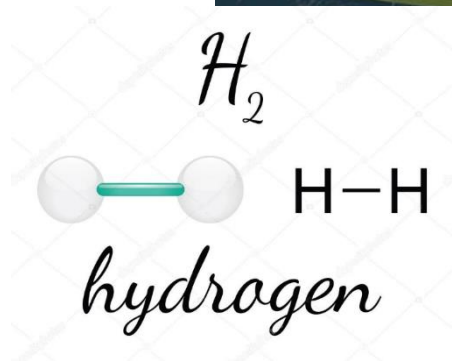
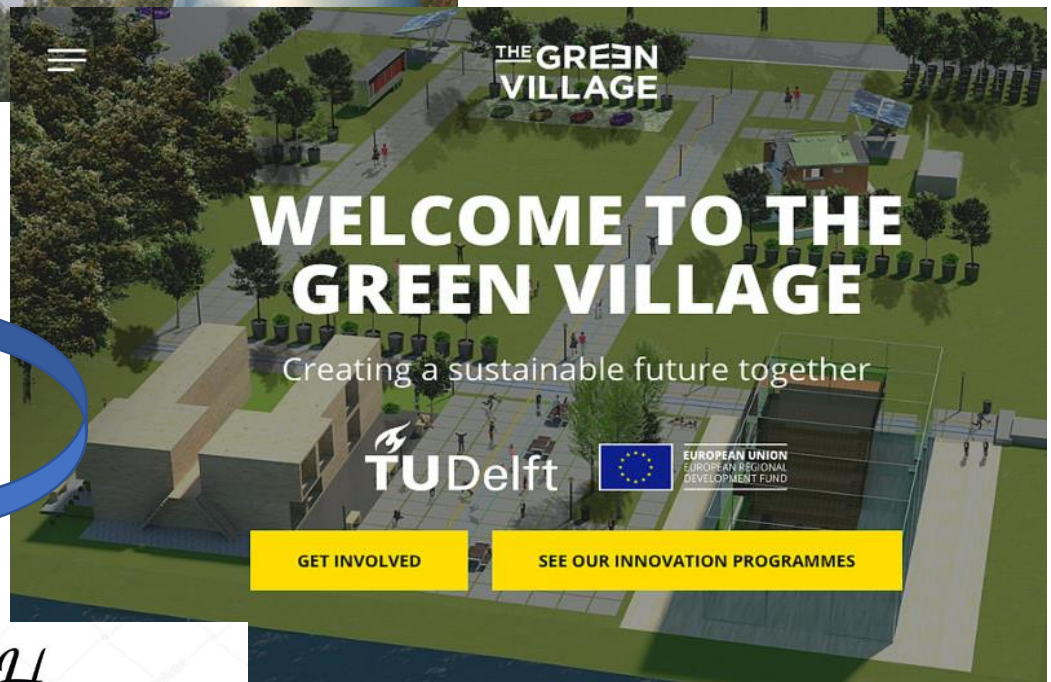


HYDROGEN HEATING (H₂) STUDIES

Openbare eindrapportage TWAS119013, september 2022

Dit onderzoek is uitgevoerd met Topsector Energiesubsidie van het Ministerie van Economische Zaken



Inhoud

1. GEGEVENS PROJECT	3
2. INHOUDELIJKE EINDRAPPORTAGE: H2-Heating Studies	4
SAMENVATTING.....	4
INLEIDING	6
Overheidsbeleid.....	6
Onderzoek van twee routes voor verwarming.....	7
DOELSTELLINGEN	8
WERKWIJZE	8
Start van het project:.....	8
Bouw fysieke installaties	8
Uitbreiding onderzoek:.....	9
Economische analyses	10
RESULTATEN	11
Opbouwen en commissioning fysieke H2-installatie (WP 2).....	11
Veiligheidsonderzoek (WP2)	14
Opzet simulatiemodellen (WP-2B)	19
Metingen aan de fysieke installaties, aanpassingen (WP1, WP3, WP4)	22
Resultaten metingen fysieke installaties (WP5A).....	26
Resultaten (energetisch) van de simulaties (WP5B)	28
Economische resultaten (WP6)	30
CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	35

1. GEGEVENS PROJECT

Projectnummer: TWAS119013

Projecttitel: HYDROGEN HEATING (H2) STUDIES (afkorting: H2 Heating Studies)

Penvoerder en medeaanvragers:

- Stichting Hoger Beroepsonderwijs Haaglanden – De Haagse Hogeschool, HHS (penvoerder)
- TU Delft – vakgroep EnergyTechnology van faculteit 3ME
- Hogeschool Arnhem Nijmegen
- Accenda
- Van Dorp Installatietechnik
- Flamco BV

Associate Partners

- The Green Village (test-locatie ketel)
- Nefit (leverancier H2-ketel)

Projectperiode:

- Oorspronkelijk van 1 januari 2020 tot en met 30 september 2021
- Tegen de eerste beschikking is bezwaar gemaakt om tgv COVID en de voorrang die onderwijs kreeg in die situatie boven onderzoek. Gevraagd is een later startdatum en een verlenging van de looptijd. Dat bezwaar is gehonoreerd.
- De definitieve projectperiode is daardoor geworden: 1-4-2020 (3 maanden later) en de einddatum op 30-6-2022 (drie maanden opschuiven + 6 maanden later).

Inhoudelijke wijzigingen:

- Ten gevolge van diverse, gerapporteerde, vertragingen, is een simulatie-onderdeel aan het onderzoek toegevoegd, dat het voordeel heeft dat verschillen doorgerekend/gesimuleerd kunnen worden in het onderzoek naar optimale combinaties van vermogens, naast en aanvullend met de ervaringen en metingen aan een fysieke installatie in de praktijk, waarvan de resultaten vergeleken zijn met de simulaties

2. INHOUDELIJKE EINDRAPPORTAGE: H2-Heating Studies

SAMENVATTING

Het onderzoek H2-Heating Studies is uitgevoerd omdat in Nederland besloten is om “van aardgas los te komen”, volledig los in 2050. Door de recente ontwikkelingen in Oekraïne mogelijk eerder.

Uitgangspunt daarbij is dat het 100% overstappen naar een centrale elektrische infrastructuur (gebaseerd op **elektronen** transport) niet haalbaar is vanwege beperkingen op het gebied van opslag en piekbelasting. Onderzoek naar de mogelijke inzet van een parallelle energie-infrastructuur, gebaseerd op het transport van **moleculen** (i.c. waterstof, H₂), ter vervanging van het huidige fossiele aardgas, is daarom doel van dit onderzoek.

Het onderzoek is gericht op de sector woningbouw, anno 2020 voor 87% afhankelijk van aardgas en verantwoordelijk voor ca. 50% van het totale aardgasverbruik in Nederland.

Het betreft hierbij ook veel oudere, matig geïsoleerde woningen die zeer beperkt geschikt zijn voor de inzet van een elektrisch aangedreven warmtepomp ivm energetisch rendement en noodzakelijke stooktemperaturen.

Om die redenen zijn twee technische verwarmings-opties onderzocht die gebruik maken van waterstof:

1. Een direct gestookte CV ketel op H₂-gas en
2. een hybride oplossing waarbij H₂-gas in een brandstofcel wordt gebruikt voor opwekking van elektriciteit en warmte (op een relatief hoog temperatuurniveau), waarbij de elektriciteit gebruikt wordt voor het aandrijven van een warmtepomp.

Focuspunten in het onderzoek waren daarbij: technische toepasbaarheid, economische aspecten, (explosie-) veiligheid en haalbaarheid (effectiviteit) waarmee de stap naar “van aardgas los” kan worden versneld.

Oorspronkelijk was een subdoel om ook een benchmark uit te voeren met verschillende leveranciers van H₂-ketels. Enige tijd na de start van het project bleek echter slechts één leverancier een werkende H₂-ketel te kunnen leveren.

Beide configuraties (ad 1 en 2) zijn fysiek gebouwd, en het realiseren daarvan kende daarbij, zoals vaker bij innovatieve projecten, vele tegenslagen in de planning. Die tegenslagen werden hier vooral veroorzaakt door lange levertijden van componenten, tegenslagen op het gebied van vergunningen (onbekendheid en angst bij toezichhouders) en het niet kunnen krijgen van een watergekoelde brandstofcel met een voor een woning passend elektrisch vermogen, waardoor de bouw van beide installaties ernstige vertraging opliep.

De H₂-ketel is toegepast in een woning op The Green Village in Delft, binnen een aanpalend project genaamd H₂@Home. Het betreft hier een bewoonde woning in een living-lab-situatie. De hybride-opstelling was door (tijds- en fysieke beperkingen) niet mogelijk op diezelfde locatie. De hybride installatie is daarom opgebouwd bij partner Accenda, waarbij hiermee de ruimteverwarming is gerealiseerd in een semi-buitenklimaat in een grote hal in een voormalige kabelfabriek.

Uiteindelijk zijn beide installatie-types (ketel en hybride-installatie) als gevolg van alle vertragingen pas 3-4 maanden vóór de einddatum van het project, operationeel werkend gekregen. Het doel om aan te tonen dat beide opties technisch haalbaar zijn is daarmee gerealiseerd, maar een ander doel, namelijk om een jaar lang metingen te verrichten om over alle seizoenen rendementen te kunnen meten en daarmee een uitspraak te kunnen doen over de economie van de opties moest anders gerealiseerd worden.

Om de economie en de seizoenseffecten te kunnen bepalen ondanks de kortere meetperiode van minder dan één jaar is daarom parallel aan de fysieke bouw een simulatietraject ontwikkeld, een zgn. “digital twin” oplossing. In dit parallelle onderzoekstraject zijn twee technieken gebruikt nl:

1. Een energetische benadering met Simulink. In deze simulatie wordt bij de gekozen Label D woning de benodigde energievraag per 5 minuten berekend over een heel seizoen, daarbij rekening houdend met de noodzakelijke temperatuurniveaus. In deze simulatie zijn realistische eigenschappen van woning, buitenklimaat en technische componenten toegepast.

2. Een economisch/energetisch model, gebouwd in excel: Dit model werkt met uurlijkse energiewaardes en daarnaast zijn er divers variabelen zoals energieprijzen instelbaar zodat vele scenario's zijn door te rekenen met o.a. verschillende regeltechnische uitgangspunten, waaronder bijvoorbeeld een uitgangspunt om zo min mogelijk elektriciteit uit het E-net te onttrekken.

De combinatie van het aantonen van de haalbaarheid van de fysieke bouw, het uitvoeren van metingen aan een fysieke installatie en simuleren van diverse realistische, regeltechnische en economische situaties maakt dat dit onderzoek overall meer inzicht heeft geleverd dan oorspronkelijk afgesproken.

In het kort laten de resultaten van dit onderzoek het volgende zien (label D woning):

A. Technisch passend bij de warmtevraag

Zowel een direct gestookte H2-ketel als een hybride installatie zijn realiseerbaar en kunnen een Label D woning voorzien van de noodzakelijke warmte voor ruimteverwarming en tapwater.

Zowel het thermisch vermogen als het noodzakelijke temperatuurniveau kunnen door beide varianten geleverd worden.

Het bouwen van een hybride installatie is daarnaast technisch complexer dan enig ander verwarmingssysteem, het op schaal uitrollen van dit systeem vraagt kennisontwikkeling en disseminatie in de installatiebranche. Net als bij de ontwikkeling van de warmtepomp voor de woningbouw, 25 jaar geleden, ligt hier een taak voor de industrie om stekkerklare oplossingen te ontwikkelen die als complete package-unit door de installatiebranche geïnstalleerd kunnen worden. Dit industrieel vervaardigen zal ook een belangrijke bijdrage leveren aan de kostenreductie.

B. (explosie) Veiligheid, lekkages en waterstofbestendigheid

Er is door onbekendheid met de eigenschappen van H2 angst, onduidelijkheid en terughoudendheid ten aanzien van de toepassing van een H2-installatie. Er is mede daardoor een tendens naar overcompensatie en het nastreven van een "nul" risico.

Praktijkervaringen en simulaties geven aan dat die angst deels ongegrond is of met redelijke eisen tot een aanvaardbaar risico is terug te brengen.

Om drempels bij de aanleg van H2-installaties weg te nemen is er behoefte aan het ontwikkelen van landelijke (+ Europese) regelgeving t.a.v. de veiligheidsvoorzieningen en regelgeving waaraan de aanleg van H2-binnen-installaties moet voldoen.

Er zijn voldoende soorten, geschikte en beschikbare leidingmaterialen voor het gebruik van H2 mogelijk, onderzoek naar geschikte pakking materialen loopt nog.

C. Economische aspecten

D. De economie van een H2-installatie is afhankelijk van zeer veel variabelen, waaronder de diverse energieprijzen en verbruiksprofielen. Daarnaast is de vraag welke kostenfactoren waar komen te liggen, en op welke schaal het systeem wordt toegepast. Leggen we de systeemgrens op huis of blok-niveau, dan blijkt uit de simulaties, bij reële aannames voor energieprijzen en te verwachten daling van investeringskosten dat de hybride installatie, zonder aanvullende subsidies op middellange termijn (5-10 jaar) niet economisch rendabel lijkt. Zowel in vergelijking met een H2-ketel als met een elektrische warmtepomp. Deze uitkomst ontstaat door de significant hogere investeringskosten van het systeem t.o.v. alternatieve systemen.

Echter, door de meest recente ontwikkelingen (september 2022) in de energiemarkt, bijvoorbeeld de overwegingen om de Elektriciteitsprijs los te koppelen van de aardgasprijs, kan dit beeld nog veranderen.

Als de systeemgrens op landelijk niveau wordt gelegd, en vermeden investeringen aan het E-netwerk worden meegerekend en worden aangewend voor de hogere investering van de hybride installatie, dan kan dit economisch plaatje gunstiger uitvallen. Uit het onderzoek blijkt dat de hybride installatie een significant ontlastend effect kan hebben op het elektriciteitsnet in vergelijking met een scenario waarin "van gas los" leidt tot het toepassen van warmtepompen en andere elektrische verwarmingssystemen die voor piekvraag zijn bedoeld.

E. Haalbaarheid (effectiviteit) waarmee de stap naar "van aardgas los" kan worden versneld.

De wens om versneld van aardgas los te komen lijkt haalbaar op basis van de vorige drie punten, mits de kosten op landelijk niveau worden verrekend en voldaan wordt aan de noodzaak van een subsidieregeling.

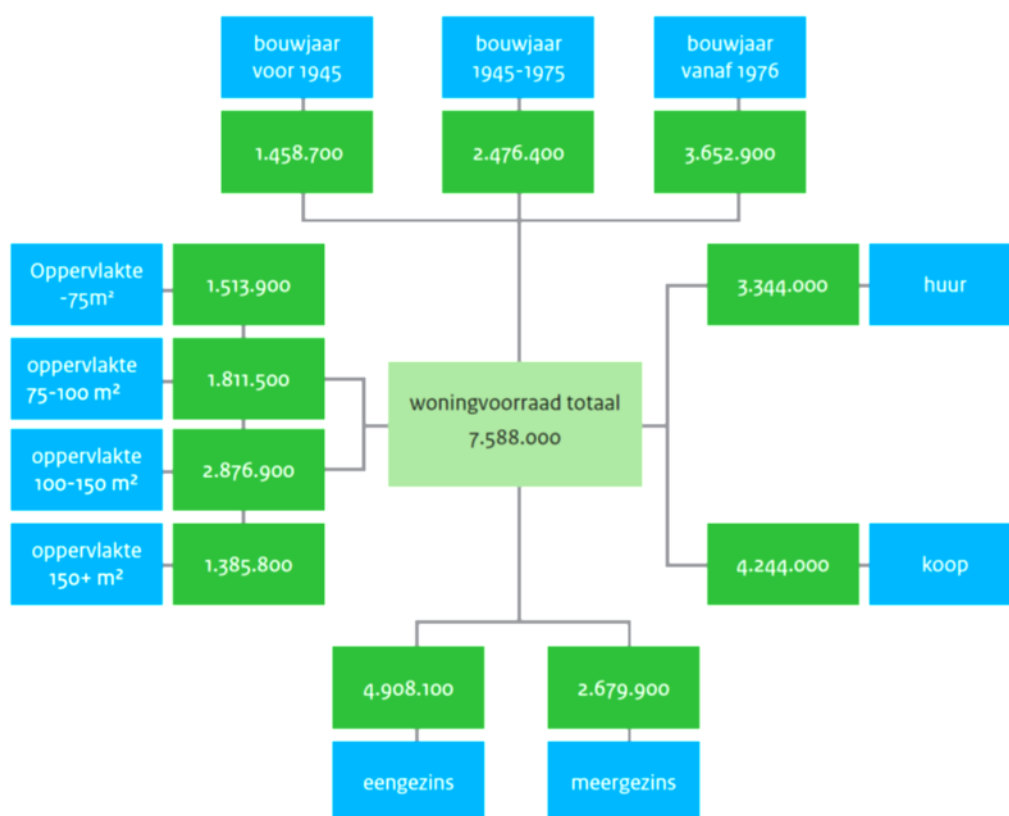
INLEIDING

Overheidsbeleid

De Nederlandse regering heeft besloten dat we in Nederland in 2050 “van (aard)gas los” moeten zijn. 87% van alle huishoudens wordt anno 2020 door middel van aardgas verwarmd wordt.

De vraag die daarbij in 1e instantie rijst is: In hoeverre kunnen elektrische warmtepompen daarbij een rol spelen? Bij het beantwoorden daarvan spelen naast overwegingen op het gebied van de elektrische infrastructuur ook het volgende mee:

Er zijn zo'n 8 miljoen woningen (zie figuur 1) en die kunnen vanwege het grote aantal alleen allemaal elektrisch verwarmt worden, als ons elektriciteitsnet veel zwaarder wordt uitgevoerd. Een alternatief is verwarmen op basis van waterstof. Dit past goed bij onze huidige gas infrastructuur, het belast het elektriciteitsnet niet en bij verbranding in een ketel is het hoge temperatuurverwarming. Hoge temperatuurverbranding past goed bij slecht geïsoleerde huizen en ongeveer de helft van de woningvoorraad van Nederland, 4 miljoen woningen is ouder dan 1975 en daarmee merendeels slecht geïsoleerd.



Figuur 1: Woningvoorraad naar eigendom, bouwtype, bouwjaar en oppervlakte.

Bron: Cijfers over Wonen en Bouwen 2016, ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties

Daarbij komt nog dat een warmtepomp als solo-verwarmingstoestel niet geschikt is voor slecht geïsoleerde woningen vanwege een beperkt vermogen.

Overstappen op all electric verwarmen is niet volhoudbaar vanwege de hoge belasting van het elektriciteitsnet en bijbehorende hoge kosten. Bovendien betekent elektrisch verwarmen een grote mismatch tussen energieaanbod van zonnepanelen in de zomer en energievraag voor verwarmen in de winter, waarvoor energieopslag nodig is.

Verwarmen met duurzaam geproduceerde waterstof is daarom een interessant alternatief omdat waterstof een energiedrager is die ook goed als opslagmedium van energie voor seizoenoverbrugging kan dienen. De Aanname daarbij is het transporteren van grote(re) vermogens met dit medium naar verwachting goedkoper te realiseren dan met elektriciteit, gebruikmakend van bestaande aardgas infrastructuur. Deze aanname wordt overigens door sommigen ook wel bestreden.

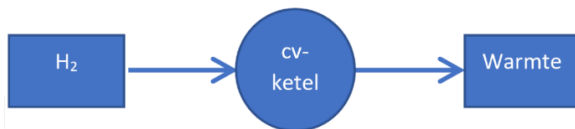
Onderzoek van twee routes voor verwarming

Er is onderzoek gedaan naar twee conceptueel verschillende verwarmingsroutes met waterstof (H₂) als brandstof:

H₂-ketel: Directe verbranding van H₂ in een CV-ketel. Deze test is uitgevoerd in een reele en bewoonde woning, bouwstijl 1980, op het terrein van The Green Village in Delft

Route 1 – Verwarmen door de waterstof te verbranden in een ketel. Deze route kan als volgt geschematiseerd worden.

Route 1

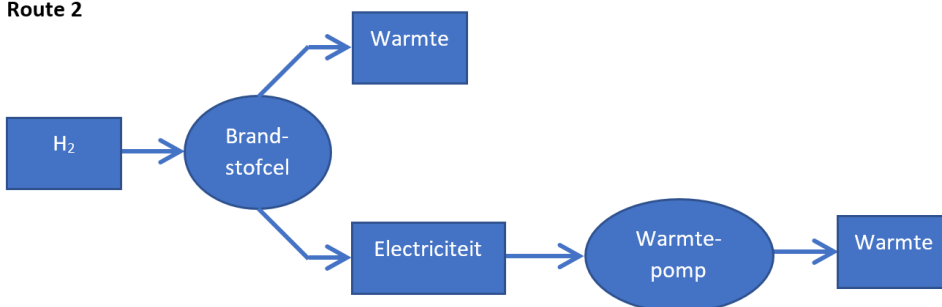


Figuur 2. Schematische weergave van verwarmen met behulp van een waterstof gestookte ketel.

Hybride-opwekkings: Omzetting via brandstofcel met gebruik restwarmte en opgewekte elektriciteit voor verwarmen via warmtepomp. Deze test is uitgevoerd op het terrein van één van de partners, te weten bij Accenda

Route 2 – Verwarmen door de waterstof te voeden aan een brandstofcel en de daarmee geproduceerde elektriciteit te gebruiken om een warmtepomp aan te drijven die voorziet in de warmte. De restwarmte van de brandstofcel kan gebruikt worden voor bv verwarmen van tapwater. Deze route 2 kan als volgt geschematiseerd worden.

Route 2



Figuur 3. Schematische weergave van verwarmen door waterstof met een brandstofcel om te zetten in restwarmte en elektriciteit en de elektriciteit via een warmtepomp in warmte om te zetten.

DOELSTELLINGEN

Voor H2-Heating studies zijn de volgende onderzoeksdoelen gedefinieerd:

Het project beoogt te onderzoeken of waterstof, ten behoeve van de warmtevraag vergeleken bij andere duurzame alternatieven:

- i. technisch passend kan zijn bij de warmtevraag (ruimteverwarming, tapwater, hoge/lage temperatuur verwarming, isolatiegraad),
- ii. economisch interessant (kosten van: installatie, brandstof en onderhoud),
- iii. Veiligheid (explosie), lekkages en waterstofbestendigheid en
- iv. haalbaar is (door het wegnemen van twijfel in de discussie over toepassing van waterstof, op basis van de bovenstaande gerealiseerde doelen) en daardoor de stap naar “van (aard)gas los” versnelt

WERKWIJZE

Start van het project:

Het ontwerpen en bouwen van de fysieke testinstallaties om daaraan metingen uit te voeren was prioriteit #1, direct na de start van het onderzoek.

Het ging daarbij om het bouwen van 2 testopstellingen:

1. Het vergelijken van diverse CV-ketels onderling ten aanzien van rendement
2. Het bouwen en gedurende een jaar meten van de hybride installatie: Brandstofcel + warmtepomp.

Beide soorten testopstellingen waren beoogd plaats te vinden op The Green Village (TGV), waar 3 woningen zijn gebouwd in de bouwwijze zoals in 1970 gebruikelijk was: Een energie-Label D woning. TGV heeft daarvoor speciale ontheffing gekregen om deze woningen rond 2017 te mogen bouwen. Ontheffing was nodig omdat ze daarmee niet voldoen aan vigerende bouw-regelgeving.

Beide opstelling hadden van het begin af te maken met tegenslagen in praktische zin:

- De toezeggingen van een 6-tal leveranciers dat zij H2-ketels konden leveren werden op één na ingetrokken. Er bleef slechts één ketel over te leveren door Remeha. Het idee om te benchmarken kon daardoor niet worden uitgevoerd. Achteraf, door andere vertragende factoren, had hier de tijd ook voor ontbroken overigens, waarover later meer.
Daar kwam bij dat de H2-voorziening op TGV veel later beschikbaar kwam, met name als gevolg van veiligheids eisen en angst voor gevaren van H2 bij de milieudienst.
- Het bleek niet mogelijk beide configuraties op TGV uit te voeren ivm het niet gelijktijdig beschikbaar zijn van twee woningen op TGV en plaatsgebrek voor de hybride uitvoering in een van de woningen van de TGV. Daardoor moest een andere locatie gezocht worden voor de hybride installatie
- Vertraging in de levering en levertijden van zowel de H2-ketel als de brandstofcel bleken aanzienlijk langer
- Daarbovenop kwam in maart 2020 de Corona situatie die vooral fysieke werkzaamheden vertraagde.

Bouw fysieke installaties

Aanpak H2-ketel

Door aan te haken bij een ander onderzoeksprogramma, H2@Home, is tijdwinst behaald in het fysiek beschikbaar krijgen van de ketel voor metingen. Echter, de vertraging bij het operationeel krijgen van de H2-infrastructuur op TGV bleef.

Lering is getrokken uit het parallel testen van verschillende leidingmaterialen en het inzetten van sensortechnieken (sniffers) om het reukloze H2-gas tijdig te kunnen detecteren. Het definiëren, ontwerpen, het praktisch uitvoeren en werkend krijgen van de veiligheidsinstallatie was een tijdsintensief proces. Parallel daaraan is een promovendus olv Prof. Ad van Wijk gestart met het H2-veiligheidsonderzoek. Vanuit de theoretische kennis van H2 t.a.v. explosiegevaar maar ook met behulp van geavanceerde CFD-technieken waarmee soorten lekken en de verspreiding van lekkages zijn onderzocht. De resultaten daarvan zijn vertaald in conclusies over de verspreiding van H2 in ruimtes als onderdeel van de het veiligheidsonderzoek.

Aanpak Hybride installaties:

Voor de hybride installatie is een alternatieve testlocatie gevonden bij een van de partners nl. bij Accenda BV. Ook bij Accenda was het beschikbaar krijgen van H2-infrastructuur een vertragende factor, naast de eerder genoemde levertijd van de brandstofcel.

De combinatie van een BC met warmtepomp, en later ook icm een accupakket gaf een ontwerpuitdaging: Keuze voor een optimaal geachte uitvoering, keuze van capaciteiten van componenten, grootte van buffers, hydraulische koppeling en inpassing en het kiezen van de juiste temperatuurniveau's bleek een complex proces waarbij zowel veel installatietechnisch als nieuw te ontwikkelen kennis over een innovatief product nodig was. Dit ontwerpproces heeft veel tijd gevraagd in de aanloop naar het feitelijk bouwen.

Daarna werden parallel diverse componenten besteld, waaronder BC, WP en de omkasting, die zo later bleek geen optimale afmetingen te hebben voor de noodzakelijke ontluchttingsvoorzieningen. Allemaal normale en oplosbare knelpunten bij een innovatieve en nieuwe technische oplossing.

Parallel is het meetplan opgesteld (WP1) en zijn in WP5 op basis hiervan de analyses en interpretatie van de resultaten en prestaties bepaald.

Uitbreiding onderzoek:

Parallel ontwikkelen van simulaties

Doordat het consortium medio 2021 zag aankomen dat beide installaties te laat werkend opgeleverd zouden worden en nog slechts 3-5 maanden zouden gaan reteren voor metingen, is ook een parallel simulatie-ontwikkel-spoor gestart om, met name voor de complexe hybride installaties, zowel technisch-energetisch als ook economisch onderzoek te kunnen doen. Daarbij zijn de praktijk metingen gebruikt om de uitgangspunten in de simulatie te vergelijken en te valideren.

Met de fysieke installatie is aangetoond dat het systeem werkelijk functioneert, wat belangrijke leermomenten zijn en zijn metingen verricht aan een installatie die feitelijk een allereerste prototype is.

De noodgedwongen toevoeging van de simulatie is daarbij ook zeer waardevol gebleken omdat hiermee voor verschillende technische configuraties, regelstrategieën en combinaties van vermogens voor BC en WP jaarlijkse doorrekeningen mogelijk zijn, wat bij één fysieke opstelling niet mogelijk is.

Voor dit parallelle spoor zijn 2 extra werk pakketten gedefinieerd te weten 2B en 5B:

Werkpakket 2B "Documentatie Simulatiemodellen"

Hierin is gedefinieerd wat de uitgangspunten zijn van de simulatie-opzet. Deze sluit aan bij de oorspronkelijke doelen van het project.

Twee simulatiemodellen zijn hierbij gebruikt en gedefinieerd:

- a) Een simulatie uitgevoerd in Simulink (een applicatie op Matlab). Dit is een simulatie-tool die sterk is in het technische en energetisch simuleren van hydraulische systemen, gekoppeld in dit geval aan een dynamisch gebouw (huis) model. Sterk ook in het modelleren van warmteoverdracht en temperatuurniveau's. Stapgrootte was 5 minuten waarbij een heel jaar doorgerekend is voor diverse technische varianten.

Gekozen is voor het energieverbruik van een Label D-woning

- b) Een simulatie uitgevoerd in excel. Bij deze simulatie ligt de focus ook op economische berekeningen in combinatie met diverse (instelbare) keuzes op het gebied van "minimaliseren van elektriciteitsinkoop" of het "maximaliseren van de totale sCOP" en dat dan mogelijk bij verschillende energietarieven.

Er is gewerkt aan een optie om het effect van toepassing van een lokale accu te onderzoeken, maar ivm beperkte tijd zijn de resultaten hiervan niet verder uitgewerkt. Vervolgonderzoek op dit gebied is nuttig.

De energievraag van het huis is bepaald door het gebruik van NEDU-energie-profielen. De energiebehoefte wordt in een uurlijkse stapgrootte doorgerekend met als variabelen energieprijzen voor elektriciteit en waterstof.

Tbv validatie zijn de resultaten van beide onafhankelijk ontwikkelde simulaties vergeleken en gebruikt voor het debuggen.

Werkpakket 5-B: "Werkpakket 5B Analyse en interpretatie simulaties"

In dit werkpakket wordt het onderzoek uitgewerkt met simulaties naar wat de optimale configuraties zijn t.a.v. vermogens, capaciteiten, vatinhoud, waarbij de meetresultaten zijn gebruikt om de gebruikte apparaat karakteristieken te toetsen.

De resultaten hiervan zijn gebruikt in WP 6 "Economische analyses"

Economische analyses

In WP 6 is de economie uitgewerkt voor de H2-ketel en verschillende hybride configuraties, de H2 ketel en een (solo) warmtepomp. Voor de hybride installatie is daarbij de in WP5B gevonden optimale installatie-combinatie (BC = 2 kWel, WP = 4,5 kWth) doorgerekend voor verschillende prijsniveau's van energiedragers in een gevoeligheids analyse.

Voor de economische analyse is gebruik gemaakt van de excel-simulatie, ook gebruikt in WP5B, waarin naast energetische parameters ook financiële parameters zijn toegepast.

Beide sporen (bouw en meten aan fysieke installaties resp. simulaties) leveren samen een uitgebreid onderzoekresultaat op, de resultaten van "the best of both worlds"

De praktijkervaring en metingen in combinatie met de flexibiliteit en de mogelijkheid om parameters te variëren van een simulatie leveren samen een overzicht van de mogelijkheden en optimale keuzes die gemaakt kunnen worden met beide typen waterstof gedreven installaties voor woningverwarming.

RESULTATEN

Opbouwen en commissioning fysieke H2-installatie (WP 2)

1. *Algemene praktijkervaringen ontwerp en realisatie:*

Bij de installatievoorbereiding en het opbouwen zijn algemene ervaringen opgedaan ten aanzien van het werken met H2-gas-systemen op de volgende gebieden:

- **Regelgeving ontbreekt:**

Er is gezocht naar richtlijnen voor het ontwerpen, engineeren en installeren van H2-installaties op deze schaal, vergelijkbaar met aardgasrichtlijnen voor woningbouwinstallaties. Deze blijken (nog) niet ontwikkeld te zijn voor de toepassing van een H2-ketel en een hybride H2-installatie voor woningen:

 - Er zijn geen normen voor waterstof producten binnenshuis: Enigszins in de buurt komt de keuringseis 214 (KE214) die voor buiteninstallaties is ontwikkeld en gaat over bijmenging van H2 tot 100%
 - Er zijn geen standaard berekeningsbladen voor leidingdimensionering, de relatie gassnelheid en geluid is niet bekend
 - Praktijkervaring en eisen t.a.v. lektheid van H2-installaties zijn niet gevonden
- **Verkrijgbaarheid Waterstof-componenten:**

H2-ketel, leverbaarheid, complexiteit, omvang en montage

 - Alleen Remeha kon uiteindelijk, zij het vertraagd, één ketel geschikt voor H2 leveren
 - Over de complexiteit van de ketel worden geen mededelingen, maar de techniek lijkt erg op die van aardgas. Het door-ontwikkelen lijkt daarom ook een kwestie van focus en prioriteit te zijn bij fabrikanten. Technische belemmeringen voor het breed in de markt zetten van H2-ketels lijken er niet fundamenteel te zijn.

Brandstofcel, leverbaarheid, omvang en montage

 - Een brandstofcel is nog niet een stekkerklaar plankproduct, bedoeld voor brede toepassing. Er was sprake van een beperkte keuze, lange levertijden en beperkte (en bovendien onjuiste) documentatie.
- **Leidingkeuze en Leidingaanleg.**

Omdat regelgeving ontbreekt is bij de opzet van de installaties zeer risico-mijdend gewerkt oa bij de keuze van leidingsystemen, en door inzet van sensortechnieken en aarding. (zie ook WP4, "Lessons learned")

 - Omdat H2 niet is geodoriseerd is van sensortechnieken (sniffers) gebruik gemaakt in de meterkast van de woning op TGV:
 - De sensoren zijn zeer veilig afgesteld, daardoor zijn relatief veel vals-positieve meldingen ontstaan
 - Er zijn magneet ventielen in de leidingen aangebracht die de H2-toevoer sluiten bij een alarmering
 - Om opbouw van statische elektriciteit te voorkomen is veel aandacht aan veiligheidsaarding op leidingen besteed. Diverse malen bleek toch lokaal statische lading te ontstaan, dat met extra aarding is opgelost.

Aandacht: Met name kunststofleidingsystemen zijn moeilijk te aarden, omdat bij de koppelingen niet altijd een goede galvanische verbinding ontstaat.

 - Voorafgaand aan het vullen van H2 leidingen zijn deze gespoeld met Stikstof (N2). Hiervoor moesten er veel ontluchtingspunten en beveiligingen tegen overdruk worden aangebracht.
- **Energiemetingen van gas en waterzijdige energiestromen**

H2 ketel op TGV:
Energiemetingen: Zijn zoveel mogelijk uitgevoerd met "proven technology":

 - H2-Verbruiks-Metingen zijn gedaan met een voor H2 omgebouwde balg-aardgasmeter die is getest op een nauwkeurigheid van 2% (opgave gAvilAr)
 - Waterzijdige zijn energiemetingen aan tapwater en woningverwarming gedaan

Hybride installatie:

 - Complex ontwerp-proces: Het ontwerp-proces van een dergelijk innovatief proces vraagt veel tijd, hoewel de vraagstelling simpel lijkt. Dat wordt mede veroorzaakt door het feit dat bij zo'n ontwerp heel veel verschillende kennis, uit verschillende kennisdomeinen en op verschillende niveaus (praktijk en uitvoerings-kennis, vs theoretisch) bijeenkomt. Er blijkt bijvoorbeeld veel praktische installatietechnisch expertise noodzakelijk te zijn bij het maken van een goed hydraulisch schema (dat is een vak), naast kennis over inpassing van een innovatieve techniek met

nieuwe en eigen eisen die deze stelt aan zijn “omgeving” (temperaturen, eisen aan de snelheid van temperatuurverandering, eisen aan de waterkwaliteit etc.).

Dat vraagt (zie ook discussie later) om het industrieel ontwikkelen en “stekkerklaar”(package) aanbieden van een dergelijk product, wil dit in de praktijk kans van slagen hebben. Ongeacht de vraag hoe goed het in theorie en in een fieldlab ook blijkt te kunnen functioneren.

- De assemblage/montage van het gekozen systeem verliep in eerste instantie voorspoedig maar ook hier zat het venijn in de staart en in de details: er bleken bijvoorbeeld water lekkages op te treden, er waren problemen met het gevulde krijgen van de koudemiddelleiding en van de warmtepomp, er bleek een foutief schema voor de aansluiting van de BC te zijn etc. Kortom, de complexiteit pleit er ook hier voor dat de markt stekkerklare oplossingen moet kunnen bieden voor een succesvolle markt-implementatie.

2. Specifieke praktijkervaringen ontwerp en realisatie Hybride installatie:

Ontwerp en bouwen Hybride installatie

Voorafgaand aan de bouw is een meetplan (WP 1) geformuleerd voor beide opwekkingsinstallaties.

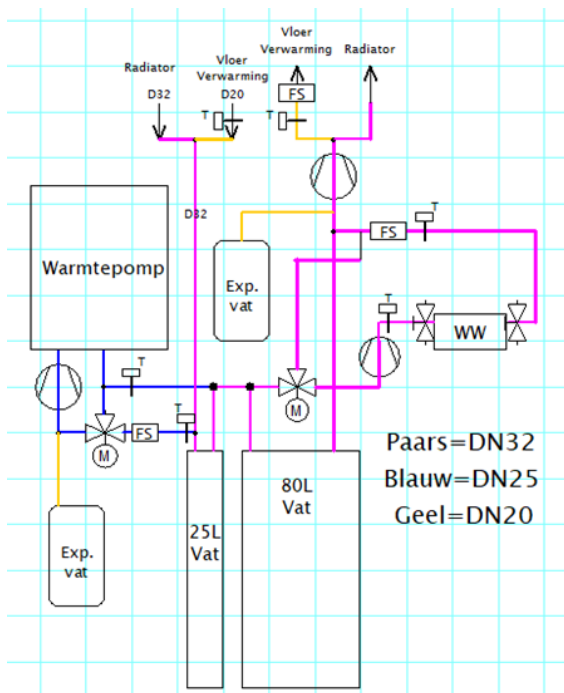
Wat betreft de bouw van de hybride installaties. Een beknopte samenvatting daarvan is de volgende:

Ontwerpproces

Keuze Brandstofcel (BC): Belangrijk was dat er een z.g. gesloten PEM BC geselecteerd kon worden. Het belangrijkste verschil tussen een open- en een gesloten PEM BC is het type koeling. Bij een open PEM is dit lucht koeling en bij een gesloten PEM vind koeling hoofdzakelijk plaats via vloeistof koeling. De overdracht- en buffering van warmte bij vloeistof is daarbij veel beter te controleren en nuttig te gebruiken.

Een BC kent een maximum temperatuur waarop geregeld dient te worden, omdat anders schade aan BC kan ontstaan. Het maximum rendement van de BC ligt heel dicht tegen deze grens aan. Het membraam van de BC moet niet te heet worden en voor de levensduur is het tevens belangrijk om een gelijkmatige temperatuurverdeling te creëren en temperatuur veranderingen geleidelijk te laten verlopen. Het is dan ook noodzakelijk om dit optimaal te regelen middels een 3-weg mengregeling. Het koelcircuit van de BC dient daarbij hydraulisch gescheiden te zijn van het warmtecircuit richting de warmtebuffer. Het vloeistofcircuit dat de BC doorstroomt moet gevuld zijn met niet-geleidend water (eisen aan dat water > 200 kOhm.cm). Daarom is het noodzakelijk om de warmteoverdracht te laten geschieden via een RVS warmtewisselaar en dat het koelsysteem verder is uitgevoerd in materiaal dat geen ionen afgeeft. Gekozen is voor een (kunststof) siliconen leidingsysteem aan de BC zijde.

Na de selectie van de BC is de capaciteit van de batterijen bepaald. Deze is afgestemd op de elektrisch vraag van de



warmte pomp en de overige infrastructuur. In de praktijk zal altijd een combinatie met batterijen te adviseren zijn, immers verloopt de vraag naar warmte en de vraag naar elektriciteit niet synchroon met de opwekking. Daarom is er zowel een warmtebuffers alsook een elektriciteitsbuffer opgenomen in het concept. De batterijen kunnen niet direct opgeladen worden vanuit de BC. Het spanningsbereik van de BC sluit namelijk niet aan bij het spanningsbereik van de batterijen. Er is daarom gekozen voor een indirecte elektrische koppeling, een combinatie van DC-AC invertors en AC-DC batterijladers. Waarbij AC staat voor Alternating Current (wisselspanning) en DC voor Direct Current, (gelijkspanning) Zowel de BC alsook de batterijen zijn gebaseerd op gelijkstroom (DC), terwijl de warmtepomp en andere componenten zijn gebaseerd op wisselstroom (AC). Om de elektriciteit vanuit de BC en batterijen te kunnen gebruiken voor deze toepassingen, wordt er een DC-AC omvormer gebruikt.

3. Uitvoeringsproces

Dimensionering, leveringsproblemen

De verkrijgbaarheid van een BC met waterkoeling is anno 2021 nog beperkt.

Het kleinste vermogen van een PEMFC systeem verkrijgbaar tijdens het onderzoek was helaas 8 kW-elektrisch. Bij een grotere markt voor het toepassen van een BC in een woonhuis zal het aanbod waarschijnlijk wel groeien, maar bij dit project was het alleen mogelijk om een voor de vermogensvraag van een woning een veel te grote BC aan te schaffen, feitelijk niet passend bij de thermische vraag. 2 kWel ligt veel dichterbij de vraag.

De levering maakte het wel mogelijk om zoals beoogd een werkend systeem op te leveren, maar betekende ook dat het niet goed mogelijk was om de BC langdurig ook op vollast te laten draaien.

Concreter: Als de BC op vol vermogen draait is het accupakket in een half uur opgeladen.

In de praktijk betekent dit dat al na ca. 20 minuten het laadsysteem terug-regelt om tegemoet te komen aan het (in belang van de levensduur) rustig en gelijkmatig regelen van de brandstofcel.

Het accupakket maakte het dus wel mogelijk dat kortdurend op vol vermogen gedraaid kon worden, maar niet lang genoeg om echt een stationaire situatie te bereiken in het hele systeem inclusief thermische en elektrische buffers.

Veiligheidsonderzoek (WP2)

Inleiding

Waterstofgas heeft een negatieve roep ten aanzien van de (on)veiligheid in het gebruik. Dat kan een negatief effect hebben op het breed toepassen van waterstof binnen de energie-transitie. Maar het is ook belangrijk om vroege projecten goed en veilig te laten verlopen zonder ongelukken om opbouw van weerstanden (negatief imago) te voorkomen.

Om de risico's te objectiveren en in beeld te brengen voor toepassing in een woning, en zo mogelijk te beheersen, is hiernaar onderzoek gedaan binnen de H2-Heating Studies.

Daarbij is gekeken naar de eigenschappen van H₂ in het algemeen (o.a. explosie en verbrandings eigenschappen en verspreidingsgedrag), is onderzoek gedaan naar meet- en sensor-technieken tbv detectie en is in beeld gebracht wat het gedrag is van waterstof in een standaard meterkast zoals die in Nederland algemeen wordt toegepast. Voor die meterkast zijn fysieke metingen gedaan aan een waterstof-installatie en is een CFD-simulatie-model ontwikkeld voor onderzoek aan de verspreiding van waterstof in een meterkast

Risico-vergelijk H₂ vs aardgas (fysisch/chemisch)

Eigenschappen H₂ (t.o.v. aardgas), theoretische veiligheids-issues.

Verspreidings- en concentratie-issues

- H₂ is een licht molecuul (14x lichter dan lucht, 20x lichter dan aardgas), waardoor het gas snel opstijgt en zich snel verspreidt.
- H₂ is een klein molecuul (waardoor weglekken door minieme poriën eerder optreedt ("zweten").
- Iets lagere viscositeit dan aardgas ca. 20% "dunner"
- Waterstof (H₂) is kleurloos en geurloos (net als aardgas overigens). Aardgas wordt geodoriseerd, maar odorisatie van H₂ is in discussie ivm mogelijke schade aan de FC-membranen.

Brand- en explosie-issues

- H₂ heeft in vergelijking met aardgas een lagere ontstekingstemperatuur en ruimere explosiegrenzen (tussen 4%-75 volume% tegen aardgas 5-15 volume% in lucht). De zgn H₂-LEL (Lower Explosion Limit) is 4%.
- H₂ heeft in gasvorm bij gelijke druk wel een lagere energie-inhoud dan aardgas
- H₂ heeft een hoge verbrandingssnelheid (snel vlamfront)
- H₂ brandt met een nauwelijks zichtbare vlam

Meeste risico's in de meterkast:

- In de meterkast van een woning bestaat het grootste risico op ophoping van H₂-gas (naast nabij het gastoestel zelf). Hier komen leidingen samen, zijn relatief veel leiding-koppelingen, komt gas met een hogere transportdruk binnen, waarna de druk gereduceerd wordt, wordt het gasverbruik gemeten. Bovendien worden in een standaardkast ook andere technieken gebruikt, de elektriciteitsmeter, watermeter en data/internet voorzieningen, die mogelijk elektrische ontladingen kunnen geven.

Kortom: Een verzameling van risico's in een klein gebied.

Opzet van het risico-onderzoek

Op basis van eigenschappen en de risico's van H₂ is dit onderzoek gefocused op de meterkast en zijn de volgende deelonderzoeken uitgevoerd:

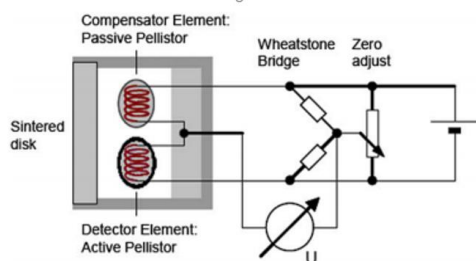
1. Sensor-technieken: Onderzoek is gedaan naar verschillende soorten sensortechnologieën. Dit om met sensoren de functie van de menselijke neus bij gebrek aan odorisatie te kunnen invullen.
2. Fysieke meetopstelling, op basis van een standaard kast volgens NEN 2768 (2016), uitgevoerd met 8 sensoren lokaties en meetresultaten
3. Simulatieberekeningen: Simuleren van een lek met CFD-berekeningen, validatie met meetresultaten

De belangrijkste conclusies daaruit staan hieronder beschreven.

Ad 1: Sensortechnieken

Er zijn 4 typen sensoren onderzocht op basis van verschillende fysische meet principes. Ook bij gelijke fysische principes (er zijn 3 verschillende catalytische sensoren onderzocht) bleken verschillende kwaliteiten sensoren te bestaan.

Een voorbeeld van een schakeling uit de deelrapportage van een catalytische sensor is als volgt:



Een zeer beknopte weergave van de kwaliteiten van de 4 type sensoren is als volgt:

Ranking	Accuraat (overall)	Responstijd	Stabiliteit	Selectiviteit	Kosten/prijs	Opmerking
1. Thermal conductivity sensor	++	++	++	++	Hoog	
2. Catalytic #1 sensor (kwaliteiten divers)	+	+	+	-	Acceptabel	Meet diverse soorten gas, ook aardgas
3. Metal Oxide (Semiconductor) sensor	-	+			Goedkoop	
4. Electrochemical sensor	++		--			Uiteenlopende kwaliteit, betrouwbaarheid? Korte levensduur

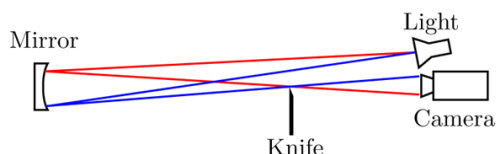
Een catalytische sensor, mits goed uitgevoerd, is anno 2021 de basis van veel aangeboden sensoren, in sommige gevallen gecombineerd met een ander type sensor.

Ad 2: Fysieke meetopstelling

Er is een standaard meterkast conform NEN 2768 (2016) gebruikt voor het verrichten van metingen aan de verspreiding van (bewuste) lekkages van H₂. Een foto van de proefopstelling uit het rapport:



In deze kast zijn op 8 posities H₂-sensoren geplaatst. Gedurende de H₂-lekkages zijn de metingen van verschillende sensoren in één grafiek weergegeven om de verspreiding in de kast te kunnen volgen. Daarnaast is er met de zgn Schlieren techniek met een speciaal camera-systeem gevisualiseerd hoe de verspreiding van (bewust) uitstromend H₂-gas (5 liter/uur) verloopt. Deze techniek maakt gebruik van dichtheidsverschillen tussen lucht en H₂-gas.



Er zijn voor 7 verschillende fysieke gebruik-situaties metingen verricht waarbij aardgas lekken en H₂-lekken zijn vergeleken en waarbij de ventilatie(openingen) open en dicht zijn gezet in verschillende combinaties. Een voorbeeld ziet er als volgt uit:

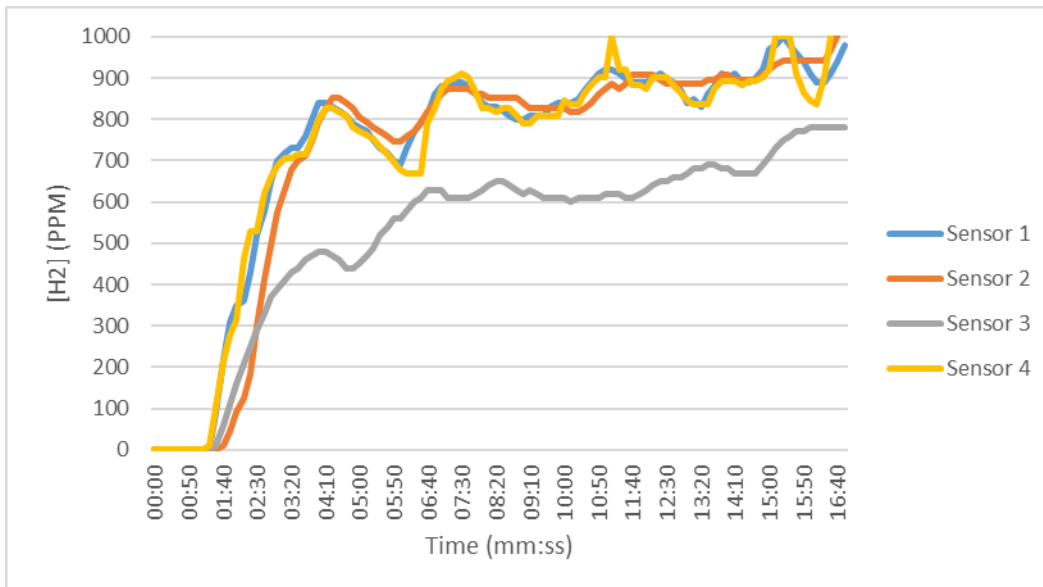


Fig 4-10: Metingen van de 4 sensoren bovenin de kast (ppm) bij een 5 L/h naar boven gericht lek en een open ventilatieroosters

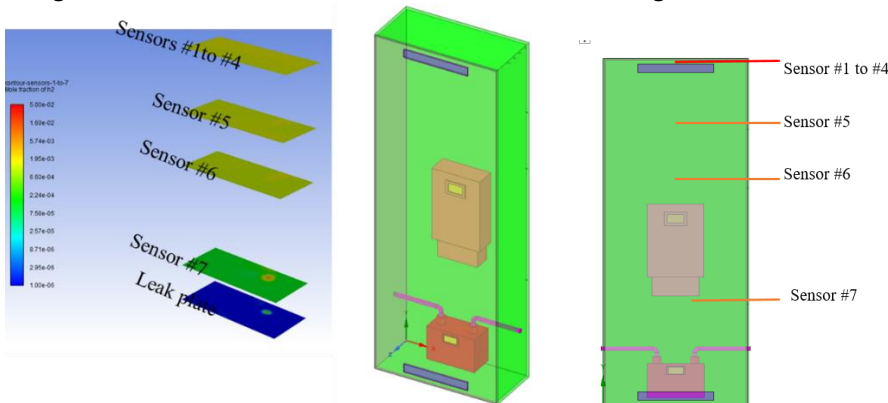
De overall-conclusies van deze fysieke metingen zijn als volgt (par. 4.5):

- Algemeen: De deur is niet volledig luchtdicht en er lekt voortdurend H2 gas weg door kieren
- Situatie bij gesloten ventilatie: Hierin wordt bovenin de kast de hoogste H2-concentratie gemeten. Ondanks dat bleef de concentratie op 19% LEL (19% van 4% ontbrandings-condities)
- Situatie met ventilatie: Geeft lagere H2-concentraties (logisch) maar ook een beter menging en minder ophoping bovenin de kast. Maximale concentratie 6% LEL
- Hoogste concentraties: Treden op bovenin de kast, maar vervolgens treedt soms ook terugkaatsing op zodat een "plukje" H2-gas weer naar beneden zakt.
- Sensor 3 (positie rechts bovenin) blijkt structureel bij deze kastindeling de laagste H2-waarde te meten vergeleken met de sensoren gepositioneerd bovenin de kast .
- Richting van het lek: Afhankelijk van de richting van het lek kan ook onder de kast ophoping optreden. Een LEL van 20% bij een lek richting achterwand is gemeten .
- Aardgaslek: De metingen met aardgas werden uitgevoerd met eenzelfde gat-grootte. Er lekt in dat geval slechts ca. 2,5 liter/uur de kast in vanwege het grotere Methaan-molecuul en de hogere viscositeit.
- Aardgas vs H2: Bij een H2 lek treedt bovenin de kast veel sneller (3x sneller) een concentratie van H2 op dan bij aardgas. Een gecombineerd effect van verschil in lekkende volume als van de fysieke eigenschappen.

Ad 3: Simulatieberekeningen

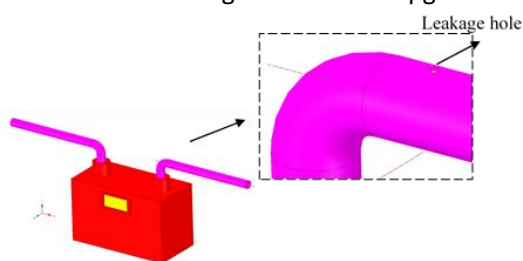
Omdat met simulaties meer verschillende situaties te beoordelen zijn is een CFD-model (CFD = Computational Fluid Dynamics) ontwikkeld dat getoetst en gevalideerd is aan de fysieke metingen. Het gaat in deze overall-rapportage te ver om dit in detail toe te lichten, ter illustratie is de uitkomst van een CFD berekening gevisualiseerd, waarbij het effect van een obstakel op de verdeling te zien is:

Het gebruikte model inclusief de sensor-vlakken is als volgt:



Schematic of Y sensor planes for reporting H2 concentrations inside the metering cabinet

Het H₂-lek is als volgt in dit model opgenomen.



Figuur 5-3 The leak location on the outlet pipe of gas meter

De uitkomsten van de CFD-simulaties zijn in verschillende vlakken te visualiseren. Een vooraanzicht ziet er voor dit lek bijvoorbeeld als volgt uit:

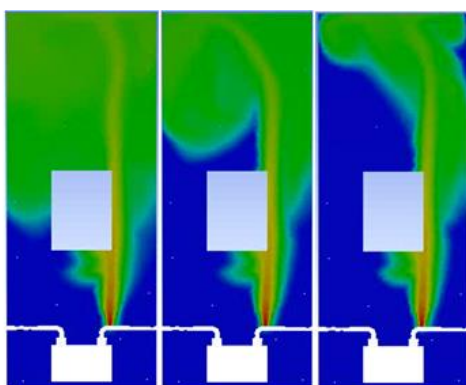


Fig.5-10 Vooraanzicht CFD-berekeningen

Net als bij de fysiek metingen zijn bij de CFD-metingen de H₂-concentraties van de verschillende H₂-sensoren in de tijd uitgezet voor dezelfde meetsituatie als bij de fysiek metingen.

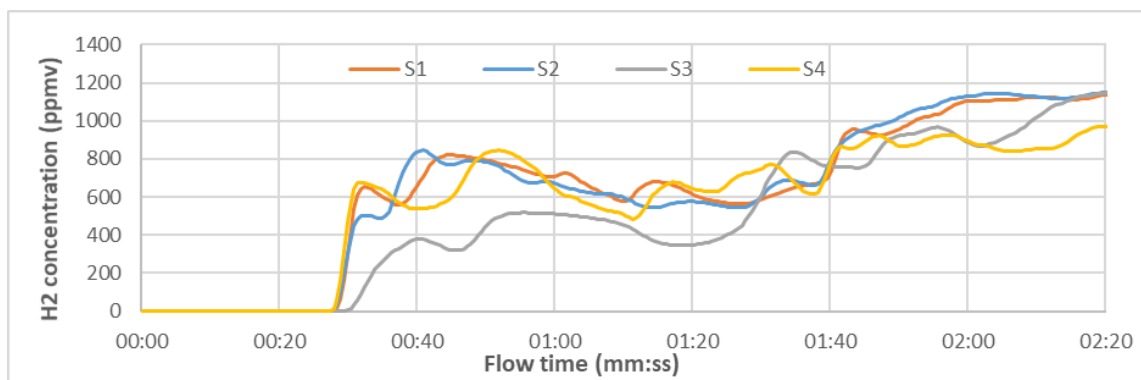


Fig. 5-16: CFD-Metingen van de 4 sensoren bovenin de kast (ppm) bij een H₂-lek van 5 l/h, open ventilatieroosters met een luchtstroom van 800 ml/s.

De resultaten van deze simulatie zijn, bij de gehanteerde ventilatie-lucht-hoeveelheid, qua orde vergelijkbaar met de meetresultaten van de fysieke opstelling en lijken hiermee een goede weergave te bieden van de fysieke kast.

Overall conclusie: Met dit aan de hand van fysieke meetwaarden gevalideerde CFD-model kunnen naar de toekomst toe ook andere situaties zoals het effect van meer/andere ventilatie, andere lekhoeveelheden en lekkage richtingen worden doorgerekend.

H2 Leidingen

Veiligheid en pakking materiaal bij H2-leidingen

Er zijn verschillende soorten leidingen gebruikt voor het transport van waterstof. Koper-leidingen, PE met aluminium inlage en staal.

Daarbij is gebruik gemaakt van de informatie in de KIWA rapportage “Keuringseis 214”.

In paragraaf 3.2 van deze keuringseis 214 wordt hierover het volgende vermeld:

3.2 Materialen

Van de materialen in tabel 1 is bekend dat ze bestand zijn tegen waterstofgas. Van de materialen waarvan de bestandheid tegen waterstofgas onbekend is, of materialen die niet in deze tabel voorkomen moeten aantoonbaar gemaakt worden dat ze bestand zijn tegen waterstofgas om aan deze keuringseis te voldoen.

Materiaal	Geschiktheid
PE80	X
PE100	X
PCV-A	X
PVC-CPE	X
NBR	X
POM	X
Nodulair-gietijzer	X
Koper / koperlegeringen	X
Koolstof staal (St 37/235, ASTM A106 gr. B, API 5L gr. B)	X
Roestvast staal (AISI 316 soorten)	X
Aluminium legeringen	X
Methacrylate Ester lijmen	X

Tabel 1: Geschiktheid van materialen

De in binnen-installaties veelgebruikte leiding-materialen koper, aluminium en PE staan in deze lijst en kunnen daarmee als “geschikt voor H2’ worden aangemerkt.

Echter, de geschiktheid van pakking materialen is een ander issue. Tijdens de veldtest (b)leek dat hier zowel diffusie van gassen als veroudering van het materiaal optrad. Dat bleek uit het gegeven dat er na verloop van tijd zuurstof werd gemeten in de leidingen.

Veroudering van pakking materiaal is dus wel degelijk een belangrijk veiligheids-issue dat nog verder vervolgd (duur-) onderzoek vraagt.

Kiwa doet momenteel verder onderzoek naar een goede en veilige keuze voor pakkingen en afdichtingsmateriaal, materiaal dat bestand is tegen waterstof en dat goede diffusieweerstand biedt tegen “zweten” van H2-gas.

Opzet simulatiemodellen (WP-2B)

Zoals in de samenvatting en werkwijze is aangegeven, is parallel aan de fysieke test een simulatieonderzoeks traject opgezet waarmee verschillende installatievarianten onderzocht en doorgerekend kunnen worden. In dit parallelle onderzoekstraject zijn twee simulatie-technieken gebruikt:

1. Een economisch/energetisch model, gebouwd in excel: Dit model werkt met uurlijkse energiewaardes en daarnaast zijn er divers variabelen zoals energieprijzen instelbaar zodat vele scenario's zijn door te rekenen met o.a. verschillende regeltechnische uitgangspunten, waaronder bijvoorbeeld een uitgangspunt om zo min mogelijk elektriciteit uit het E-net te onttrekken.
2. Een energetische benadering met Matlab/Simulink. In deze simulatie wordt bij de gekozen Label D woning de benodigde energievraag per 5 minuten berekend over een heel seizoen, daarbij rekening houdend met de noodzakelijke temperaturniveaus. In deze simulatie zijn realistische eigenschappen van woning, buitenklimaat en technische componenten toegepast. Het nauwkeuriger Simulinkmodel is gebruikt om de energetische vereenvoudigingen in het Excelmodel te toetsen.

In Tabel 1 zijn de uitgangspunten tbv beide simulaties gegeven .

Tabel 1. Gemeenschappelijke uitgangsgegevens van het Simulink- en Excelmodel.

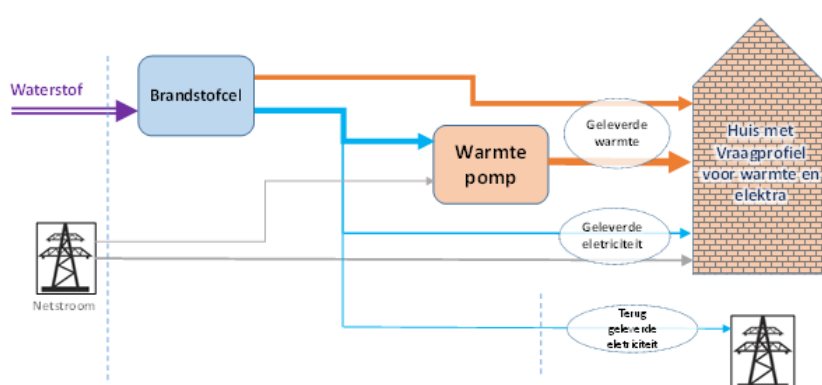
Referentiewoning	
Type	Premie D
Eigenschappen	Gegeven in document 'Voorbeeldwoningen 2011 Bestaande bouw'
Gasverbruik	1542 m ³ aardgas/jr.
Vraagmodel	
ruimteverwarmingsvraag	39,0 GJ/jr
Warmtapwatervraag	9,6 GJ/jr gebaseerd op 80 m ³ /jr van 60 °C
Gebruiksperiode	8:00 – 23:00 uur
Dagtemperatuur	20 °C volgens NEN 5067
Nachttemperatuur	15 °C volgens NEN 5067
Nominaal vermogen	8,1 kW (Berekend)
Klimaatmodel	NEN5060
Installatiemodel	
<i>Warmtepomp</i>	
COP warmtepomp	η_{sys} -COP _c
Nominale warmtepomp vermogens	4,5 kW en 9 kW gebaseerd op beschikbare handelsproducten
Nominaal compressorvermogen	2,74 en 5,48 kW gebaseerd op Remeha warmtepompen
<i>Booster</i>	
Nominaal vermogen	9 en 0 kW
<i>Componenten</i>	
Warmteverliezen	Afwezig omdat afwijking binnen de gewenste nauwkeurigheid is.
<i>Regelingen</i>	
Stooklijn warmtepomp	55 tot 20 °C bij -10 tot 20 °C gebaseerd op best practices.
Opwarmtijd na nachtverlaging	2 uren
Aanvoertemperatuur t.b.v. warm tapwaterproductie.	55 °C opdat voldoende warm tapwater van 40 °C beschikbaar is.

Als woning is een label-D rijtjeswoning gehanteerd met een gemiddeld jaarlijks gasverbruik van 1543 m³ aardgas. Wanneer aangenomen wordt dat het warmwaterverbruik 80 m³ van 60°C is, komt dit ongeveer overeen met 300 m³ aardgas. De rest, 1243 m³ aardgas, is dan voor ruimteverwarming. Met een aangenomen installatierendement van 90%, wordt de jaarlijkse warmtevraag 39,0 GJ voor ruimteverwarming en 9,6 GJ voor tapwaterverwarming. Het nominale verwarmingsvermogen 8,1 kW is berekend met behulp van een warmteverliesberekening waarin transmissie-, ventilatie- en infiltratieverliezen bij -10°C buitenluchttemperatuur zijn bepaald. Tevens is de opwarmtoeslag opgenomen om de woning na nachtverlaging op te warmen van 15 naar 20°C. Daarvoor is berekend dat een opwarmperiode van 2 uren

volstaat. In de simulaties worden de weergegevens gehanteerd volgens NEN5060. Gecontroleerd is dat de berekeningen zonder installatie de warmtevraag levert.

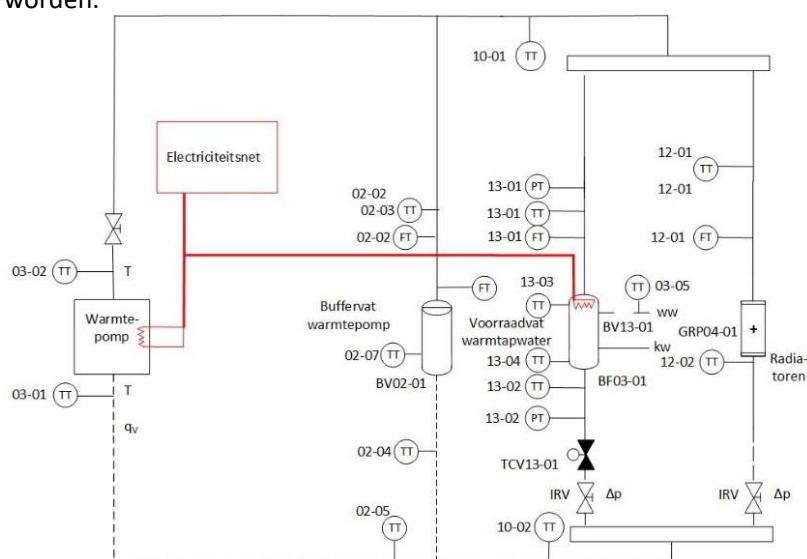
De Simulink- en Excelmodellen zijn vergeleken voor een verwarmingsinstallatie met een warmtepomp. Het warmtepompmodel is ook gehanteerd in de energetische en economische gevoeligheidsanalyses van WP5 b en 6. In het warmtepompmodel wordt de COP bepaald door de COP volgens het Carnotproces COP_c te vermenigvuldigen met het systeemrendement η_{system} . In beide simulaties is er een elektrische naverwarming (booster) die er voor zorgt dat het aanvoerwater opgewarmd wordt naar de gewenste waarde bij grote warmtevraag. Deze aanvoertemperatuur wordt weersafhankelijk geregeld; 55°C bij een buitenluchttemperatuur van -10 °C en lager en 20°C bij een buitenluchttemperatuur van 20°C en hoger. Na warmtapwaterverbruik wordt er warm tapwater bereid met een temperatuur van 55°C.

Figuur 1 geeft het energetisch schema van het Excelmodel. De warmte- en elektriciteitsvraag worden gerealiseerd door een warmtepomp die door de brandstofcel wordt aangedreven. De bij de brandstofcel vrijkomende warmte wordt ook benut. Wanneer er een tekort aan elektriciteit is, wordt deze geleverd uit het elektriciteitsnet en overschot van elektriciteit, opgewekt door de brandstofcel, wordt terug geleverd.



Figuur 1 Energetisch schema Excelmodel

Figuur 2 geeft het energetische schema van het Simulinkmodel. In dit model levert een warmtepomp warmte voor tapwater en ruimteverwarming. In de warmtepomp is een booster aanwezig die elektrisch verwarmd. Het buffervat BV02-01 is een schakelvast die ervoor kan zorgen dat de warmtepomp niet pendelt. Buffervat BV13-01 is een warm watervoorraadvat. Ter voorkoming van legionella, kan het buffervat tijdelijk elektrisch verhit worden.



Figuur 2 Energetisch schema simulinkmodel.

Tabel 2 Aanwezige componenten in de simulatiemodellen (werkpakket 2b).

	Simulink-model	Excel-model
Warmtepomp	X	X
Warmte booster	X	X
Brandstofcel		X
Pompen	X	
Schakelvat	X	
Warm tapwatervat	X	

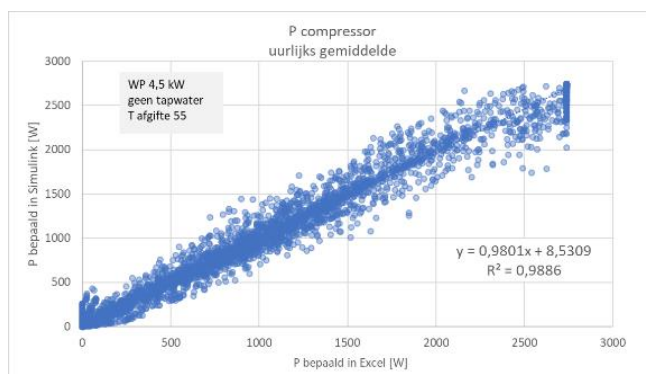
Tabel 3. Kenmerkende verschillen tussen het Simulink- en Excelmodel.

	Simulinkmodel	Excelmodel
Energievraag	Ruimteverwarming Tapwaterverwarming Elektriciteit ontbreekt.	Ruimteverwarming Tapwaterverwarming Elektriciteit (3500 kWh/jr volgens www.nedu.nl)
Simulatiegrootheden	Energie: warmte en elektriciteit. Toestandsgrootheden: watertemperaturen en – massastromen.	Energie: warmte, elektriciteit en enthalpie (waterstof), temperaturen.
Simulatie-intervaltijd	5 minuten (afwijkingen bij langere tijden)	1 uur (vanwege rekentijden en ontbreken van thermische energieopslag)
Brandstofcel	afwezig	
Buffervaten	Schakelvat: 75 l. Buffervat warm tapwater: 200 l	Afwezig: vanwege complexiteit
Minimale tapwatertemperatuur	40 °C	N.v.t.: Energievraag wordt geleverd

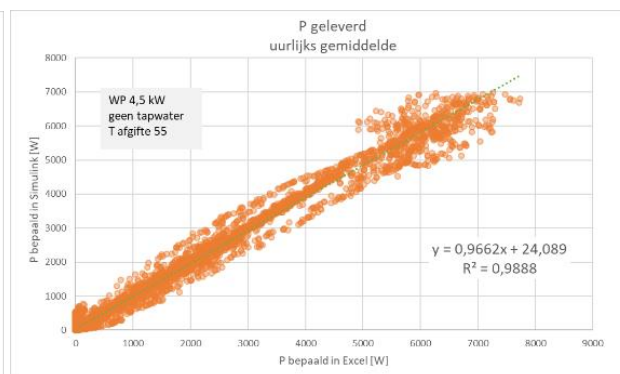
Het Excelmodel is getoetst met het gedetailleerder Simulinkmodel. De geleverde warmte door de opwekkers is in beide modellen gelijk. Zie figuur 6.1 in de bijlage en hieronder. Wel waren er verschillen in de SCOP's van de warmtepompinstallatie. De geconstateerde afwijkingen in de SCOP (verschil uitkomsten Excel- en Simulinkmodel) waren in de orde van grootte –2,4 tot +6,4 % afhankelijk van de aanwezigheid van warmtapwatervraag en de geregelde wateraanvoertemperatuur naar de vertrekken. De afwijkingen worden veroorzaakt doordat er in het Simulinkmodel rekening wordt gehouden met thermische massa waardoor er verschuivingen plaats vinden in de benodigde warmtelevering door de warmtepomp. Dat kan zowel positief als negatief (ingeval grote warmtepomp bij realisatie van zowel ruimte- als tapwaterverwarming.) uitpakken.

Regressieanalyse toont aan dat het Excelmodel hetzelfde gedrag vertoont als het Simulinkmodel.

In Figuur 6.1 zijn de resultaten gegeven voor de regressieanalyse voor het gemiddelde warmtepompvermogen en verwarmingsvermogen per uur.



Figuur 1 Opgenomen vermogen van de warmtepomp. Simulink (y-as) vs Excel model (x-as)



Figuur 2 Geleverd warmtevermogen. Simulink vs Excel model.

De conclusie is dat zowel het Simulink- als het Excelmodel geschikt wordt geacht om gevoeligheidsanalyses in werkpakketten 5b en 6 uit te voeren.

Metingen aan de fysieke installaties, aanpassingen (WP1, WP3, WP4)

Inleiding

Het maken van en meten aan fysieke installaties is in het project opgenomen om diverse redenen:

- a) Maken: Praktijkervaringen, waar loop je tegenaan om een innovatieve installatie te maken in al zijn aspecten. Wat leren de eerste metingen je (WP 3)
Welke optimalisatie mogelijkheden zijn er na een eerste inbedrijfstelling, welke leereffecten zijn er (WP 4)
- b) Meten: Hoe ga je meten, welke metingen zijn nodig, welke sensoren en nauwkeurigheid is nodig (WP 1)

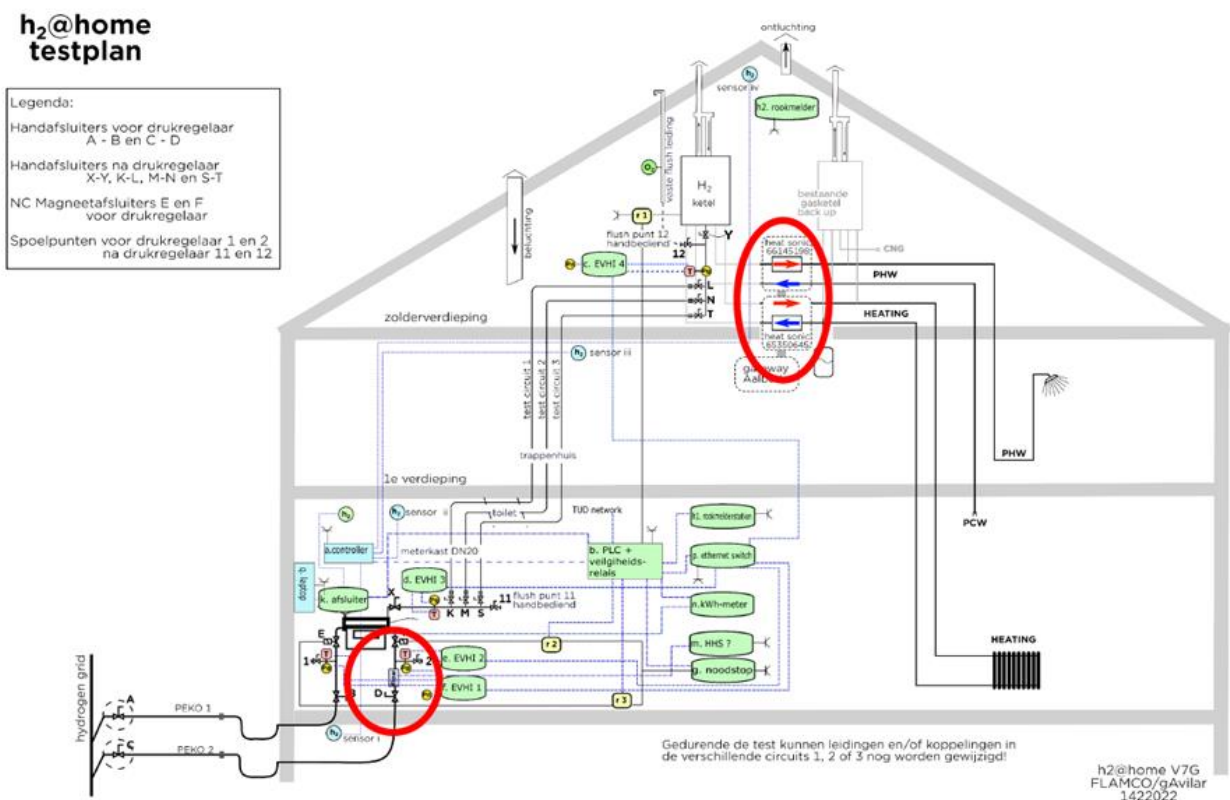
Wat betreft het 1^e punt zijn hiervóór in deze overall rapportage al de algemene en specifieke praktijkervaringen samengevat in de paragraaf "Resultaten A" onder "Opbouwen en commissioning fysieke H2 installatie (WP 2)".

In deze paragraaf wordt volstaan met de weergave van principe-schema's uit WP 2 respectievelijk van de ketelopstelling en van de hybride installatie waarin de diverse meetpunten en metingen staan aangegeven. Dit is nodig voor begrip van het onderdeel metingen (WP 3) en begrip voor de afstelling en bijstelling na 1^e ingebruikname (WP 4).

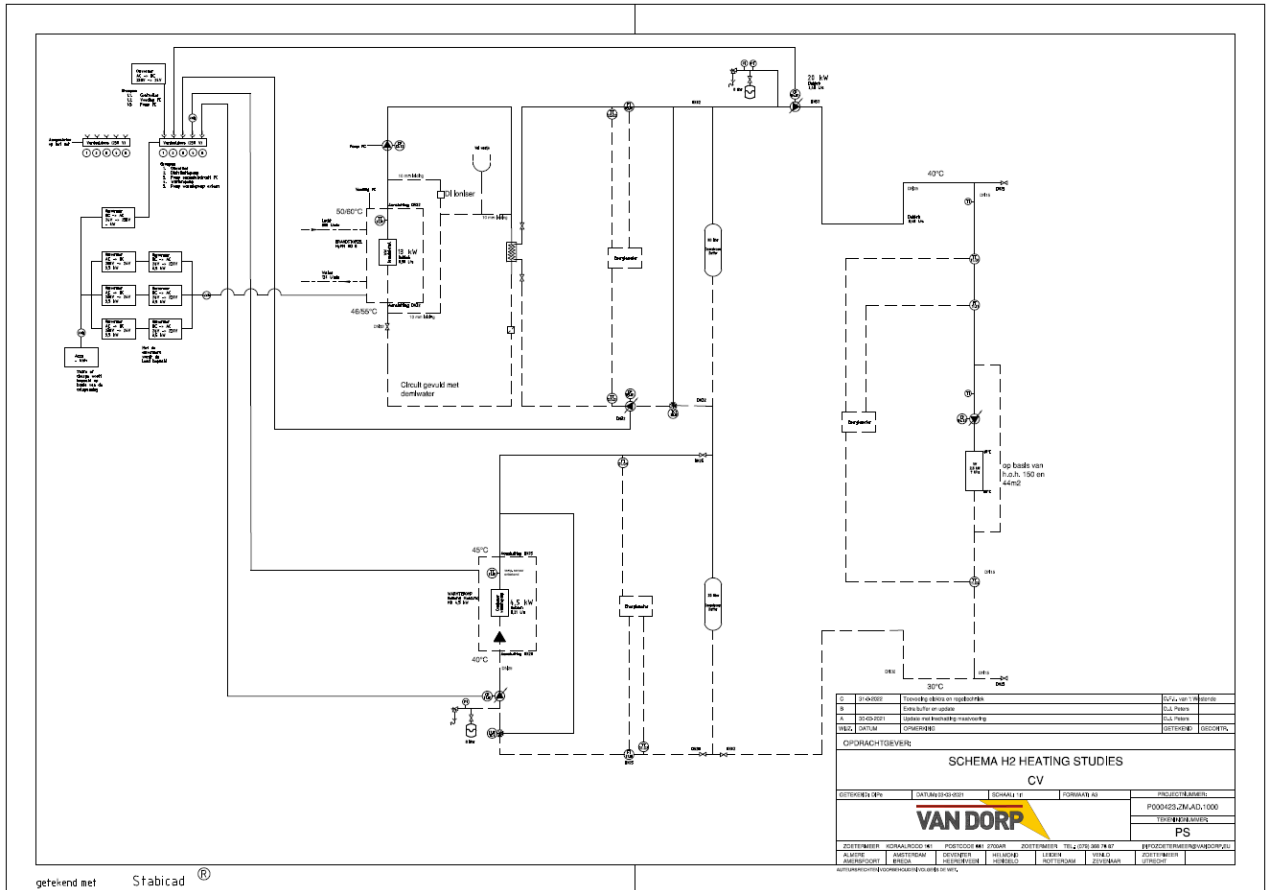
In deze paragraaf wordt eerst de kern van de metingen compact besproken.

Daarna wordt verder ingezoomd op de ervaringen en bijstellingen die nodig waren na de ingebruikname.

Principeschema's



Principe schema "ketelinstallatie op The Green Village"



Principe schema "Hybride installatie"

Metingen

Wat betreft het feitelijk meten aan beide systemen, zowel ketel als hybride installatie, gaat het in dit project in eerste instantie om het meten van energiestromen. Waarbij de metingen tevens nodig zijn voor de aansturing van de installatie. Het gaat dus niet alleen om monitoring maar ok om stuur-informatie.

In essentie zijn de volgende soorten energiemetingen toegepast:

H2 -ketel op The Green Village

- H2-balg meter voor de H2-ketel getest op TGV. Het betreft een door gAvilar gemodificeerde aardgasmeter
- Energiemeters (warmtemeters) in tapwater en CV-water tbv ruimteverwarming op

Metingen aan de hybride installatie (weergave in het prinsipeschema van WP2A)

- Warmte meters (waterzijdig) in het WP en BC-circuit
- kWel-Meters in de elektrische circuits
- H2-flow-meter

De dataoverdracht heeft plaatsgevonden mbv .csv bestanden na een gebleken gevoeligheid van uitval van de online verbindingen.

De verslaglegging van de metingen en sensorenlijst is weergegeven in deelrapportage WP1 en WP3 waarnaar hier korthedshalve wordt verwezen.

De samenvatting en conclusies naar aanleiding van de 1e metingen zijn als volgt:

- De metingen aan het H2-ketel systeem zijn na een trage startgoed verlopen. Het betreft hier een relatief eenvoudig meetsysteem met een 3-tal energiemetingen, aan de H2 kant en 2x waterzijdig.
- De metingen aan de hybride installatie BC+WP zijn eveneens goed verlopen. Mbv calibratie van sensoren en het beperken van het aantal metingen tot de kern van de onderzoeksdoelen is een robuuste monitoring mogelijk geworden.
- Door de relatief korte meetperiode die resteerde (ca 3 maanden) én de handicap van de noodgedwongen keuze voor een te grote brandstofcel (8 kW ipv 2 kW) is de lengte van de mogelijke metingen relatief kort en kan daardoor niet goed een stationaire situatie bereikt worden. Dat beperkt de mogelijkheden om harde uitspraken te doen over systeem-rendementen bij deel- en bij vollast. Toetsing van de meet-resultaten aan de simulatie-uitkomsten ondersteunen de simulatie-uitgangspunten en uitkomsten.

Afstellingen en bijstellingen (WP 4)

Ervaringen, knelpunten en bijstellingen

Er zijn voor het bouwen van het prototype alleen in de markt verkrijgbare componenten gebruikt: "Plankproducten". Levertijden van de verschillende componenten vielen tegen en maakten dat er noodgedwongen soms gekozen werd voor "second best".

Dat bleek in de praktijk beperkingen te geven in de testmogelijkheden en dieper inzicht in de werking en/of rendementen van componenten die niet altijd goed te achterhalen bleken.

Terwijl in een testopstelling (uiteraard) behoefte bestaat om individuele componenten voor onderzoek (bijvoorbeeld de warmtepomp) in het onderzoek selectief te kunnen meten of aan te kunnen sturen.

Een overzicht van waar het consortium in de praktijk is aangelopen:

- **Warmtepomp:** Het bleek niet mogelijk goed de besturing van de package unit over te nemen. De fabrikant heeft de besturingssoftware geheel afgeschermd en gaf geen toegang tot de sourcecode. Dat maakte dat de warmtepomp nagenoeg niet aan te sturen was, zoals bijvoorbeeld het definiëren van een dynamische stooklijn. Hier is zo goed als mogelijk "omheen" gewerkt, maar gaf duidelijk beperkingen.
- **Efficiencygegevens:** Het efficiency verlies van de DC-AC omvormer als deelsysteem binnen de configuratie was niet goed gespecificeerd door de leverancier. Doordat er een extra directe elektriciteitsmeting gebruikt werd in de voeding naar de warmtepomp, kon geconstateerd worden dat de toegepaste omvormers een aanzienlijk (vrijwel constant, onafhankelijk van de belasting) 0-verlies hebben van ca. 150W. Dit verlies was niet een primair onderzoeksdoel, maar de keuze voor een extra kWel-energie meter bracht dit relatief grote verlies aan het licht
- **Electromagnetische storingen:** Aandacht is nodig voor Invloed van de EMC op de datacommunicatie binnen het systeem. De eerst metingen gaven verwarrende resultaten.
- **Foutieve elektrische aansluitingen BC:** Door de fabrikant is een levering gedaan met onjuiste aansluitingen binnen aangeleverde componenten. Door leverancier aangeleverde deelassemblages bleken niet te werken. Na doorlichten van het systeem bleek dat de deelsystemen door de leverancier niet juist door hen waren aangesloten.
- **Ramping belasting van de BC:** De BC heeft een optimale belastingcurve en deze loopt in de praktijk niet parallel met de gewenste belasting.

Concrete aanpassingen na 1^e ingebruikname

- De warmtepomp kan voor test-activiteiten gedwongen worden in een bepaalde werk-modus door de buitentemperatuur ingang met een 6 stappen weerstand te “faken” op verschillende buitentemperaturen
- Door EMC-storingen varieerden de metingen oorspronkelijk. Door aanvullende maatregelen, betere afscherming en ander kabelloop, zijn deze problemen opgelost, waarna de uitkomsten stabiel waren.
- Het registreren van de uitkomsten in de back-log bleek minder stabiel. Is gedurende het proces wel verbeterd, maar is wel parten blijven spelen.
- De uitkomsten gepresenteerd op het Human Machine Interface scherm waren niet realtime. Deze tijdvertraging is aangepast.
- Sensordata is door nabewerking in de software nauwkeuriger gekregen (filtering & correlatie)

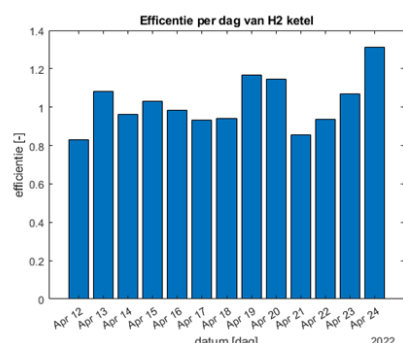
Op basis van lessons learned in dit onderzoek kan worden gesteld:

- Kies zo mogelijk voor een geheel zelf op te bouw BC configuratie om te komen tot meer ideale configuratie.
- Kies zo mogelijk voor een “open source” warmtepomp configuratie
- Zoek voor vervolgonderzoek een passender vermogen voor de capaciteit van de BC. De gebruikte configuratie was niet ideaal voor het onderzoek.

Resultaten metingen fysieke installaties (WP5A)

H2 ketel op TGV:

Energetisch rendement: Het gemiddelde rendement van de H2-ketel is gemeten op 102% (obv onderwaarde of Low Heating Value LHV) over een periode van 13 dagen.



Histogram 1: Energetisch rendement H2 ketel, per dag.

Dat betekent dat er gemiddeld sprake is van winning van condensatiewarmte in de H2-ketel. De spreiding over kortere tijdstappen, per dag is groot en varieert tussen de 83% en 131% rendement. Deze spreiding wordt vermoedelijk veroorzaakt door het feit dat een slimme gasmeter is gebruikt, die gespreid en ook afgetopt/gedempt het gasverbruik doorgeeft. Hierdoor loopt de centrale registratie van het gasverbruik altijd achter en zal er bij een dagovergang het gasverbruik op conto worden gebracht van een “verkeerde dag”. Bij langduriger metingen middelt dit effect uit.

Hybride installatie:

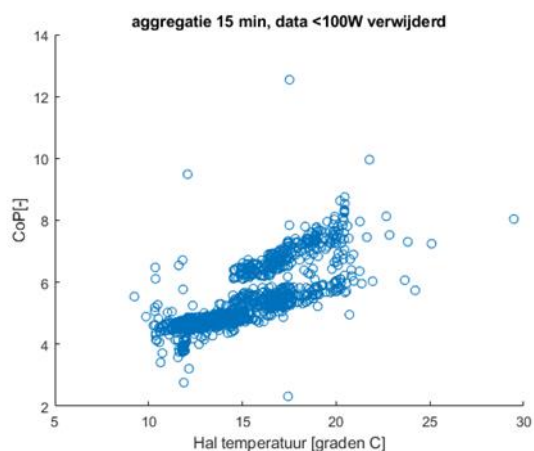
Het energetisch rendement van de WP is zeer variabel en afhankelijk van zowel het temperatuurniveau van de gebruiker (condensator) als de brontemperatuur van de WP.

Er is daarom geen sprake van één waarde maar van een “wolk” van waarden per meetserie.

In onderstaande puntenwolk zijn bovendien voor twee verschillende meetseries de metingen geplot. Dat levert twee “curves” op die in één grafiek zijn geplot.

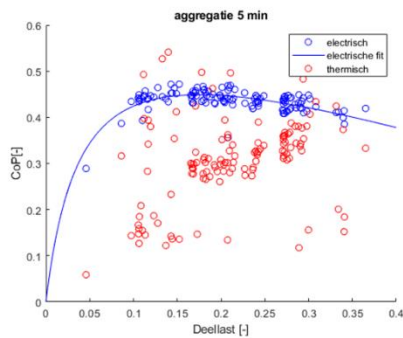
Een voorbeeld geeft onderstaand meetresultaat waarbij de COP is uitgezet tegen de hal-temperatuur (exclusief de invloed van de geleverde temperatuur) waar de buitenunit zich bevindt in ‘semi-buitenomstandigheden’. In de meetperiode was het weer zeer gematigd en niet extreem koud. COP’s van >8 zijn dan soms mogelijk.

Het jaargemiddelde ligt, als gevolg van (ook voorkomende) lagere buitentemperaturen, veel lager, zie verder bij de simulatieresultaten.



Figuur 1. Twee meetseries leveren twee COP-“curves” tgv verschillende combinaties van condities bij de condensator resp. verdamper. Op de assen: COP vs Hal-temperatuur

Het energetisch rendement van de BC kon alleen bij deellast bepaald worden en bovendien ook kortstondig, waardoor er tijdens de metingen nooit een volledige stationaire situatie is bereikt. Dat maakt dat voorzichtig met de resultaten omgegaan moet worden, maar vergelijking met de in de simulatie gehanteerde karakteristiek is mogelijk. Het resultaat van de elektrische efficiency, hier ook COP genoemd, is te lezen in de grafiek. In figuur 3, rechts, is de specificatie van de fabrikant geplaatst



Figuur 2. Gemeten waardes Elektrisch en thermisch

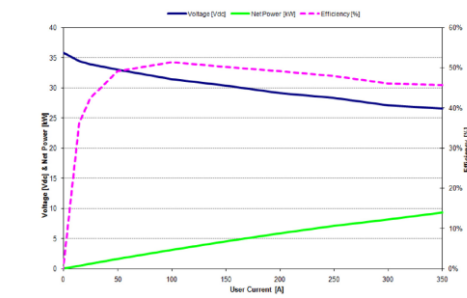


Figure 2: Typical HyPM® HD 8 Performance

Figuur 3. Opgave fabrikant elektrisch

Te zien is dat de elektrische efficiency een duidelijke curve laat zien (blauw). De elektriciteitsproductie volgt snel de belasting van de BC en is niet-nauwelijks afhankelijk van dempende effecten zoals in het thermische systeem wel het geval is (door bijv. trage opwarming van massa en buffervaten).

De thermische efficiency daarentegen laat geen karakteristiek zien. Vermoedelijk het gevolg van het feit dat de BC noodgedwongen veel te groot is gekozen t.o.v. de vermogensvraag. Zelfs in deellast kon daardoor slechts zo kort gedraaid worden dat geen goed stationair evenwicht bereikt kon worden.

Een andere hypothese die bediscussieerd is, is dat er door warmteverliezen in het primaire circuit van de brandstofcel slechts een beperkte hoeveelheid "winbare warmte" zou zijn.

Deze hypothese zou leiden tot een offset, een lagere ligging van een (rode, thermische) curve. Het chaotische beeld van de rode meetpunten lijkt deze hypothese niet te ondersteunen. Bovendien wordt door Nedstack, met praktijkvoorbeelden, de aanname weersproken dat een groot deel van de warmte niet winbaar zou zijn. Het niet bereiken van een stationaire situatie lijkt de meest waarschijnlijke verklaring voor de rode puntenwolk.

Resultaten (energetisch) van de simulaties (WP5B)

De simulaties zijn gebruikt om antwoord te geven op de volgende optimalisatie vragen

1. Wat zijn de optimale vermogens voor de combinatie BC en WPn bij de gekozen gebruiksprofielen, om maximale netontlasting te realiseren? Dit zonder lokale opslag in een accu en zo min mogelijk teruglevering aan het net (focus dus op alleen de lokale thermische energievoorziening)
2. Wat is het aandeel waterstof in dat geval voor de thermisch energievoorziening, ofwel hoeveel netontlasting wordt bereikt met de hybride installatie?
3. Wat is de maximale sCOP die haalbaar is met alleen de WP?
4. Hoe gevoelig is de sCOP voor een juiste instelling van de stooktemperatuur?
5. Wat is de optimale vatgrootte (t.a.v. de schakelbuffer voor de WP) voor een maximale sCOP?
6. Wat is de optimale vatgrootte voor tapwater. En daaraan gekoppeld de vraag: Wat is het effect van de wekelijks opwarming van het tapwatervat ivm legionella bestrijding en welk effect heeft dat op de optimale vatgrootte van het tapwatervat?
7. Welke adviezen zijn er te geven t.a.v. woningverbetering (isolatie) aan de onderzochte label D woning met het oog op een zo hoog mogelijke sCOP.

Resultaten uit de simulaties:

- Er is geoptimaliseerd voor een maximale ontlasting, winter en zomer van het elektriciteitsnet. Een maximale H2f fractie

De uitkomsten daarvan zijn geven in de volgende tabel:

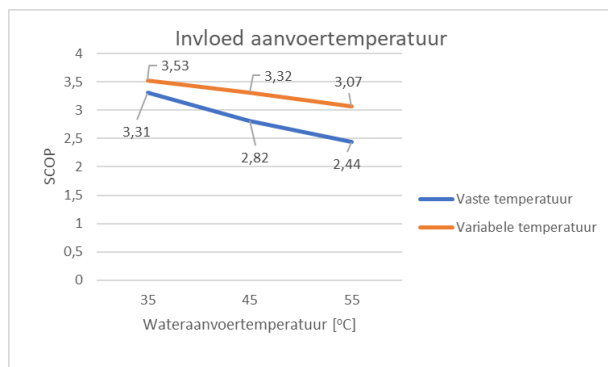
Tabel 0.1 sCOP_warmte & H2F_warmte vergeleken. Groen en blauw gekleurde vakken zijn de hoogste scores (grijze vakken niet meegenomen)

P WP	BC = 0 kW		BC = 1 kW		BC = 2 kW		BC = 4 kW		BC = 8 kW	
	sCOP	H2f	sCOP	H2f	sCOP	H2f	sCOP	H2f	sCOP	H2f
0 kW	1,00	0,00	0,96	0,58	0,93	0,80	0,89	0,85	0,87	0,75
2 kW	2,38	0,00	1,91	0,73	1,90	0,87	1,93	0,85	2,00	0,71
4,5 kW	3,16	0,00	2,18	0,84	2,10	0,92	2,17	0,87	2,32	0,72
8 kW	3,29	0,00	2,20	0,84	2,10	0,93	2,18	0,87	2,33	0,72

Te lezen is:

- **Ad 1 en 2:** De configuratie van een brandstofcel van 2 kW gecombineerd met een warmtepomp van 4,5 kW geeft een vrijwel maximale H2f score, dwz de fractie waterstof van de gebruikte ingangsenergie. Oftewel een maximale ontlasting van het elektriciteitsnet. De sCOP_{warmte} van deze configuratie is dan 2,1, de H2f_{warmte} is 0,92. Dat betekent dat 92% van de warmtevraag wordt voorzien met waterstof, in dit geval is dat met een H2-verbruik van 179 kg per jaar. Het totale elektriciteitsgebruik uit het net bedraagt in dit geval 485kWh_e, exclusief huishoudelijk E-gebruik.
- **Ad 3:** Maximaal haalbare sCOP. Zonder BC, waarbij alle energie (naar de WP) uit het net wordt onttrokken is de sCOP 3,29. Deze waarde is logischerwijs hoger dan van de combinatie BC+WP, ze dient slechts ter vergelijking met de maximaal haalbare sCOP van de warmtepomp.

- **Ad 4:** De stooklijn heeft grote invloed op de sCOP van de warmtepomp. Een onjuiste stooklijn kan leiden tot een bijna 30% lagere sCOP, figuur 5.1 in WP5B



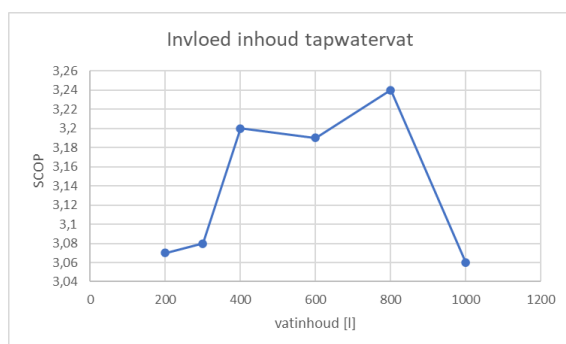
Invloed wateraanvoertemperatuur bij -10°C. (fig 5.1)

- **Ad 5:** Schakelbuffer WP zie tabel 5.1: Het schakelvat is technisch noodzakelijk voor een stabiele werking van de installatie, maar de grootte blijkt niet heel erg kritisch te zijn voor de sCOP. Een schakelvat van 75 l levert een optimale SCOP op van 3,07. Een kleiner vat van 50 liter heeft slechts een beperkt negatief effect op de sCOP.

Bij een afweging waarin de investeringen en ruimtegebruik wordt meegenomen is een 50 litervat een goed compromis.

	Vatinhoud [l]				
	25	50	75	150	300
Ebooster [GJ]	9,5	2,7	2,4	2,3	2,3
Ewp [GJ]	10,9	13,3	13,4	13,5	13,5
Etot [GJ]	20,4	16,0	15,8	15,8	15,8
Qtot [MG]	48,0	48,6	48,6	48,6	48,6
sCOP	2,36	3,03	3,07	3,08	3,08

- **Ad 6:** Optimale Vatgrootte tapwater, bij wekelijks opwarmen tot 60° ivm voorkomen legionella: Bij een vatinhoud van 200 l is de invloed van één keer per week opwarmen (elektrisch met gloeispiraal, COP =1,0) van het vat naar 60°C gering (1 %). Bij grotere vaten is het effect groter omdat dan een groot volume opgewarmd moet worden. Het voordeel van een hogere sCOP bij een groter vat wordt bij grote vaten teniet gedaan door de energie die benodigd is voor het met gloeispiraal verwarmen van het vat. 200 liter is een optimale inhoud voor tapwater. Bovendien heeft een groot vat door het grotere buitenoppervlak meer warmteverlies (stilstandsverlies); dat extra thermische verlies is in de simulatie niet meegenomen. Tenslotte zal een heel groot vat moeilijk achteraf in een bestaande woning te integreren zijn, een extra argument waarmee 200 liter een goed optimum is.



- **Ad 7: Adviezen t.a.v. woningverbetering. Opmerkingen en aanbevelingen**
Hoe groter de elementen die warmte afgeven (=groot VO= Verwarmend Oppervlak) en hoe minder energie een woning voor ruimteverwarming nodig, hoe lager de aanvoertemperatuur kan zijn bij een traditioneel radiator/convectoor-systeem.

Voor de label D woning (die bij H2-heating gehanteerd is) is in het algemeen een aanvoertemperatuur van 80° of minder voldoende voor thermisch comfort.

De volgende aanpassingen aan een Label D woning, die vaak niet ingrijpend zijn, en/of vaak al zijn uitgevoerd na al die jaren, dragen bij aan een zo laag mogelijke aanvoertemperatuur en een zo hoog mogelijk rendement van een hybride installatie:

A. Vergroten van de capaciteit van het warmteafgifte systeem op plekken in huis die een hoog comfort vragen met behulp van :

- Grotere radiatoren (bijv. 3-plaats met convector ipv 2p-plaats zonder convector)
- Geforceerd convectie met kleine ventilatoren
- Toepassing van vloerverwarming (kan in sommige gevallen al aanwezig zijn)

B. Beperken van de warmtevraag met behulp van:

- Dubbel glas; dat is vaak al uitgevoerd
- Dakisolatie
- Spouwmuur isolatie
- Vloerisolatie
- Isolatie van CV-leidingen in onverwarmde ruimtes.

Maatwerk zal in vele gevallen tot de mogelijkheid leiden om nog meer (COP) mogelijkheden te benutten van een Hybride installatie door een zo laag mogelijke aanvoertemperatuur voor de wintersituatie in te kunnen stellen.

Economische resultaten (WP6)

Inleiding aanpak economische beschouwing:

In WP 5b zijn de energetische prestaties bepaald met de optimale installatie die in WP 2b is vastgesteld:

Een Brandstof Cel met een vermogen van 2 kWel en WP van 4,5 kWth

Hiermee kan met waterstof 92% van de thermische warmte worden opgewekt waarmee het elektriciteitsnet sterk wordt ontlast. Een klein deel van de energie, ca 8%, wordt dus nog (netto) aan het net onttrokken.

In WP6 is de invloed van de kapitaalkosten (aanschaf en onderhoud) toegevoegd, naast het effect van verschillende energieprijzen, om daarmee te komen tot een totale economisch beschouwing.

Voor deze variabelen zijn reële keuzes gedaan.

Soms is ook de omgekeerde weg bewandeld: Voorbeeld: "Wat mag/moet de investering zijn, bij gekozen energieprijzen, om die investering te kunnen terugverdienen".

Additioneel ook het effect op de economie onderzocht als de BC (maximaal) elektriciteit levert voor eigen huishoudelijk gebruik en/of teruglevering aan het net. In WP5b was de regeling zodanig ingesteld dat alleen de thermische behoefte werd geleverd (ook) door de hybride installatie

De belangrijkste beoordelings indicatoren bij de economische analyse zijn verder:

- sCOP warmte (seizoens COP voor alleen thermische energie)
- sCOPtotaal (seizoens COP voor thermische energie + verbruik huishoudelijke energie)
- H2f-warmte: = aandeel H2 voor de productie van alleen de thermische vraag
- H2f-totaal: = aandeel H2 voor de productie van de thermische vraag + extra geleverde energie (tbv teruglevering en/of huishoudelijk gebruik)
- OEM: On-site Energy Matching: De instelling van de regeling om precies de juiste hoeveelheid energie op te wekken voor de (uurlijkse) energievraag.

Resultaten economische analyses

Er is een aantal stappen gevolgd om tot uitspraken te komen t.a.v. de economie van diverse technische installaties. In een aantal iteratieve stappen in paragraaf 3 wordt onderzocht welke prijsniveau's gunstig zijn voor de hybride installatie en wat het effect op de netbelasting is.

(NB: Omdat het aantal variabelen dat hierbij een rol speelt zeer groot is, is er niet één uitkomst in de gevoeligheidsanalyse te geven maar zijn wel algemeen trends te benoemen).

De gevolgde (iteratieve) stappen zijn als volgt:

- a) Bij welke combinatie van energieprijzen kan de hybride installatie economisch draaien als alleen naar de energiekosten gekeken wordt.
- b) Welke technische hybride configuratie (vermogens van BC en WP) hoort daarbij als exact de juiste hoeveelheid thermische energie wordt geleverd?

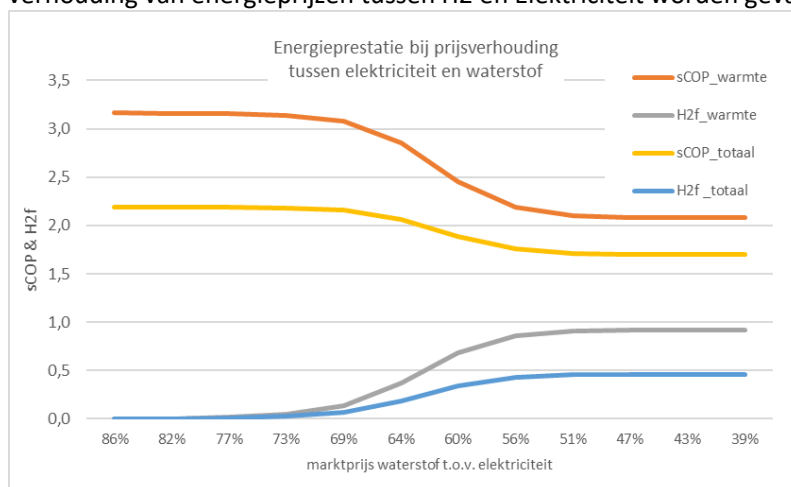
- c) Wat is het effect van teruglevering op de economie? Daarbij wordt voor teruglevering een vergoeding berekend van 1/3 van de inkoopkosten voor elektriciteit voor een huishouden (salderingsregeling is afgeschaft)
- d) Wat zijn de energiekosten bij verschillende energie-prijsscenario's absoluut in euro's en vergeleken met de referentie-energiekosten van een (solo) warmtepomp
- e) Wat is de impact van de hybride installatie mét en zónder levering voor eigen gebruik of teruglevering aan het net
- f) Wat is de economie als naast de energiekosten ook de kapitaalkosten (investering (Capex) en onderhoud (Opex)) worden meegerekend.
- g) Hoe ziet de terugverdientijd en break-even-situatie er grafisch uit?

Ad a en b: Hybride installatie vs solo WP draait economisch bij kWhel = € 0,45 en H2 = 5 €/kg

Deze situatie wordt geleverd met een BC van 2 kWel en een WP van 4,5 kWth. In de simulatie blijkt dat bij de ingestelde (OEM-) regeling bij het prijsniveau van 5 €/kg de hybride installatie maximaal op H2 draait.

P_bc [W]	P_wp [W]	elektriciteit	waterstof	sCOP heat	H2f heat	sCOP totaal	H2f totaal	OEM	rekening
0	4500	45 ct/kWh	5 €/kg	3,16	0,00	2,19	0,00	nvt	€3.490
1000	4500	45 ct/kWh	5 €/kg	2,18	0,84	1,75	0,42	1	€2.801
2000	4500	45 ct/kWh	5 €/kg	2,10	0,92	1,71	0,47	1	€2.674
4000	4500	45 ct/kWh	5 €/kg	2,17	0,87	1,75	0,44	1	€2.738
8000	4500	45 ct/kWh	5 €/kg	2,32	0,72	1,83	0,36	1	€2.931

Uit de volgende grafiek voor de hybride installatie is af te lezen hoe de energieprestaties verlopen als de verhouding van energieprijzen tussen H2 en Elektriciteit worden gevarieerd (figuur 2 uit WP6):



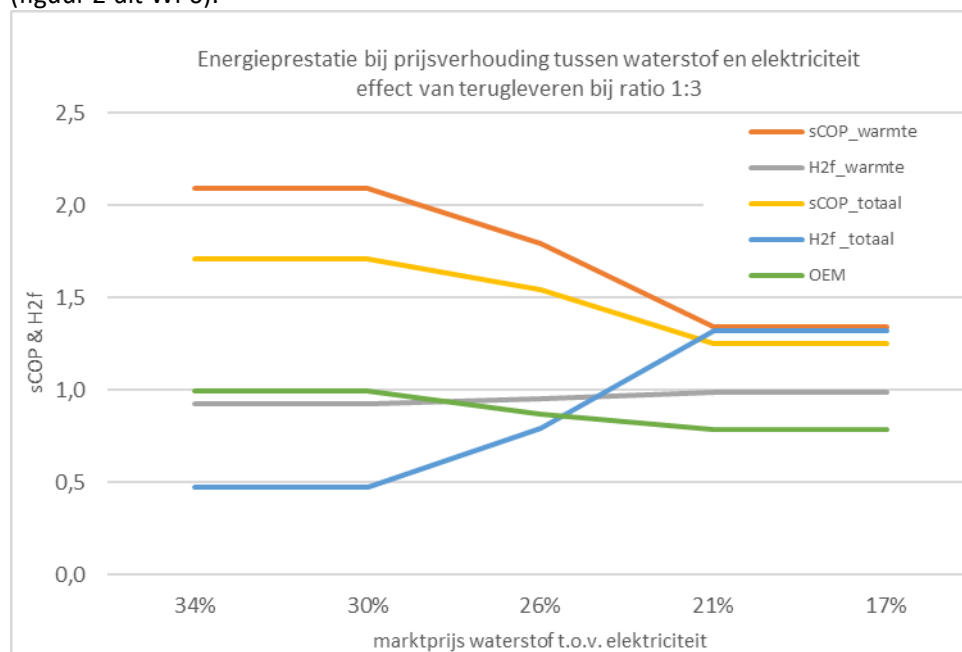
Ad c: Effect teruglevering op de economie, bij verschillende prijsverhoudingen Elektriciteit vs H2

Omdat bij teruglevering met een lage teruglever-vergoeding wordt gerekend (1/3 van de inkoopprijs) is het economisch pas bij een heel lage H2-prijs interessant om terug te leveren.

De tabel in het voorbeeld geeft de gevoeligheid aan voor deze prijsverhouding in/verkoop van elektriciteit. Bij een lage prijs van 3,5 euro/kg en een hoge prijs van 0,45 ct/kWhel wordt economisch niet meer teruggeleverd bij een verhouding van 4/1 en slechts weinig teruggeleverd bij 3/1. Bij 4/1 is dat te zien aan de H2f-heat van 0,92.

verhouding terugleververgoeding		sCOP heat	H2f heat	sCOP totaal	H2f totaal	OEM	rekening
(netto saldering)	in/verkoop 1:1	1,34	0,99	1,25	1,32	0,78	€750
elektriciteit: 45 ct/kWh	in/verkoop 2:1	1,34	0,99	1,25	1,32	0,78	€1.520
waterstof: 3,5 €/kg	in/verkoop 3:1	2,03	0,93	1,67	0,56	0,96	€2.305
(geen teruglevering)	in/verkoop 4:1	2,10	0,92	1,71	0,47	1,00	€2.404

Uit de grafiek voor de hybride installatie is af te lezen hoe de energieprestaties verlopen als de verhouding van energieprijzen tussen H2 en Elektriciteit worden gevarieerd in geval van teruglevering bij de ratio 3/1 (figuur 2 uit WP6):



Ad d: energiekosten bij diverse energiescenario's:

De energierekening van een (solo) WP is als referentie genomen voor het prijsvergelijk van energiekosten. Te zien is dat bij een H2-prijs van ca. 6,0 €/kg de energiekosten van de hybride-installatie vergelijkbaar zijn met de WP, waarbij de kapitaalkosten nog niet zijn meegerekend. De H2-ketel wordt pas interessant bij een H2-prijs lager van 3,5 €/kg

prijs H₂: elektriciteit = 82%. Verbruik 0,1 kg H₂.

referentie installaties:	elektriciteit 35 ct/kWh	waterstof 9,5 €/kg	totaal rekening	kosten tov warmtepomp
Warmtepomp	€2.715	-	€2.715	100%
Waterstofketel	€1.221	€3.648	€4.869	179%
Hybride systeem	€2.713	€1	€2.714	100%

prijs H₂: elektriciteit = 51%. Verbruik 177 kg H₂

referentie installaties:	elektriciteit 35 ct/kWh	waterstof 6 €/kg	totaal rekening	kosten tov warmtepomp
Warmtepomp	€2.715	-	€2.715	100%
Waterstofketel	€1.221	€2.432	€3.653	135%
Hybride systeem	€1.400	€1.059	€2.459	91%

prijs H₂: elektriciteit = 30%. Verbruik 180 kg H₂

referentie installaties:	elektriciteit 35 ct/kWh	waterstof 3,5 €/kg	totaal rekening	kosten tov warmtepomp
Warmtepomp	€2.715	-	€2.715	100%
Waterstofketel	€1.221	€1.419	€2.640	97%
Hybride systeem	€1.380	€629	€2.010	74%

prijs H₂: elektriciteit = 17%. Verbruik 180 kg H₂. 490 kg H₂ bij terug leveren.

referentie installaties:	elektriciteit 35 ct/kWh	waterstof 2 €/kg	totaal rekening	kosten tov warmtepomp
Warmtepomp	€2.715	-	€2.715	100%
Waterstofketel	€1.221	€811	€2.032	75%
Hybride systeem	€1.380	€360	€1.740	64%
Hybride systeem, terugleveren. (3:1)	€47	€981	€1.028	38%

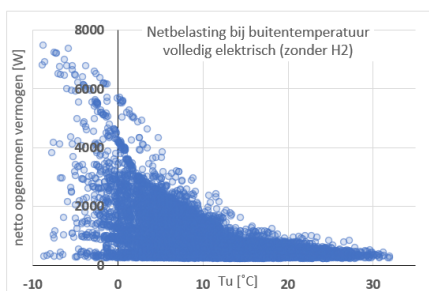
Ad e): Resultaten netontlasting met hybride installatie

In onderstaande puntenwolken is weergegeven wat de belasting is van het net (horizontaal = buitentemp) voor drie verschillende technische configuraties en regelstrategieën, zonder daarbij op de economie te letten:

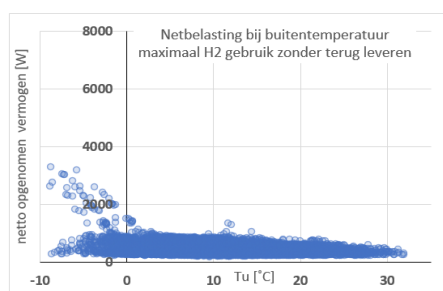
- i. Situatie verwarmen met de (solo) WP (linksboven)
- ii. Situatie met hybride installatie in bedrijf zónder teruglevering (rechtsboven)
- iii. Situatie met hybride installatie in bedrijf mét (maximale) teruglevering (linksonder).

NB: Voor i. en ii. (gig 5 en 6) Is bewust dezelfde verticale schaal gekozen. De pieken in de winter ($< 10^\circ$ zijn aanzienlijk lager en ook veel lager in aantal.

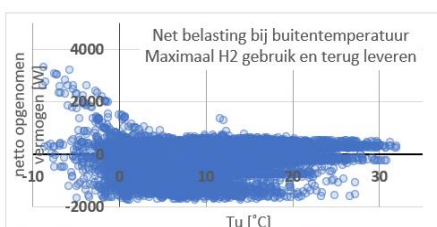
Voor iii. Geldt dat de positieve netbelasting op de grootste piekmomenten ($T_u < 0^\circ\text{C}$) vrijwel gelijk is aan ii. Daarnaast wordt echter ook significant teruggeleverd (de puntenwolk onder de x-as). Terugleveren wordt hierbij alleen gedaan op momenten dat ook de warmte uit de BC voor de woning gebruikt kon worden. Er wordt dus géén warmte ‘afgefakkeld’.



Figuur 5 Netto elektriciteitsgebruik van het net in 'all-electric' toestand, zonder waterstofgebruik.



Figuur 6 Netto elektriciteitsgebruik van het net in maximaal hybride functioneren



Figuur 7 Netto elektriciteitsgebruik van het net bij functioneren met

Ad f: Economie berekening energiekosten + Capex + Opex

Uit de tabellen 4.1 en 4.3 blijkt het volgende:

Tabel 4.1: Bij een aanname voor de investering (BC = € 10.000) en onderhoud voor de BC (€ 0,35 resp 6 €/kg zijn de totale jaarlijkse kosten voor de hybride installatie ruim hoger dan van de (solo) WP en op een vrijwel gelijk niveau als bij de H2-ketel

Tabel 4.3: In deze tabel is berekend, bij reëel ingeschatte energiekosten van € 0,35/kWh-el en € 4/kg H2 wat het investeringsniveau voor de BC zou moeten zijn voor gelijke totaal kosten met de WP. De BC zou dan niet meer mogen kosten dan € 3.000 voor de 2kWel uitvoering met waterkoeling.

(NB het voorspellen van prijs-ontwikkeling is ongewis, in <https://www.waterstofmagazine.nl/feiten-cijfers>, wordt onderbouwd wat de kostprijsontwikkeling voor H2 zou kunnen zijn. Die denktrend is hier aangehouden. Conclusie ten tijde van de analyse is dat zonder subsidie de hybride installatie niet snel rendabel zal kunnen zijn vergeleken met de warmtepomp.

Addendum d.d. september 2022. Indien de huidige marktprijs voor elektriciteit wordt gehanteerd (€1/kWh) verandert deze conclusie in een significant voordeel voor de hybride installatie t.o.v. beide alternatieven.

Tabel 4.1 Vergelijkende kostenberekening totale jaarlijkse energiekosten (ex. vastrecht). Prijsscenario 1, behoudende energieprijzen en brandstofcel op €10.000

	vaste kosten per jaar					€/jaar	variabele kosten per jaar					totale kosten per jaar	
	componenten (eenmalig)	installatie (eenmalig)	onderhoud (jaarlijks)	totaal vast	levensduur [jaar]		H2 [kg]	Kosten H2	elektra warmte [kWh]	elektra huishelijk [kWh]	kosten elektra		totaal variabel
el.: 0,35 ct/kWh H2: 6 €/kg verh. H2:El = 51%													
Warmtepomp	€4.500	€1.500	€150	€6.000	15	€550			4102	3500	€2715	€2715	€3265
CV H2	€3.500	€1.000	€150	€4.500	15	€450	405	€2.432		3500	€1221	€3654	€4104
Hybride													
WP	€4.500	€1.500	€125	€6.000	15	€525	177	€1.059	538	3476	€1.400	€2460	€4453
BC	€10.000	€750	€125	€10.750	8	€1.469							

Tabel 4.3 Vergelijkende kostenberekening van totale jaarlijkse energiekosten. Prijsscenario 3, elektriciteit 35ct/kWh, waterstof 4€/kg. De investeringskosten voor Brandstofcel zodanig gekozen (€3500), dat de hybride installatie vergelijkbare jaarlijkse kosten heeft met beide referentiesystemen.

	vaste kosten per jaar					€/jaar	variabele kosten per jaar					totale kosten per jaar		
	componenten (eenmalig)	installatie (eenmalig)	onderhoud (jaarlijks)	totaal vast	levensduur		H2 [kg]	Kosten H2	elektra warmte [kWh]	elektra huishelijk [kWh]	kosten		totaal variabel	
el.: 0,35 ct/kWh H2: 4 €/kg verh. H2:EI = 34%														
Warmtepomp	€4.500	€1.500	€150	€6.000	15	€550			4102	3500	€2715	€2715	€3265	
CV H2	€3.500	€1.000	€150	€4.500	15	€450	405	€1.621		3500	€1221	€2843	€3293	
Hybride	WP	€4.500	€1.500	€125	€6.000	15	€525	180	€719	484	3473	€1.380	€2100	€3281
	BC	€3.500	€750	€125	€4.250	8	€656							

h. Terugverdientijd en break-even-situatie bij variabele H2-prijzen en 65% subsidie voor het BC deel

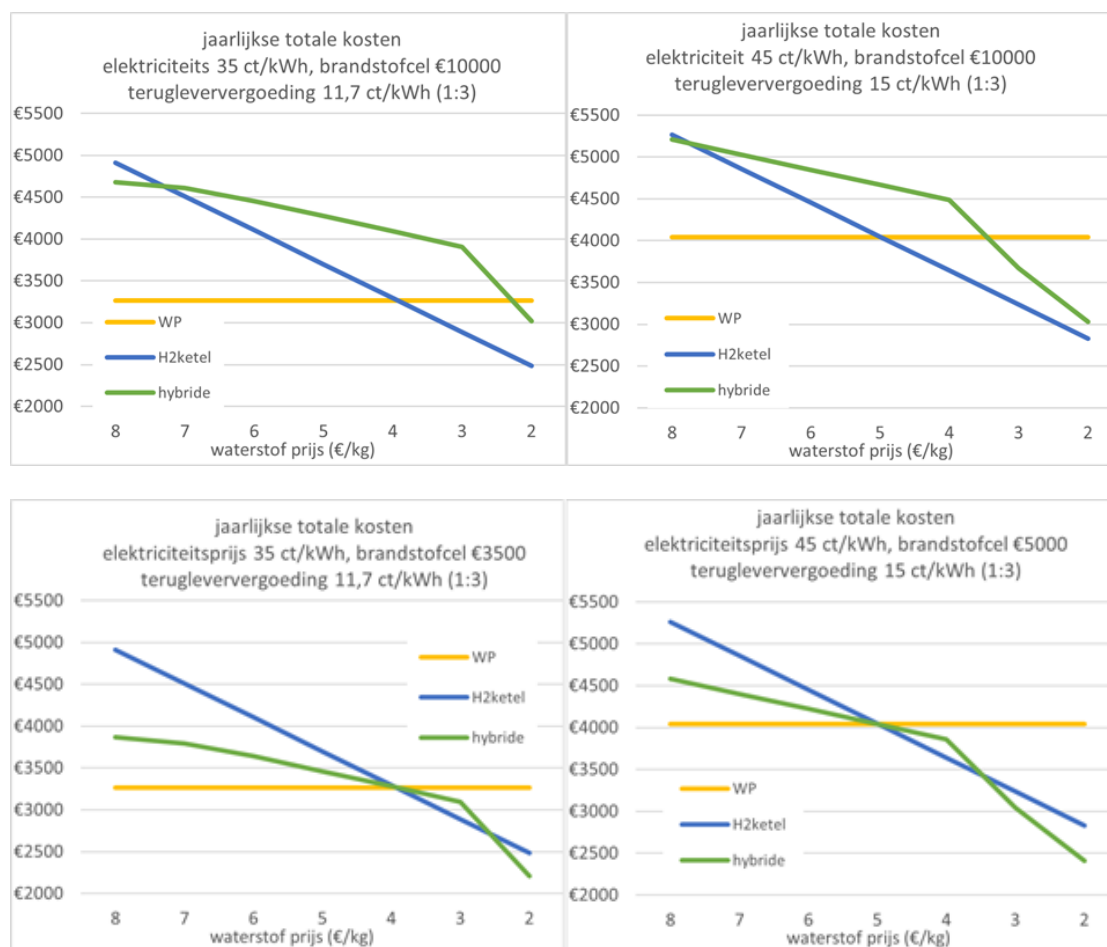
Te zien is dat zonder subsidie (bovenste linker grafiek) voor de hybride installatie break-even wordt bereikt bij een H2-prijs van ca. € 2 /kg. Bij een subsidie van € 6.500 (onderste grafiek links) ligt dit bij ca. € 4/kg wat een haalbaar prijsniveau lijkt te zijn op middellange termijn.

De knik in de groene lijn (hybride) is het gevolg van het feit dat H2 dan competitiever wordt met E-inkoop en de BC dan maximaal elektriciteit gaat produceren op basis van de economische instelling van de regeling.

Ook hier zal dan meer warmte door de BC worden geproduceerd waarvan het nuttig gebruik (of de afvoer ervan) in de woning mogelijk gebruikt kan worden maar waardoor de WP minder warmte zal hoeven leveren.

De H2f fractie zal daardoor lager (ongunstiger) worden.

Tenslotte heeft een hogere elektriciteitsprijs dan 0,35 €/kWhel, bij gelijke H2-prijs, het effect dat eerder financieel breakeven wordt bereikt (grafiek rechtsboven).



Figuur 1 Jaarlijkse totale kosten bij diverse waterstofprijzen, vaste elektriciteitsprijs en investeringskosten voor de brandstof cel à €3.500 en €5.000.

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In het H2heating project is onderzocht in hoeverre waterstof toegepast kan worden bij woningen. Uit de onderzoeken is gebleken dat zowel de waterstofketel als een brandstof gecombineerd met een warmtepomp technisch en veilig haalbaar zijn voor label D- woningen en hoger. Vooral de configuratie brandstofcel-warmtepomp is interessant vanwege een sCOP die in de buurt van 2 is en daardoor hoger is dan die van de waterstofketel die een sCOP lager dan 1 heeft.

Een belangrijke conclusie is dat de brandstofcel-warmtepomp configuratie voor netontlasting zorgt t.o.v. een elektrische warmtepomp doordat elektriciteitsvraag- en pieken kunnen worden gereduceerd door de eigen opwekking van elektriciteit, ook voor huishoudelijke doeleinden, d.m.v. de brandstofcel. Dit kan leiden tot een reductie van de kosten van een beoogde netverzwaring.

Onderstaand wordt nader ingegaan op de vier aspecten technisch, economisch, veilig en van aardgas loskomen.

Technisch passend?

- A. Zowel een hybride installatie als een H2-ketel zijn technisch passend bij de warmtevraag van een Label D-woning. Deze woningen zijn veelal al geschikt of met beperkte middelen geschikt te maken voor een 80/60° of zelfs een 70/50° afgifte systeem dat door de H2-ketel goed geleverd kan worden. Voor het hybride systeem is een afgifte-systeem van 70/50° optimaler. Dit is als snel mogelijk als wordt uitgegaan van een beperkte upgrade van het afgifte systeem die deze temperatuur verlaging mogelijk maakt. Additioneel of in plaats daarvan, kan hetzelfde bereikt worden met aanvullende bouwkundige isolatie, iets dat bij dit type woning vaak al met subsidies (bijv. voor dubbel glas) is gerealiseerd.
- B. De hybride installatie maakt het meest efficiënt gebruik van H2 (sCOP van bijna 2,0 vs 1,0 voor de H2-ketel) en belast de H2-infrastructuur beduidend minder dan de H2-ketel. Deze sCOP kan nog aanzienlijk hoger zijn als zou blijken dat in de zomer de netcongestie lager is en de WP ook vaker rechtstreeks uit het net gevoed kan worden.

Economisch interessant?

- C. H2-installaties hebben een lage H2-kg prijs nodig om economisch interessant te zijn. De economie hangt daarbij sterk af van hoe de energieprijzen zich ontwikkelen. De H2-ketel is door het verwachte beperkte investeringsniveau eerder economisch rendabel dan de hybride installatie, maar vraagt meer H2 uit de infrastructuur dan de energetisch veel gunstigere hybride oplossing. Het investeringsniveau van de hybride variant maakt dat deze, zonder aanvullende subsidies of brandstof-prijsvoordeel, niet binnen de komende 10 jaar economisch rendabel kan zijn. Hierbij is niet het volgende, potentieel wel aanwezige voordeel van een hybride installatie meegenomen: *Binnen specifieke marges kan het hybride systeem gunstig snel inspelen op flexibele en variabele energieprijzen. Daarmee kan het hybride systeem technisch een ondersteunende functie vervullen bij het creëren van netbalans die de sterke fluctuaties van zon en wind kan compenseren, gebruikmakend van het stuursignaal "energieprijs van (terug)levering.*

Veiligheid?

- D. Gebruik van H2 creëert door de fysieke eigenschappen een groter veiligheidsrisico dan aardgas. Dit risico is te beperken met een aantal maatregelen en/of ontwikkelingen en keuzes:
- Keuze voor odorisatie van H2 versnelt het signaleren van een lek; gezocht zal moeten worden naar een vorm waarmee een BC niet beschadigd wordt
 - Aanvullende sensortechniek is beschikbaar en ontwikkelt zich verder. Dit is een aanvullende veiligheidsvoorziening voor een vroeg-signalering bij lekkages die de gastoevoer kunnen afsluiten.
 - Keuze en/of ontwikkeling van pakkingmaterialen die bestand zijn tegen H2.
 - Leiding-aanleg zonder verbindingen tussen meterkast en het H2-toestel. Dat beperkt het risico in de woning en beperken de noodzaak voor sensor-beveiliging tot de meterkast en het H2-toestel zelf.
 - Richtlijnen voor leiding-aanleg en te gebruiken leidingmaterialen en verbindingen dragen bij aan het veilig aanleggen van installaties.
- Overall zal een veiligheidsniveau van nul nooit kunnen worden bereikt, net als dat ook voor aardgas nooit bereikt is. Maar het onderzoek naar veiligheid en veiligheidsmaatregelen geeft wel de informatie en inzichten dat het risico van het gebruik van H2 tot een acceptabel niveau is terug te brengen.

Haalbaarheid versneld “van aardgas loskomen”.

- E. De H2-ketel is technologisch goed (en snel genoeg) te ontwikkelen voor verdere marktintroductie. De hybride installatie bevindt zich momenteel nog op een veel lager TRL niveau; de industrie zal deze ontwikkeling verder moeten invullen, vóórdat een succesvolle introductie mogelijk en uitvoerbaar is.
- F. Voor de hybride installatie is, ivm de complexere techniek, een industrialisering noodzakelijk waarbij stekkerklare oplossingen in de markt worden gezet met een goed gebruiksaanwijzing. Bij voldoende economisch voordeel, bijv. mbv subsidies en een duidelijk sturende overheid richting H2-economie wordt verwacht dat de industrie deze stekkerklare oplossingen kan gaan aanbieden.
- G. Er is dringend regelgeving en de beschikbaarheid van installatievoorschriften op het gebied van H2-toepassing noodzakelijk. De afwezigheid daarvan heeft bij de uitvoering van dit project ernstige vertraging veroorzaakt