit literatuur- maar ook praktijkonderzoeken zoals experimenten. De resultaten leveren vooral veel kennis op. Deze kennis is benodigd om op een veilige en met beproefde methodes ervaring op te kunnen doen. Deze ervaringen worden opgedaan in de pilotprojecten zoals o.a. de WaterstofStraat bij The Green Village,

Meer informatie onderzoeken en de pilotprojecten is te vinden op
https://www.netbeheernederland.nl/dossiers/waterstof
https://hydelta.nl/

Samengevat

Met name is verder onderzoek mogelijk en gewenst naar een aantal onderwerpen, onder te verdelen in technische en maatschappelijke thema's:
Wat betreft de technische onderwerpen is verder onderzoek gewenst naar:

- Is te achterhalen wat de achtergrond/oorzaak is geweest van de eenmalige aanwezigheid zuurstof in de leidingen?
- In het kader van de eerste vraag: is het afpersen volgens de in H2@Home gebruikte methode afdoende voor alle (met name "bestaande") installaties?

- In welke situaties/ na welke activiteiten en/of verstoringen is het spoelen van de leidingen noodzakelijk?
- Is de in het project H2@Home ontwikkelde manier van spoelen optimaal en/of nog te verbeteren?
- Wat is de minimale veiligheidsinstallatie die noodzakelijk wordt geacht in woningen?

Wat betreft de maatschappelijke onderwerpen is verder onderzoek gewenst naar:

- De vraag naar minimaal geaccepteerde veilgheid is ook van toepassing op het verdere maatschappelijke onderzoek. Er zullen meerdere tests moeten worden uitgevoerd om de maatschappelijke acceptatie voor toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving te vergroten.
- Tenslotte zullen gegevens van alle verschillende tests en proeven moeten worden gebundeld zodat er uiteindelijk ook wet- en regelgeving kan worden opgesteld.
- Het is vooral belangrijk om op verschillende plaatsen tests uit te voeren, zodat meerdere netbeheerders en installateurs, als ook gemeenten, handhavers en bewoners ervaring kunnen opdoen.
- Op het gebied van de distributie, hetgeen buiten de scope van het project H2@Home valt, zijn er nog verdere onderzoeken noodzakelijk. Deze worden nader verwoord en toegelicht in de rapportage van de netbeheerders naar aanleiding van de test op The Green Village in Delft.

Bijdrage aan waterstofeconomie

Het project H2@Home heeft, naast de hiervoor omschreven directe projectresultaten, op meerdere manieren bijgedragen aan de totstandkoming van een waterstofeconomie. Enkele voorbeelden hiervan staan hieronder beschreven.

Kennisdeling

De opgedane kennis is en wordt op meerdere manieren gedeeld:

- Op twee events op The Green Village zijn de resultaten gedeeld; één bijeenkomst was voor een breder publiek, hiervoor kon men zich vrij inschrijven. Kennisdeling bij deze bijeenkomst was meer gericht op de mogelijke gevolgen voor huiseigenaren bij een wissel van aardgas naar waterstof. Het andere event was gericht op bedrijven en instanties, waar meer inhoudelijk werd ingegaan op de technische details en uitkomsten.
- Met andere lopende en voorgenomen projecten op het gebied van de toepassing van waterstof in de bewoonde omgeving, onder andere door het delen van de risicoanalyses en ervaringen.
- Door de publicatie van dit rapport.

Bijdrage aan onderwijs- en onderzoeksactiviteiten

Naast een praktische bijdrage aan het verderop omschreven onderzoek 'Heating Studies' van de Haagse Hogeschool, heeft H2@Home ook een bijdrage geleverd aan:

- een promotieonderzoek aan de TU Delft naar methoden voor risicoanalyse
- een minor-onderzoek aan de TU Delft naar acceptatie van bewoners voor waterstof binnenshuis.

Bijdrage aan ontwikkeling waterstofnet

De rol van de regionale netbeheerders in dit project was het zorgen voor de distributie van waterstof naar de woning waarbij veiligheid, betrouwbaarheid en kwaliteit (conform specificaties) belangrijke parameters zijn.

Het starten van de WaterstofStraat op The Green Village heeft de netbeheerders tot actie overgezet om actief over deze zaken na te denken en daarmee de onderzoek roadmap binnen Netbeheer Nederland aan te vullen en uit te voeren. Deze onderzoeken richten zich vooral op de techniek (aantonen geschiktheid gasnet en gereedschappen) en veiligheid (beheersmaatregelen, werkinstructies, veiligheidsafstanden en risico-inventarisaties). De resultaten van de onderzoeken hebben inzicht verschaft om op een betrouwbare en controleerbare manier een waterstofnetwerk in- en uitbedrijf te kunnen nemen en deze op een veilige wijze te kunnen beheren.

Niet alleen op technisch vlak heeft dit project inzichten gegeven. Door ook actief overheden en vergunningverlenende instanties in dit project te betrekken, heeft dit geleid tot inzichten in de uitdagingen waarvoor overheden en veiligheidsregio's staan in de transitie om (in plaats van aardgas) een woning door middel van waterstof te verwarmen. Door met elkaar samen te werken heeft dit geleid om van elkaar te leren en stappen te zetten zodat met vertrouwen er een vergunning is verstrekt om dit project te mogen uitvoeren. Deze ervaringen helpen ons om de vervolgstappen te kunnen zetten om onze waterstofpilotprojecten in daadwerkelijke woonwijken te vervolgen en een grotere uitrol in waterstofactiviteiten mogelijk te maken.

De combinatie van de projecten H2@home en de WaterstofStraat van de regionale netbeheerders bij The Green Village zijn ook als podium of platform gebruikt om aan het grote publiek te laten zien dat waterstof in het bestaande aardgassysteem (netwerk en verbruikers) op een veilige en betrouwbare manier gebruikt kan worden en daarmee een bijdrage kunnen leveren aan de energietransitie.

Hiermee hopen de netbeheerders ook andere leveranciers, overheden en gebruikers te inspireren om ook te ontwikkelen op het gebied van waterstof en te onderzoeken of hun componenten en diensten geschikt zijn voor de toepassing met waterstof.

Betrokkenheid gehele keten

In het project H2@Home is de hele keten betrokken geweest. In het project zijn producenten van componenten, netbeheerders, een installateur, ketel-producent als ook eindgebruikers (bewoners) en certificerende instanties (Kiwa) betrokken geweest. Dit maakt het project in zijn vorm dan ook uniek, mede omdat alle testen in de woning inclusief het transport door de WaterstofStraat hebben plaatsgevonden.

Het is ook gebleken dat met name op het demarcatie punt (van gasnet naar binnenhuis installatie) de uitdaging het grootst is; hier vindt de druk-reductie plaats en wordt de spoelinstallatie aangesloten. In dit gebied (rondom de gasmeter) zitten ook de eventueel benodigde veiligheidsmaatregelen, die het complex maken. Mede door de brede opzet is er veel tijd gestoken in communicatie en afstemming, hetgeen niet altijd eenvoudig bleek te zijn.

Afspraken met betrekking tot de verantwoordelijkheden zijn uitermate belangrijk; wie is verantwoordelijk voor de installatie en tot op welk niveau. Zoals gebruikelijk bij aardgas installaties was de installateur verantwoordelijk voor de binnenhuisinstallatie en de netbeheerder voor de toevoerinstallatie. Onderlinge afstemming tussen beide verantwoordelijken verliep uitstekend en is bepalend gebleken voor het bereikte resultaat.

Lessons-learned: toepassing voor andere projecten

Uiteindelijk is de installatie in gebruik gesteld en is er waterstof door de hele installatie (van H_2- invoed-installatie tot en met de verbrandingsketel) gestroomd.

Nagenoeg alle mogelijke verstoringen van een “normaal” gebruik hebben zich, al dan niet actief opgewekt, voorgedaan. Van een storing op de verwarmingsketel tot en met een storing in de levering van waterstof is voorgekomen. Meerdere malen is gebleken dat de huidige wet- en regelgeving zoals van toepassing is op aardgas installaties, niet afdoende is voor waterstof installaties.

Wel is duidelijk aangetoond dat met aanvullingen op de wet- en regelgeving zoals die zijn uitgewerkt en uitgevoerd door het H2@Home team, er een veilige en werkende situatie mogelijk is. Voor een grote uitrol van waterstof in de maatschappij verdient het de aanbeveling om de “lessons learned” verder uit te werken en om te zetten in aangepaste wet- en regelgeving.

Voor een praktische uitvoering daarvan zullen nog meerdere installaties moeten worden opgezet en in bedrijf gesteld. De veiligheidsmaatregelen in het project H2@Home zijn te veel omvattend voor een massale uitrol. Er zal gekeken moeten worden welke veiligheidsmaatregelen noodzakelijk zijn.

Representatieve situatie

Er is getest in een woning zoals deze standaard gebouwd werden in de jaren 70. De uitdaging van de energietransitie ligt namelijk op het terrein van de bestaande bebouwing. Daarom is dit type woning gekozen en zijn materialen gebruikt zoals in deze woningen gebruikelijk zijn. Het verwarmingssysteem (achter de ketel) en het tapwater systeem is niet gewijzigd.

Tocht- en temperatuurswisselingen in de woning, welke op labniveau zeer moeilijk na te bootsen zijn, hebben een effect op het waterstofgas in de leidingen. Ook dit is geanalyseerd, zodat procedures en standaarden hierop kunnen worden afgestemd.

Subsidie-doelstellingen

H2@Home is uitgevoerd met Topsector Energiesubsidie van het Ministerie van Economische Zaken.

Eén van de onderwerpen binnen de subsidieregeling waar H2@Home onder valt is ‘toepassing van waterstof in de bestaande gebouwde omgeving voor de invulling van de warmtevraag voor ruimteverwarming en warm tapwater, dan wel voor opwekking en opslag van decentrale elektriciteit.’ De verkorte algemene doelstelling is het realiseren van kostenreductie voor de inzet van waterstof als energiedrager, door directe verlaging van benodigde kosten en/of verbeterde efficiency en betrouwbaarheid. Hierbij moet zicht zijn op robuuste business cases waarbij rekening wordt gehouden met maatschappelijke inbedding en acceptatie bij de belangrijkste stakeholders voor implementatie van de innovatie.

Het project H2@Home heeft aan deze doelstellingen bijgedragen:

- Binnen het project is duidelijk aangetoond dat toepassing van waterstof als energiedrager in een bewoonde woning goed mogelijk is met gebruik van materialen (zoals leidingen, drukregelaar, kranen, meterbeugel) zoals deze nu ook worden toegepast voor aardgasinstallaties. De gasmeter is af-fabriek licht aangepast en functioneert voor zover na te gaan in dit project ook naar behoren. De ketel is wel nieuw. Het kunnen gebruiken van bestaande materialen levert bij uitgebreidere toepassing grote besparing op: nieuwe installaties kunnen worden gemaakt van onderdelen die al op de markt zijn én bestaande installaties kunnen na een goed doorlopen lektest worden hergebruikt. De precieze werkwijze en eisen om een bestaande installatie te keuren zullen nog wel moeten worden vastgesteld (zie ook de aanbevelingen).
- Eisen met betrekking tot de veiligheid, in combinatie met onzekerheid over de noodzaak doordat er nog zeer weinig ervaring is bij deze toepassing, hebben er toe geleid dat de veiligheidsinstallatie die is toegepast buitenproportioneel duur en uitgebreid was. De ervaringen opgedaan tijdens H2@Home worden nuttig gebruikt in de discussie over nut en noodzaak van deze maatregelen. Hierbij gaat het om een afweging tussen kosten, veiligheid en maatschappelijke acceptatie. H2@Home kan op dit gebied niet dé antwoorden geven zo die er zijn, maar levert wel een bijdrage aan de totstandkoming van dit antwoord.
- Door ook ruimte te bieden aan veiligheidsmaatregelen die nog geen algemeen goed zijn voor aardgasinstallaties maar met de huidige stand van techniek goed mogelijk zijn, worden nieuwe paden voor beveiliging geopend die op den duur kostenbesparend kunnen zijn. Hierbij gaat het vooral om ‘slimme’ toepassingen zoals het detecteren van lek door het combineren van informatie van de ketel en de gasmeter, of door het koppelen van de rookmeldinstallatie aan een afsluiter in de gastoevoer.
- Door toepassing van een retrofit toevoeging op de huisdrukregelaar, die hierdoor als veiligheidsklep kan dienen, is een kosten-efficiënte manier van beveiliging onderzocht. Het zal vooral van de discussie over het al dan niet wenselijk zijn van afsluiten in geval van alarm afhangen of deze toepassing ook daadwerkelijk ingezet zal worden.
- Als spoelen inderdaad noodzakelijk of zeer gewenst blijkt, zal dit een verhoging van de kosten betekenen ten opzichte van de situatie met aardgas, zowel voor materiaalkosten als onderhoudskosten. Het consortium H2@Home beveelt daarom ook aan om na te gaan of spoelen inderdaad noodzakelijk is. Tegelijk kan door de ervaringen van H2@Home worden aangegeven wat de aanbevolen plaatsing is van de spoelpunten én is tijdens het project een spoelinstallatie ontwikkeld voor installateurs waarmee snel en veilig kan worden gespoeld.

Spin off binnen en buiten de sector

Kennisoverdracht / link met pilotprojecten op grotere schaal

De ervaringen die in de project H2@home en de WaterstofStraat op The Green Village zijn opgedaan vormen de basis voor verschillende pilotprojecten van de netbeheerders. In deze pilotprojecten worden de gasnetten in reguliere woonwijken en later ook steden overgezet van aardgas naar waterstof. De kennis en kunde die bij H2@home is opgedaan is daarbij zeer waardevol. Niet alleen voor de netbeheerders zelf, maar het zorgt ook voor comfort en vertrouwen aan de andere stakeholders, waaronder de bewoners. Daarom worden de ervaringen binnen de netwerkbedrijven gedeeld in diverse gremia. Zo is er binnen Netbeheer Nederland het team Netwerken voor Duurzame Gassen (NDG) en de Onderzoeksgroep H2 (OGH2) die bestaan uit leden vanuit de netwerkbedrijven die actief betrokken zijn bij waterstofpilots- en onderzoeken. Deze leden zijn veelal betrokken bij het onderzoeksprogramma Hydelta waarin diverse onderzoeken worden uitgevoerd naar Waterstof in de bebouwde omgeving. De rapporten van deze onderzoeken worden via de website van Netbeheer Nederland en Hydelta vrij ter beschikking gesteld.

Daarnaast worden alle ervaringen die worden opgedaan in de waterstofpilotprojecten gedeeld in het sector pilotoverleg binnen Netbeheer Nederland zodat de kennis wordt verspreid.

Onderzoek efficiënte warmtevoorziening

Het feit dat een werkende waterstof installatie aanwezig was op The Green Village leidde ertoe dat de Haagse Hogeschool, die onderzoek doet naar de efficiency van waterstof installaties, ook data heeft verzameld in de woning. Zo zijn metingen van waterstof verbruik gekoppeld aan geleverde warmte in de woning. Kleine aanpassingen met betrekking op nauwkeurigheid van metingen zijn hiervoor gemaakt.
De gebruikte verbrandingsketel is een vorm van gebruik van waterstofgas. Andere vormen, zoals het gebruik van een brandstofcel, zijn niet in deze woning maar elders getest. Resultaten kunnen wel met elkaar worden vergeleken. Hierdoor ontstaat een beeld van verbruik en efficiency. Op basis daarvan, zo is de verwachting, kan in de toekomst per situatie bepaald worden welke oplossing de meest optimale is.

Publicaties en contact

Publicaties H2@Home

Dit rapport is de enige publicatie vanuit het H2@Home consortium en is te vinden op de site https://www.thegreenvillage.org/ (zoeken op 'H2@Home') en op www.impactsmartsolutions.com.

Publiciteit en bezoekers

The Green Village is een living lab waar belangstellenden vanuit diverse beroepsgroepen inspiratie opdoen op het gebied van de duurzame vernieuwing in de gebouwde omgeving. Voorlichting naar de pers over H2@Home vond ook voornamelijk plaats vanuit The Green Village. Dit heeft geleid tot onderstaande artikelen en aantallen bezoekers.

10-11-2021 Architectenweb H2@Home https://architectenweb.nl/nieuws/artikel.aspx?ID=51068
10-11-2021 Installatienet.nl H2@Home https://www.installatienet.nl/eerste-woning-met-individuele-aansluiting-op-ondergronds-waterstofnet/
10-11-2021 Installatie H2@Home https://www.installatie.nl/nieuws/eerste-woning-op-ondergronds-waterstofnet/
10-11-2021 Change Inc. H2@Home https://www.change.inc/energie/het-eerste-huis-dat-waterstof-in-plaats-van-gas-gebruikt-staat-in-delft-37317
11-11-2021 Duurzaam Gebouwd H2@Home https://www.duurzaamgebouwd.nl/artikel/20211111-europese-primeur-woning-op-ondergronds-waterstofnet
11-11-2021 Indebuurt Delft H2@Home https://indebuurt.nl/delft/nieuws/europese-primeur-deze-delftse-woning-werkt-op-waterstof~142877/
16-11-2021 Installatie&Bouw H2@Home https://www.installatieenbouw.nl/artikel/eerste-woning-aangesloten-op-waterstof/
22-2-2022 De Telegraaf H2@Home https://www.telegraaf.nl/lifestyle/1294751330/koken-en-stoken-we-straks-thuis-op-waterstof
19-4-2022 NPO Radio 1 H2@Home https://www.nporadio1.nl/uitzendingen/geld-of-je-leven/2859fd87-2836-4a1d-80e2-b037ef5eaa31/2022-04-19-geld-of-je-leven

Het aantal bezoekers dat kennis heeft gemaakt met H2@home is 3105 (periode: maandag 3 januari tot en met vrijdag 1 juli 2022).

Contactpersonen

Voor meer informatie over H2@Home kunt u contact opnemen met onderstaande personen:

Materialen binnen-installatie en aansluiting op het net (Peko)
dhr. Ben Mureau, Aalberts hydronic flow control ben.mureau@aalberts-hfc.com

Drukregeling, afsluitbare regelaar:
mw. Lianne Mostert, gAvilar, lianne.mostert@gavilar.nl

Installatie, werkprocedures, spoelprocedures
dhr. Mark Sprenkels, Breman, m.sprenkels@breman.nl

Locatie The Green Village (TU Delft)
mw. Lidewij van Trigt, The Green Village lidewij.vantrigt@thegreenvillage.org

Dataplatform, veiligheidsinstallatie:
dhr. Pieter Hoenderken, Het Internet Huis, p.hoenderken@impact-is.com

Voor meer informatie over de waterstof cv-ketel kunt u contact opnemen met:
Ing. R.W. van den Tempel, Remeha, raymond.van.den.tempel@remeha.nl

Literatuurlijst / leessuggesties

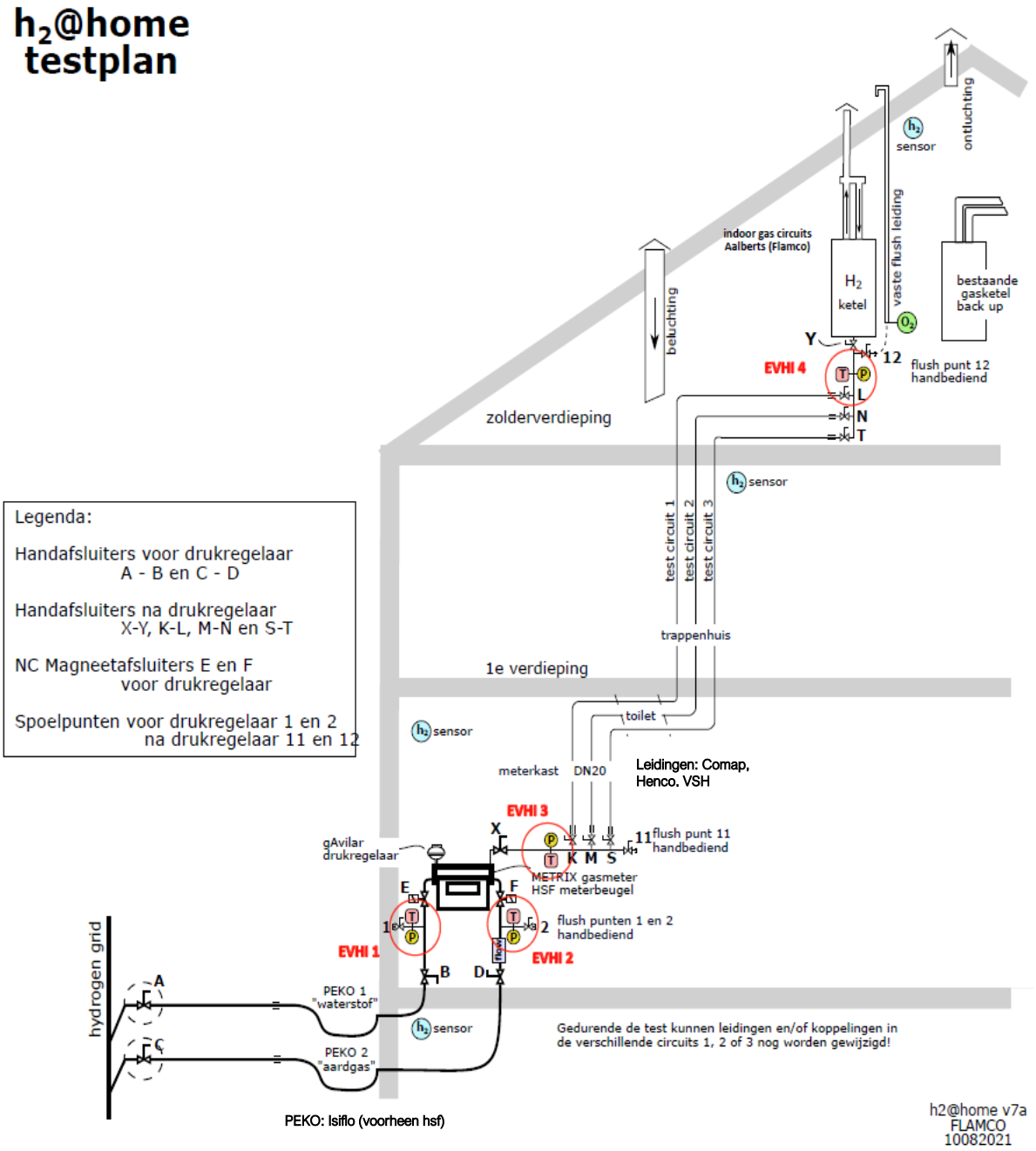
Onderstaande bronnen zijn gebruikt bij het opstellen van de risico-inventarisatie.

1. 'Safety_Planning_for_Hydrogen_and_Fuel_Cell_Projects_Release1p31_20190705'; FCH 2 JU; https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Safety_Planning_for_Hydrogen_and_Fuel_Cell_Projects_Release1p31_20190705.pdf
2. 'HyIndoor, pre-normative research on safe indoor use of fuel cells and hydrogen systems', by Béatrice l'hostis, air liquide, et al., www.hyindoor.eu.
3. HyIndoor rapport '*Work Package 5: Widely accepted guidelines on Fuel Cell indoor installation and use - Hyindoor- Pre-normative research on safe indoor use of fuel cells and hydrogen systems, Technical Report, January 2015, Simon Jallais, Elena Vyazmina et al.*
4. 'D6.3_HyResponse_EuropeanEmergencyResponseGuide_V10-20161031_FinalVersion'; ENSOSP; http://www.hyresponse.eu/public_deliverables/D6.3_HyResponse_EuropeanEmergencyResponseGuide_V10-20161031_FinalVersion.pdf
5. 'Risicoanalyse waterstofdistributie, Alliander'; DNV-GL; rapport No. OGNL.172353, 22 november 2018; https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Waterstof_56_392cd0302d.pdf
6. ISO/TR 15916 Basic considerations for the safety of hydrogen systems
7. 'Proefopstelling verspreiding waterstof in de meterkast, Alliander N.V.; DNV-GL, rapportnr. OGNL.101302828-071; 20 februari 2020; https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Waterstof_56_a100f0a377.pdf
8. 'hydrogen pipeline systems, IGC Doc 121/14'; EIGA;
9. 'testing hydrogen admixture for Gas Applications, non-combustion related impact of hydrogen admixture - material compatibility; THyGa/FCH-JU;
10. 'plan voor waterstof in Hoogeveen, publiek rapport 2020'; waterstof Hoogeveen; https://www.omgevingsweb.nl/wp-content/uploads/po-assets/363177.pdf
11. 'veiligheidsaspecten van waterstof in een besloten ruimte'; Instituut Fysieke Veiligheid; oktober 2020
12. 'safety issues surrounding hydrogen as an energy storage factor, HyHouse report' Kiwa Gastec, 2015
13. 'toekomstbestendige gasdistributienetten-GT170272-2018-07-05', Kiwa iov netbeheer nederland, 2018
14. 'KE214: Geschiktheid voor bijmenging tot en met 100% waterstofgas', KIWA, 2019
15. g-12-ld-aansluitleidingen-beproeven-op-sterkte-en-dichtheid-versie-15-04-2019, Stedin
16. g-11-nieuwe-ld-aansluitleidingen-en-meteropstellingen-veilig-aansluiten-en-in-bedrijf-nemen-versie-15-04-2020, Stedin
17. Abschlussbericht Einfluss von Wasserstoffanteilen im Erdgas auf Bauteile der Gasinstallation, DBI GTI; 2017

Diverse onderzoekrapportages mbt waterstof en naslagwerken zijn te vinden op:
https://www.netbeheernederland.nl/dossiers/waterstof-56/documenten

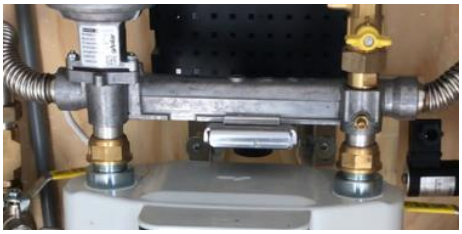
Zo ook zijn er recentelijk diverse eindrapportages over waterstof gepubliceerd vanuit HyDelta. Deze zijn te vinden op de website: https://hydelta.nl/research-programme

Bijlage A Installatie H2@Home: gasvoerende delen



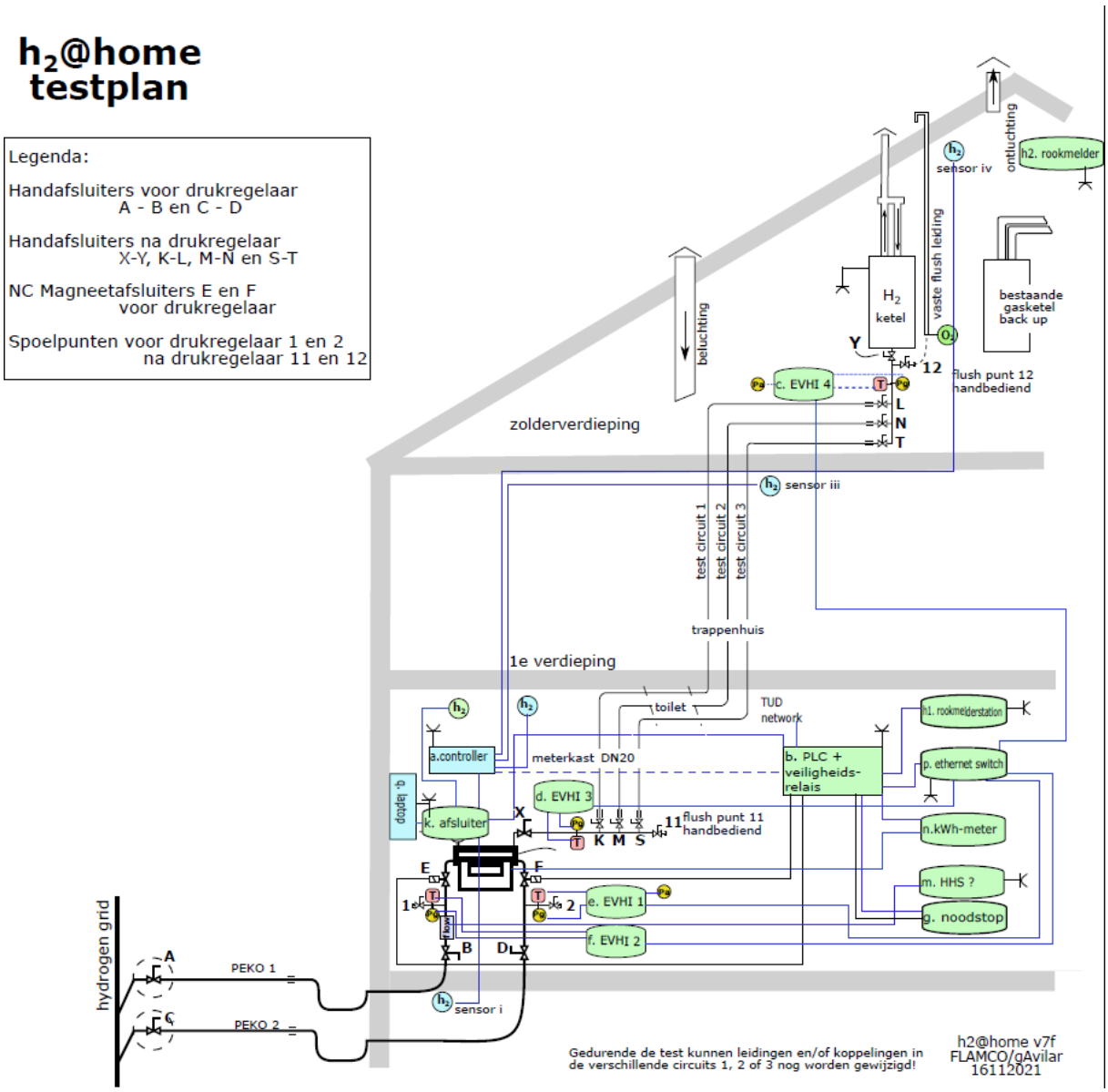
Lijst van onderdelen: zie volgende bladzijde

Benaming op tekening	Nadere omschrijving, foto	Leverancier / via
Hydrogen grid	WaterstofStraat, toeleverende netwerk	Stedin
A, C	Grondafsluiters in putjes	Stedin
PEKO 1, 2	Toevoerleidingen naar de meterkast	Isiflo (voorheen HSF)
B, D	Hoofdkraan	Stedin
Flushpunten 1, 2	Spoelpunten: T-stuk met kraan en slangaansluiting met dop	gAvilar
EVHI 1, 2	Temperatuursensor en absolute druksensor(en) inclusief uitlezing. De sensoren zijn op een dubbel T-stuk gemonteerd, de temperatuursensor in een zakbuis. Het effect van flow op de drukmeting bij deze meetwijze is voor de gedane metingen niet van belang geacht.	gAvilar
E, F	Magneetventielen	gAvilar / Madas

Drukregelaar met ssv	Drukregelaar WMRG met dichte ggb en ssv (overdrukbeveiliging), 	gAvilar
Meterbeugel	Meterbeugel, KE165 en KE214 gecertificeerd 	Isiflo (voorheen HSF)
Gasmeter	Balgengasmeter G4, aangepast voor waterstofmetingen Voor continue uitlezing is gebruik gemaakt van een advanced residential smart meter with modular communication	Apator Metrix Iskraemeco
Afsluiter X	Afsluiter	Aalberts Hydronic Flow Control
EVHI 3	Zie EVHI 1,2	gAvilar
Afsluiters K, M, S	Afsluiters voor de drie leidingen	Aalberts Hydronic Flow Control
Flushpunt 11	Zie flushpunten 1, 2	gAvilar
Test circuit 1, 2, 3	drie binnenleidingen: • Comap (MultiSkin perskoppelingen perslucht en gas) • Henco (PEXc/AL/PEXc Gasbuis) • VSH (Koperen leidingen met VSH Super knelfittingen) 	Comap, Henco, VSH (Aalberts Hydronic Flow Control)

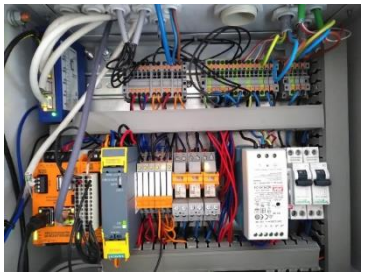
Afsluiters L, N, T	Afsluiters voor de drie leidingen	Aalberts Hydronic Flow Control
Flushpunt 11	Zie flushpunten 1, 2	gAvilar
EVHI 4	Zie EVHI 1,2	gAvilar
Afsluiter Y	Afsluiter direct vóór de ketel	Aalberts Hydronic Flow Control
H2-ketel	Ketel geschikt voor waterstof	Remeha
Indoor gas circuits Aalberts	Rookgasafvoer	Breman
Vaste flushleiding	Spoelleiding restrictie en meetpunten	Flamco (Aalberts Hydronic Flow Control) / gAvilar / Breman

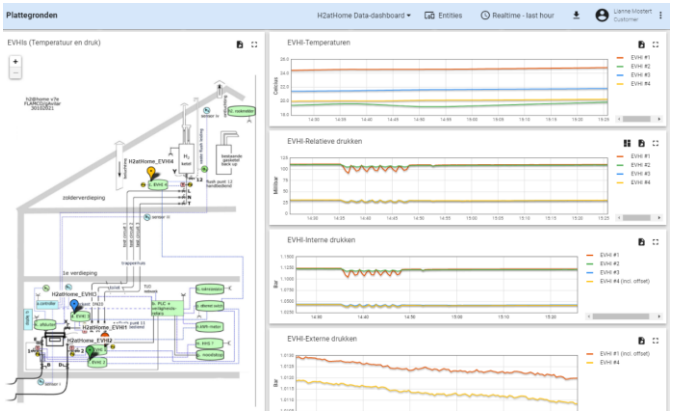
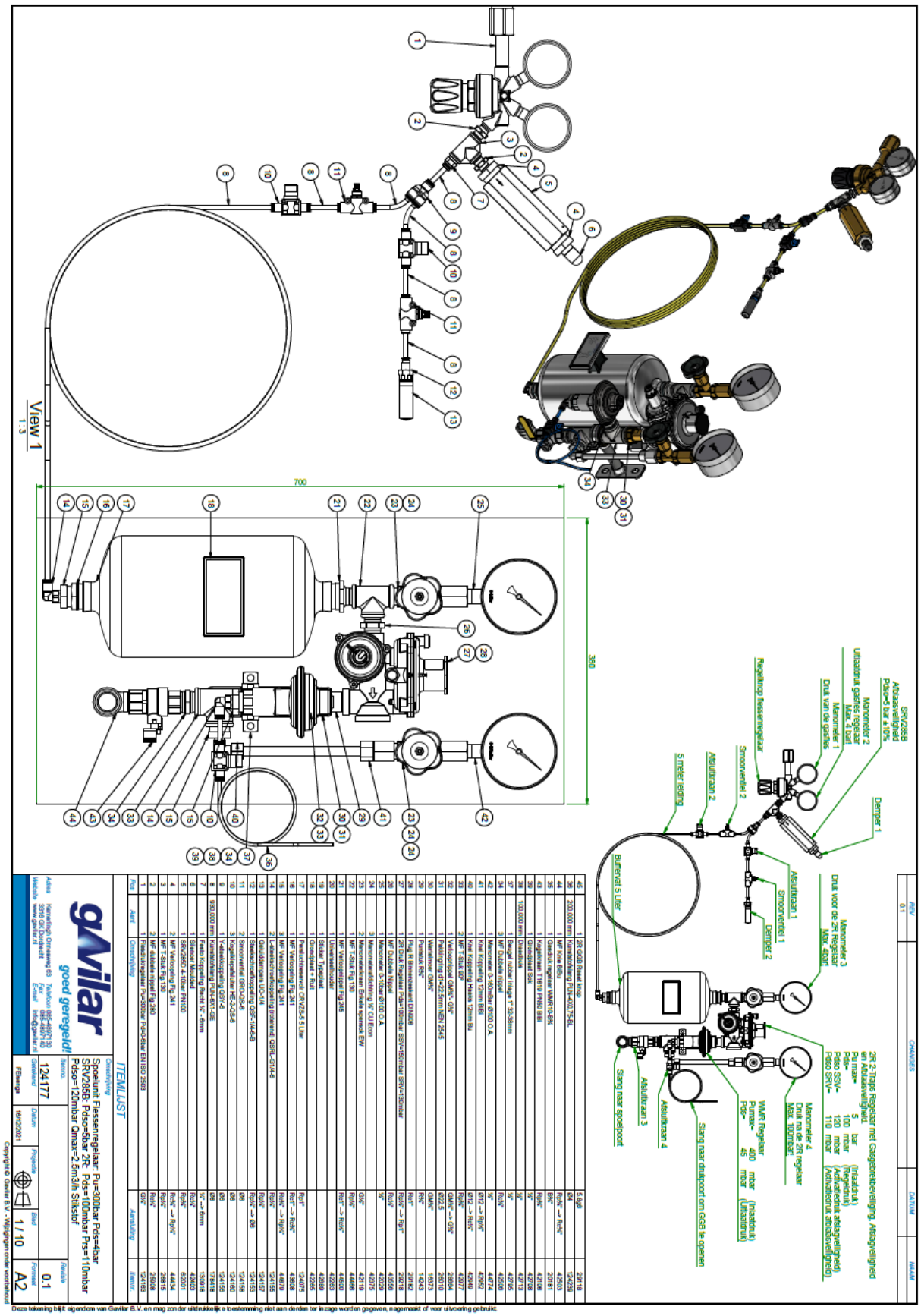
Bijlage B Installatie H2@Home: veiligheidssysteem



Omschrijving van de onderdelen van het veiligheidssysteem: zie volgende bladzijde.

Deze veiligheidsinstallatie is met nadruk geen blauwdruk voor veiligheidssystemen bij gebruik van waterstof in woonhuizen in het algemeen. Ze is op deze wijze aangelegd om alle denkbare risico's uit te sluiten en een vergunning te kunnen krijgen, en omdat het hier om een zeer specifieke situatie ging met diverse meetinstrumenten en niet-geodoriseerd gas.

Benaming op tekening	Nadere omschrijving, foto	Actie bij activering
a. **controller**	Bosean BH-50: controller van de gele H_2-sensoren	Laag alarm> 10 ppm (later: > 100 ppm): Waarschuwing naar monteur, afgesloten toevoer door middel van de magneetventielen. Hoog alarm > 800 ppm (> 400 ppm voor de kruipruimte) : Waarschuwing naar monteur, afgesloten toevoer, alarmsignaal in de woning.
b. PLC + veiligheidsrelais	Besturingskastje met daarin de 'PLC', voeding voor de magneetventielen en daaraan geschakelde veiligheidsrelais, verbonden met rookmelder, noodstop, controller van de H_2-sensoren, afsluiter op de regelaar. 	Alarmmeldingen van de rookmelder, de noodstop en de controller leidden zonder tussenkomst van de PLC tot een alarmsignaal in huis en het afsluiten van de magneetventielen. Het programma voor de PLC is geschreven door Het Internet Huis.
g. noodstop	Noodstop voor bewoner, voor als deze het idee heeft dat er iets niet klopt.	Melding naar monteur, magneetventielen sluiten, alarmmelding in huis. Deze noodstop is niet geactiveerd tijdens de gehele looptijd.
h. rookmelder	Rookmelder op zolder ! waterstofvlammen zijn niet goed zichtbaar en worden niet door elk type rookmelder herkend!	Bij melding van rook sluiten de magneetventielen.
k. afsluiter	een prototype van de ESV, gecombineerd met de gasdrukregelaar. De aansturing van de interne onderdelen vindt plaats via een door PIA Automation ontworpen en gerealiseerde printplaat.	Bij alarmmelding wordt de afsluiter geactiveerd. Omdat dit een prototype betreft, zijn aanvullend magneetventielen geplaatst.

E. en F. magneetafsluiter	Normally Closed magneetventielen	Bij alarmmelding sluiten deze ventielen de toevoer naar de binneninstallatie af (vanaf iets na de hoofdkraan in de meterkast).
Sensor i t/m iv	H_2-sensoren, geplaatst in de kruipruimte, meterkast, overloop en op zolder.	Alarmmelding via de controller (a.). De sensoren zijn daar bedraad op aangesloten. Bij verlies van verbinding schakelt het veiligheidsrelais.
Sensor v	H_2-sensor voor huishoudelijk gebruik van New Cosmos, verbonden met de ESV.	Bij alarmmelding sluit de ESV. Via de PLC sluiten ook de magneetventielen en krijgt de monteur een melding. In huis klinkt een alarmsignaal.
(online) dashboard	Portal met alarmmeldingen en meetgegevens, opgezet door Het Internet Huis. De data komen real-time uit de PLC. 	De monteurs kunnen via dit portal de status van het systeem bekijken, ook bij alarmmeldingen. Ook voor het analyseren van de resultaten is dit dashboard uiterst bruikbaar.
(online)	Alarmmeldingen via Telegram aan de monteurs	De PLC stuurt bij alarmen en andere meldingen een bericht uit via Telegram.

Bijlage C: spoelinrichting