

KWR 2025.073 | juli 2025



H-Flex

Groene waterstof in een flexibel
elektriciteitssysteem

Openbare eindrapportage

Daniël Bakker, Els van der Roest, Dirk Vries,
Lotte Vijverberg, Jos Boere



Dit document kan het beste in “volledig scherm modus” gelezen worden.

KWR

Bridging Science to Practice



Samenvatting

Over H-Flex - kader

De energietransitie is in volle gang, en groene waterstof heeft binnen het duurzame energiesysteem een belangrijke systeemrol te vervullen als energiedrager, grondstof en opslagmedium. In de afgelopen jaren is in Nederland veel ontwikkeling geweest in de realisatie van opwekkingsvermogen voor duurzame elektriciteit en elektrificatie van verschillende sectoren. Als gevolg daarvan treden er problemen op in termen van de transportcapaciteit van het elektriciteitsnet (netcongestie) en de balancering van opwekking en gebruik van elektriciteit (balans). Groene waterstof kan in een systeemrol bijdragen aan een balans van het elektriciteitsnet en aan vermindering van netcongestie. Groene waterstof kan immers geproduceerd worden op momenten en plaatsen dat hernieuwbare elektriciteit overvloedig is, op grote schaal opgeslagen en getransporteerd worden, en vervolgens benut worden op momenten en plaatsen waar schaarste heerst. In het H-Flex project demonstreren we de huidige mogelijkheden hiervan, en bestuderen we de opties om de rolinvulling verder te optimaliseren, aan de hand van de demonstratie van een lokale groene waterstofketen in Nieuwegein.

Doelstelling

De drie hoofddoelen van het H-Flex project zijn:

1. Faciliteren van de omzetting van duurzaam opgewekte elektriciteit in groene waterstof door installatie van een 2.5 MW_e elektrolyser;
2. Technieken ontwikkelen om de efficiency van de elektrolyser te verhogen;
3. Bepalen van de mogelijkheden voor het integreren van een elektrolyser in een flexibel elektriciteitssysteem, en de werking daarvan.

Resultaten

De waterstofproductie door Hysolar draait inmiddels sinds 2024. Dit is gelukt doordat Hysolar en KWR actief hebben gezocht naar oplossingen voor knelpunten die bij de realisatie zijn opgetreden, waaronder:

- Juridische belemmeringen rondom een de elektriciteitsaansluiting,
- Een langdurig vergunningetraject,
- Technische complicaties bij de elektrolyser en de aanleg van een ondergrondse waterstofleiding van 1 km lang,
- Forse extra kosten voor de installatie ten opzichte van de oorspronkelijke begroting,
- Beperkte beschikbaarheid van monitoringsgegevens,
- Algemeen, een veel tragere ontwikkeling van de marktvraag naar groene waterstof dan oorspronkelijk voorzien.

Voor de verbetering van de efficiency zijn verschillende succesvolle opties verkend in termen van haalbaarheid en mogelijke opbrengsten:

- Terugwinnen van restwarmte die vrijkomt tijdens groene waterstofproductie: hierdoor kan de overall efficiency van de installatie toenemen van gemiddeld 76% naar 90%.
- Toepassen van DC (gelijkstroom) in plaats van AC (wisselstroom): DC heeft krachtige voordelen, die de weg vrijmaken voor verdere toepassing en opschaling.
- Verslimmen van de aansturing ten behoeve van het reduceren van elektriciteitskosten en toepassen van netwerkbalancering: gericht op inkoop van elektriciteit op gunstige momenten en balancering van het elektriciteitsnet is een regulaar ontwikkeld voor flexibele aansturing van de elektrolyser. Dit levert een extra verdienpotentieel op voor de elektrolyser. De pilot waarin de elektrolyser is ingezet op de passieve onbalansmarkt bevestigt dit en toont tevens risico's van flexibele inzet die afgewogen dienen te worden tegen het verdienpotentieel.

Maatschappelijke impact

De kennis die binnen het project H-Flex is ontwikkeld helpt het energiesysteem duurzamer en economisch haalbaar te maken. De impact is divers:

- Hysolar: optimalisatie van de bedrijfsvoering;
- Andere productielocaties van groene waterstof: vergelijkbaar met Hysolar;
- Decentrale energiehub: de rol van waterstof bij verzachten/voorkomen van netcongestie;
- De NL kennispositie: van groot belang, zeker gezien de landsbrede congestie van het elektriciteitsnet.

Inhoudsopgave

1. [Introductie](#)

Deel I – Groene Waterstofproductie

2. [Tijdslijn realisatie elektrolyser](#)
3. [Lessons learned tijdens realisatie](#)
4. [Monitoring elektrolyser](#)
5. [Monitoring zonneveld](#)

Deel II – Hogere efficiency door restwarmte & gelijkstroom

6. [Hoe gelijkstroom bijdraagt aan een efficiënter systeem](#)
7. [Restwarmte uit elektrolyse](#)

Deel III – Slimme aansturing voor meer flexibiliteit

8. [Hoe kan een elektrolyser flexibiliteit toevoegen?](#)
9. [Waterstofregelaar op basis van APX](#)
10. [Pilot aansturing elektrolyser balancerende markten](#)

Deel IV – Conclusies, aanbevelingen en bronnen

11. [Conclusies, aanbevelingen en vervolgonderzoek](#)
 12. [Bronnen](#)
-

Deel V – Projectgegevens en Uitvoering

13. [Projectgegevens](#)
14. [Publicaties](#)

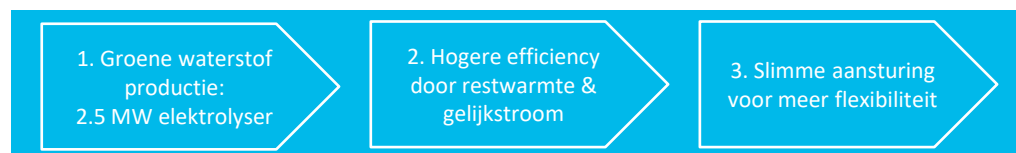
N.B. op elke pagina kan naar de inhoudsopgave genavigeerd worden door op de blauwe button te klikken: [Link naar overzicht](#)

1. Introductie – kader en doelstelling

Over H-Flex - kader

De energietransitie is in volle gang, en groene waterstof heeft binnen het duurzame energiesysteem een belangrijke rol te vervullen als energiedrager, grondstof en opslagmedium [0]. In de afgelopen jaren is in Nederland in de energietransitie veel ontwikkeling geweest in de realisatie van opwekkingsvermogen voor duurzame elektriciteit en elektrificatie van verschillende sectoren. Als gevolg daarvan treden er problemen op in termen van de transportcapaciteit van het elektriciteitsnet (netcongestie) en de balancering van opwekking en gebruik van elektriciteit (balans). Groene waterstof kan in de systeemrol bijdragen aan balans van het elektriciteitsnet en aan vermindering van netcongestie. Groene waterstof kan immers geproduceerd worden op momenten en plaatsen dat hernieuwbare elektriciteit en transportcapaciteit overvloedig is, op grote schaal opgeslagen en getransporteerd worden, en benut worden op momenten en plaatsen waar schaarste heerst.

In H-Flex project karakteriseren we de flexibiliteit van elektrolyse en de positieve impact van groene waterstof op het elektriciteitsnet. Het H-Flex project, gestart in 2020, was daarmee één van de voorlopers in de sector. Gedurende de looptijd heeft het H-Flex project vele lessen opgeleverd. We hopen dat andere initiatiefnemers van waterstofprojecten, maar ook andere belanghebbenden zoals beleidsmakers, kunnen leren van de inzichten uit het H-Flex project, zodat het bijdraagt aan meer succesvolle realisaties.



Luchtfoto van de elektrolyser installatie van Hysolar gerealiseerd bij KWR in Nieuwegein

Doelstelling

De drie hoofddoelen van het H-Flex project zijn:

1. Faciliteren van de omzetting van duurzaam opgewekte elektriciteit in groene waterstof door installatie van een 2.5 MW_e elektrolyser;
2. Technieken ontwikkelen om de efficiency van de elektrolyser te verhogen;
3. Bepalen van de mogelijkheden voor het integreren van een elektrolyser in een flexibel elektriciteitssysteem, en de werking daarvan.

1. Introductie – leeswijzer

Leeswijzer

Dit overkoepelende, vertrouwelijke eindrapport geeft een beeld van de opbrengsten van het H-Flex project dat is uitgevoerd van maart 2020 tot en met april 2025. De resultaten hebben we geordend volgens de drie hoofddoelen van het project die op de vorige pagina uiteen zijn gezet. In Deel 1 van de rapportage gaan we in op de realisatie en monitoring van de electrolyser, en welke lessen we daaruit konden leren. Het gebruik van gelijkstroom infrastructuur en de benutting van restwarmte om de efficiency van de elektrolyser te verhogen worden omschreven in Deel II. In Deel III worden de resultaten gepresenteerd van het onderzoek naar de integratie en werking van een elektrolyser in een flexibel elektriciteitssysteem. We ronden het inhoudelijke gedeelte van deze rapportage in Deel IV, waar we de conclusies, aanbevelingen, suggesties voor vervolgonderzoek en de gebruikte bronnen omschrijven. Verwijzingen naar literatuur zijn in het document weergegeven als getal tussen blokhaken, bijvoorbeeld “[15]”.

In het laatste deel van deze rapportage, Deel V, geven we inzicht in de uitvoering van het project: de projectgegevens, het projectteam en de publicaties.





Deel I - Groene
waterstofproductie

KWR

Bridging Science to Practice



2. Tijdslijn ontwikkeling elektrolyser



De realisatie van de elektrolyser was op het moment dat het projectvoorstel voor H-Flex werd opgesteld, voorzien in het eerste kwartaal van 2021, zodat er nog drie jaar gemonitord zou kunnen worden. In werkelijkheid heeft de realisatie veel langer geduurd, zoals in de tijdslijn hieronder is te zien. Het vergunningsproces duurde lang. Het begon met een aantal maanden onduidelijkheid over wie het bevoegd gezag was om de vergunning te beoordelen. In het proces daarna was het te merken dat er nog relatief weinig expertise bij gemeenten, provincies en omgevingsdiensten aanwezig was om elektrolyse projecten goed te keuren. Het vergunningsproces is echter niet het enige dat tegenviel qua doorlooptijd.

Ook de realisatie van de elektriciteitsaansluiting en wateraansluiting, levering van de elektrolyser installatie zelf en aanleg van de pijpleiding naar het tankstation bleken haken en ogen te hebben die niet allemaal werden voorzien. Meer over de lessen die t.a.v. de realisatie geleerd zijn is te lezen in hoofdstuk 3. van deze eindrapportage. Uiteindelijk is de volledige installatie in oktober 2024 feestelijk in gebruik genomen door Zijne Majesteit de Koning. Aangezien de elektrolyser voor die tijd al enkele malen in gebruik is geweest voor tests is de monitoringsperiode reeds gestart in september 2024. De pilot slim aansturen is in het eerste kwartaal van 2025 uitgevoerd.



3-1. Lessons learned realisatie



Netaansluiting

De opzet in het project was om de elektrolyser direct aan te sluiten op het naastgelegen zonnepark van Waternet, waarbij de stroom wordt doorgeleverd achter de meter via hun eigen stroomnet, het liefst op gelijkstroom om twee DC-AC-DC omvormingen te voorkomen.

Wat gaat goed?

- Goed contact met Stedin & Waternet over o.a plaatsing elektrolyser
- Technisch zijn er geen problemen voor de aansluiting
- Doorlevering kan via MLOEA (meerdere leveranciers achter een aansluiting)

Wat zijn uitdagingen?

- Directe aansluiting op DC niet mogelijk omdat SDE+ subsidie zonnepark dan zou vervallen.
- De VEMW adviseerde negatief over MLOEA aan Waternet want strikt genomen niet toegestaan met verschillende entiteiten.
- Tot aan goedkeuring nieuwe energiewet was cable pooling met opwek én afname niet toegestaan.

Gevolg/ondernomen actie

De elektrolyser heeft uiteindelijk een eigen (5MVA) aansluiting op het onderstation van Stedin. Gesprekken met Stedin over oplossingsrichtingen t.b.v. de energietransitie hebben bijgedragen aan de totstandkoming van cable pooling met opwek én afname.

Vergunningentraject

Het produceren van waterstof is een milieubelastende activiteit waarvoor een vergunning, passend binnen een bestemmingsplan, noodzakelijk is. De locatie is het terrein van KWR, op het bedrijventerrein Plettenburg in Nieuwegein. In goed overleg met de gemeente Nieuwegein en het bevoegd gezag is dit proces snel gestart.

Wat gaat goed?

- De samenwerking tussen alle betrokkenen
- Tijdens het project is de aandacht voor groene waterstof en het belang ervan toegenomen
- Er zijn veel aanbieders van componenten en randapparatuur

Wat zijn uitdagingen?

- Procedures nog niet altijd ingericht voor het begeleiden van dit soort projecten
- Vergunningsonderdelen worden getoetst op PGS35 (tankstation), die niet matcht met de elektrolyser → blijkt bijv. uit brandwerende coating, vloeistofdichte vloer
- Vertraging in levering elektrolyser

Gevolg/ondernomen actie

De installatie van de elektrolyser loopt vertraging op, ten opzichte van de oorspronkelijke planning (uit het projectplan) schuift de realisatie uiteindelijk 3,5 jaar op. Ook worden meerkosten gemaakt voor veiligheidsmaatregelen die eigenlijk niet van toepassing zijn.

3-2. Lessons learned realisatie



Realisatie elektrolyser

De 2,5 MW PEM-elektrolyser is in mei 2024 geplaatst op het terrein van KWR in Nieuwegein (Waterkwartier) en sinds oktober operationeel.

Wat gaat goed?

- Het tankstation levert sinds oktober 2024 lokaal geproduceerde waterstof van de gerealiseerde elektrolyser
- De samenwerking met de leveranciers verliep soepel in de aanloopfase
- Door vroegtijdige aanvraag was er geen vertraging i.r.t. het verkrijgen van de netaansluiting n.a.v. netcongestie

Wat zijn uitdagingen?

- Technische problemen tijdens commissioning
- Het vergunningstraject door afstemming tussen bevoegd gezag, gemeente en Hysolar
- Onduidelijke afspraken over verantwoordelijkheden systeemintegratie
- Dataverzameling door de vele databronnen
- Onverwacht hoog stikstofverbruik¹
- Huisnummer nodig voor aanvraag wateraansluiting

Gevolg/ondernomen actie

De onduidelijke taakverdeling rondom systeemintegratie leidde tot veel extra werk voor Hysolar. Voor het verhoogde stikstofverbruik is een stikstofgenerator geplaatst en is de vergunning aangevuld. Er wordt gewerkt aan een centrale database. De wateraansluiting liep vertraging op doordat een huisnummer pas na vergunningsverlening werd afgegeven.

Realisatie pijpleiding

Er is een ondergrondse waterstofleiding aangelegd tussen de elektrolyser en het tankstation. De speciale RVS leiding is circa 1,1 km lang en in drie delen aangebracht via een horizontaal gestuurde boring. De werkzaamheden zijn gestart in september 2023 en afgerond vóór ingebruikname van de elektrolyser.

Wat gaat goed?

- De KLIC-melding² werd sneller verkregen dan verwacht, waarbij constructief werd meegedacht door de betrokken partijen
- De toestemming van de grondeigenaar kwam vlot tot stand
- De leiding is succesvol lekdicht aangelegd in stedelijk gebied, zonder grote verstoringen

Wat zijn uitdagingen?

- Het oorspronkelijke plan met open sleufaanleg over gemeentelijk terrein vergde veel afstemming en tijd
- Leidingen bestemd voor brandbare gas- of vloeistoffen boven een bepaalde diameter en druk vielen onder het Besluit Externe Veiligheid Buisleidingen wat een complicerende factor zou betekenen richting de realisatie en tijdens de operationele fase

Gevolg/ondernomen actie

Bij de gehanteerde druk is gekozen voor een beperkte leidingdiameter waardoor een toestemming van o.a. gemeente en de grondeigenaar en KLIC-melding voldoende was. De leiding is in drie delen aangebracht om hinder te beperken en afstemming te vereenvoudigen.

¹ Stikstof is nodig om een inerte omgeving te creëren wanneer de elektrolyser niet actief is

² KLIC staat voor Kabels en Leidingen Informatie Centrum

4-1. Monitoring elektrolyser: aanpak

Welke informatiebehoefte was er?

Voor een goed inzicht in de prestaties en flexibiliteit van een PEM-elektrolyser is monitoring nodig van de operationele inzet, de systeemefficiëntie, het potentieel voor restwarmtebenutting en het potentieel voor flexibele aansturing.

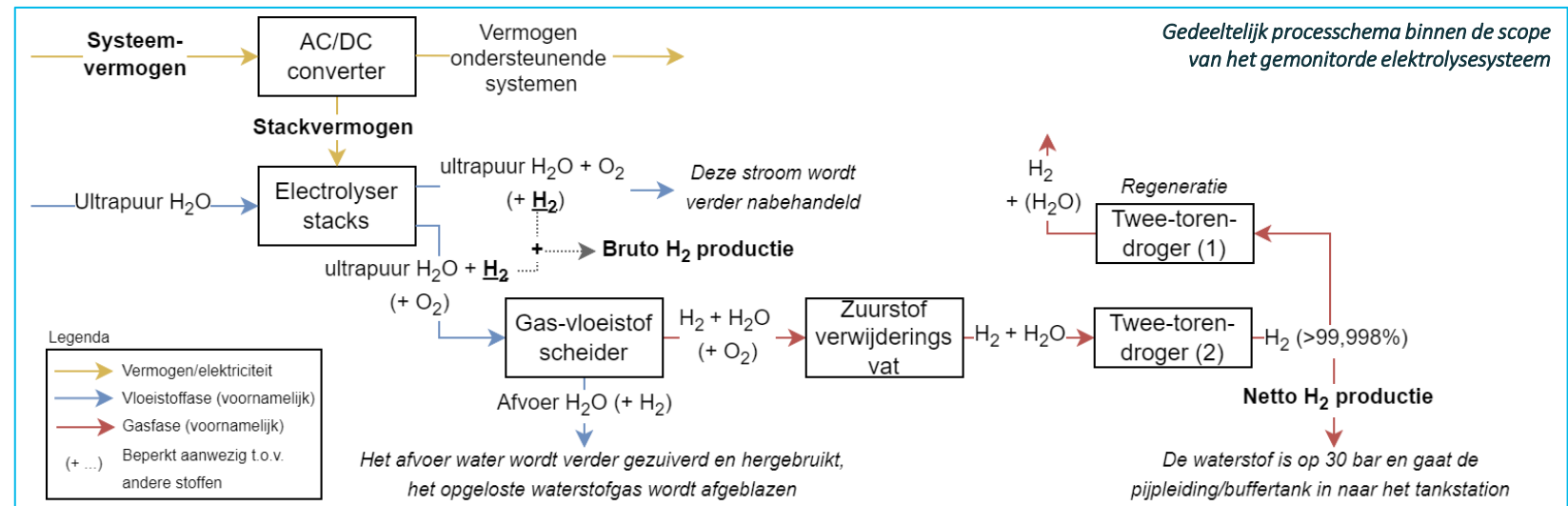
Hoe is de data verzameld?

De monitoring heeft plaatsgevonden op verschillende onderdelen van de elektrolyser via o.a. kWh-meters en massaflowmeters. De geproduceerde datasets en bijhorende informatie zijn in de tabel weergegeven. Vanwege het premature karakter zijn niet alle monitoringsresultaten in deze rapportage weergegeven.

Monitoringsperiode en inzet van de elektrolyser

De monitoring vond plaats van september 2024 tot april 2025, i.e. tijdens de opstartfase die voorafgaat aan de SAT (Site Acceptance Test). De data zijn nog niet representatief voor de werking van de installatie onder praktijkcondities. Om die reden kunnen nog geen gegevens worden gerapporteerd.

Dataset	Resolutie	Eenheid
Draaiuren waarin waterstof geproduceerd wordt	uur	uur
Systeemvermogen (elektrolyser + ondersteunende systemen)	5 min	kW
Waterstofproductie (naar bufferopslag)	5 min	kg H ₂ /uur
Waterstofproductie efficiency (HHV)	5 min	%
Temperatuur van het koelcircuit voor de ventilatoren	5 min	°C
Temperatuur van het koelcircuit na de ventilatoren	5 min	°C



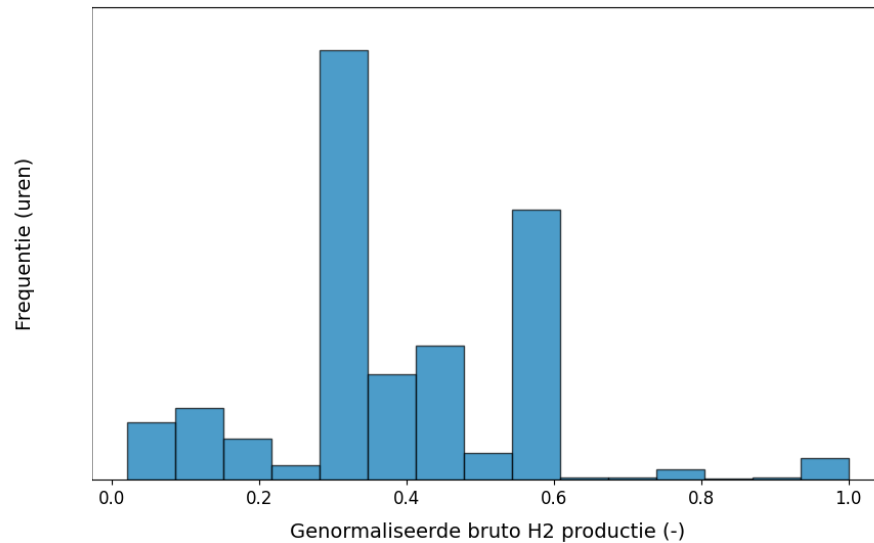
4-2. Monitoring elektrolyser: resultaten (1/2)

Operationele inzet

Gedurende de periode van monitoring heeft de elektrolyser op verschillende waterstofproductie targets gewerkt om het gehele systeem vanaf elektrolyser t/m waterstoftankstation verder in te regelen. De productieresultaten staan weergegeven in de grafiek.

De productie is vraaggestuurd en bedoeld om te voldoen aan de waterstofbehoefte van het tankstation. De productie vond vooral plaats tussen circa 30% en 60% belasting.

Verdeling van bruto waterstofproductie tijdens draaiuren



Verdeling van de genormaliseerde bruto waterstofproductie tijdens draaiuren met >1 kg/uur bruto productie.

Systeemefficiëntie (1/2)

Inzicht in de prestatie van het elektrolyser is de basis voor optimalisatie. Een gevalideerd Power-to-X-model ondersteunt dit doel door de netto systeemefficiëntie te beschrijven bij verschillende productiesetpoints. Deze efficiëntie wordt bepaald als de verhouding tussen de netto waterstofproductie en het systeemvermogen.

Aanpak data-analyse

De efficiëntie wordt bepaald onder stabiele condities om tijdsafhankelijke effecten uit te sluiten. De gehanteerde methode bestaat uit de volgende stappen:

1. Selecteren van stabiele periodes op basis van systeemvermogen en waterstofproductie.
2. Berekenen van het gemiddelde en de standaarddeviatie per productiesetpoint.
3. Bepalen van de systeemefficiëntie per productiesetpoint met de formule:

$$\eta_{sys} = HHV * \frac{m_{H2}}{P_{sys}} * 100\%$$

- *HHV* (Higher Heating Value): de chemische energie-inhoud van waterstof, gelijk aan 39,4 kWh/kg.
- *m_{H2}*: massastroom van waterstof in kg/uur.
- *P_{sys}*: elektrisch systeemvermogen in kW.

4-2. Monitoring elektrolyser: resultaten (2/2)

Potentieel restwarmtebenutting

De elektrolyser wordt gekoeld via een gesloten circuit dat restwarmte afvoert met behulp van een droge koeler. Deze restwarmte kan i.s.m. met een geschikte afnemer nuttig worden ingezet. Het potentieel voor restwarmtebenutting hangt af van het warmtedebiet en de temperatuur van de koelvloeistof voor de koeler.

Warmtedebiet

Het warmtedebiet wordt bepaald door het temperatuurverschil over de droge koeler, het lucht- en vloeistofdebiet en warmteoverdrachtcoëfficiënt van de koelvloeistof. Op basis van het maximale systeemvermogen van 2,55 MW en de systeemefficiëntie is een **theoretische bovengrens van 0,66 MW** aan restwarmteverliezen bepaald. Niet alle verliezen worden echter via het koelcircuit afgevoerd of zijn effectief overdraagbaar waardoor deze bovengrens in de praktijk lager uit zal vallen.

Kwaliteit/temperatuur

De koelregeling is momenteel zodanig ingesteld dat de temperatuur na de koeler ruim onder de waarschuwingsgrens van 48 °C blijft. Bij één van de momentopnames onder 60% belasting was deze bijvoorbeeld circa 34°C. Deze temperatuur hangt verder mede af van de buitencondities en andere variabelen. In overleg met de leverancier zou de ingestelde temperatuur mogelijk verhoogd kunnen worden tot enkele graden onder de grens. Het verhogen van deze temperatuur vergroot het toepassingsgebied van de restwarmte.

Het productiesetpoint van de elektrolyser en het debiet van de koelvloeistof bepalen samen de mate van opwarming van de vloeistof, en daarmee de temperatuur vóór de droge koeler. Deze temperatuur, maximaal instelbaar op **48 °C**, geldt als **bovengrens** voor de temperatuur van de beschikbare restwarmte.

Potentieel flexibele aansturing

Scholt Energy geeft aan dat deelname aan zowel de passieve als de aFRR-actieve onbalansmarkt interessant kan zijn voor een elektrolysesysteem.

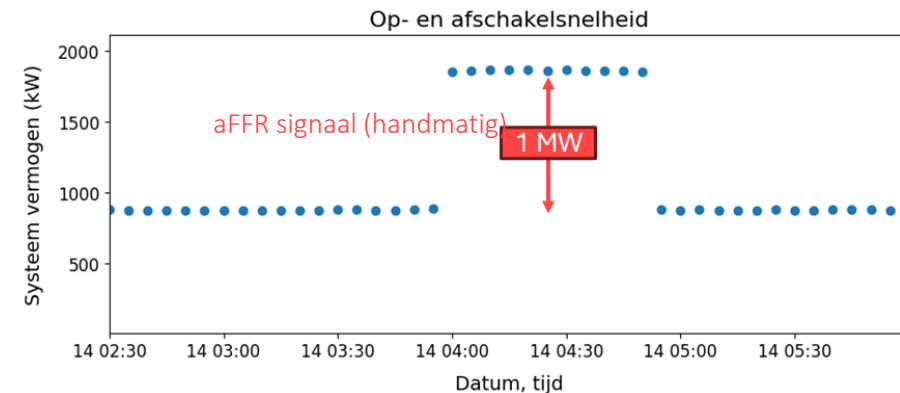
Passieve onbalansmarkt

Op deze markt wordt gereageerd op real-time onbalansprijzen. Er gelden geen snelheidseisen t.a.v. de responstijd, deelname hangt vooral af van strategie [3].

aFRR-actieve onbalansmarkt [4]

TenneT schakelt het systeem op afgesproken momenten op/af tegen vergoeding. Een uitgeschakelde elektrolyser is hiervoor ongeschikt omdat de opstarttijd ruimschoots meer is dan de vereiste responstijd van <30 s, maar bij een draaiend systeem toont een test met een handmatig signaal dat model staat voor een signaal van de aFRR van 1 MW (minimale biedgrootte) aan dat:

- ✓ de op-/afschakelsnelheid $\geq 0,2$ MW/min (20%/min) is (boven de vereiste 7%/min),
- ✓ binnen 5 minuten volledig gecontracteerd vermogen bereikt wordt (eis: <15 min).



Simulatie van een aFRR-signaal waarbij het systeemvermogen gedurende een uur handmatig met 1 MW is verhoogd.

4-3. Monitoring elektrolyser: modelvalidatie

Modelvalidatie Power-to-X

Bij de ontwikkeling van het Power-to-X-model [5] was er in de literatuur nog weinig bekend over de vorm van de netto systeemefficiëntiecurve voor een PEM-elektrolyser. Daarom is destijds gekozen voor een benadering op basis van een **bruto stack-efficiëntiecurve** [6]. Deze aanpak houdt echter geen rekening met systeemverliezen van ondersteunende installaties, noch met waterstofverliezen door zuivering.

Door in plaats van het stackvermogen het systeemvermogen te gebruiken, worden vermogensverliezen wél meegenomen, wat leidt tot een **bruto systeemefficiëntiecurve**. De relatie tussen systeemvermogen en bruto productie bleek goed te benaderen met een kwadratische vergelijking, waarmee de efficiëntiecurve afgeleid kan worden:

$$\eta_{sys,bruto} = HHV * \frac{a * P_{sys}^2 + b * P_{sys} + c}{P_{sys}} * 100\%$$

Voor de **netto systeemefficiëntiecurve** moeten ook de waterstofverliezen worden meegenomen. Deze aangepaste benadering geeft waarschijnlijk een realistischer beeld van de systeemprestaties dan het eerder gebruikte stack-efficiëntiemodel. Het is nodig om een grotere dataset met netto productiegegevens te verzamelen, zodat de efficiëntiecurve rechtstreeks op basis daarvan kan worden gefit. Het verzamelen van representatieve datapunten wordt verder uitgevoerd na afronding van de SAT.

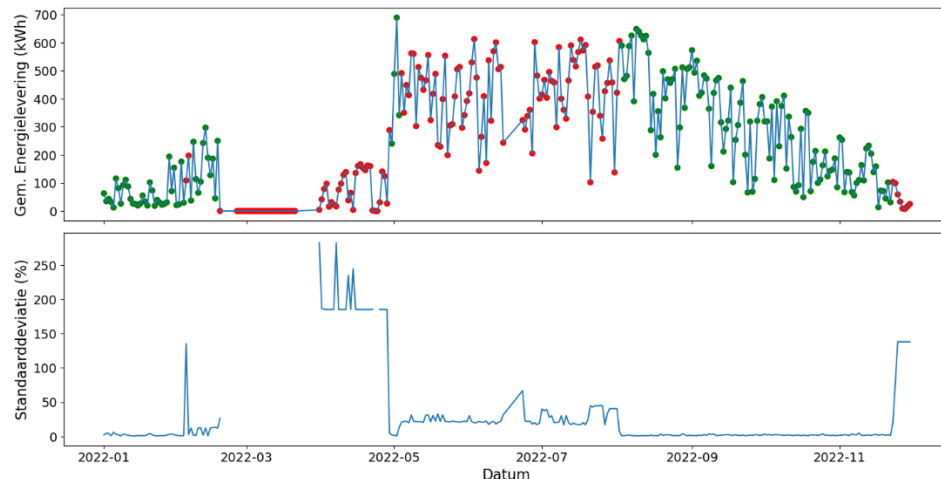
$$\eta_{sys,netto} = HHV * \frac{a * P_{sys}^2 + b * P_{sys} + c - d}{P_{sys}} * 100\%$$

5. Monitoring zonneveld

Informatiebehoefte en dataverzameling

Voor een mogelijke toekomstige koppeling met een zonneveld door middel van een power-purchasing agreement (PPA) is een gevalideerd model [5] belangrijk om te kunnen anticiperen op de verwachte energieproductie. Hiervoor zijn de volgende gegevens verzameld:

- **Energieproductie per uur** over een heel jaar. De geselecteerde data bestaat uit AC-productie van 9 omvormers met gelijke configuratie. Periodes met ontbrekende data en een verschil tussen de metingen (standaarddeviatie > 15%) zijn niet meegenomen om individuele afwijkingen te minimaliseren. Het ontbreken van data heeft meerdere oorzaken, waaronder:
 - Communicatieproblemen waardoor de omvormers uitvielen (onbekende oorzaak);
 - Foutieve instelling van de transformator (was ingesteld op 'leveren' in plaats van 'terugleveren');



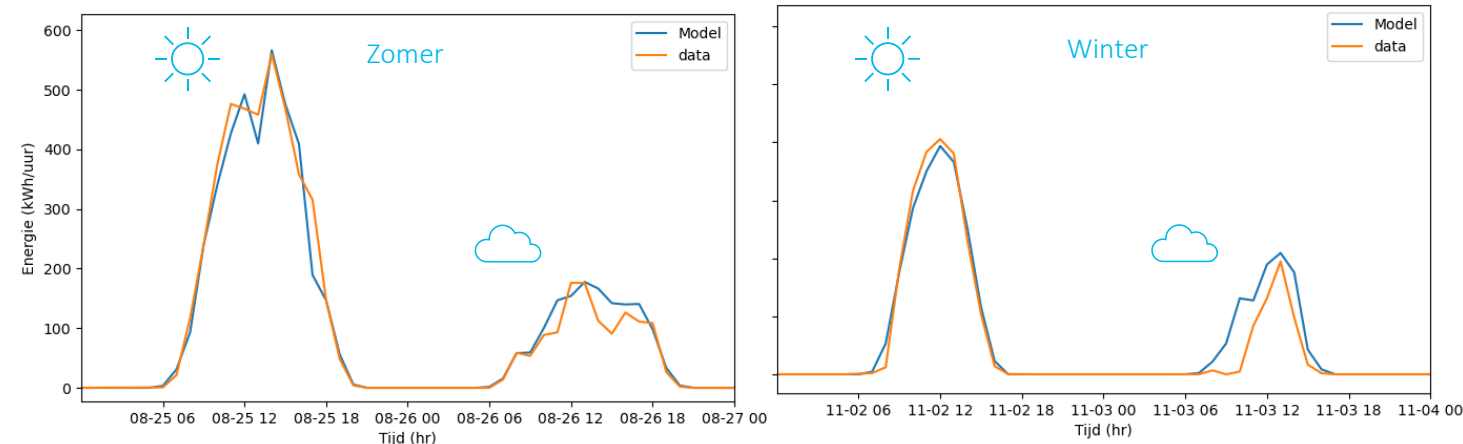
Gemiddelde dagelijkse energielevering en standaarddeviatie voor 9 omvormers van zonnepark WRK. Rode punten geven ongeschikte data aan vanwege hoge standaarddeviatie of ontbrekende gegevens.

- **Zonneveldgegevens** zoals oriëntatie en instellingsdatum, verkregen via Waternet.
- **Paneelspecificaties** zoals rendement en paneeloppervlak, op basis van datasheets [7].
- **Lokale temperatuur** en **zonnestraling** van KNMI-station De Bilt.

Modelvalidatie Power-to-X

Bij hoge energieopwekking fluctueert de fout willekeurig binnen een absolute bandbreedte van circa 10%. Naarmate de opwekking lager is, treedt er een toenemende overschatting op. Dit patroon is ook zichtbaar in de detailbeelden: op bewolkte dagen, met name in de winter, overschat het model de opgewekte energie.

Een mogelijke verklaring is de vereenvoudigde modellering van verliezen, die momenteel lineair benaderd wordt. Niet-lineaire effecten, zoals die van omvormers, worden daardoor mogelijk onvoldoende meegenomen. Ook de berekening van de invallende zonnestraling op de panelen kan verbeterd worden.



Vergelijking tussen gemodelleerde en gemeten energielevering voor twee periodes: één in de zomer en één in de winter. In beide gevallen volgt een bewolkte dag direct op een zonnige dag.



Deel II – Hogere
efficiency door
restwarmte &
gelijkstroom

KWR

Bridging Science to Practice



6. Hoe gelijkstroom bijdraagt aan een efficiënter systeem

In het huidige energiesysteem is wisselstroom (AC) gangbaarder dan gelijkstroom (DC), maar dit is aan het veranderen. De belangrijkste drivers hiervoor zijn de ontwikkeling van vermogenselektronica, en de combinatie van elektrificatie en digitalisering. Vrijwel elke elektrische applicatie werkt intern op DC, dit geldt zowel voor productie (wind/zon) als voor verbruik (gebouwde omgeving, mobiliteit en industrie). In H-Flex project zijn drie vragen beantwoord omtrent een systeemontwerp op gelijkstroom tussen het zonnepark, de elektrolyser en het nabijgelegen KWR gebouw.

a. Wat zijn de mogelijkheden voor directe DC koppeling?

Een directe DC/DC koppeling tussen zonnepark en elektrolyser is een logische stap, omdat beide intern op DC werken, maar ook andere systeemcomponenten kunnen op DC werken. De figuur hiernaast laat een mogelijk systeemontwerp zien waarbij er directe DC/DC koppelingen zijn gemaakt, maar er ook nog de mogelijkheid bestaat tot omvorming naar AC om inpasbaarheid te waarborgen.

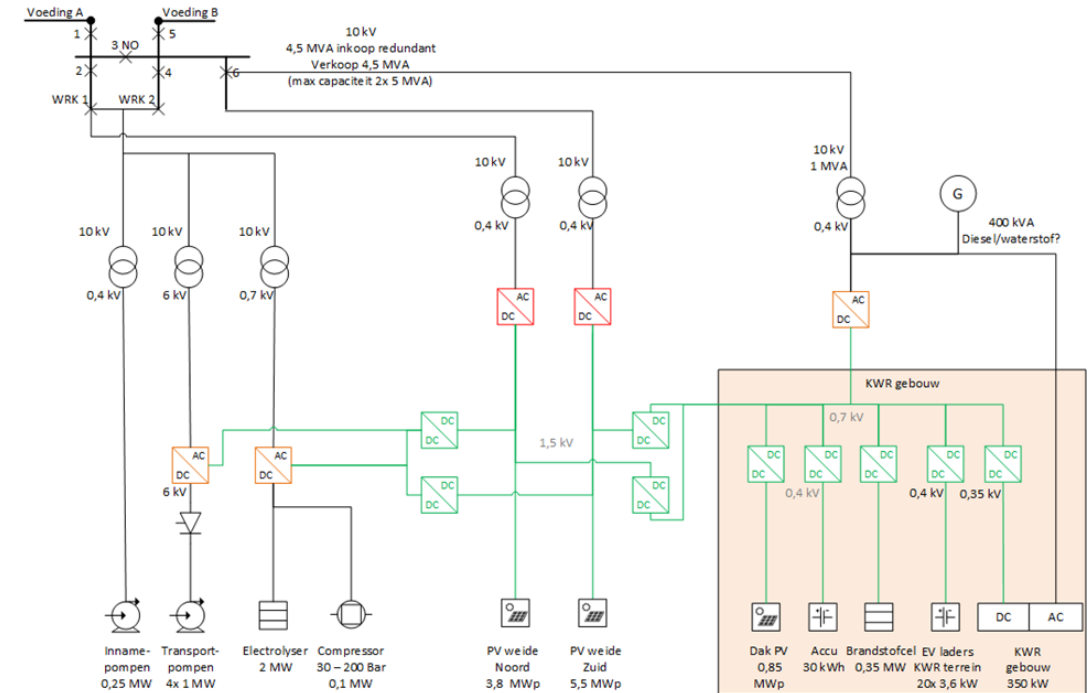
b. Wat zijn mogelijke besparingen bij directe DC-koppeling?

Gelijkstroom heeft als voordelen hogere transportcapaciteit in de infrastructuur, minder transportverliezen en materiaalbesparing door minder omvormingsstappen, eenvoudiger dynamisch netbeheer en de mogelijkheid verbruikers aan te sturen.

c. Met welke aspecten moet rekening worden gehouden bij een DC systeem?

DC infrastructuur vraagt andere vormen van beveiliging en beheer. In de afgelopen jaren zijn de benodigde componenten (DC/DC omvormers) geleidelijk commercieel beschikbaar gekomen. De kosten en beschikbaarheid van componenten zijn daarmee ook verbeterd. De voordelen van DC, bredere beschikbaarheid van componenten en concrete voorbeeldsystemen zorgen ervoor dat DC oplossingen interessant zijn voor het ontwerp van (lokale) energiesystemen.

In de praktijk bleek er geen directe koppeling mogelijk tussen het zonnepark en de elektrolyser (zie HFLEX02) en zijn componenten nog niet breed beschikbaar. Dus ondanks de mogelijke voordelen, wordt het H-Flex project in AC uitgevoerd met benodigde DC/AC en AC/DC omvormers.



Schema elektrische installatie van het H-Flex project met zonnepark, elektrolyser, transportpompen op het WRK terrein en het KWR gebouw.

7-1. Restwarmte uit elektrolyse: hoe?

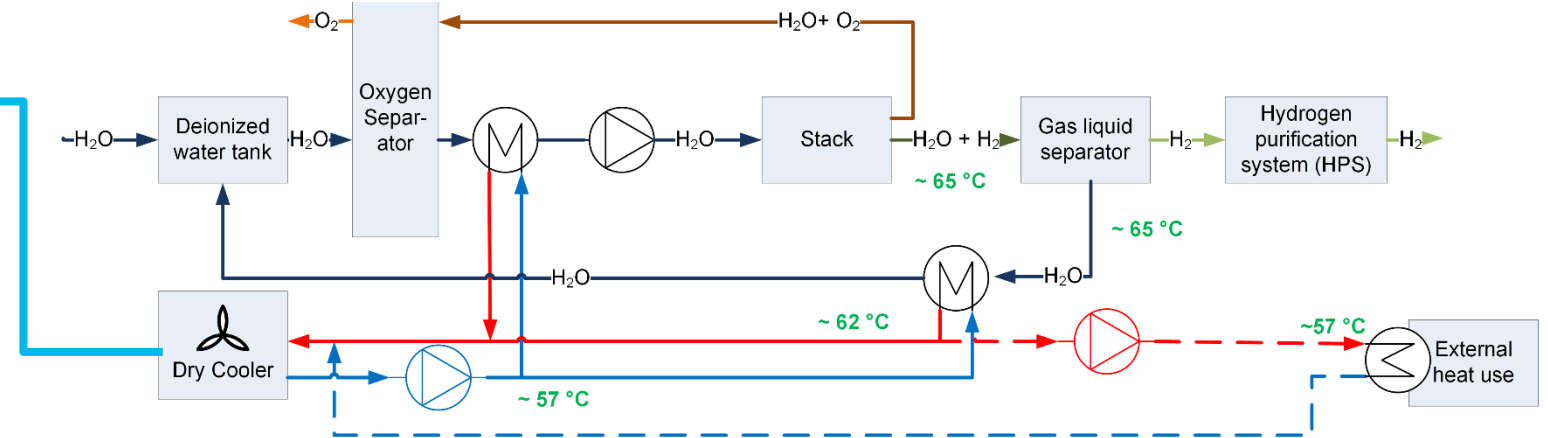
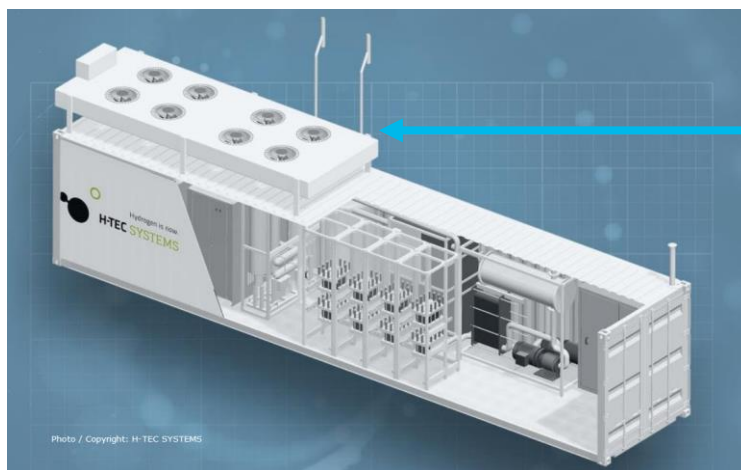
Hoe ontstaat de restwarmte en win je het terug?

Het proces van elektrolyser is niet 100% efficiënt, en dus komt er restwarmte vrij. De warmte komt vrij via de zuurstofstroom, de waterstof stroom en de water recirculatie. In de elektrolyser zijn al warmtewisselaars aanwezig die warmte onttrekken na de zuurstofscheiding en gas-vloeistof scheiding (zie figuur). Koeling vindt vervolgens standaard plaats met lucht via een ventilatiesysteem op het dak van de container (zie Figuur). Door een extra loop met koelwater aan te sluiten voor de droge koeler kan de warmte ook door een andere toepassing worden gebruikt. Mocht de retourtemperatuur van deze loop toch te hoog zijn, of is er bij de afnemer geen warmtevraag op het moment dat de elektrolyser aan staat, dan kan de droge koeler alsnog (deels) worden ingezet. Het is dus een redundant systeemontwerp en niet moeilijk om te realiseren voor een elektrolyserfabrikant. In het H-Flex project is dit met de fabrikant besproken.

Warmtespecificaties van de elektrolyser in Nieuwegein

Bij de 2,5 MW PEM elektrolyser in het H-Flex project gelden de volgende specificaties:

- De elektrolyser werkt op ca 65°C, wat resulteert in een beschikbare restwarmte temperatuur van maximaal 48°C.
- Koelwater wordt typisch op een temperatuur van 30°C naar de stack gepompt.
- Er is in het eerste jaar ca 300 kWth aan warmte beschikbaar op 75% load, en 330 kWth na 10 jaar door afname in efficiëntie van 1% per jaar.
- Het inkomende water wordt opgewarmd met restwarmte, het gaat om ca 0.57 kWh/kg H₂.
- Met een droge koeler die direct op het fundament is gemonteerd (i.t.t. wat de figuur linksonder suggereert, daar zit de koeler op het dak) zijn de koelwaterleidingen eenvoudig bereikbaar voor de realisatie van een restwarmte uitkoppeling met minimale ingrepen.



Schematische weergaven van de relevante componenten voor warmteuitwisseling in een PEM elektrolyser. Bron: van der Roest et al. (2023) [6]

7-2. Restwarmte uit elektrolyse: wat levert het op?

Hogere systeem efficiëntie, CO₂ besparing en business case

Voor de 2.5 MW elektrolyser zijn verschillende cases voor warmtegebruik uitgewerkt in een wetenschappelijke publicatie [6]. In dit rapport kijken we naar de casus voor hergebruik van de restwarmte op de temperatuur die uit de elektrolyser komt bij een wasserij op 200m afstand van de elektrolyser. We concluderen dat:

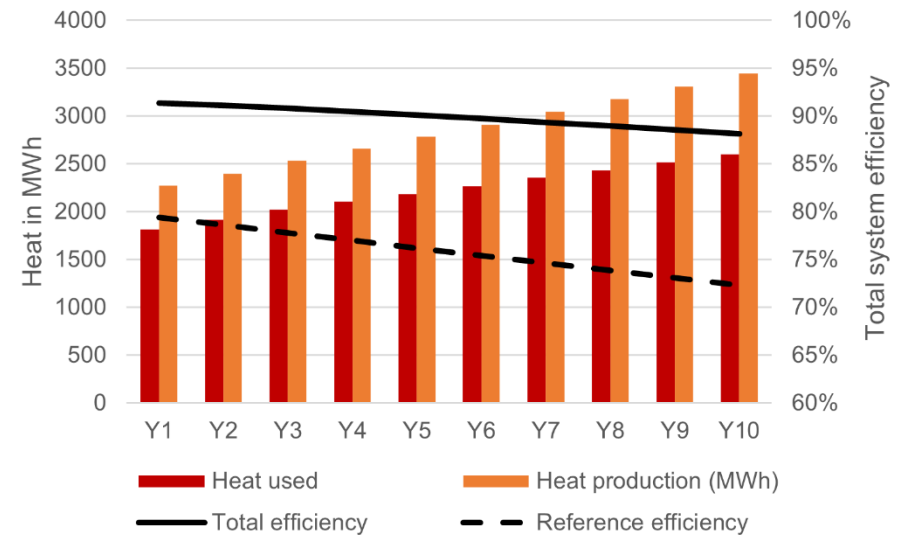
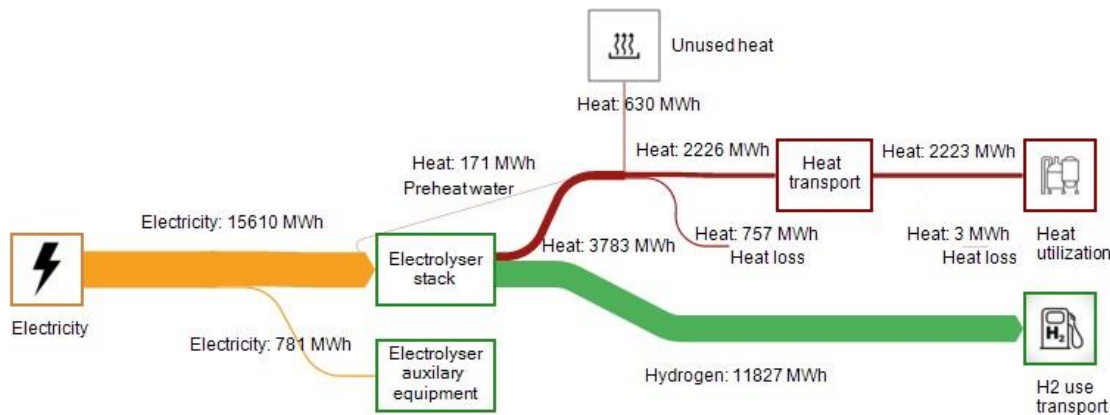
- De efficiency van de installatie toeneemt van gemiddeld 76% tot 90% (op higher heating value) door inzet van de restwarmte. Van de elektriciteit die de elektrolyser in gaat kan 14% worden gebruikt in de vorm van restwarmte.
- Door het vervangen van gas voor warmteproductie met een boiler door restwarmte uit groene waterstofproductie wordt ca 0.28 ton CO₂/MWh warmte bespaart, or 620 ton CO₂/jaar.
- De kosten om de warmte uit te koppelen zijn omgerekend 20 k€/jaar of 8,9 €/MWh warmte, wat in de buurt ligt van industriële restwarmtebronnen (6-10 €/MWh) [8] en lager dan bijvoorbeeld thermische energie uit water (55,4-73,4 €/MWh) [9].

Gebruik de HHV, niet de LHV

In alle berekeningen is de higher heating value (HHV) van waterstof (39,4 kWh/kg) gebruikt. Het is belangrijk om niet de LHV (33,3 kWh/kg) te gebruiken, deze is alleen relevant bij verbrandingsprocessen. Als de LHV wordt gebruikt om de restwarmteproductie te bepalen, leidt dit tot een significante overschatting van de beschikbare restwarmte. Bij 80% efficiency op HHV is maximaal 20% restwarmte beschikbaar, op LHV is de efficiency dan 67,5% en zou er opeens max. 32% restwarmte beschikbaar zijn. Dit is echter niet het geval, gebruik dus altijd de HHV.

Warmteafnemers mogen niet te ver weg zitten

Afstand is de belangrijkste factor voor de economische haalbaarheid van restwarmteuitkoppeling uit elektrolyse. Met direct gebruik van de restwarmte zonder tussenkomst van een warmtepomp is de maximale afstand ca 3 km.



Sankey diagram van de energiestromen, 14% van de stroominput wordt uiteindelijk nuttige warmte.

Bron: van der Roest et al. (2023) [6]

Warmteproductie en gebruik over de eerste 10 jaar waterstofproductie. Gemiddeld neemt de efficiëntie toe van 76% naar 90%. Bron: van der Roest et al. (2023) [6]

7-3. Restwarmte uit elektrolyse: naar de praktijk

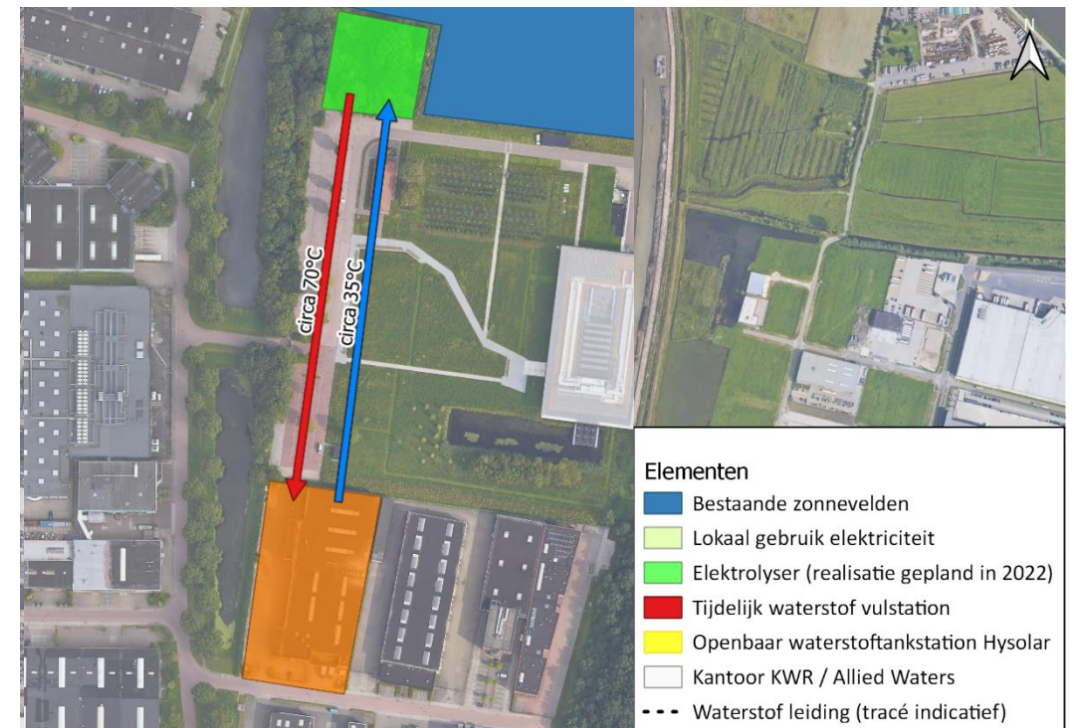
Van onderzoek naar de praktijk

De elektrolyser bevindt zich bij het KWR gebouw op een bedrijventerrein in Nieuwegein-Zuid. Dat biedt kansen voor warmteuitwisseling met mogelijke buurbedrijven. Sinds 2021 lopen gesprekken met onder andere een industriële wasserij die nu nog met op aardgas gestookte ketels werkt, en ook andere kansen op het bedrijventerrein worden onderzocht. Een voorwaarde voor daadwerkelijke realisatie van deze warmte uitwisseling is een solide businesscase en inpasbaarheid in de bedrijfsvoering voor deelnemende partijen. Daarover zijn en worden met regelmaat gesprekken gevoerd tussen verschillende belanghebbenden.

Organisatorische en juridische aspecten

Om de warmte-uitwisseling tot stand te brengen zijn in een vooronderzoek zaken uitgezocht die ook van nut kunnen zijn bij andere vergelijkbare projecten:

- Er zijn weinig juridische verplichtingen ten aanzien van het inrichten van een warmte-uitwisseling. De Warmtewet is niet van toepassing omdat het om grootschalige afname van warmte gaat (>100kWh), er kunnen individuele contracten (B2B) worden opgesteld tussen afnemer en leveranciers (datacenter & elektrolyser), of hiervoor kan een nieuwe onderneming/warmtebedrijf worden opgericht. Op een bedrijventerrein zijn weinig belemmeringen te verwachten ten aanzien van warmteuitwisseling, maar een omgevingsvergunning en aanlegvergunning zijn wel nodig.
- Het is belangrijk dat de afnemende partij actief betrokken is en sturing geeft aan vervolgstappen. De handreiking voor gebiedsgerichte warmte-uitwisseling uit 2014 van RVO [10] is nog altijd actueel en behulpzaam bij het opzetten van restwarmteuitkoppeling. Ook het expertise centrum warmte heeft een nuttige pagina over restwarmte, met onder andere een definitie.





Deel III – Slimme
aansturing voor meer
flexibiliteit

KWR

Bridging Science to Practice



8. Hoe kan een elektrolyser flexibiliteit toevoegen?

Vorstudies flexibele inzet elektrolyser

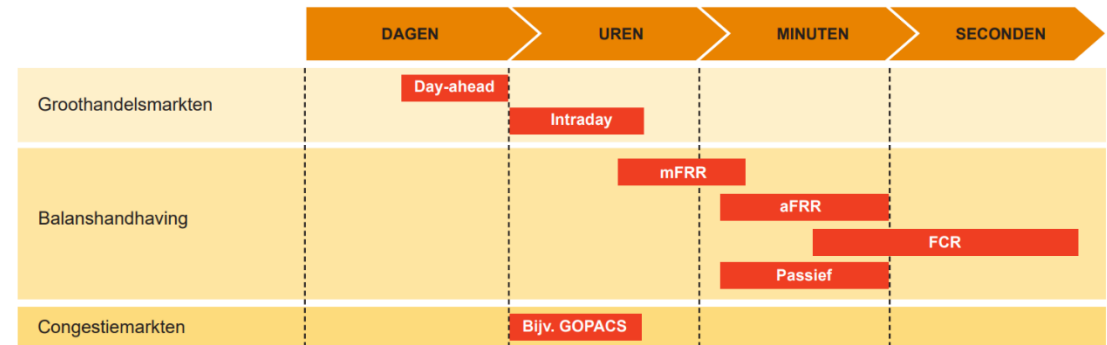
Aangezien de inkoop van elektriciteit de belangrijkste kostencomponent is voor de exploitatie van een elektrolyser hebben we in het H-Flex project gekeken hoe de aansturing van de groene waterstofproductie zodanig kan worden ingericht dat deze kosten worden geminimaliseerd. Dit begint met inkoop van elektriciteit op de day-ahead markten, met variabele stroomprijzen per uur. We presenteren een proof-of-concept regelaar voor day-ahead markten in hoofdstuk 9. Vervolgens liet Scholt energy in de beginfase van het project zien dat handelen op specifieke balancerende markten potentie heeft voor aanvullende kostenbesparing/verdiensten:

- de aFRR markt was het meest gunstig voor de elektrolyser,
- overdimensionering elektrolyser leidt tot meer flexibiliteit,
- bij dagbiedingen een verdienste tussen de 80-250 keuro/jaar haalbaar kan zijn, bij 4-uurs biedingen 180-300 keuro per jaar (gebaseerd op mediaan prijzen 2021).

In 2024 liet PowerHive bovendien zien dat het handelen op de passieve onbalans markt ook tot aanvullende verdiensten kan leiden. In hoofdstuk 10 verder in op de mogelijkheden van de twee voorgenoemde onbalansmarkten en de pilot die is uitgevoerd op de passieve onbalansmarkt.

Marktontwikkelingen en kader

Bij aanvang van het H-Flex project (2021) beloofden de balancerende markten een waardevolle toevoeging te zijn aan de business-case van een elektrolyser. Op dat moment was netcongestie nog in opkomst. Gedurende het project is de markt voor



Overzicht van balancerende markten en de indicatieve tijdschaal voor het plannen of afroepen van energie/vermogen op de verschillende markten.

flex vermogen sterk gegroeid. Enerzijds worden er steeds meer flexibele assets gerealiseerd (voornamelijk batterijen) omdat de waarde van flex is toegenomen in tijden van onbalans en netcongestie. Anderzijds worden de spelregels gaandeweg aangepast n.a.v. de bijwerkingen daarvan (waaronder onbalansschommelingen). Hoewel de inzet van een elektrolyser nog steeds denkbaar is op deze markten, is het sterk de vraag of dit nog wenselijk en nuttig is gezien de dominantie van andere, snellere assets. Netcongestie-mitigatie en de mogelijkheden om te handelen in vermogen (zoals op de GOPACS markt) zijn in dit project niet expliciet onderzocht. Hierin zien we echter een aanvullende kans voor elektrolyzers om maatschappelijke meerwaarde te bieden, o.a. vanwege de grote aansluitvermogens, de noodzaak om enkel te draaien op momenten dat elektriciteit groen kan worden ingekocht voor de productie van groene waterstof, en eens te meer vanwege de rol van duurzame gassen in grootschalig energietransport.

9-1. Waterstofregelaar op basis van day-ahead markten (1/2)

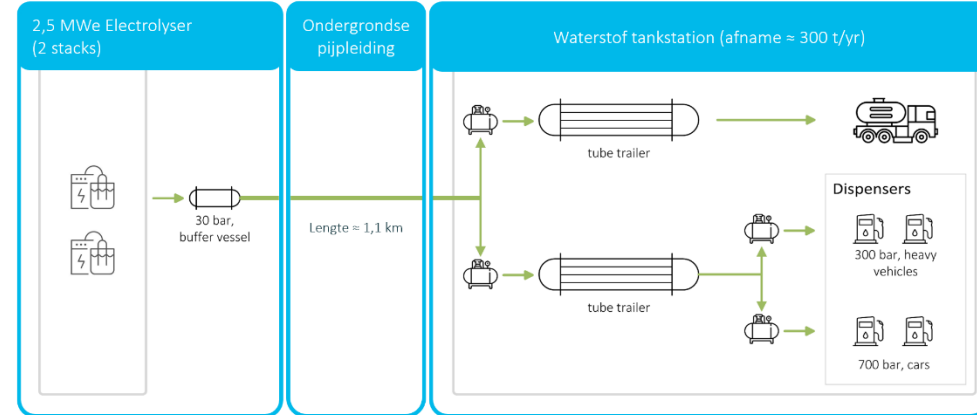
Modelstudie

De potentie en kansen van het handelen op de EPEX/APX-markt om de elektriciteitskosten van de elektrolyse zo laag mogelijk te houden zijn met een modelstudie doorgerekend. Daarbij is gekeken naar de inzet van de elektrolyser en in hoeverre de mate van inzet, of vollastfactor, invloed heeft op de elektriciteitskosten indien er op de EPEX-markt gehandeld wordt.

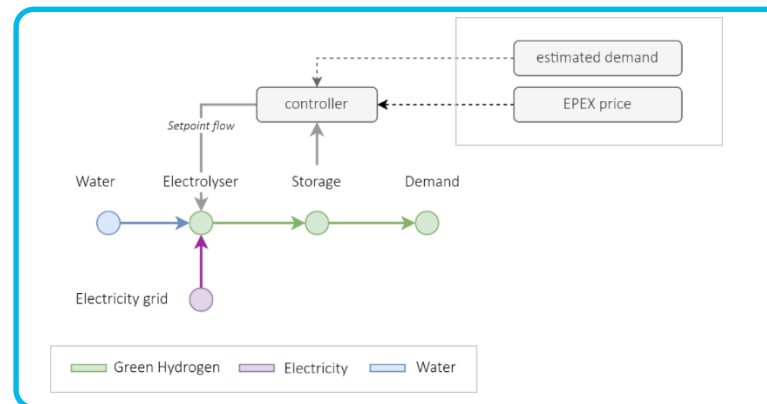
Twee regelaarstrategieën zijn onderzocht:

- Een heuristische “feedforward” regelaar die op basis van een voorspeld waterstofvraagpatroon en een ordening van de voorspelde EPEX-elektriciteitsprijzen de optimale momenten van een dag bepaalt om voldoende waterstof in het elektrolyzersysteem in Nieuwegein te produceren;
- Een modelpredictieve regelaar (MPC: model predictive control) die de regeling van een PtX-systeem bestaande uit een WKO, elektriciteit door zonnepwec en een elektrolyser gekoppeld met een tankstation numeriek optimaliseert op elektriciteitskosten, gebruikmakend van EPEX-prijsvoorspellingen en weersverwachtingen. *Zie verder bron [11].*

De heuristische regelaar is als proof-of-concept verder uitgewerkt voor het bestaande waterstofleverende systeem als weergegeven in de figuur rechtsboven. Daarbij zijn de energieconsumptie en waterstofmassastromen van het systeem met de elektrolyser, de opslag van waterstof en de waterstofvraag door af- en aankoppeling van trailers als ook het tankpatroon van zware motorrijtuigen en persoonsvervoer gemodelleerd. Een schematische weergave van hoe het systeem is gemodelleerd is weergegeven in het figuur rechtsonder.



Schematische weergave van de relevante modelcomponenten van het waterstofleverende systeem. Bij het model voor waterstofopslag is rekening gehouden met een minimum- en maximumlimiet, als ook energieverbruik dat benodigd is voor compressie en decompressie.

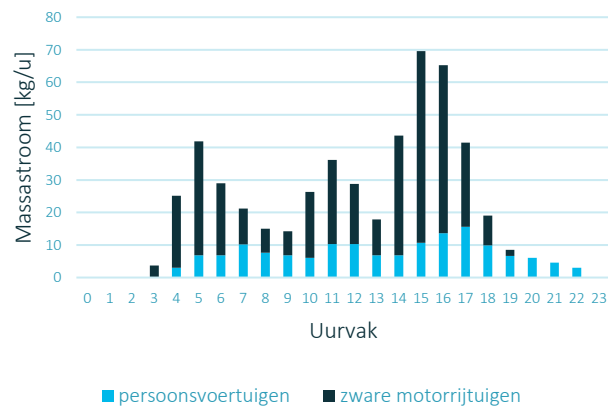


Schematische weergave van de heuristische feedforward regelaar die o.b.v. dag-vooruit voorspelde EPEX-prijzen en waterstofvraag de productiesetpoint van waterstof bepaalt.

9-1. Waterstofregelaar op basis van day-ahead markten (2/2)

Tankpatroon en scenario's

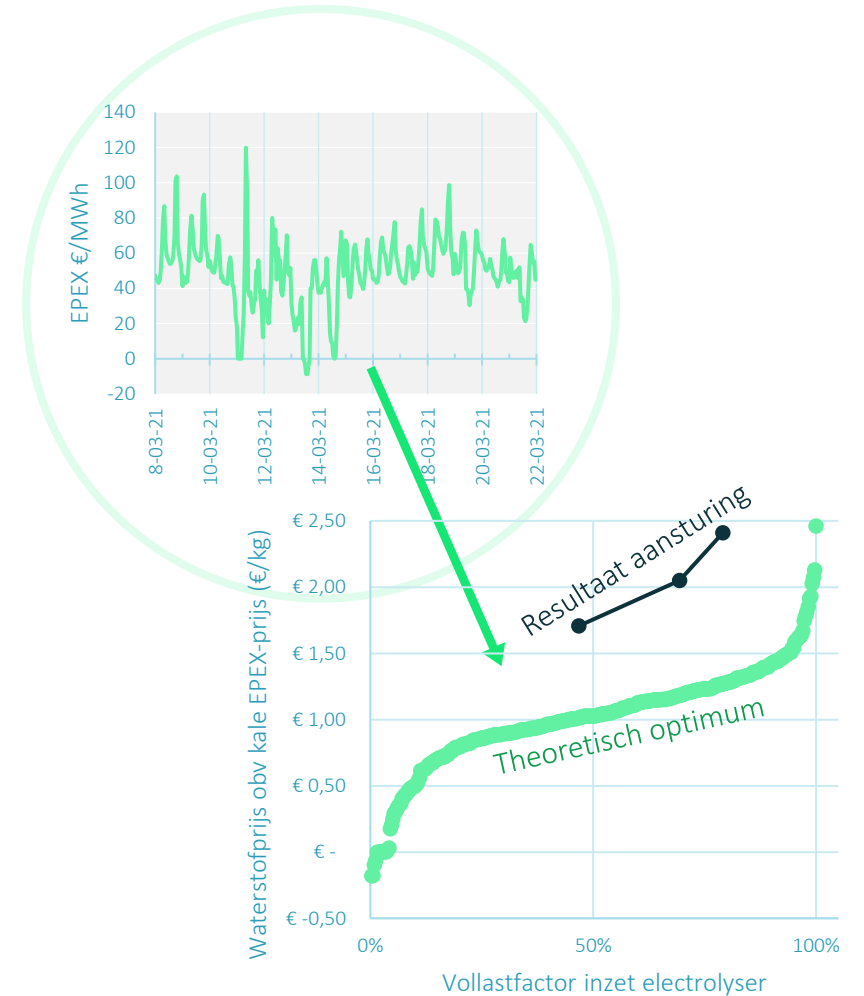
Voor het tankpatroon van persoonsvoertuigen en zware motorrijtuigen is een gemiddelde week- en weekenddag bepaald waarop modelsimulaties zijn doorgerekend, zie de figuur hieronder voor het weekdagpatroon. Daarnaast zijn 3 scenario's met verschillende vollastfactor (46%, 70% en 80%) gedefinieerd waarbij het tankpatroon gelijk is voor alle scenario's, maar er meer trailers worden geëxporteerd voor de zwaardere vollastscenario's.



EPEX en vertaling naar kostprijs

De day-ahead handel (EPEX) is een dagelijkse veiling waarbij energieleveranciers hun energie inkopen voor de korte termijn. De energieprijzen (in €/MWh) worden vastgesteld op uurbasis. Deze prijzen zijn te vertalen naar een kostprijs per kg waterstof door rekening te houden met de 'higher heating value' (HHV) voor de omrekening naar €/kg en de efficiëntie van de elektrolyser. Het dynamische karakter van de prijsontwikkelingen is in het cirkelronde kader voor een tweewekelijkse periode in maart 2021 weergegeven. Deze is vertaald naar een theoretische kostprijscurve indien er ongelimiteerde waterstofopslag beschikbaar zou zijn, zie de groene curve in de figuur rechts.

Het model met de heuristische regelaar is doorgerekend voor de scenario's met verschillende vollastfactor gedurende de bovengenoemde tweewekelijkse periode. De resultaten zijn vertaald naar een werkelijke kostprijs (o.b.v. de EPEX-elektriciteitsprijzen), en is getoond met de zwarte curve in de figuur rechts. Bij zwaardere vollastfactor is te zien dat de werkelijke kostprijs hoger wordt en verder gaat afwijken van het theoretisch minimum (groen curve) omdat de opslagcapaciteit steeds meer limiterend wordt.



9-2. Projectplan implementatie waterstofregelaar

Binnen het H-Flex project wordt een projectplan opgesteld dat de behoeften van de implementatie van overkoepelende monitoring en aansturing van de groene waterstofketen inzichtelijk maakt. Dit projectplan zou een onderlegger kunnen zijn voor de gezamenlijke uitvoering van deze werkzaamheden.

Doelstellingen aansturing

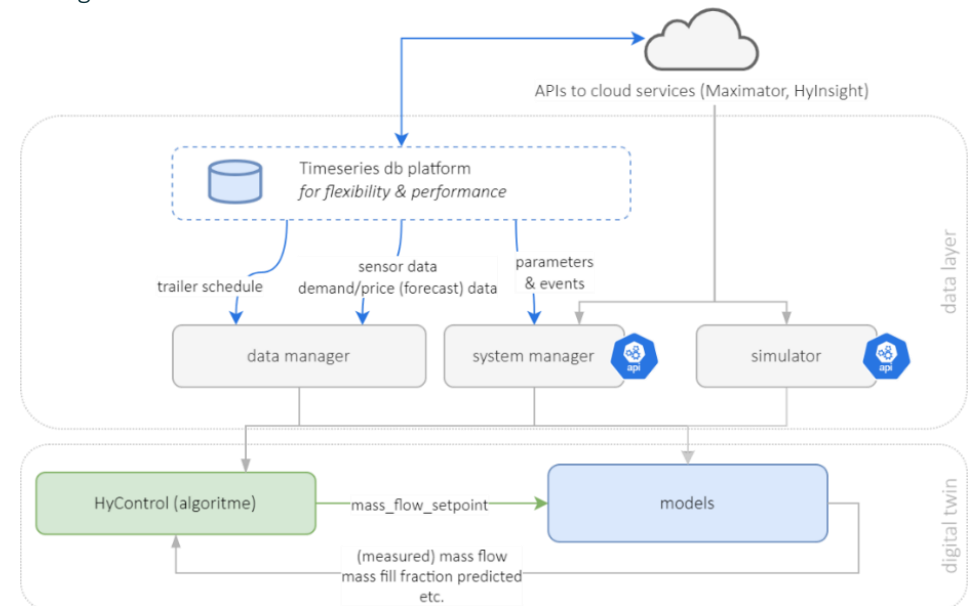
Voor de implementatie van een geavanceerde aansturing voor de electrolyser dienen de aansturingprincipes en de achterliggende modellen ontwikkeld te worden. Om de principes van de aansturing vorm te geven is allereerst inzicht nodig in de doelstellingen én de rangschikking daarvan. Een eerste uitwerking van de doelstellingen en randvoorwaarden voor operatie is:

- garanderen van verwachte afname (i.e. leveringszekerheid, 24 u vooruit);
- verlagen van stroomkosten (day-ahead markten);
- waarborgen van ijzeren reserve;
- technisch opereren van de electrolyser en tankstation
- voldoen aan voorwaarden gesteld voor subsidies (OWE) en certificering (HBE);
- Ontsluiten opbrengsten door netwerkdiensten (balancerende markten);
- verlagen van Netwerkkosten (kWmax kosten);
- monitoring elektriciteitsgebruik t.b.v. vrijstelling energiebelasting.

Het uitwerken van den interacties tussen deze doelstellingen en randvoorwaarden, en de uiteindelijke prioritering daarvan, is onderdeel van de werkzaamheden in het projectplan.

Concrete uitwerking

Voor het technisch opereren van de aansturing zijn er datakoppelingen nodig ten behoeve van het verzamelen van de noodzakelijke input en het verzenden van de berekende setpoints, een database nodig ten behoeve van het opslaan en ter beschikking stellen daarvan, en geregeld onderhoud nodig zodat het softwarepakket kan blijven draaien (zie schema hieronder). Bij de ontwikkeling van al deze elementen dient rekening gehouden te worden met het adequaat beveiligen van de verschillende toegangswegen die er zijn, zowel fysiek als digitaal.



10-1. Pilot aansturing balancerende markten: aFFR

Volgens de studie van Scholt Energy (2021) beschreven in [Hoofdstuk 8](#) zijn de aFFR-onbalansmarkt en de passieve onbalansmarkt geschikte opties voor een PEM-elektrolyser om flexibiliteit te bieden op balancerende markten. Om te toetsen of het systeem in de praktijk daadwerkelijk geschikt is voor deelname, is een pilot noodzakelijk. Voor de aFFR-markt gelden strenge certificeringseisen en is de infrastructuur in Nieuwegein momenteel nog niet gereed om deze markt te testen. Daarom wordt gekozen voor een **theoretische studie voor de aFFR-markt** en een **praktische pilot voor de passieve onbalansmarkt**.

Wat houdt de aFFR-onbalansmarkt in? [4]



Als gecontracteerde bidder geef je aan TenneT door in welk tijdvak (minimaal 4 uur) je een bepaald flexibel vermogen (minimaal ± 1 MW) beschikbaar stelt. Dit gebeurt via een bieding, waarbij zowel een capaciteitsvergoeding (€/MW/uur) als een activatievergoeding (€/MWh) moet worden opgegeven.



In geval van onbalans kan TenneT biedingen activeren. Als er geen onbalans is of jouw bieding niet aan de beurt komt, blijft deze inactief.



Ontvang een vergoeding voor beschikbaarheid en een extra vergoeding bij daadwerkelijke activatie.

Hoe kan een elektrolyser inspelen op de aFFR-onbalansmarkt?

De elektrolyser in Nieuwegein (2,5 MW) draait nog niet op volle capaciteit en beschikt over 400 kg waterstofopslag. Daardoor ontstaat ruimte om flexibiliteit aan te bieden op de aFFR-markt, met name afregelvermogen in de eerste jaren. De inzetmogelijkheden zijn afhankelijk van de basislast van de elektrolyser. Op basis daarvan kunnen verschillende regelstrategieën worden toegepast:

1. Basislast < 0.5 MW

1 tot 2 MW afregelvermogen (dus de elektrolyser opschakelen).

2. Basislast 0.5 – 1 MW

1 MW afregelvermogen.

3. Basislast 1 – 1.5 MW

1 MW symmetrisch (zowel op- als afregelen).

4. Basislast 1.5 – 2 MW

1 MW opregelvermogen aanbieden (dus de elektrolyser afschakelen).

Potentie van de elektrolyser op de aFFR-onbalansmarkt

- **Resultaat desktopstudie 2021:** Op basis van de desktopstudie uit 2021 ligt de verwachte opbrengst bij deelname aan de aFFR-markt, met 4-uursbiedingen, tussen de €180.000 en €300.000 per jaar. Hierbij is alleen gerekend met de capaciteitsvergoeding, zonder eventuele inkomsten uit daadwerkelijke activiteiten.
- **Marktcontext in 2025:** De studie is 4 jaar geleden uitgevoerd, en sindsdien is de concurrentie op de aFFR-markt toegenomen door met name de opkomst van batterijen. Dit kan de marktpositie en daarmee de verwachte inkomsten van de elektrolyser negatief beïnvloeden.
- **Conclusie:** Deelname van de elektrolyser aan de aFFR-markt lijkt technisch en economisch haalbaar, mits de inzet slim wordt afgestemd op de actuele marktdynamiek. Voor daadwerkelijke implementatie is verder onderzoek nodig naar:
 - De kosten en doorlooptijd van de benodigde certificering;
 - De potentie van de elektrolyser in de huidige marktcontext.
 - De mogelijkheden voor flexibele aansturing wanneer rekening wordt gehouden met de randvoorwaarden van PPA's en RFNBO-gecertificeerde waterstof

10-1. Pilot aansturing balancerende markten: passief (1/4)

Wat houdt de passieve onbalansmarkt in? [3]



Elke BRP¹/marktpartij dient dagelijks een programma in bij TenneT waarin het verwachte elektriciteitsverbruik of de verwachte levering wordt vastgelegd.



De som van de afwijkingen tussen deze programma's en de werkelijke situatie veroorzaakt onbalans op het net.



Op de passieve onbalansmarkt spelen marktpartijen in op prijsprikkels die voortkomen uit de systeemontbalans. Afhankelijk van de situatie kan het lonen om bewust af te wijken van het programma, of juist om deze zo nauwkeurig mogelijk te volgen.



TenneT corrigeert de systeemontbalans actief met op- en/of afregelvermogen.



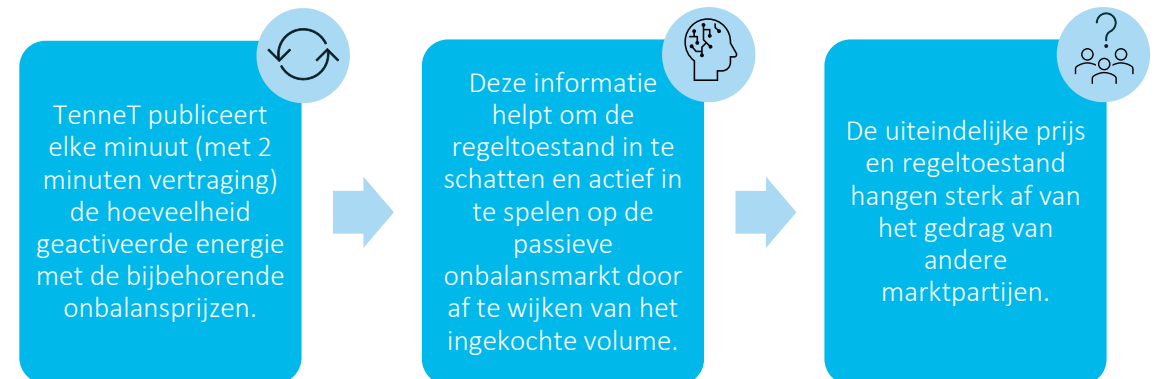
Per kwartier wordt op basis van het programma en het daadwerkelijke verbruik bepaald of een BRP/marktpartij moet bijbetalen of een vergoeding ontvangt. De bijbehorende **onbalansprijs** hangt af van de manier waarop TenneT moet ingrijpen (de zogeheten *regeltoestand*) en of er sprake is van een overschot of tekort ten opzichte van het ingestuurde programma.

Wanneer loont het om van het programma af te wijken?

Het marktmechanisme is zo ingericht dat een afwijking van het programma financieel aantrekkelijk kan zijn als deze bijdraagt aan het herstel van de systeembalans. Andersom geldt dat afwijkingen die de onbalans vergroten financieel worden ontmoedigd.

Regeltoestand	Handeling TenneT	Aanzet tot afwijking?
0	In balans (geen handeling)	Nauwelijks prijsprikkel
+1	Vooraf opregelvermogen ²	Extra verbruik helpt → meer verbruiken loont
-1	Vooraf afregelvermogen ²	Minder verbruik helpt → minder verbruiken loont
2	Instabiel (op- en afregelen)	Afwijken is risicovol → liever aan programma houden

Real-time marktwerking



¹ Balansverantwoordelijke partijen (BRPs) zijn verantwoordelijk voor het handhaven van vraag en aanbod op de energiemarkt van hun eigen portfolio. Iedere partij die elektriciteit afneemt of levert op het Nederlandse net, is aangesloten bij een BRP.

² Doorgaans, niet altijd het geval.

10-2. Pilot aansturing balancerende markten: passief (2/4)

Stappenplan pilot passieve onbalansmarkt

1. Selectie van pilot momenten

In het eerste kwartaal (Q1) van 2025 zijn **acht momenten** geselecteerd waarop vooraf geen elektriciteit is ingekocht. Dit zorgt ervoor dat alle afname via de passieve onbalansmarkt verloopt en er een tekort aan elektriciteit ten opzichte van het ingestuurde programma is.*

2. Handmatige besturing door operator

Tijdens elk pilotmoment beoordeelt een operator of het gunstig is om de elektrolyser aan te zetten. Aangezien in deze pilot alleen sprake is van een tekortsituatie, is een moment **gunstig** wanneer:

- de **regeltoestand -1** is;
- er **veel afschakelvermogen** wordt geactiveerd door Tennet.

4. Vergelijking onbalansprijs en spotprijs

Achteraf wordt per kwartier de onbalansprijs (tekort) vergeleken met de reguliere EPEX-spotprijs om te bepalen of inkoop via de onbalansmarkt goedkoper is geweest.

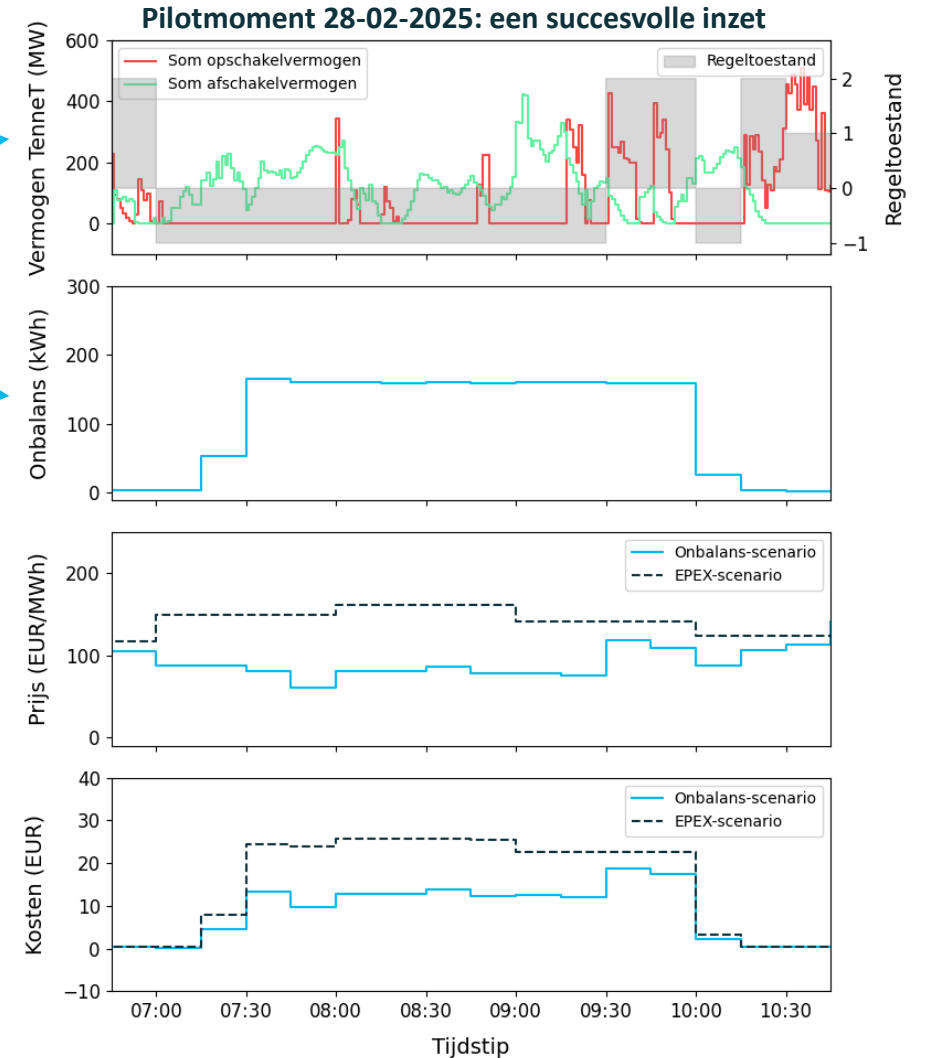
5. Evaluatie van elektriciteitskosten per scenario

Voor elk pilotmoment worden de totale elektriciteitskosten berekend in twee scenario's:

1. **Scenario passief:** Alle stroom is ingekocht via de passieve onbalansmarkt.
2. **Scenario EPEX:** Dezelfde hoeveelheid stroom is op dat moment ingekocht via de EPEX-spotmarkt.

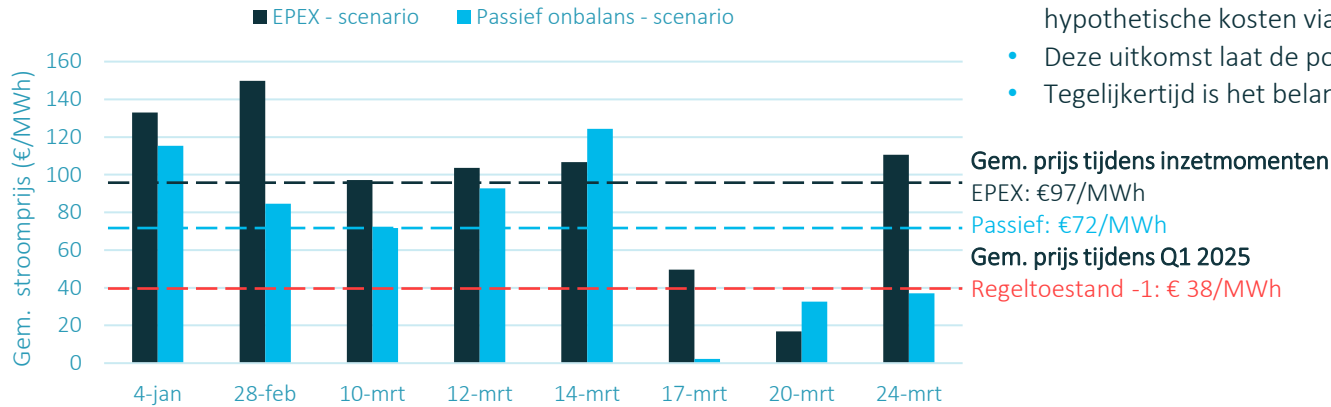
Deze vergelijking geeft een eerste indicatie van de economische potentie van deelname aan de passieve onbalansmarkt.

*In een toekomstig energiesysteem verwachten we steeds meer groene stroom uit wind en zon. Dat levert goedkope stroom op, die voor RFNBO-gecertificeerde waterstof geschikt is. Zodoende is de vraag of flexibele inzet op balancerende markten dan nog rendeert. Gezien de grote onzekerheden inherent aan de markten zelf, én aan de marktontwikkelingen voor de toekomst, zou het voorspellen van de flex mogelijkheden en hun verdiensten een interessante studie zijn.



10-2. Pilot aansturing balancerende markten: passief (3/4)

Stroomprijs (gem.) tijdens de pilotinzetmomenten

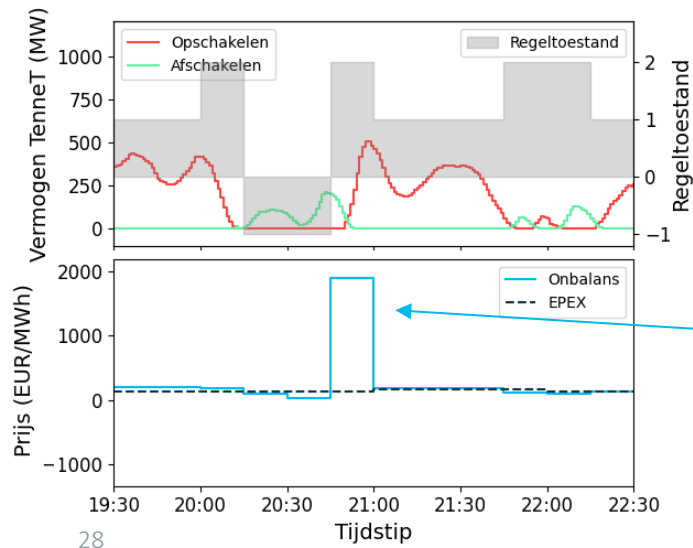


Resultaten: pilot eindevaluatie

- Bij 6 van de 8 pilotmomenten waren de elektriciteitskosten op de passieve onbalansmarkt lager dan de hypothetische kosten via de EPEX-spotmarkt. Dit zou hebben geleid tot een kostenbesparing van circa 25%.
- Deze uitkomst laat de potentie van deelname aan de passieve onbalansmarkt zien.
- Tegelijkertijd is het belangrijk te benadrukken dat er niet actief is geoptimaliseerd op de EPEX-markt.

Beperkte benutting van regeltoestand -1 leidde soms tot inzet bij ongunstige prijsniveaus, doordat:

- Gem. duur van regeltoestand -1 korter dan een uur, terwijl de elektrolyser doorgaans langer draait vanwege een opstarttijd (~30 min) met bijbehorende verliezen.
- Beperkte mogelijkheid tot tussentijds terugschakelen vanwege handmatige uitvoering.



Risico's door regeltoestand 2

Wanneer meerdere partijen tegelijk anticiperen op een verwachte regeltoestand, kan het systeem omslaan naar regeltoestand 2:

- Gemiddeld zijn de prijzen in regeltoestand 2 vergelijkbaar met die in regeltoestand +1 of -1 (zie tabel) → Afwijken is ongunstig.
- Incidenteel kunnen echter extreem hoge prijzen optreden (zie figuur).

Frequentie, duur, en onbalansprijzen tijdens de regeltoestanden (Q1 2025)

Regeltoestand	Frequentie (%)	Duur (uur)			Gem. tekortprijs (€/MWh)	Gem. overschotprijs (€/MWh)
		Min.	Gem.	Max.		
0	1%	0,25	0,33	0,75	87 ± 11	87 ± 11
+1	39%	0,25	0,92	9,25	177 ± 212	177 ± 212
-1	38%	0,25	0,83	7,50	38 ± 88	38 ± 88
2	22%	0,25	0,47	2,50	140 ± 182	44 ± 98

10-2. Pilot aansturing balancerende markten: passief (4/4)

Lessen uit de pilot

Op- en afschakelsnelheid voldoende voor marktdeelname

De elektrolyser kan snel genoeg schakelen om mee te doen op de passieve onbalansmarkt.

Timing is crucial

Verwachte prijsvoordelen kunnen omslaan als veel partijen tegelijk reageren.

Beperkte flexibiliteit bij opstart beïnvloedt resultaat

De opstarttijd (~30 min) beperkt inzet bij korte prijsspieken en vereist langere inzetperiodes, wat risico's vergroot bij per-kwartier wisselende onbalansprijzen.

Handmatige uitvoering leidt tot gemiste kansen

Zonder automatisering konden ongunstige prijsperiodes niet altijd worden vermeden.

(Deels) vooraf inkopen verhoogt potentiële opbrengsten

Met deels vooraf ingekochte elektriciteit kan de elektrolyser inspelen op prijsspieken bij zowel elektriciteitstekorten (regeltoestand -1) als -overschotten (regeltoestand +1).

(Deels) vooraf inkopen verlaagt potentieel risico's

Omdat een onbalansperiode 15 minuten duurt en veel kan veranderen door andere marktpartijen, blijft met vooraf ingekochte elektriciteit ruimte om tussentijds op of af te regelen en zo een ongunstige situatie alsnog te corrigeren.

Conclusie

De pilot toont financiële potentie en heeft momenten het systeem onbalans verkleind, maar op andere momenten juist erger gemaakt. Onzekerheden in het toekomstige energiesysteem maken lange termijn verdiensten onzeker.

Tijdens de pilot zijn er verschillende inzichten gekregen om marktdeelname te verbeteren.

Aanbevelingen

Automatisering van de aansturing

De belangrijkste vervolgstap is het ontwikkelen van een geautomatiseerde aansturing van de elektrolyser. Deze aansturing kan worden gekoppeld aan een digitale tweeling, waarmee prijsspieken, waterstofvraag en systeemlimieten op elkaar kunnen worden afgestemd. Zo ontstaat een efficiënte en continue aansturing, zonder voortdurende inzet van operators.

Vervolg pilot passieve onbalansmarkt met integratie van EPEX day-ahead markt

Een aanbeveling uit de pilot is om een vervolgpilot uit te voeren waarbij de passieve onbalansmarkt wordt gecombineerd met de EPEX day-ahead markt. Dit maakt het mogelijk om de inzet over beide markten te optimaliseren en eerdere leerpunten in de praktijk te brengen. Als onderdeel van deze vervolgpilot zou een scenario studie kunnen worden uitgevoerd die lange termijn verdiensten inzichtelijk maakt.



Deel IV – Conclusies,
aanbevelingen en
bronnen

11-1. Conclusies

1. Faciliteren productie van groene waterstof door installatie van een 2.5 MWe elektrolyser

De waterstofproductie door Hysolar draait inmiddels sinds 2024. Dit is gelukt doordat Hysolar en KWR actief hebben gezocht naar oplossingen voor knelpunten die bij de realisatie zijn opgetreden, waaronder:

- Juridische belemmeringen rondom een directe lijn, waardoor alsnog een netaansluiting moest worden gerealiseerd
- Een langdurig vergunningetraject
- Technische complicaties bij de electrolyser en de aanleg van een ondergrondse waterstofleiding van 1 km lang
- Extra kosten voor de installatie ten opzichte van de oorspronkelijke begroting
- Beperkte beschikbaarheid van monitoringsgegevens
- Algemeen, een veel tragere ontwikkeling van de marktvraag naar groene waterstof dan oorspronkelijk voorzien

2. Technieken ontwikkelen om de efficiency van de elektrolyser te verhogen

Succesvolle opties die zijn onderzocht, zijn:

- Terugwinnen van restwarmte die vrijkomt tijdens groene waterstofproductie: hierdoor kan de overall efficiency van de installatie toenemen van gemiddeld 76% naar 90%
- Toepassen van DC (gelijkstroom) in plaats van AC (wisselstroom): DC heeft krachtige voordelen, die de weg openen naar verdere toepassing en opschaling
- Slimme aansturing en netwerkbalancing: zie punt 3.

3. Bepalen van een werkwijze om een elektrolyser in een flexibel elektriciteitssysteem in te bedden

Gericht op inkoop van elektriciteit op gunstige momenten en balancing van het elektriciteitsnet is een regelaar ontwikkeld voor flexibele aansturing van de electrolyser. Dit levert een extra verdienpotentieel op voor de electrolyser. De pilot waarin de electrolyser is ingezet op de passieve onbalansmarkt bevestigt dit en toont tevens risico's van flexibele inzet die afgewogen dienen te worden tegen het verdienpotentieel.

11-2. Aanbevelingen

Aanbevelingen voor overheden/bevoegd gezag



De regelgeving ten aanzien van groene waterstofproductie verder vormgeven via de (concept) richtlijn PGS-40.



De waterstofmarkt stimuleren door groene oplossingen (waaronder waterstof) te waarderen in aanbestedingen (nationaal – regionaal – lokaal).



Doorontwikkelen van het systeem van Hernieuwbare Brandstof Eenheden, HBEs (straks EREs).

Aanbevelingen voor initiatiefnemers van waterstofprojecten



Het is belangrijk om een ketenaanpak (van productie tot afname) in één keer op te zetten. Zoek samenwerking op met verschillende belanghebbenden om doorloop te versnellen.



Basiscomponenten zijn beschikbaar, mogelijkheden voor verdere systeemintegratie door gebruik restwarmte & slimme aansturing moeten nog verder worden gedemonstreerd in de praktijk.



Afzetontwikkeling is essentieel in de huidige waterstofmarkt en dient van begin af aan sturend te zijn.

11-3. Aanbevelingen voor vervolgonderzoek



Demonstreren van de werking van DC-netwerken in verschillende typen omgeving (bijv. bedrijventerrein),

De voordelen van DC infrastructuur zorgen ervoor dat deze oplossingen interessant zijn voor het ontwerp van (lokale) energiesystemen. Verschillende demonstratie laten deze potentie ook zien. Tegelijkertijd zijn er nog weinig projecten met DC infrastructuur gerealiseerd in Nederland, en nog geen enkel project waarin waterstof een (mogelijke) rol speelt. Zodoende is er behoefte aan dergelijke projecten.



Demonstreren van het nuttig gebruik van restwarmte van elektrolyse

Uit onderzoek én uit de resultaten van de monitoring van de electrolyser in Nieuwegein blijkt dat de beschikbare restwarmte relatief eenvoudig te beschikking kan worden gesteld, op een bruikbaar temperatuurniveau. Tegelijkertijd zijn er ook vraagstukken omtrent het ontwerp van een integraal energiesysteem waarin dit wordt toegepast. Zo is er enkel restwarmte beschikbaar op momenten dat er groene waterstof wordt geproduceerd, zodat inpassing in bestaande processen niet vanzelfsprekend is. Zodoende is er behoefte aan een project waarin het uitwisselen van warmte wordt gedemonstreerd in de praktijk.



Pilot volledig geautomatiseerde flexibele aansturing van de electrolyser

In het H-Flex project hebben we laten zien dat het mogelijk is om een slimme regelaar te ontwerpen die verschillende doelstellingen kan combineren, en hebben we bovendien een projectplan geschreven om een dergelijke regelaar te implementeren. Zodoende is er behoefte aan een project waarin een volledig geautomatiseerde aansturing van de electrolyser kan worden gedemonstreerd. De te implementeren regelaar dient daarin o.a. rekening te houden met de RFNBO/RED-eisen en een inkoopstrategie met een slimme combinatie van EPEX day-ahead markt én passieve onbalansmarkt.



12. Bronnen

[0] Rijksoverheid, “Nationaal plan energiesysteem”, dec. 2023, Online beschikbaar: [link](#)

[1] Y. Ligen, H. Vrabel, and H. Girault, “Energy efficient hydrogen drying and purification for fuel cell vehicles,” Int J. Hydrogen Energy, vol. 45, no. 18, pp. 10639–10647, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.035. Online beschikbaar: [link](#)

[2] Cummins, “HYDROGEN: THE NEXT GENERATION,” 2021. Online beschikbaar: [link](#)

[3] Next-kraftwerke, “Balanceringsmarkten.” Geraadpleegd op 4 april 2025. Online beschikbaar: [link](#)

[4] Next-kraftwerke, “Regelvermogen (aFRR).” Geraadpleegd op 4 april 2025. Online beschikbaar: [link](#)

[5] E. Roest, L. J. P. van der Snip, J. M. Bloemendaal, and A. van Wijk, “Power-to-X. Werken aan de energietransitie in Nieuwegein,” 2018., Rapport nr. KWR 2018.032, KWR, Nieuwegein, Online beschikbaar: [link](#)

[6] E. van der Roest, R. Bol, T. Fens, and A. van Wijk, “Utilisation of waste heat from PEM electrolyzers – Unlocking local optimisation,” Int. J. Hydrogen Energy, vol. 48, no. 72, pp. 27872–27891, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.374. Online beschikbaar: [link](#)

[7] Boviet Solar, “Boviet Solar 3 - Gamma Series ,” 2022. Online beschikbaar: [link](#)

[8] R. Cardose, T. van der Velden, J. Westerweel, F. Niewold, and R. Molenaar, “Gedetailleerde kostenberekening aquathermie - Varianten onderzoek en gedetailleerde kostenberekeningen”, Online beschikbaar: [link](#)

[9] M. Muller and S. Lensink, “Conceptadvies SDE++ CO2-Reducerende Opties,” 2019, Online beschikbaar: [link](#)

[10] RVO, “Een handreiking voor gebiedsgerichte warmte-uitwisseling,” 2014, Online beschikbaar: [link](#)

[11] Kaya, Oguzhan, Els van der Roest, Dirk Vries, en Tamas Keviczky, “Hierarchical Model Predictive Control for Energy Management of Power-to-X Systems”, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), okt. 2020, Online beschikbaar: [link](#).



Deel V –
Projectgegevens en
Uitvoering

13-1. Projectgegevens

Gegevens project

Projectnummer DEI4819013
Projecttitel Groene waterstof in een flexibel elektriciteitssysteem
Penvoerder Hysolar B.V.
Deelnemer KWR Water B.V.
Projectperiode 1 mei 2020 tot en met 30 april 2025

Werkwijze eindrapportage

Deze rapportage is opgesteld door KWR. De rapportage is besproken met en aangevuld door Hysolar als penvoerder van het H-Flex project. De kwaliteitsborging van de rapportage is intern uitgevoerd door KWR.

Verkregen subsidie

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei, het Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur, Regeling nationale EZK- en LNV-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.



36 Van links naar rechts: realisatie van het fundament t.b.v. de elektrolyser installatie, realisatie van de waterstofleiding van de elektrolyser naar het tankstation, en levering van de elektrolyser installatie per kraan in mei 2024

13-2. Projectgegevens: Projectgroep H-Flex



Nellie Slaats
Projectmanager,
KWR/Allied Waters (tot
eind 2023)



Els van der Roest
Onderzoeker
energie en water
KWR (tot eind 2023)



Dirk Vries
Onderzoeker,
systeemmodellering
KWR



Lotte Vijverberg
Onderzoeker energie en
transitie
KWR/Allied Waters



Ad van Wijk
Kwaliteitsborger
Hoogleraar TU Delft,
Gasthoogleraar KWR



Wilfried van der Veen
Operator Allied
Waters/Hysolar



Daniël Bakker
Projectmanager,
Onderzoeker systeem-
integratie, KWR



Jos Boere
Directeur Allied Waters,
aandeelhouder Hysolar



Ron Bol
Expert groene waterstof,
Allied Waters/Hysolar



Sander Drissen
Director Innovation
Scholt Energy/Hysolar
(tot medio 2023)



Theo Fens
Specialist DC en
systeemintegratie
TF Energieadvies



Dik Raadgever
Projectleider Hysolar

14. Publicaties

Wetenschappelijke publicaties

- Oguzhan Kaya, Els van der Roest, Dirk Vries, Tamas Keviczky; Hierarchical model predictive control for energy management of Power-to-X systems; Proceedings of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe; p. 1094-1098; DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248892>
- Els van der Roest, Ron Bol, Theo Fens, Ad van Wijk; Utilisation of waste heat from PEM electrolyzers – Unlocking local optimization; International Journal of Hydrogen Energy; vol 48, issue 72; 2023; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.374>

Bijdragen aan conferenties

- Els van der Roest, Theo Fens, Ron Bol, Hans Huiting, Ad van Wijk; Heat utilization from hydrogen production, An example of local energy system integration; Smart Energy Systems Conferentie; 14 sept 2022; link [book of abstracts](#)
- Dirk Vries, Els van der Roest, Daniël Bakker, Ron Bol, Ad van Wijk; Control strategies for flexible hydrogen production by a 2.5MW electrolyser stack supplying a filling station; Smart Energy Systems conferentie; 12 sept 2023; link [book of abstracts](#)

Online publicaties

- Energiea; Experts: gooi restwarmte uit elektrolyzers niet weg; 11 oktober 2023; [link](#).

Belangrijke publicaties en evenementen rondom waterstof door Hysolar en KWR gedurende het project

- Koninklijk Huis; Opening productiestation voor groene waterstof Hysolar; 4 okt 2024; [link](#).
- Ad van Wijk, Els van der Roest, Jos Boere; Groene energie voor iedereen. Hoe waterstof en elektriciteit onze toekomst dragen; 2023; DOI: 10.5281/zenodo.8207551; ISBN: 9789082763720; [download link](#)



Colofon

Juli 2025 | KWR 2025.073

Opdrachtnummer (KWR)
403317

Projectmanagers
Nellie Slaats, Daniël Bakker (*)

Opdrachtgever
RVO

Kwaliteitsborger(s)
Ad van Wijk

(*) contactpersoon voor verdere informatie

Auteur(s)

Daniël Bakker
Els van der Roest
Dirk Vries
Lotte Vijverberg
Jos Boere

Trefwoorden

Transitie, energie, waterstof, flexibiliteit

Verzonden aan

Dit is de publieke eindrapportage van het H-Flex project, verzonden aan RVO.

Groninghaven 7
3433 PE Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl



[@KWR_Water](https://twitter.com/KWR_Water)



[KWR](https://www.linkedin.com/company/kwr)



[KWR_Water](https://www.instagram.com/KWR_Water)