



KWR 2020.004 | Maart 2020

Solar Power to the People: Systeemontwerp Power-to-X

Solar Power to the People: Systeemontwerp Power-to-X

KWR 2020.004 | Maart 2020

Referentie nummers

RVO Referentie: TEUE117059

KWR projectnummer: 402256

Projectmanager

Luc Palmen

Opdrachtgever en verantwoording

Deze activiteit is mede gefinancierd door het ministerie van Economische Zaken en Klimaat, Regeling nationale EZK- en LNV-subsidies, Topsector Energie - TKI Urban Energy, uitgevoerd door RVO en door het programma Water in de Circulaire economie (WiCE), een collectief onderzoeksprogramma van de Nederlandse drinkwaterbedrijven en de Watergroep.

Dit is een openbaar eindrapport. Voor inzage in achterliggende deelrapporten wordt verwezen naar de penvoerder (KWR), zie HS7 voor beschrijving.

Auteur(s)

Els van der Roest

Met medewerking van:

Jos Boere (Allied Waters)

Stijn Beernink, Teun van Dooren, Niels Hartog, Hans Huiting, Frank Oesterholt (KWR)

Theo Fens, Jaco Reijerkerk (TU Delft)

Fabian Benschop (PitPoint)

Edzard Gelderman, Luc Ponsioen (Aveco de Bondt)

Gijs van der Meer, Stefan Mol (Waternet)

Kwaliteitsborger(s)

Ad van Wijk

Verzonden naar

TKI Urban Energy & RVO

Keywords

systeemintegratie, energie & water, waterstof, warmteopslag, HTO, gelijkstroom

Projectperiode

2018 – 2019



ALLIED WATERS®

KWR



TU Delft



Jaar van publicatie
2020

Meer informatie

MSc. Els van der Roest
T 030 6069597
E els.van.der.roest@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR

Maart 2020 ©

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevens bestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Samenvatting

De Klimaatwet en het Klimaatakkoord zijn allebei heel duidelijk, Nederland moet in 2050 een 100% duurzame energievoorziening hebben en in 2030 een CO₂ reductie van 49% of zelfs 55% hebben bereikt. Er moet nog veel gebeuren om onze energievraag te verduurzamen en gelukkig gebeurt dit ook in een steeds sneller tempo. Maar door het niet-continue opwekpatroon van zon- en wind, het feit dat niet de hele energievoorziening met elektriciteit kan worden ingevuld en de toenemende beperkingen op het elektriciteitsnet met betrekking tot het aansluiten van zon- en windparken is het belangrijk om een deel van de duurzame stroom om te zetten in andere energiedragers.

In het Power-to-X concept combineren we opwek van duurzame stroom (zon- en wind) met conversie naar en opslag van waterstof en warmte, plus opvang, opslag en gebruik van regenwater. In de afgelopen twee jaar is het Power-to-X concept verder onderzocht, met een focus op realisatie in Nieuwegein. In dit rapport worden de bevindingen gedeeld op de onderwerpen elektriciteit en gelijkstroom, warmteproductie, -opslag en -vraag, waterstofproductie en afname en voor het systeem als geheel.

Elektriciteit

Op het WRK terrein in Nieuwegein zijn twee zonneparken aangelegd. Deel één is een 3,8 MWp park met een Noord-Zuid-opstelling, het tweede deel is 5,5 MWp in Zuid-opstelling. Deze parken gaan samen naar verwachting 8,6 GWh per jaar opleveren. Op dit terrein wordt water uit het Lekkanaal t.b.v. drinkwaterproductie voorgezuiverd voordat het naar de waterleidingduinen bij Zandvoort wordt gepompt. Na aftrek van deze basislast van de opwek van de zonnestroom, blijft er nog 3,5 GWh per jaar over voor andere vormen van gebruik of omzetting. De hoogste stroompiek voor teruglevering na aftrek van eigen verbruik is naar schatting 6 MW.

Mochten er in de toekomst windturbines (3 x 3.2MW) aan het systeem worden toegevoegd, dan zou er in totaal 30 GWh per jaar worden opgewekt. Hiervan kan ongeveer 10,6 GWh door de pompen gebruikt worden, waarna er nog 19,4 GWh per jaar over is voor andere vormen van gebruik. De hoogste terugleverpiek na aftrek van eigen verbruik komt dan rond de 15 MW uit. In beide gevallen kan een Power-to-X systeem zorgen voor omzetting van overtollige stroom in andere producten zoals warmte en waterstof.

Optimalisatie met gelijkstroom

De elektriciteit in het net op alle spanningsniveaus, en daarmee ook binnen de gebouwde omgeving en op het WRK terrein, is wisselstroom (AC, alternating current). Binnen dit project is onderzocht welk deel van het systeem op gelijkstroom (DC) gerealiseerd zou kunnen worden. Redenen om te kiezen voor DC zijn minder energieverlies, minder materiaalgebruik en minder elektromagnetische velden. Gelijkstroomtoepassingen zijn zowel te vinden in de wijk, in de openbare ruimte (openbare verlichting en elektrische laadpalen) en in woningen als in de meer industriële omgeving van het zonnepark, de elektrolyser en de warmtepomp. Op basis van eerste berekeningen is de inschatting dat de voordelen van DC niet zozeer liggen bij het beperken van energieverlies, maar meer bij een reductie van de materiaalkosten doordat er minder omvormers en dunnere kabels nodig zijn. Er zijn echter nog geen DC/DC-omvormers voor grote vermogens (MW bereik) commercieel beschikbaar. Op dit moment zullen deze omvormers kostbaar maatwerk zijn, die specifiek voor dit project gemaakt worden door gespecialiseerde bedrijven. Het is daarom niet te verwachten dat er voor dit eerste systeem een daadwerkelijke kostenbesparing behaald wordt, maar als dit soort systemen op grotere schaal worden ontwikkeld is dit wel mogelijk. Bij verdere ontwikkeling richting realisatie zou de casus Nieuwegein als proof-of-concept kunnen fungeren.

Warmte

Warmte is een heel belangrijk onderwerp als het gaat om het verduurzamen van de gebouwde omgeving, het omvat ruim 70% van de energievraag voor gebouwen. De warmtevraag laat een duidelijk seizoenspatroon zien dat tegengesteld is aan de opwek van duurzame energie met zonnepanelen die steeds meer in de gebouwde omgeving worden gebruikt. Deze mismatch vraagt om seizoensopslag, niet alleen van elektriciteit, maar mogelijk ook van warmte (of andere energiedragers).

In Nieuwegein ligt de wijk Rijnhuizen, waarin zich onder andere een voormalig fort (Jutphaas) en het kasteel Rijnhuizen bevinden. Het gebied bestaat hoofdzakelijk uit kantoren en bedrijven, maar in de komende jaren zullen er 2500 woningen worden ontwikkeld, waarvan een groot deel gebaseerd op transformatie van de huidige kantoorgebouwen. Binnen Rijnhuizen is het mogelijk om voor circa 1700 van de 2500 woningen een lage-temperatuur warmtenet (40 – 50 °C) te ontwikkelen dat gebaseerd is op het Power-to-X concept. In totaal is de warmtevraag 12,5 GWh per jaar voor de hele wijk met een piekvraag van ca. 5-6 MWth vermogen. Voor Rijnhuizen worden de mogelijkheden voor realisatie van een lage temperatuur warmtenet inclusief opslag nader onderzocht in samenwerking met marktpartijen. De afweging die daarbij gemaakt moet worden is of warmtelevering het beste op 40°C of 50 °C kan worden geleverd. Factoren die daarbij een rol spelen zijn de keuze voor een tapwatersysteem, ruimteverwarming systeem, het warmtenet ontwerp en de efficiëntie van het warmteopslagsysteem.

Aquathermie en warmteopslag

In de transitie naar een duurzame warmtevoorziening worden geothermie, restwarmte en aquathermie gezien als mogelijke toekomstige bronnen die een deel van de warmtevoorziening voor hun rekening kunnen nemen. In Nieuwegein zou gebruik kunnen worden gemaakt van het Lekkanaal of het Merwedekanaal als warmtebron (aquathermie). In de zomerperiode (mei-september) kan warmte worden gewonnen en met een warmtepomp van 3-4 MWel vermogen (ca. 12-14 MWth) worden opgewaardeerd naar 50°C dan wel 65°C. Deze warmte kan vervolgens worden opgeslagen in de ondergrond om de seizoensmismatch te overbruggen. Voor de casus Nieuwegein is onderzocht welk watervoerend pakket (WVP) in deze situatie het meest geschikt is voor opslag en wat het effect van temperatuurverhoging op zowel de chemische als microbiologische processen is. Ondanks richtlijnen van de provincie Utrecht die aansturen op hoge temperatuur warmteopslag in WVP2 of lager, lijkt voor de casus Nieuwegein-WRK terrein opslag in het 1^e WVP (tot 50 meter diepte) de beste optie. Voor het onderzoeken van de effecten op de waterkwaliteit zijn op het WRK terrein sedimentmonsters op diepte genomen, die als 'batches' in het lab op reactiviteit zijn getest. Qua temperatuurniveau zorgt opslag op 50°C voor een hogere terugwin efficiëntie dan op 65°C. Al met al zijn de resultaten van de experimenten volgens verwachting en verklaarbaar vanuit een bio-geochemisch perspectief. De effecten van de ondergrondse warmteopslag lijken beperkt, zeker tot 60 °C. Als er wordt besloten tot verdere stappen richting realisatie, wordt aanbevolen om uitgebreide monitoring te doen van de effecten bij toepassing in het veld, op basis van de inzichten verkregen uit deze studie.

Waterstof

Waterstof is net als elektriciteit een energiedrager. Met waterstof kan wereldwijd transport en grootschalige opslag van duurzame en koolstofvrije energie mogelijk worden gemaakt. Groene waterstof kan lokaal worden geproduceerd via elektrolyse van (gedemineraliseerd) water, met behulp van elektriciteit uit zon en wind. In Nieuwegein is gekozen voor toepassing van groene waterstof voor mobiliteit, met name voor zwaar transport. Dit is in 2019 mede de drijfveer geweest voor de oprichting van het bedrijf Hysolar B.V. (www.hysolar.nl). In het algemeen ligt het zwaartepunt voor licht vervoer en/of kleine afstanden bij batterij elektrisch vervoer (BEV) en voor zwaar vervoer en/of grotere afstanden bij brandstofcel elektrische voertuigen (FCEV). Voor beide vormen gaan de technologische ontwikkelingen nog volop verder. Het is aannemelijk dat in de toekomst elektrisch vervoer de hoofdrol heeft, gebaseerd op een mix van BEV en FCEV, en hybride voertuigen voor een overgangperiode. De keuze tussen BEV en FCEV wordt vooral gebaseerd op het aantal kilometers dat op één batterij/tank gereden kan

worden en de laadtijd ofwel vultijd. Het belangrijkste knelpunt van BEV nu is de actieradius en voor FCEV zijn met name de beschikbaarheid en kosten van de brandstofcellen nog een uitdaging.

Om groene waterstof te kunnen maken zijn drie dingen essentieel. De eerste is groene stroom, het tweede is heel zuiver water en de derde een elektrolyser die van deze twee producten (groene) waterstof en zuurstof maakt. In Nieuwegein kiezen we voor realisatie van een PEM (polymer electrolyte membrane) elektrolyser van 2 MW. De reden hiervoor is dat op die manier samen met de warmtepomp (3-4 MWel) de pieken in stroomproductie van het zonnepark (max. 6 MW) goed kunnen worden afgevangen. De andere reden heeft te maken met de verwachte afzet, waarbij een productie van ca. 250 ton waterstof per jaar mogelijkheden biedt om met verschillende afnemers afspraken te maken en een business case te creëren, wat bij kleinere volumes lastiger is. Om ieder jaar 250 ton waterstof te kunnen produceren (op 30 bar), moet de elektrolyser ruim 7000 uur per jaar draaien en is ongeveer 14,7 GWh per jaar aan stroom nodig. Met de twee zonneparken en aftrek van stroom voor de pompen van WRK en de warmtepomp blijft er nog ongeveer 2,2 GWh per jaar over voor de elektrolyser. De rest van de stroom (12,5 GWh per jaar) zal voorlopig uit het net moeten komen. Indien er 3 windturbines aan het systeem worden toegevoegd, is het mogelijk om ruim 8 GWh per jaar aan stroom direct uit duurzame bronnen te halen, waarbij nog ca 6,7 GWh per jaar stroom uit het net nodig is.

Power-to-X in de praktijk

Om meer inzicht te krijgen in de werking van het totale systeem, is het rekenmodel 'Power-to-X' verder ontwikkeld zodat voor verschillende scenario's een energiebalans per uur kan worden opgesteld en economische berekeningen kunnen worden gedaan. Als alle verschillende onderdelen binnen het Power-to-X concept samen gerealiseerd zouden worden, wat betekent dit dan voor de energiebalans van het systeem, en wat zijn de kosten van de verschillende producten? Het staat nog niet vast hoe het uiteindelijke systeem er precies uit zal gaan zien en er zijn nog veel keuzevrijheden. Om meer inzicht te krijgen zijn met het model drie verschillende aspecten van het totale systeem onderzocht;

- 50°C of 40°C warmtelevering: omdat dit invloed heeft op de grootte van de warmtepomp, het opslagsysteem en de afleverset voor in huis. De analyse laat zien dat de totale systeemkosten voor het Power-to-X systeem in beide scenario's vergelijkbaar zijn. Wel is het duurder voor de bewoner om op 40°C warmte aangeleverd te krijgen door de huidige kosten van de boosterwarmtepomp. Echter, daar staat tegenover dat bij 50°C warmtelevering het opslagsysteem niet het hele jaar door kan functioneren omdat het systeem teveel afkoelt en er om die reden een extra bron nodig zal zijn, die kosten zijn nog niet in deze analyse meegenomen.
- Restwarmte uit elektrolyser: De invloed van de integratie van het warmte- en waterstofsysteem is onderzocht door de restwarmte uit de elektrolyser (50-80°C) te gebruiken in het warmtesysteem. Als de restwarmte uit de elektrolyser kan worden gebruikt, leidt dit zowel tot een beter functionerend warmtesysteem waarin minder externe bronnen nodig zijn als een lagere warmteprijs, 10-13% afhankelijk van het scenario.
- Windturbines: er zijn analyses met en zonder drie windturbines gedaan, omdat er een kans bestaat dat deze uiteindelijk gerealiseerd kunnen worden en deze extra energie grote impact heeft op het systeem. De waterstofproductieprijs wordt licht verlaagd (van 5€/kg kale productieprijs tot 4,7€/kg met windturbines) bij inzet van windenergie omdat er meer lokale groene stroom achter de meter kan worden gebruikt. Bij plaatsing van windturbines heeft het Power-to-X systeem ook een veel grotere potentie om curtailment van lokaal opgewekte groene stroom te voorkomen zonder de netaansluiting te verzwaren.

Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de opgedane kennis over het totale concept en de verschillende deelonderwerpen kunnen de volgende conclusies worden getrokken en aanbevelingen worden gegeven. Deze worden in het desbetreffende hoofdstuk (6) verder toegelicht.

Conclusies

1. Elektriciteit: Een elektriciteitssysteem op DC levert energie en materiaalbesparingen op.
2. Warmte: Hoge temperatuur warmteopslag (HTO) in het eerste watervoerend pakket wordt aanbevolen voor de Power-to-X casus in Nieuwegein.
3. Warmte: Warmtelevering op 40°C wordt aanbevolen in Nieuwegein.
4. Waterstof: Er is een groeiende vraag naar zero-emissie vervoer. In Nieuwegein is de geplande waterstofproductie geschikt en op een kostenniveau wat toepasbaar is voor mobiliteit.
5. Waterstof: Gebruik van netstroom is additioneel nodig om de waterstofproductie rendabel te maken.
6. Integraal: Curtailment kan deels worden voorkomen door het Power-to-X systeem als naast zon ook wind wordt aangesloten.
7. Integraal: Het Power-to-X systeem in Nieuwegein heeft kans van slagen.

Aanbevelingen

1. Inventariseer bij een nieuw project de noodzaak van netverzwaring.
2. Betrek stakeholders vroeg in het proces.
3. De slagingskans van een Power-to-X project is groter bij samenwerking met een grootverbruiker van stroom.
4. Maak in het begin een ontwerp voor systeemintegratie.
5. Zorg voor betrokkenheid binnen het project, maar laat verschillende delen ook los van elkaar ontwikkelen.
6. Ga aan de slag!

N.B. Dit rapport is een overkoepelende samenvatting gebaseerd op onderzoek naar verschillende deelonderwerpen. Over deze onderwerpen zijn ook diepgaandere deelrapporten opgesteld, die opgevraagd kunnen worden. Zie hoofdstuk 7 voor meer informatie.

Inhoud

Samenvatting	5	
Inhoud	9	
1	Introductie	11
1.1	Waarom conversie en opslag?	11
1.2	Power-to-X	12
1.3	Power-to-X in Nieuwegein	13
1.4	Waarom zou u dit lezen?	14
2	Elektriciteit	15
2.1	Waar komt de elektriciteit in het SPX project vandaan?	15
2.1.1	Nu: beginnen met zon	15
2.1.2	Straks ook wind?	15
2.2	Waarom gelijkstroom?	16
2.3	Gelijkstroom in Systeemontwerp Power-to-X	16
2.3.1	In de woonwijk	16
2.3.2	In het Power-to-X systeem	17
2.3.3	Wat kan er nu al?	17
2.4	Op weg naar realisatie	18
3	Warmte	19
3.1	Een duurzaam warmtesysteem voor de wijk Rijnhuizen	19
3.1.1	Rijnhuizen – een wijk in ontwikkeling	19
3.1.2	Hoeveel warmte is er nodig?	19
3.2	Duurzame warmteproductie en opslag	21
3.2.1	Hoe produceer je duurzame warmte?	21
3.2.2	Hoge temperatuur ondergrondse warmteopslag- welke effecten heeft dat?	21
3.3	Op weg naar realisatie	23
4	Waterstof	24
4.1	Sleutelrol waterstof in een duurzaam energiesysteem	24
4.2	Waterstof in Nieuwegein voor mobiliteit	24
4.3	Waterstofproductie met een elektrolyser	26
4.3.1	Hoe produceer je groene waterstof?	26
4.3.2	Waar komt de stroom voor de elektrolyser vandaan?	27
4.3.3	Water en waterstofkwaliteit	27
4.3.4	Van productie naar klant	28
4.4	Op weg naar realisatie	28
5	Power-to-X in de praktijk	30
5.1	Een integraal perspectief	30
5.2	Een blik op het totale systeem	30

5.2.1	Wat hebben we geleerd over Power-to-X in Nieuwegein?	30
5.2.2	Kosten, baten en risico's	35
5.3	Op weg naar realisatie	37
6	Conclusies en aanbevelingen	39
6.1	Conclusies – Wat hebben we geleerd over Power-to-X?	39
6.2	Aanbevelingen op weg naar realisatie	40
7	Meer weten?	42
8	Literatuur	44

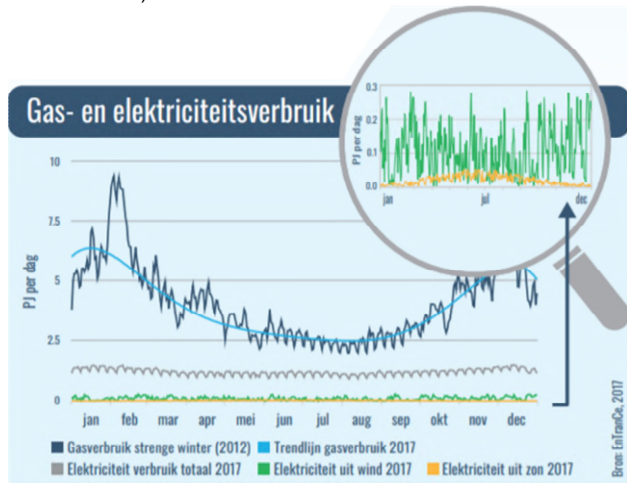
1 Introductie

1.1 Waarom conversie en opslag?

De Klimaatwet en het Klimaatakkoord zijn allebei heel duidelijk, Nederland moet in 2050 een 100% duurzame energievoorziening hebben [1]–[3] en in 2030 een CO₂ reductie van 49% of zelfs 55% hebben bereikt. In 2017 kwam 6,6% en in 2018 kwam 7,4% van ons totale energieverbruik uit hernieuwbare bronnen, waarvan meer dan de helft uit biomassa [4], [5]. De doelstelling voor 2020 is om 14% van ons energiegebruik uit duurzame bronnen te halen. Om deze doelstelling, en alle andere doelstellingen die daarna volgen, te kunnen halen, moet flink geïnvesteerd worden in duurzame opwekcapaciteit. Dat gebeurt ook, het aandeel zonne-energie is in 2018 bijvoorbeeld met 40% gegroeid [4], waardoor nu ca. 0,5% van de totale energievraag van Nederland door zonne-energie wordt ingevuld.

Er moet dus nog veel gebeuren om onze energievraag te verduurzamen. Naast dat dit op zich al een behoorlijke uitdaging is, spelen er nog drie belangrijke zaken. Ten eerste wordt voor de opwek van duurzame energie voornamelijk naar wind- en zonne-energie gekeken. Beide technologieën hebben een onregelmatig opwekpatroon en zijn dus niet altijd in staat de energievraag in te vullen, waardoor de betrouwbaarheid van het energiesysteem onder druk komt te staan. Ook in het toekomstige energiesysteem willen we betrouwbare en betaalbare energie. Duurzame energie wordt steeds goedkoper en is op steeds meer plekken op de wereld waar het hard waait of de zon veel schijnt al goedkoper dan fossiele elektriciteit. Conversie en opslag van stroom vanaf de oceaan of uit de woestijn, gevolgd door vervoer naar plekken waar deze energie juist wordt gebruikt (zoals in Nederland), kan bijdragen aan een duurzaam, betrouwbaar en betaalbaar energiesysteem, zoals beschreven in *Solar Power to the People* [6]. Dat betekent niet dat we geen duurzame opwek in Nederland moeten realiseren, maar wel dat niet alles lokaal opgelost kan en hoeft te worden.

Een ander belangrijk inzicht is dat elektriciteit slechts ongeveer 15 % van ons huidige energiesysteem beslaat [7]. Andere belangrijke sectoren zijn grondstoffen (gas, olie), hoge temperatuur warmte (industrie), lage temperatuur warmte (huishoudens, landbouw) en mobiliteit, waarin met zonne- en windenergie niet direct wordt voorzien. Naast elektrificatie van een deel van deze sectoren door een toename van elektrisch vervoer, warmtepompen en aanpassing van (sommige) industriële processen, zal in elk geval voor grondstoffen en een deel van de energievraag (bijv. hoge temperatuur warmte of zwaar vervoer) elektriciteit niet de geschikte bron blijken. Daarom is naast elektrificatie, ook conversie van duurzame elektriciteit naar andere energiedragers belangrijk.



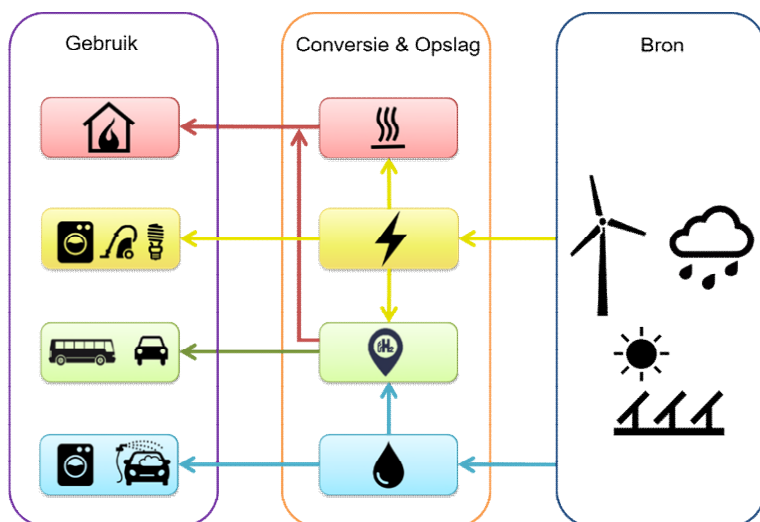
Figuur 1 Verhouding tussen gas- en elektriciteitsverbruik gevisualiseerd, inclusief duurzame opwek [7]

Ten derde blijkt bij de beperkte huidige duurzame opwek in Nederland al dat we tegen beperkingen van het elektriciteitsnet aanlopen, voornamelijk in de Noordelijke provincies [8], [9]. In die provincies is meer ruimte voor de opwek van duurzame elektriciteit, maar daar zijn de netten niet op ingericht, omdat de vraag tot nu toe de bepalende factor was. Maar ook in stedelijke gebieden wordt steeds meer stroom opgewekt en ingevoerd op de netten die daar oorspronkelijk niet voor bedoeld zijn [10]. Natuurlijk kunnen en moeten we het elektriciteitsnet verzwaren, maar dit kost tijd, geld en menskracht, terwijl er al een nijpend tekort aan technici is [11]. En stel dat het elektriciteitsnet verviervoudigd wordt, dan zitten we nog met een probleem, want als er stroom over is, waar moet dat dan naartoe? Opnieuw blijkt hier hoe belangrijk conversie en opslag in de energietransitie zullen zijn. Niet alleen om onnodige verzwaring van het net te voorkomen, maar ook om het energiesysteem in balans te houden over uren, dagen en seizoenen heen.

1.2 Power-to-X

Opslag in de vorm van elektriciteit alleen is niet voldoende, niet qua tijdsduur (batterijen zijn geschikt als opslag tot enkele dagen) en kosten, maar ook omdat we al eerder zagen dat in ons energiesysteem andere producten nodig zijn dan elektriciteit. Als we een woonwijk bekijken, dan hebben de bewoners naast elektriciteit ook behoefte aan warmte, mobiliteit en water. Deze functies zijn grotendeels te vervullen met als basis duurzame energie en regenwater en dat is waar Power-to-X voor staat. Je begint met elektriciteit (Power), maar zet dit om in andere producten ('X'). Het Power-to-X concept werkt aan oplossingen voor het beperken van netverzwaring en het invullen van andere functies binnen het energiesysteem dan elektriciteit door (overtollige) duurzame energie en regenwater op te slaan en/of om te zetten in:

- Waterstof;
- Warmte bij 40-65°C;
- Demi-water



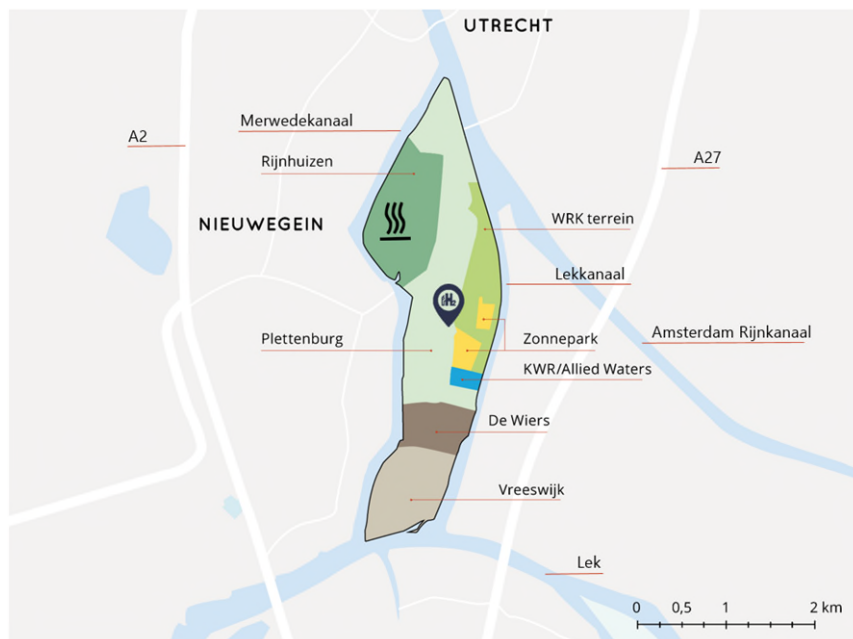
Figuur 2 Visualisatie Power-to-X concept

Door deze sector-koppeling is het mogelijk het energiesysteem verder te verduurzamen, terwijl het energiesysteem betrouwbaar en betaalbaar blijft. In deze publicatie kunt u meer lezen over de verschillende onderdelen van het concept vanuit een onderzoeksperspectief. Maar naast onderzoek, wordt ook toegewerkt naar realisatie van een eerste Power-to-X systeem in Nieuwegein.

1.3 Power-to-X in Nieuwegein

In Nieuwegein ligt een klein stukje ‘Noord-Holland’, er wordt hier namelijk water ingenomen uit het Lekkanaal door WRK, het gezamenlijke waterbedrijf van Waternet en PWN. Dit water wordt voorgezuiverd en vervolgens naar de waterleidingduinen bij Zandvoort gepompt, om uiteindelijk na verschillende zuiveringsstappen als drinkwater in Amsterdam uit de kraan te komen. Op dit terrein is in de periode 2018-2019 een PV park gerealiseerd van in totaal 9,3 MWp, verdeeld over twee velden. Het is ook nog mogelijk dat er in de toekomst enkele windturbines op het WRK-terrein worden geplaatst, gezien de doelstellingen voor duurzame opwek die volgen uit het Klimaatakkoord.

Een deel van de stroom wordt op het terrein zelf gebruikt, er is een vrij constante stroomvraag van 2 MW voor pompenergie. Maar voornamelijk in de zomer, als de zonnepanelen een overschot aan elektriciteit produceren, zou een deel van deze elektriciteit kunnen worden omgezet in andere producten. Met behulp van een elektrolyser kan waterstof worden geproduceerd met duurzame mobiliteit als eerste toepassing, met name gericht op zwaar vervoer. Daarnaast kan een ander deel van de elektriciteit worden omgezet in warm water van 40-65°C met behulp van een grote warmtepomp, die warmte onttrekt aan het oppervlaktewater van het Lekkanaal of Merwedekanaal. Deze warmte kan als warm (grond)water in de ondergrond worden opgeslagen in een zogenaamde hoge temperatuur warmteopslag (HTO) en in de winter worden geleverd aan woningen in de nabijgelegen wijk Rijnhuizen. In deze wijk zijn nu vooral veel kantoren, maar er zullen in totaal ca. 2500 woningen worden ontwikkeld in de komende jaren. Figuur 3 geeft een overzicht van de projectlocatie.



Figuur 3 Overzicht van Power-to-X in Nieuwegein, met de locaties van het WRK terrein, het zonnepark, de waterstofproductie en de wijk Rijnhuizen (warmtelevering)

De zonnepanelen leveren niet alleen elektriciteit, maar zouden ook regenwater op kunnen vangen. Van dit regenwater wordt met minimaal energieverbruik demiwater geproduceerd door omgekeerde osmose (RO). Dit water kan gebruikt worden voor de productie van waterstof en zou misschien een deel van het waterverbruik van de wijk kunnen vervangen. Naast de productie van warmte, waterstof en water kan een deel van de geproduceerde elektriciteit (via het elektriciteitsnet) gebruikt worden voor verlichting en apparaten in de wijk. De rest van de stroom wordt terug geleverd aan het net. Om de opgewekte PV-stroom zo nuttig mogelijk te gebruiken wordt onderzocht of tussen de verschillende systeemonderdelen een gelijkstroomnet (DC) kan worden aangelegd, zodat er geen onnodige omzettingen nodig zijn van gelijkstroom (DC) naar wisselstroom (AC) weer terug.

1.4 Waarom zou u dit lezen?

Dit project is uitgevoerd om te komen tot een systeemontwerp voor het Power-to-X systeem. De kennis en ervaring die hier in de afgelopen jaren is opgedaan willen we graag delen met zoveel mogelijk mensen. Nieuwe inzichten die zijn opgedaan over de verschillende onderdelen van het concept worden hier gepresenteerd. Daarnaast willen we ook graag delen welke lessen we hebben geleerd met betrekking tot de realisatie van een Power-to-X systeem. Welke inzichten hebben we gehad, wat hielp mee of juist tegen en hoe zouden we anderen aanraden dit aan te pakken. Daarbij gebruiken we de casus in Nieuwegein als leidraad. Een praktische insteek dus, maar wel met inzichten die breder kunnen worden getrokken en bruikbaar zijn voor iedereen die zich afvraagt hoe we ons energiesysteem duurzaam kunnen maken, terwijl we het betaalbaar en betrouwbaar willen houden.

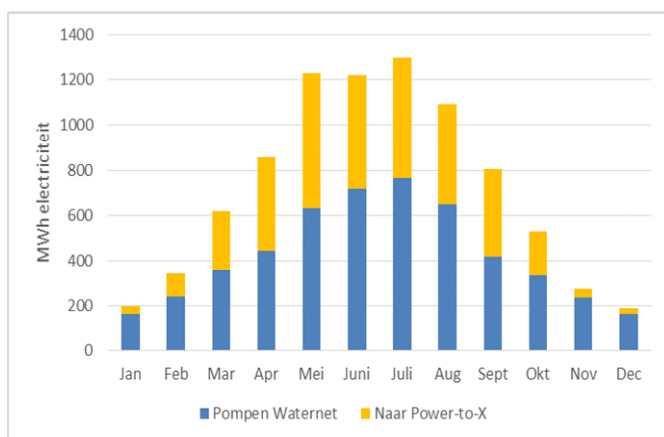
Deze publicatie volgt de verschillende onderdelen van het concept; elektriciteit in hoofdstuk 2, warmte in hoofdstuk 3 en waterstof in hoofdstuk 4. De opbouw van deze hoofdstukken is vergelijkbaar, we vertellen hoe het product kan worden gebruikt en hoe het wordt opgewekt/geproduceerd. Daarnaast bevat ieder hoofdstuk een paragraaf met factoren die belangrijk zijn op weg naar toepassing. In hoofdstuk 5 wordt nog wat meer verteld over het achterliggende rekenmodel waarmee het hele concept als geheel kan worden doorgerekend, en worden ook resultaten voor andere casussen dan Rijnhuizen gepresenteerd. In hoofdstuk 6 staan de belangrijkste conclusies en aanbevelingen. Voor de verschillende onderdelen zijn uitgebreide deelrapporten beschikbaar op aanvraag, voor meer informatie, zie HS7.

2 Elektriciteit

2.1 Waar komt de elektriciteit in het SPX project vandaan?

2.1.1 Nu: beginnen met zon

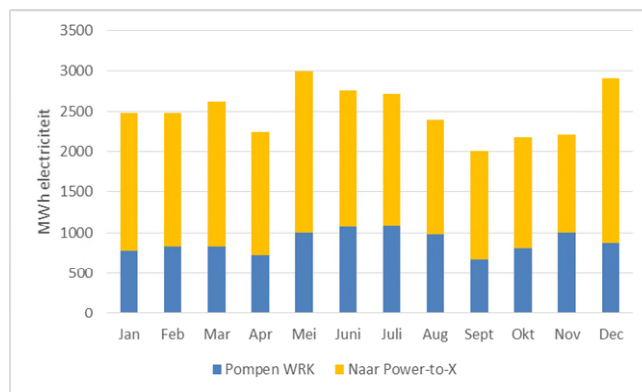
Op het WRK terrein in Nieuwegein (zie Figuur 3) zijn twee zonneparken aangelegd. Deel één is een 3,8 MWp park met een Noord-Zuid opstelling te zien in Figuur 4, met 3,1 MW omvormervermogen. Het tweede deel is 5,5 MWp in Zuid-opstelling, op het terrein loopt een 10kV net waar deze parken op aangesloten worden. Deze parken gaan samen naar verwachting 8,6 GWh per jaar opleveren, wat overeenkomt met het elektriciteitsgebruik van ca. 2900 huishoudens. Op het terrein wordt water uit het Lekkanaal voorgezuiverd voordat het naar de waterleidingduinen bij Zandvoort wordt gepompt. Ook gaat een deel naar Tata Steel bij IJmuiden. In totaal gaat het om 14 miljoen liter water per uur, het voornaamste energiegebruik op locatie gaat dan ook zitten in de pompenergie om al dit water naar de juiste plek te pompen. Hiervoor is 3,7 MW aan capaciteit gereserveerd, in de praktijk wordt er maximaal 3,4 MW gevraagd en gemiddeld is er een constante vermogensvraag (basislast) van ca. 1,9 MW. Als deze basislast van de opwek van de zonnestroom afgehaald wordt, dan blijft er nog 3,5 GWh per jaar over voor andere vormen van gebruik of omzetting, de hoeveelheid verschilt per maand (zie figuur 4). De hoogste stroompiek voor teruglevering na aftrek van eigen verbruik is naar schatting 6 MW.



Figuur 4 Opwek van stroom uit zonneparken WRK en eigen stroomverbruik per maand. Rechts zonnepark deel 1.

2.1.2 Straks ook wind?

Oorspronkelijk was het plan om op het WRK terrein ook 5 windturbines te plaatsen, hier zijn nog geen vergunningen voor verkregen. Maar gezien de opgave die er ligt voor de energie-regio's om binnen Nederland voor 35 TWh per jaar aan zonne- en windenergie op land op te wekken [2], zou dit nog kunnen veranderen. Het is dus goed mogelijk dat er uiteindelijk nog wel windturbines gerealiseerd zullen worden in Nieuwegein en/of op het WRK terrein. Daarom kijken we hier naar de beschikbare hoeveelheid elektriciteit als er 3 windturbines (van 3.2 MW) geplaatst zouden worden. Met deze windturbines erbij zou er jaarlijks ca. 30 GWh aan duurzame elektriciteit worden opgewekt op het WRK terrein. Hiervan zou ongeveer 10,6 GWh door de pompen gebruikt worden, waarna er nog 19,4 GWh per jaar over is voor andere vormen van gebruik. De hoogste terugleverpiek na aftrek van eigen verbruik komt dan rond de 15 MW uit. Om al deze elektriciteit terug te voeden in het netwerk zal bij de huidige aansluiting van 4,5 MW een verzwaring nodig zijn van de aansluiting (tot 15MW).



Figuur 5 Opwek van stroom uit zonneparken op het WRK terrein + 3 windturbines, inclusief eigen stroomverbruik per maand.

2.2 Waarom gelijkstroom?

De elektriciteit in het net op alle spanningsniveaus, en daarmee ook binnen de gebouwde omgeving, is wisselstroom (AC, alternating current). Al ruim 100 jaar is wisselstroom de wereldwijde standaard, historisch gezien is de keuze gevallen op AC omdat in die tijd gelijkstroom (DC, direct current) nog niet goed over grote afstanden getransporteerd kon worden [12]. Door de ontwikkeling van vermogenslektronica eind vorige eeuw kan dit inmiddels wel en wordt de keuze voor DC ook steeds logischer. Binnen dit project is onderzocht welk deel van het systeem op gelijkstroom gerealiseerd zou kunnen worden. Redenen om te kiezen voor DC zijn:

- *Minder energieverlies:* Zonnepanelen produceren DC, dat nu door een DC/AC-omvormer wordt omgezet in AC en in de meeste apparaten weer terug naar DC. Daarbij treedt energieverlies op wat voorkomen zou kunnen worden door direct met DC te werken.
- *Minder materiaalgebruik:* Om hetzelfde vermogen te transporteren zijn voor DC minder dikke kabels nodig, dat scheelt in materiaalgebruik en dus potentieel ook in kosten [13]. Een ander aspect is dat je in een DC systeem maar één DC/DC-omvormer nodig is, terwijl dat er anders twee zouden zijn, van DC/AC (zon-net) en AC/DC (net-apparaat).
- *Minder elektromagnetische velden:* Bij AC wordt 50 x per seconde een elektromagnetisch veld op- en afgebouwd. Deze velden kunnen invloed uitoefenen op de gezondheid van mensen, hoewel hard wetenschappelijk bewijs hiervoor nog niet geleverd is. DC heeft een constant magnetisch veld, vergelijkbaar met het constante aardmagnetisch veld dat geen invloed heeft op de gezondheid.

2.3 Gelijkstroom in Systeemontwerp Power-to-X

In het Systeemontwerp Power-to-X kan op twee plekken DC worden gebruikt, namelijk tussen de onderdelen op industrieel niveau (in het PtX-model: zonnepark, energieopslag, elektrolyser en de warmtepomp) en in de wijk (woningen, openbare verlichting en E-laad infrastructuur). Welke mogelijkheden biedt dit?

2.3.1 In de woonwijk

In de openbare ruimte van een woonwijk zijn duidelijke functies aan te wijzen voor DC-technologie. De openbare verlichting (OV) en elektrische laadpalen zijn de meest voor de hand liggende toepassingen [13]. Moderne OV is gebaseerd op led-technologie die op DC werkt. Een systeem van bijvoorbeeld zonnepanelen, batterijen en verlichting kan dan met één enkele DC/DC-omvormer worden bediend. Bij laadpalen voor elektrische auto's kan een soortgelijke redenering gevolgd worden, een lader werkt immers ook op DC. De geschatte energiebesparingen liggen rond de 10%, zie ook volgende paragraaf. De besparing in materiaal is groter: de winst is te vinden in minder en goedkopere apparatuur: in plaats van DC/AC- plus AC/DC-omvormers zijn er alleen DC/DC-omvormers nodig.

Binnenshuis is het mogelijk om veel apparatuur op DC te laten werken. Een simpele manier om dit nu al deels te doen is via USB stopcontacten. Ongeveer 25% van de apparatuur in onze huizen werkt op al DC, en nog eens 60% zou zonder problemen op DC kunnen werken (waterkoker, oven, inductiekookplaat) [13]. Voor 15% van ons stroomverbruik is AC nu nog noodzakelijk en zouden aanpassingen nodig zijn om deze op DC te laten werken, bijvoorbeeld de stofzuiger. Een robotstofzuiger bijvoorbeeld zou wel op DC kunnen werken. Praktisch onderzoek naar hoe alle apparaten in huis op DC zouden kunnen werken vindt ook plaats in Nederland, bijvoorbeeld door de Haagse Hogeschool [14]. Een eerste pilot is ook gerealiseerd, met veertien appartementen in Eindhoven die zoveel mogelijk op DC werken, met onder andere USB-stopcontacten [15]. Ook hier geldt dat er minder omvormers nodig zijn en dat er minder materiaal gebruikt kan worden wat kostenbesparend werkt.

2.3.2 In het Power-to-X systeem

De grote onderdelen van het PtX-systeem zoals het zonnepark, een windturbine en de elektrolyser werken allen op DC. Onderzoek heeft laten zien dat de warmtepomp ook op DC zou kunnen werken. Omdat de vermogens hier hoger zijn dan in de woonwijk, zijn er ook grotere potentiële besparingen mogelijk in materiaalkosten (met name in de te vermijden verzwaaring van de netaansluiting) en energie. Om dit te kunnen onderzoeken, zijn verschillende AC- en DC-varianten van het PtX-systeem met elkaar vergeleken, te beginnen met een referentie scenario met alleen het PV-park en de stroomafname van WRK zelf tot aan een systeem waarbij alles op DC draait, inclusief het naastgelegen KWR-gebouw [16].

Zoals boven aangegeven bij de woonwijk zijn er in een DC-versie minder omvormers nodig. In de AC-versie vragen de stappen DC/AC en AC/DC twee omvormers. In de DC versie worden deze twee omvormers vervangen door één enkele DC/DC-omvormer die ook nog eens minder materiaal vraagt. Een tweede belangrijke besparing is dat er minder en van een lager vermogen, in de regel kostbare, 10kV/400V MS-transformatoren (middenspanning) in een DC-versie nodig zijn.

Een marktverkenning heeft laten zien dat DC/DC-omvormers voor kleinere vermogens (10 kW bereik) op dit moment al beschikbaar zijn [17]. DC/DC-omvormers voor grote vermogens (MW bereik) zijn nog niet commercieel te verkrijgen. Op dit moment zullen deze omvormers kostbaar maatwerk zijn, die specifiek voor dit project gemaakt worden door gespecialiseerde bedrijven. Het is daarom niet te verwachten dat er voor dit eerste systeem een echte kostenbesparing gehaald wordt, maar als dit soort systemen op grotere schaal worden ontwikkeld is dit wel mogelijk.

Met betrekking tot energiebesparing kan een ruwe schatting gemaakt worden. DC/DC-omvormers in het kW bereik hebben momenteel een rendement van circa 95%. Het rendement van AC/DC-omvormers is 90-95% [18]. Het rendement van moderne DC/AC-omvormers ligt rond de 95% [19]. Bij de combinatie DC/AC + AC/DC is dit 85%-90%, bij een enkele DC/DC omvormer is dit >95%. Ontwikkelingen naar hoogfrequente DC/DC omvormers laten zien dat op dit moment al rendementen van 99% haalbaar zijn [20]. *Samenvattend: DC/AC + AC/DC : 85%-90%, DC/DC: 99%*. Hieruit wordt geconcludeerd dat de te behalen winst voor DC is te vinden door het toepassen van één in plaats van twee omvormers, voor een klein deel betrekking hebbend op de rendementen maar nog sterker betrekking hebben op materiaal.

2.3.3 Wat kan er nu al?

De verkenning naar de mogelijkheden met DC als (deel)vervanging voor AC laat zien dat de ontwikkeling van DC systemen op veel gebieden nog in de onderzoeks- en ontwikkelfase zit. De markt voor DC producten ontwikkelt zich langzaam, zowel als het gaat om distributienetwerken, industriële apparatuur (elektrolyser, warmtepomp) of binnen een woonwijk of woonhuis. Van de meeste DC specifieke apparatuur zijn tot nu toe alleen prototypes beschikbaar en wordt pas vanaf 2025 verwacht dat deze marktrijp zijn [13]. Ook de hiervoor benodigde DC-netwerkinfrastructuur wordt door fabrikanten onderzocht, maar ook hier bestaan er alleen prototypes [20]. Er is één uitzondering, voor openbare verlichting zijn al wel commerciële toepassingen bekend, bijvoorbeeld door

CityTec [21]. USB-laders in bijvoorbeeld woningen, gecombineerd met PV -panelen en eventueel een batterij zijn ook mogelijk, maar worden nog niet op grote schaal toegepast.

Op het moment van schrijven zijn er nog geen commercieel verkrijgbare producten op de markt waarmee een volledige DC infrastructuur met DC apparatuur voor eindgebruikers gerealiseerd kan worden. Om een (deel van) het PtX-systeem in Nieuwegein met DC te kunnen realiseren zal dus maatwerk nodig zijn, zoals eerder aangegeven. Hiervoor moeten bedrijven met prototypes benaderd worden. Daarnaast kunnen fabrikanten van apparatuur gevraagd worden om speciaal voor het SPX (Systeem Ontwerp Power-to-X) project een DC versie te bouwen. Vanwege dit maatwerk zullen DC systemen dan uiteraard hogere kosten met zich mee brengen dan de standaard AC systemen. In dit onderzoek zijn verschillende bedrijven gevonden die bereid zijn om DC apparatuur te ontwerpen en bouwen als proof of concept in het SPX project, bijvoorbeeld Direct Current BV.

Op kleine schaal zijn er experimenten binnen woningen en in een kantooromgeving uitgevoerd, bijvoorbeeld in de Green Village van de TU Delft [22]. Op grotere schaal, in het MW bereik, zal de benodigde technologie verder ontwikkeld dienen te worden. Op zeer grote schaal, 100 MW -1 GW zijn er al commerciële systemen op de markt, denk hierbij aan de HVDC transport systemen tussen landen en voor grote offshore windparken die vanwege de verliezen op grote afstanden alleen met DC gerealiseerd kunnen worden [23]. De verwachting is dan ook dat DC systemen op MW schaal in de nabije toekomst op de markt zullen komen, omdat deze technologie al bestaat maar nog niet voor het 1-10 MW bereik beschikbaar is. *Het SPX project kan hiervoor een goede basis bieden om als proof-of-concept te fungeren.*

2.4 Op weg naar realisatie

De ontwikkelingen op het gebied van DC gaan snel, maar nog niet zo snel dat het nu al mogelijk is om DC-onderdelen van de plank te bestellen. Ook de wetgeving kan beperkend zijn om met DC te kunnen experimenteren, met name voor publieke netten [13]. Welke factoren zijn belangrijk voor de realisatie in een mogelijk vervolg van het SPX project?

1. *Overleg met fabrikanten en bedrijven die de benodigde apparatuur kunnen leveren:* omdat veel apparatuur al intern op DC werkt levert het weglaten van de AC/DC-omvormer een kostenreductie op.
2. *Beschikbaarheid DC/DC-omvormers:* Kleine vermogens (10 kW) zijn courant beschikbaar, dit geldt ook voor zeer grote vermogens (100 MW – 1 GW). De technologie is derhalve beschikbaar voor grote vermogens (1-10 MW) maar de productie is nog niet echt gestart. Verder overleg met leveranciers is nodig voor productie van DC/DC-omvormers in deze klasse.
3. *Kies voor partijen die (deels) in Nederland zitten:* De bereidheid tot meedenken is over het algemeen groter als een bedrijf of partij deels in Nederland zit. Er is dan ook vaak meer menskracht beschikbaar dan alleen een sales-persoon, direct contact met ontwikkelaars en ontwerpers is belangrijk voor prototyping dan wel het opstarten van de productie op basis van marktvrage.
4. *Begin bij één onderdeel:* In het project hebben we naar verschillende mogelijkheden gekeken om DC toe te passen. Het meest voor de hand liggend is een directe DC koppeling tussen het PV park en de elektrolyser plus de warmtepomp al dan niet samen met opslag (accu + waterstof/brandstofcel). Hier zijn potentieel de grootste besparingen te halen en dit deel is het meest innovatief.

3 Warmte

3.1 Een duurzaam warmtesysteem voor de wijk Rijnhuizen

3.1.1 Rijnhuizen – een wijk in ontwikkeling

In Nieuwegein ligt de wijk Rijnhuizen, waarin zich onder andere een voormalig fort (Jutphaas) en het kasteel Rijnhuizen bevinden. Het gebied bestaat hoofdzakelijk uit kantoren en bedrijven met veel leegstand, die opliep tot 40% [24]. Tegelijk is er behoefte aan meer woningen in Nieuwegein, volgens het woningbouwprogramma ca. 3500 woningen in 2030 [25]. Rijnhuizen is hiervoor een geschikte locatie, waar zowel sloop-nieuwbouw als transformatie van kantoren tot woningen kan worden toegepast. In de loop der tijd is het aantal woningen dat in Rijnhuizen gerealiseerd kan worden gegroeid van 900 woningen in 2017 tot 2500 woningen in november 2019, met energiepositief bouwen als norm [26]. Dit soort ontwikkelingen is niet alleen relevant voor Nieuwegein, maar nieuwbouw, verdichting en transformatie zal door heel Nederland nodig zijn om te blijven voldoen aan de toenemende vraag naar woningen.



Figuur 6 Overzicht van de wijk Rijnhuizen. *Figuur links; legenda geeft aan dat hoe donkerder de kleur, hoe groter de bouwhoogte, bron [26]. Rechts twee impressies van het gebied; boven kasteel Rijnhuizen, onder een te transformeren kantorencomplex.*

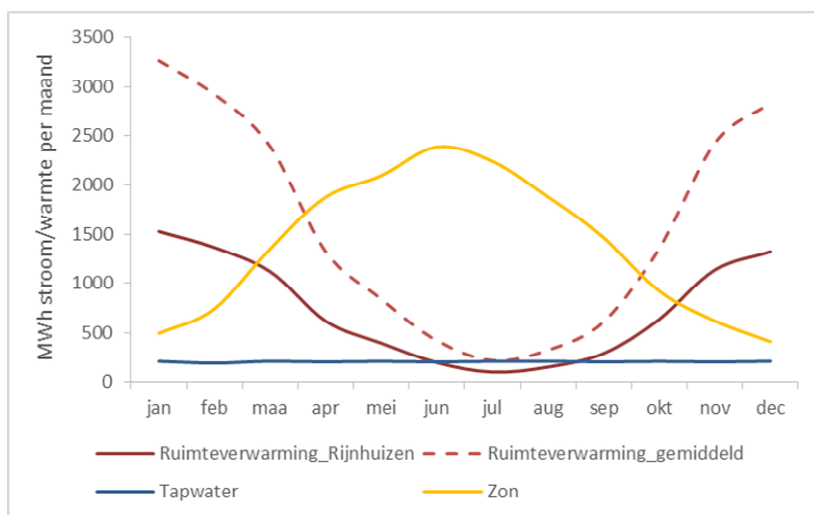
Binnen Rijnhuizen is het mogelijk om voor circa 1700 van de 2500 woningen een lage-temperatuur warmtenet te ontwikkelen gebaseerd op het Power-to-X concept. De overige woningen zijn al verder in de realisatie of liggen ongunstig ten opzichte van de overige ontwikkelingen, voor deze woningen worden andere duurzame oplossingen (WKO, luchtwarmtepompen) toegepast. Voor de 1700 woningen kan er in de zomer warmte worden geproduceerd met een warmtepomp, vervolgens opgeslagen in de ondergrond en in de winter aan huishoudens geleverd via een lage temperatuur warmtenet. Aan de uitwerking van dit idee zitten zowel technische aspecten, waarover meer te lezen is in Duurzame warmteproductie en opslag in 3.2 als meer economische en governance-aspecten die met name in 3.3 aan bod komen.

3.1.2 Hoeveel warmte is er nodig?

Warmte is een heel belangrijk onderwerp als het gaat om het verduurzamen van de gebouwde omgeving, het omvat ruim 70% van de energievraag voor gebouwen [7]. De doelstelling in het klimaatakkoord is om voor 2030 1,5 miljoen woningen te verduurzamen volgens een wijkgerichte aanpak, waarmee 1 Mton CO₂ per jaar kan worden

bespaard, denk hierbij voornamelijk aan isolatie [2]. De overige 2,4 Mton CO₂ besparing per jaar zal moeten komen uit het verduurzamen van het warmte-aanbod, hier vallen bijvoorbeeld warmtepompen (gevoed met duurzame stroom) en verduurzaming van warmtenetten onder. Het is dus te verwachten dat woningen minder energie zullen gaan gebruiken en dat het mogelijk wordt om binnen een huishouden met lagere temperaturniveaus te werken. De warmtevraag laat een duidelijk seizoenspatroon zien, wat tegengesteld is aan de opwek van duurzame energie met zonnepanelen die steeds meer in de gebouwde omgeving worden gebruikt, geïllustreerd in Figuur 7. Deze mismatch vraagt om seizoensopslag, niet alleen van elektriciteit, maar mogelijk ook van warmte (of andere energiedragers).

De vraag naar ruimteverwarming kan op lagere temperatuur voorzien worden middels vloerverwarming of lage temperatuur radiatoren (< 55°C). Tegelijk neemt het energieaandeel tapwater versus ruimteverwarming in een woning toe, zoals te zien is in Figuur 7, bij het vergelijken van de patronen voor ruimteverwarming in een gemiddelde en nieuwbouwwoning en het tapwaterpatroon. Ook hier moet een oplossing voor worden gevonden die veilig en efficiënt is, zoals een elektrische boiler of booster warmtepomp. Een warmtenet dat nu met een 70°C aanvoer- en 40°C retourtemperatuur werkt zou in dat geval verlaagd kunnen worden naar 50°C/30°C of 40°C/25°C.



Figuur 7 Warmtevraag voor ruimteverwarming in Rijnhuizen (1500 woningen) en de warmtevraag van een even grote wijk met gemiddelde woningen (data Milieu Centraal [27]). Tapwater is in beide gevallen ongeveer gelijk. De zonopbrengst van het zonnepark is weergegeven op dezelfde as en laat een omgekeerd seizoenspatroon zien.

Voor Rijnhuizen worden de mogelijkheden voor een lage temperatuur warmtenet inclusief opslag onderzocht. In totaal is de warmtevraag 12,5 GWh voor de hele wijk met een piekvraag van ca. 5-6 MWth vermogen. De afweging welke leveringstemperatuur het meest geschikt is, heeft te maken met een aantal zaken:

- **Tapwatersysteem:** Bij een 50°C zou het mogelijk zijn om met een naverwarmer in de boiler het water in de tank minimaal één keer per week naar 65°C te brengen (volgens de NEN-1006). Er bestaan echter wel kanttekeningen bij de effectiviteit van deze manier van legionellapreventie [28]. Bij 40°C aanvoertemperatuur is een extra voorziening voor tapwater nodig, zoals een boosterwarmtepomp, die hogere kosten heeft en meer ruimte in beslag neemt in een woning. Het risico op legionella is hierbij afwezig. Overigens vinden op het gebied van legionella preventie diverse innovaties plaats, waardoor het verlagen van de tapwatertemperatuur steeds minder risico met zich mee zou moeten brengen.
- **Ruimteverwarming:** Op 50°C is de aanvoertemperatuur te hoog voor vloerverwarmingssystemen en moet er dus worden uitgekoeld tot ca. 30-35°C. Bij levering op 40°C is dit verschil minder en kan er vrijwel direct

aan de vloerverwarming warmte worden geleverd. Voor lage temperatuur convectoren kunnen beide systemen worden gebruikt, met 50°C aanvoertemperatuur is wel de verwachting dat de woning sneller opwarmt dan bij 40°C.

- *Netontwerp:* Bij levering van warmte op 40°C zijn grotere leidingen nodig om dezelfde hoeveelheid warmte te vervoeren, want dezelfde hoeveelheid warmte wordt geleverd met een kleiner temperatuurverschil (15°C) ten opzichte van 50°C/30°C waar het temperatuurverschil 20°C is. Hierdoor bestaat het risico dat het net duurder wordt in de aanleg. Ook kan het een uitdaging vormen om het water genoeg uit te koelen in de woning, waardoor de retourtemperatuur hoger dan 25°C kan komen te liggen, het temperatuurverschil tussen aanvoer en retour afneemt en het debiet door de leiding hoger wordt.
- *Systeem efficiëntie:* Hierover is meer te lezen in de volgende paragraaf, maar in algemene zin geldt dat hoe lager de aanvoertemperatuur is, hoe efficiënter het systeem voor warmte productie en opslag werkt. De grootschalige warmtepomp kan efficiënter warmte produceren op een lagere temperatuur, en het opslagsysteem op lage temperatuur verliest ook minder warmte. Vanuit dit perspectief gezien is de keuze voor 40°C warmtelevering logischer dan 50°C.

De uiteindelijke keuze voor het systeem zal worden bepaald door de warmteleverancier, in samenspraak met andere stakeholders.

3.2 Duurzame warmteproductie en opslag

3.2.1 Hoe produceer je duurzame warmte?

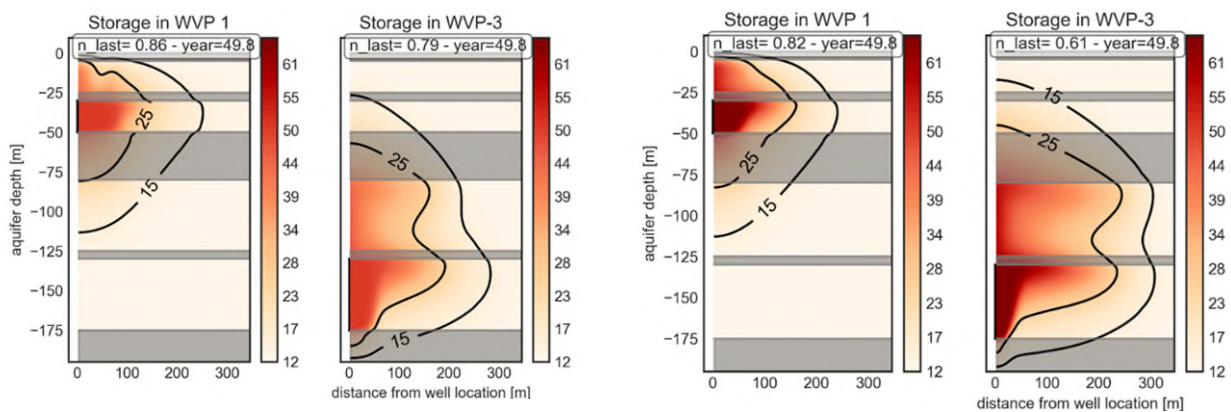
In de transitie naar een duurzame warmtevoorziening worden geothermie, restwarmte en aquathermie gezien als mogelijke toekomstige bronnen die een deel van de warmtevoorziening voor hun rekening kunnen nemen [2]. Aquathermie is het gebruik maken van de thermische energie uit water, dit kan oppervlakte water (TEO), afvalwater (TEA) of drinkwater (TED) zijn. De potentie van TEO wordt geschat op 150 PJ, circa 40% van de toekomstige (2030) warmtebehoefte binnen de gebouwde omgeving [29]. Het Power-to-X concept kan overweg met al deze bronnen, waarbij de focus momenteel ligt op TEO, gebruikmakend van het oppervlaktewater uit het Lekkanaal of het Merwedekanaal. In de zomerperiode (mei-september) kan warmte worden gewonnen en met een warmtepomp van 3-4 MWel vermogen (ca 12-14 MWth) worden opgewaardeerd naar 50°C dan wel 65°C. Deze warmte kan vervolgens worden opgeslagen in de ondergrond (meer hierover in de volgende paragraaf). Een andere mogelijke warmtebron is restwarmte. Binnen het Power-to-X concept is een interessante restwarmtebron beschikbaar, namelijk de elektrolyser. De elektrolyser produceert waterstof, maar ca. 20-25% van de energie die nodig is wordt in warmte omgezet van 50-80°C. Deze temperatuur komt heel goed overeen met die van de warmteopslag en -levering. In plaats van enkel te koelen met lucht, kan daarnaast een waterkoelingsysteem worden geïnstalleerd waardoor het overgrote deel (naar schatting minimaal 80%) van de warmte kan worden teruggewonnen. Het gaat om 3,3 GWh aan warmte per jaar, bijna 25% van de totale warmtevraag. Door een slimme koppeling van de verschillende conversie-technologieën kunnen dus extra voordelen worden behaald. Het is dan wel noodzakelijk dat de warmtepomp en de elektrolyser bij elkaar in de buurt staan.

3.2.2 Hoge temperatuur ondergrondse warmteopslag- welke effecten heeft dat?

Onderdeel van het Power-to-X concept is seizoensopslag van warmte op hogere temperaturen (40-65°C) dan gebruikelijk. Voor traditioneel open bodemenergiesystemen geldt een maximale infiltratietemperatuur van 25 graden (Waterwet, 2013). In afwijking van deze temperatuurbe grenzing mag middels maatwerk worden afgeweken van dit beleid. In overleg met de provincie Utrecht wordt nagegaan onder welke randvoorwaarden op hogere temperatuur in de bodem mag worden opgeslagen. In haar beleid wordt standaard gekeken naar het tweede watervoerend pakket en dieper [30]. Bij het ondergronds opslaan van water op hogere temperaturen (HTO) is nog niet exact bekend wat de effecten zijn op de grondwaterkwaliteit. Daarnaast zijn er oprijvingseffecten doordat

warm water een minder hoge dichtheid heeft dan het koudere grondwater erom heen. Hierdoor kan er uitstraling van warmte naar bovenliggende lagen optreden en vermindert de terugwinefficiëntie.

Voor de casus Nieuwegein is onderzocht welk watervoerend pakket (WVP) in deze situatie het meest geschikt is en wat het effect van temperatuurverhoging op zowel de chemische als microbiologische waterkwaliteit is. Ondanks de richtlijnen van de provincie Utrecht lijkt voor de casus Nieuwegein-WRK terrein opslag in het 1^e WVP (tot 50 meter diepte) de beste optie. WRK heeft namelijk reserveputten voor waterwinning in het tweede watervoerend pakket die bij aanleg van een HTO in WVP 3 in behoorlijke mate worden beïnvloed, zoals te zien in Figuur 8. Dat komt met name omdat de afsluitende laag tussen WVP 2 en 3 niet zo dik is als tussen pakket 1 en 2. Daarnaast is er door Waternet een proces in gang gezet voor een boringsvrije zone, die niet toestaat de afsluitende laag tussen pakket 1 en 2 te doorboren, waardoor opslag in WVP1 ook een betere optie is. Ten slotte heeft opslag in WVP1 een hogere terugwinefficiëntie en zorgt minder diep boren ook voor een goedkoper systeem. Het is dus aan te raden om in dit geval het HTO systeem in WVP 1 te realiseren, bij deze afweging zijn zowel Waternet als de Provincie Utrecht nauw betrokken geweest tijdens verschillende overlegmomenten. Qua temperatuurniveau zorgt opslag op 50°C voor een hogere terugwin efficiëntie dan op 65°C.



Figuur 8 Temperatuur verdeling in de bodem bij maximale warmte opslag in WVP 1 en WVP 3. Links bij 50°C na 50 jaar, Rechts bij 65°C na 50 jaar. n_last is de terugwin efficiëntie.

Voor het onderzoeken van de effecten op de waterkwaliteit zijn op het WRK terrein sedimentmonsters op diepte genomen, die als 'batches' in het lab op reactiviteit zijn getest. Het sediment is tevens geanalyseerd op organisch koolstof, verschillende veelvoorkomende anorganische parameters (macro) en een reeks aan anorganische (micro) parameters die in sporen aanwezig zijn. De concentratieveranderingen van een groot aantal van deze parameters zijn reversibel bij afkoeling (bv. fosfaat en arseen), voor andere stoffen (bv. koper en lithium) leken de concentraties niet omkeerbaar binnen de experimentele duur (irreversibel). Tevens is gebleken dat er bepaalde parameters zijn die in concentratie toenemen bij toename in temperatuur, met name arseen, koper en chroom, waarbij alleen arseen boven de normen van het Drinkwaterbesluit [31] komt. Op andere locaties zouden deze verhoudingen anders kunnen zijn. Voor arseen geldt echter dat de concentraties in de sedimentmonsters bij de achtergrondtemperatuur al dicht bij de norm van het Drinkwaterbesluit liggen, en dat de verhoging van de concentratie bij een toename in temperatuur ook weer reversibel is.

De microbiële kwaliteitsveranderingen zijn als volgt samen te vatten; bij opslag van warmte op 40°C is er minder diversiteit in de micro-organismen en worden bepaalde micro-organismen juist dominant ten opzichte van de achtergrondcondities bij ~11°C. Dit effect is omkeerbaar als de temperatuur wordt teruggebracht naar 11°C. Bij verdere verhoging tot 65°C wordt de dominantie van één bepaalde populatie nog groter, al bestaat er nog steeds een behoorlijke diversiteit. Deze verandering lijkt onder de testcondities niet reversibel, omdat alleen bepaalde warmte-minnende (thermofiele) micro-organismen overleven. Bij nog verdere verhoging van de temperatuur tot 85°C is er vrijwel geen microbiële leven meer aanwezig.

Al met al zijn de resultaten van de experimenten volgens verwachting en verklaarbaar vanuit een bio-geochemisch perspectief. De effecten van de ondergrondse warmteopslag lijken beperkt, zeker tot 65°C. Als er wordt besloten tot verdere stappen richting realisatie, bevelen wij aan om uitgebreide monitoring te doen van de effecten bij toepassing in het veld op basis van de inzichten verkregen uit deze studie.

3.3 Op weg naar realisatie

Vanuit governance-perspectief is de ontwikkeling van een duurzaam warmtesysteem inclusief warmtenet in Rijnhuizen geen eenvoudige opgave. Het gebied is vrijwel geheel in particulier en commercieel bezit en er zijn 29 verschillende ontwikkelingen die door 24 verschillende partijen worden geleid. Een kleine 300 woningen is inmiddels gerealiseerd. Daarnaast hebben we te maken met een nieuw concept, dat in delen wel eerder is toegepast, maar niet als geheel. In de komende jaren zullen dit soort situaties zich vaker voordoen, omdat ook gebieden waar veel eigenaren zijn verduurzaamd moeten worden en nieuwe oplossingen zullen worden uitgeprobeerd. Welke factoren zijn van belang om tot realisatie te komen in een dergelijke situatie?

1. *Belang energietransitie vanuit beleid:* Het Klimaatakkoord, de Klimaatwet, de warmtetransitieplannen, de regeling voor de Proeftuinen Aardgasvrije wijken en de Meerjarige Missiegedreven Innovatieprogramma's; er is veel momentum om op zoek te gaan naar duurzame oplossingen voor de gebouwde omgeving. Er komt dan ook ruimte om de eerste innovatieve projecten financieel te ondersteunen, zodat er daarna kan worden opgeschaald en versneld.
2. *Ontwikkeling voldoende afzetvolumes:* Voor een investering in een warmtenet is een minimaal afzetvolume essentieel. Al in de ideefase zijn zowel de gemeente als de Club Rijnhuizen (vertegenwoordiger van stakeholders in het gebied) betrokken en later ook mogelijke warmteleveranciers. Het samenspel tussen deze partijen heeft uiteindelijk geleid tot de mogelijkheid om een business case te ontwikkelen op basis van 1700 woningen, dit is een minimaal aantal woningen voor de warmteleverancier om een business case rond te krijgen voor het warmtenet met een acceptabele bijdrage aansluitkosten (BAK) van 5000-6000 €/woning voor projectontwikkelaars.
3. *Inbedding in regelgeving:* Rondom HTO moet nog kennis worden ontwikkeld, ook bij de provincie en gemeente. Vanaf het begin van het proces zijn deze partijen daarom betrokken, om samen te bepalen welke inzichten nodig zijn om een beter beeld te kunnen vormen van de risico's en mogelijkheden van HTO. Er geldt hier een casus specifieke aanpak, maar essentieel is om beslissende en belanghebbende partijen zo vroeg mogelijk te betrekken en transparant te zijn over al beschikbare en nog te ontwikkelen kennis.
4. *Denk na over redundantie:* Bij de ontwikkeling van een HTO systeem worden door het innovatieve aspect meer risico's ervaren dan voor conventionele warmtelevering, met name door stakeholders zoals een warmteleverancier en projectontwikkelaars. Daarom is het van belang om over redundantie na te denken in het systeem, zoals koppeling met een al bestaand warmtenet of een mogelijke extra bron, dit vergroot het vertrouwen en dus de kansen voor realisatie. Ook het overwegen van verschillende temperatuurniveaus past hierbij.

4 Waterstof

4.1 Sleutelrol waterstof in een duurzaam energiesysteem

Waterstof is net als elektriciteit een energiedrager. Waterstof is de energiedrager die wereldwijd transport en grootschalige opslag van duurzame en koolstofvrije energie mogelijk maakt. Waterstof transport via pijpleidingen en grootschalige opslag in zoutkoepels is daarbij factoren goedkoper dan elektriciteit transport via kabels en opslag in batterijen [32]. Bovendien kunnen de aardgasinfrastructuur, leidingen en zoutkoepels worden hergebruikt voor waterstof.

Waterstof wordt al gebruikt als grondstof in de industrie, in de chemie en raffinaderijen en wordt nu vooral geproduceerd uit aardgas. In de toekomst willen we waterstof produceren via elektrolyse uit water, waarbij de elektriciteit dan wel groene elektriciteit moet zijn. Waterstof kan dan bovendien gebruikt worden als groene grondstof voor de productie van staal, nieuwe chemische producten, synthetische brandstoffen en zelfs eiwitten [33]. Daarnaast is waterstof als energiedrager geschikt voor de productie van hoge temperatuurwarmte voor de industrie, voor lage temperatuurwarmte voor huizen en gebouwen, voor de omzetting naar elektriciteit én als brandstof voor transport en mobiliteit.

Beleid en regelgeving geven sturing aan verbreding van de toepassing van waterstof, zowel (1) internationaal (World Economic Forum, International Energy Agency [34], the EU Hydrogen Initiative, EU Green Deal), (2) nationaal (Klimaatakkoord [2], 3-4 GW electrolyser coalitie) als lokaal (Routekaart Energieneutraal Nieuwegein 2040 [35]).

4.2 Waterstof in Nieuwegein voor mobiliteit

Waterstof kan lokaal worden geproduceerd via elektrolyse van (gedemineraliseerd) water, met behulp van elektriciteit uit zon en wind. Een belangrijke reden voor lokale waterstof productie is dat daardoor verzwaring van het elektriciteitsnet kan worden voorkomen, waardoor kosten worden bespaard. Maar bovenal kan ook meer en sneller lokaal geproduceerde zon en wind elektriciteit in het energiesysteem worden ingepast.

In Nieuwegein, in het Power-to-X project, is gekozen voor toepassing van groene waterstof voor mobiliteit, met name voor zwaar transport. De huidige milieu-impact van de transportsector is aanzienlijk, niet alleen zorgt het voor 20% van de Nederlandse CO₂ emissies maar is mobiliteit ook verantwoordelijk voor meer dan de helft van de NO_x emissie in Nederland [36] en een groot deel van de fijnstof emissies. Deze emissies zijn het gevolg van het gebruik van fossiele brandstoffen in combinatie met het gebruik van verbrandingsmotoren. Daarom is elektrisch rijden, het gebruik van elektromotoren voor de aandrijving van de wielen, de manier om deze emissies van CO₂, NO_x en fijnstof te vermijden. Er zijn twee varianten van elektrisch rijden, namelijk batterij elektrische voertuigen (BEV) en brandstofcel (fuel cell) elektrische voertuigen (FCEV). FCEV tanken waterstof die dan in de brandstofcel wordt omgezet in elektriciteit. Bij elektrisch rijden treden weliswaar geen lokale CO₂ emissies op, maar bij de productie van elektriciteit of waterstof uit fossiele bronnen kan dat wel het geval zijn. Daarom is het alleen CO₂ emissievrij als er groene stroom danwel groene waterstof wordt gebruikt.

In het algemeen ligt het zwaartepunt voor licht vervoer en/of kleine afstanden bij BEV en voor zwaar vervoer en/of grotere afstanden bij FCEV. Voor beide vormen gaan de technologische ontwikkelingen nog volop verder. Het is aannemelijk dat in de toekomst elektrisch vervoer de hoofdrol heeft, gebaseerd op een mix van BEV en FCEV, met

een overgangperiode van hybride voertuigen. De keuze tussen BEV en FCEV heeft vooral te maken met het aantal km dat op één batterij/tank gereden kan worden en met de laadtijd ofwel vul-tijd. De laadinfrastructuur voor BEV is inmiddels in commerciële ontwikkeling, alhoewel nog een fikse uitbreiding daarvan noodzakelijk is. Tank- en vulstations van waterstof zijn nog zeer beperkt aanwezig, zij het dat diverse nieuwe voorzieningen in voorbereiding zijn, mede met financiële ondersteuning van de Rijksoverheid.



Figuur 9 Waterstoftankstations in Nederland en België. Figuur van Waterstofnet.

Kijken we naar het brandstofverbruik van FCEV dan zien we uiteraard grote verschillen tussen de verschillende vervoermiddelen, die natuurlijk verklaard worden door het verschil in gewicht van deze voer/vaartuigen (Tabel 1).

Tabel 1 Waterstofverbruik van verschillende vormen van FCEV voertuigen

	Gemiddeld verbruik per 100 km (kg waterstof)
Personenauto	1
Bus	5
Vracht/vuilniswagen	5-10
Binnenvaartschip (90-110 m lengte)	300

Bij de introductie van elektrisch rijden, zowel BEV als FCEV, speelt een aantal belangrijke knelpunten.

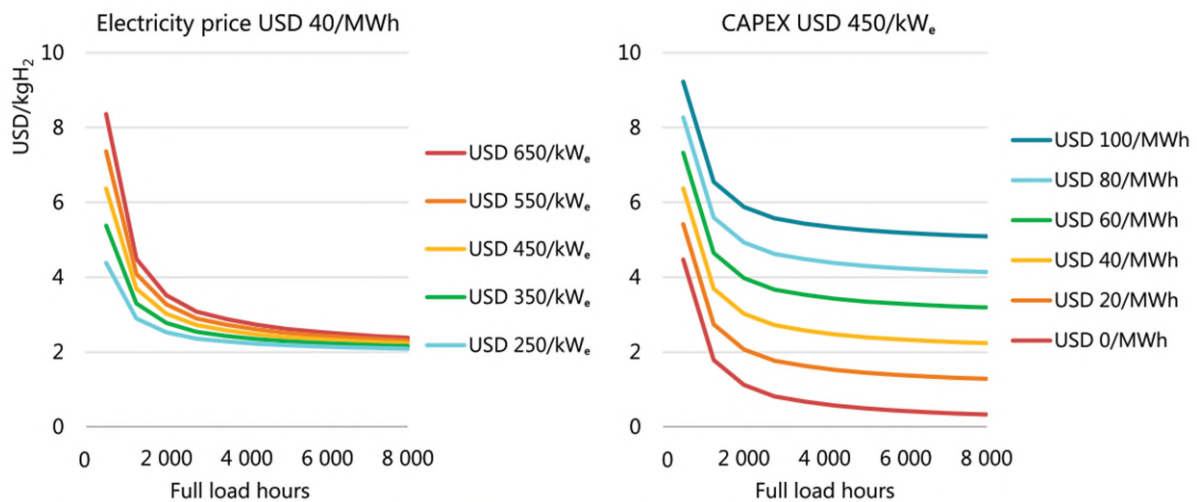
- Bij BEV is nu nog de actieradius een beperking, daarnaast zijn er ook hybride en plug-in hybride voertuigen op de markt. Deze hybride voertuigen hebben een elektromotor, die deels via elektriciteit uit batterijen en deels door elektriciteit geproduceerd met een verbrandingsmotor wordt voorzien. Deze voertuigen zijn weliswaar schoner, maar kennen nog steeds CO₂, NO_x en fijnstof emissies.
- Bij FCEV zijn momenteel de beschikbaarheid en kosten van de brandstofcellen nog een belangrijk probleem. Om waterstof toch toe te kunnen passen in met name zwaar transport kan waterstof samen met diesel worden geïnjecteerd in dieselmotoren, waardoor een schonere verbranding plaatsvindt met minder CO₂ en fijnstof tot gevolg. Deze technologie wordt momenteel uitontwikkeld en is binnenkort op de markt als transitie maatregel op weg naar volledig duurzaam vervoer.

4.3 Waterstofproductie met een elektrolyser

4.3.1 Hoe produceer je groene waterstof?

Om groene waterstof te kunnen maken zijn drie dingen essentieel. De eerste is groene stroom, het tweede is heel zuiver water en de derde een elektrolyser die van deze twee producten (groene) waterstof en zuurstof maakt. Stroom en water komen in de volgende paragrafen aan bod, net als het vervoer van de waterstof, de vraag is nu eerst hoe de keuze voor een elektrolyser tot stand komt. In Nieuwegein is in eerste instantie de grootte van de installatie bepaald, die rond de 2 MW uitkomt. De reden hiervoor is dat op die manier samen met de warmtepomp (3-4 MWel) de pieken in stroomproductie van het zonnepark (max. 6 MW) goed kunnen worden afgevangen. De andere reden heeft te maken met de verwachte afzet, waarbij een productie van ca. 250 ton waterstof per jaar mogelijkheden biedt om met verschillende afnemers afspraken te maken en een business case te creëren, wat bij kleinere volumes lastiger is. Dan moet een keuze worden gemaakt in het type elektrolyser. Momenteel zijn 2 types commercieel beschikbaar; alkaline (AEC) en proton exchange membrane (PEM), in Nieuwegein is de keuze gevallen op PEM. Alkaline elektrolyzers zijn goedkoper bij grote installaties, maar op de 2 MW schaal ontlopen de kosten elkaar niet veel tussen PEM en alkaline.

Ten slotte zijn de productie en verkoopprijs van waterstof relevant. In Nederland ligt de huidige afleverprijs van waterstof aan de pompstations (Arnhem, Den Haag, Helmond, Rotterdam, Delfzijl) rond 10,- €/kg excl. BTW. Gezien de beperkte dekkingsgraad aan de aanbodzijde is van een echte markt nog geen sprake. Ook is er bij de tankstations geen differentiatie in aanbod tussen grijze, blauwe of groene waterstof. De kosten van productie van (groene) waterstof via electrolyse zijn uitgebreid in kaart gebracht door Enpuls [37] voor de huidige situatie en door de IEA meer gericht op toekomstige grootschalige ontwikkelingen [34]. Bij vollast worden de kosten gedomineerd door de elektriciteitsprijs, meer dan door de kosten van de elektrolyser, zoals te zien is in Figuur 10. In de toekomst zal dit nog sterker gelden als de aanschafprijs van elektrolyzers gaat dalen, zoals de verwachting is.



Notes: MWh = megawatt hour. Based on an electrolyser efficiency of 69% (LHV) and a discount rate of 8%.

Source: IEA 2019. All rights reserved.

Figuur 10 Waterstofproductieprijs per kg onder verschillende draaiuren (x-as), bij een wisselende CAPEX (links) en elektriciteitsprijs (rechts)[34].

4.3.2 Waar komt de stroom voor de elektrolyser vandaan?

Om ieder jaar 250 ton waterstof te kunnen produceren (op 30 bar), moet de elektrolyser ruim 7000 uur per jaar draaien en is ongeveer 14,7 GWh aan stroom nodig. Dat de elektrolyser zoveel draaiuren moet maken, heeft met name te maken met de rendabiliteit. De beschikbare zonnestroom alleen is daarvoor niet genoeg, dus zal de zonnestroom aangevuld worden met groene stroom uit het net. Met de twee zonneparken en aftrek van stroom voor de pompen van WRK en de warmtepomp blijft er nog ongeveer 2,2 GWh over voor de elektrolyser (zonder warmtepomp zou dit 2,6 GWh zijn). De rest van de stroom (12,5 GWh) zal dus uit het net moeten komen. Indien er 3 windturbines aan het systeem worden toegevoegd, is het mogelijk om ruim 8 GWh aan stroom direct uit duurzame bronnen te halen, waarbij nog ca 6,7 GWh stroom uit het net nodig is.

4.3.3 Water en waterstofkwaliteit

Voor de elektrolyse van water is erg zuiver water nodig om ongewenste reacties aan de elektrodes van de elektrolyser te voorkomen. Het gaat dan bijvoorbeeld om de vorming van vrij chloor als er zout aanwezig zou zijn in het water dat de elektrolyser in gaat, maar ook om kalkafzetting aan de elektroden. Door deze reacties neemt het rendement van de elektrolyser af en vrij chloor tast de membranen in de elektrolyser aan. Om dit te voorkomen, wordt het water dat aan de elektrolyser wordt gevoed eerst voorgezuiverd. Meestal gebeurt dit met gewoon drinkwater. Dit is een veilige en robuuste behandeling, maar het waterverlies is bij deze "standaard" installatie echter vrij hoog. Een alternatief hiervoor zou het gebruik van regenwater kunnen zijn, waar minder zouten in zitten waardoor er minder zuiveringsstappen nodig zijn. Wel moet er een vaste stof filter toegepast worden. Op basis van enkele experimenten met water van een afstromende glazen plaat die model stond voor een zonnepaneel is geconstateerd dat regenwater ook als bron voor de elektrolyser gebruikt zou kunnen worden. Het voordeel van dit systeem is dat er tot 50% minder waterverlies is ten opzichte van het gebruik van drinkwater. Dat betekent ook dat het volume van de reststroom die afgevoerd moet worden minder groot is. In totaal is voor de productie van 250 ton waterstof 2.500- 5.000 m³ water per jaar nodig.

De waterstof die geproduceerd wordt moet, afhankelijk van de toepassing, ook aan bepaalde strikte eisen voldoen. Industrieel geproduceerde (grijze) waterstof heeft vaak een zuiverheidsgraad van 2.5-3.0 oftewel 99,5-99,9% zuiver, wat betekent dat er nog maximaal 0,1-0,5% aan andere stoffen bij de waterstof zit. De waterstof die in Nieuwegein geproduceerd gaat worden, moet heel zuiver zijn omdat deze in brandstofcellen binnen (zware) mobiliteit toegepast gaat worden. In deze brandstofcellen worden moleculen langs een katalysator geleid, waar de waterstofmoleculen uiteen vallen in waterstofprotonen en elektronen. De katalysator kan tijdelijk of blijvend

worden aangetast door een onzuivere gasstroom. Delen van de katalysator kunnen daardoor onwerkzaam worden. Het is daarom van belang dat er met een 5.0 kwaliteit waterstof gewerkt wordt, dus 99,999 % zuiverheid. Een PEM elektrolyser produceert waterstof met deze zuiverheid. Naast de waterstofproductie, is het ook belangrijk om in de hele leveringsketen oog te hebben voor verontreinigingen, zodat het geproduceerde gas niet later alsnog ongewenste stoffen gaat bevatten.

4.3.4 Van productie naar klant

Als de waterstof geproduceerd is, moet deze ergens worden opgeslagen of naartoe worden getransporteerd. Kleinschalige opslag van waterstof is duur, zeker bij opslag op hoge druk. Daarom wordt in Nieuwegein onderzocht of er gewerkt kan worden met een klein opslagvolume (ca 100 kg) aangevuld met transport via een pijpleiding naar de locatie voor het geplande tankstation ca. 1 km verderop. Overig transport kan dan vanaf daar plaatsvinden met een tube trailer, die ter plekke gevuld kan worden. Om waterstof verder per tube trailer te transporteren of in een voertuig te krijgen, moet eerst compressie plaatsvinden. Waterstof heeft namelijk wel een hoge energiedichtheid per kilogram, maar niet per volume. Om waterstof als energiedrager in te zetten, is het dus van belang om waterstof op hoge druk te brengen zodat je veel energie kan meenemen, voor mobiliteit gaat het dan om 350-700 bar. De compressor die hiervoor nodig is, brengt in het hele waterstofsysteem een grote complexiteit met zich mee, omdat waterstof een zeer klein molecuul is dat makkelijk langs de zuiger van de compressor 'sluip't'. Daarnaast zijn er veel eisen aan de compressor, zo moet deze olievrij zijn om het product zuiver te houden, moet er tot hoge drukken gecompriemd worden en mag het gas niet te warm worden omdat er gekoeld moet worden getankt. De compressor heeft door al deze aspecten relatief de meeste aandacht en onderhoud van de keten nodig.

4.4 Op weg naar realisatie

Op het gebied van waterstof zijn veel ontwikkelingen geweest de afgelopen jaren, waardoor ook in Nieuwegein realisatie goed mogelijk is. Inmiddels is er bij KWR een tijdelijk vulstation geïnstalleerd waar waterstof getankt kan worden [38] (zie Figuur 11) en zal naar verwachting de productie en afzet van eigen waterstof volgen in 2020-2021. Welke factoren hebben hierbij een rol gespeeld?



Figuur 11 Foto van het waterstofvulstation bij KWR in Nieuwegein.

1. *Ontwikkelen van marktvraag:* Cruciaal bij marktontwikkeling is het creëren van zichtbaarheid. Conceptueel is hiermee gestart met de presentatie van het Power-to-X concept in 2017, *Solar Power to the People* [6]. Een volgende stap hebben we genomen door het installeren van een vulstation voor waterstof op KWR-terrein, dit ten behoeve van bedrijfsauto's van KWR/Allied Waters. Gegeven het verbruik per transport-km (zie Tabel 1) levert een beschikbaar waterstofvolume van 250 ton per jaar energie voor óf 1000 auto's of 50 bussen, óf 2-3 vrachtschepen voor de binnenvaart. Voor het demonstratieproject in Nieuwegein kiezen we ervoor om toepassingen in de breedte te zoeken. Aanleiding is immers het op gang helpen van een

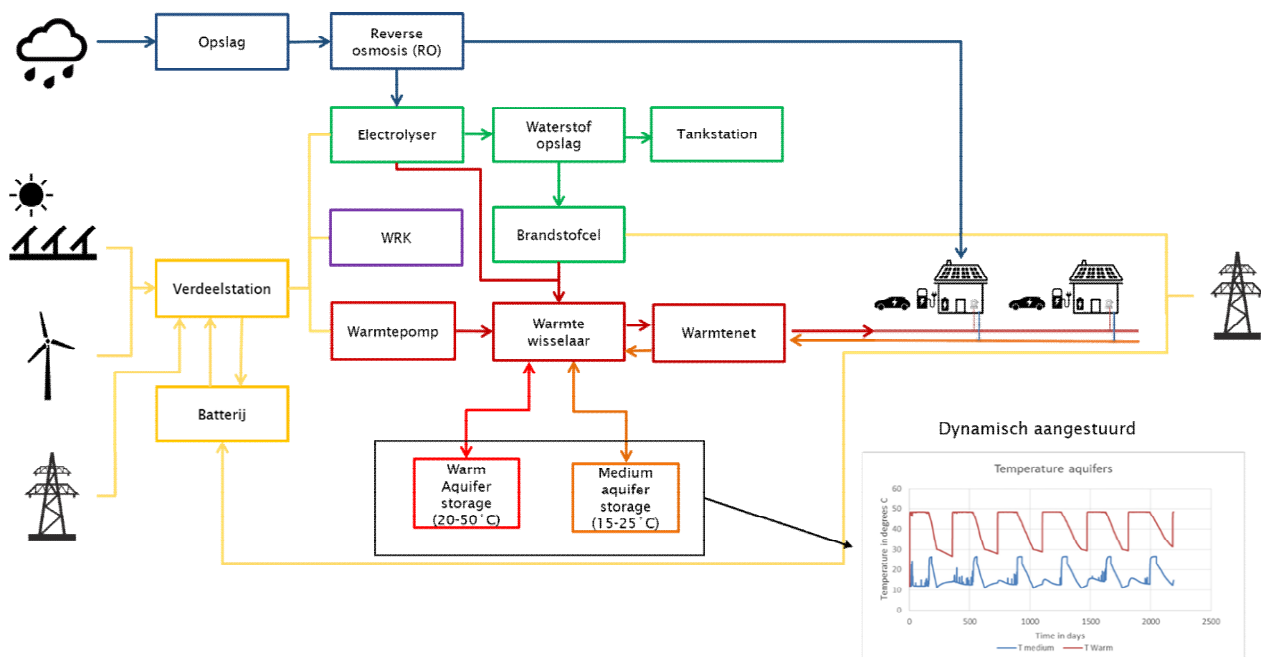
waarde- en productieketen van groene waterstof voor mobiliteit. Dit is in 2019 mede aanleiding geweest tot het oprichten van het bedrijf Hysolar B.V. Gezien de kosten verbonden aan opslag en transport van waterstof ligt het voor de hand de afnemers vooral in de naaste omgeving te zoeken. De verkenning heeft geleid tot diverse opties: krachtwerktuigen van lokale bedrijven, bussen van een lokale remise, voertuigen van de gemeente, personenauto's in de regio en een binnenvaartschip buiten de regio.

2. *De markt: er is vraag naar zero-emissie vervoer:* Nederland kent een stormachtige ontwikkeling rond onderling gerelateerde thema's als klimaatbeleid, energietransitie en aardgaswinning. Verduurzaming van onze economie is inmiddels een centraal thema geworden. Zoals bij elke nieuwe beweging reageren bedrijven hier verschillend op, variërend van afwachten, conformeren tot het nemen van een voortrekkersrol. Bedrijven die zich hiermee strategisch kunnen positioneren vormen de meest krachtige basis. Voor dergelijke bedrijven is de voortrekkersrol onderdeel van hun eigen business-model. Groene waterstof is vooral interessant voor bedrijven of organisaties (1) met een strategische doelstelling rond duurzaamheid, (2) die afnemers bedienen die een duurzame oplossing voorschrijven, (3) een logistiek voordeel behalen (korte laad/vultijd vergeleken met BEV, grotere actieradius) en/of (4) bereid zijn hun leaserijders te faciliteren.
3. *Inbedding in regelgeving:* Het realiseren van een waterstoftankstation of productielocatie is voor het bevoegd gezag vaak ook nog iets nieuws. Het is daarom belangrijk om vooroverleg te houden met de betrokkenen om het doel en de context duidelijk te maken.

5 Power-to-X in de praktijk

5.1 Een integraal perspectief

Om meer inzicht te krijgen in de werking van het totale systeem, is het rekenmodel 'Power-to-X' [39], [40] verder ontwikkeld zodat voor verschillende scenario's een energiebalans per uur kan worden opgesteld en economische berekeningen kunnen worden gedaan. De verschillende mogelijke onderdelen en interacties in het model zijn weergegeven in *Figuur 12*. In dit onderzoek zijn acht verschillende scenario's geanalyseerd gebaseerd op de casus Nieuwegein-Rijnhuizen. Daarbij zijn drie verschillende parameters gevarieerd, namelijk warmtelevering op minimaal 50 °C of 40 °C, wel of geen warmteterugwinning uit de elektrolyser en wel of geen windturbines (3 x 3.2 MW). In HS3 is gesproken over warmteopslag op 40-65 °C, hier hebben wij gekozen voor opslag op 65 °C of 50 °C, wat na opslag (en dus warmteverlies) resulteert in warmtelevering op 50 °C en respectievelijk 40 °C, dit zijn dan ook de getallen die u in dit hoofdstuk gebruikt ziet worden.



Figuur 12 Overzicht onderdelen Power-to-X model, voor de casus Nieuwegein zijn de batterij en brandstofcel weggelaten uit de modellering.

5.2 Een blik op het totale systeem

5.2.1 Wat hebben we geleerd over Power-to-X in Nieuwegein?

Als alle verschillende onderdelen binnen het Power-to-X concept samen gerealiseerd zouden worden, wat betekent dit dan voor de energiebalans van het systeem, en wat zijn de kosten van de verschillende producten? Het staat nog niet vast hoe het uiteindelijke systeem er precies uit zal gaan zien en er zijn nog veel keuzevrijheden. Daarom is besloten om de invloed van drie aspecten op het totale systeem te onderzoeken, wat leidt tot acht scenario's die in Tabel 2 zijn samengevat:

- 50 °C of 40 °C warmtelevering: omdat dit invloed heeft op de grootte van de warmtepomp, het opslagsysteem en de afleverset voor in huis.
- Restwarmte uit elektrolyser: De invloed van de integratie van het warmte- en waterstofsysteem is onderzocht door de restwarmte uit de elektrolyser te gebruiken in het warmtesysteem.

- Windturbines: er zijn analyses met en zonder drie windturbines gedaan, omdat er een kans bestaat dat deze uiteindelijk gerealiseerd gaan worden en deze extra energie grote impact heeft op het systeem.

Tabel 2 Omschrijving scenario's Power-to-X systeem

Omschrijving systeem en scenario's								
PV systeem capaciteit	3,8 + 5,5 MWp (+ 1,7 MWp op woningen)							
Aantal woningen	1700							
Warmtevraag	8,8 GWh ruimteverwarming en 3,7 GWh tapwater per jaar							
Groote elektrolyser	2,1 MW							
Waterstofvraag	250 ton/jaar							
Regenwateropslag	40.000 m ³							
(demi-)watervraag	2.500 – 5.000 m ³ voor de elektrolyser en 65.000 m ³ voor 1700 woningen							
Warmte levering	40°C leveringstemperatuur				50°C leveringstemperatuur			
Windturbines	0		3		0		3	
Restwarmte uit elektrolyser	Nee	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja
Groote warmtepomp (MWe)	3,5	3	3,5	3	4	3,5	4	3,5
Naam scenario in dashboard	40_hr0_	40_hr1_	40_hr0_	40_hr1_	50_hr0_	50_hr1_	50_hr0_	50_hr1_
	W0	W0	W3	W3	W0	W0	W3	W3
Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8

De resultaten van deze acht scenario's worden hier op hoofdlijnen besproken. Alle resultaten zijn terug te vinden in een dashboard, waar de gebruiker zelf de resultaten kan bekijken en verschillende scenario's kan vergelijken, het dashboard is te bereiken via [deze link](#). De belangrijkste economische resultaten zijn weergegeven in

Tabel 3 Tabel 3 voor het totale systeem en in Tabel 4 per huishouden. Op basis van de analyses zijn een aantal conclusies te trekken. Het is belangrijk te beseffen dat als de randvoorwaarden van het systeem veranderen, bijvoorbeeld een lagere warmtevraag van de woningen, de conclusies kunnen veranderen. De economische uitkomsten moeten als indicatief worden beschouwd en zijn vooral bedoeld om de scenario's onderling te kunnen vergelijken. Dit betekent dat er bijvoorbeeld geen kosten zijn meegenomen die voor alle scenario's gelijk zijn, zoals vastrecht voor stroom of warmte, of belasting (btw).

40°C vs 50°C warmtelevering

- **Totale systeemkosten vergelijkbaar.** Bij een warmte systeem op 50°C (scenario nr. 5-8) is een grotere warmtepomp nodig, maar wel minder bronnen in het opslagsysteem dan bij warmtelevering op 40°C (scenario nr. 1-4). Dat komt omdat voor een gelijke hoeveelheid warmte op hogere temperatuur minder ruimte nodig is dan bij opslag op lage temperatuur. Deze twee factoren middelen elkaar zo goed als uit, waardoor de totale systeemkosten redelijk vergelijkbaar zijn.
- **Werkend systeem bij 40°C, bij 50°C zijn ook andere bronnen nodig.** Bij levering van warmte op 50°C (scenario nr. 5-8) kan het warmtesysteem niet de gehele winter warmte leveren omdat het systeem teveel afkoelt. Technisch is dit misschien wel op te lossen, maar de productiekosten van warmte zullen dan nog behoorlijk stijgen terwijl de efficiëntie van het systeem alleen maar af zal nemen. In de huidige situatie zonder windturbines moet voor 14-27% van de warmtevraag een andere warmtebron worden gevonden, bijvoorbeeld door koppeling met een ander warmtenet. Op 40 °C (scenario nr. 1-4) is maar voor 2-8% van de warmte een andere bron nodig, met die marge lijkt het haalbaar om het systeem wel het hele jaar door te kunnen laten werken. Dit zou bijvoorbeeld kunnen door al eerder over te gaan tot het gebruik van oppervlaktewater voor warmteproductie in plaats van gebruik van het warmteopslagsysteem. Ook zou het warmtesysteem zelf nog verder geoptimaliseerd kunnen worden zodat er misschien helemaal geen externe bron meer nodig is. Dit kan worden uitgezocht in vervolgonderzoek. Voor een goed werkend warmtesysteem kan dus het beste voor warmtelevering op 40 °C worden gekozen, wat ook in lijn ligt met de resultaten van hoofdstuk 3.
- **De huidige kosten van de boosterwarmtepomp zorgen voor een duurder systeem bij 40°C.** De warmteproductieprijs inclusief opslag in de 40°C scenario's is 16,5-20 €/GJ, en bij 50 °C 18,5-22€/GJ. Uit literatuur blijkt dat een normale inkoopprijs voor warmte in een warmtenet tussen de 5 en 9 €/GJ ligt [41], [42], maar bij nieuwe initiatieven zoals warmtepompen kan het inkooptarief tot bijna 21 €/GJ oplopen [42]. In de woning is in het geval van warmtelevering op 40°C een boosterwarmtepomp nodig voor tapwater, die ca. 2.600 euro kost (inclusief 1.100 euro subsidie) versus 1.300 euro voor een elektrisch boiler vat bij warmtelevering op 50 °C [44]. Het lagere rendement van een boiler vat leidt tot een net iets hoger stroomverbruik (zie rij kosten elektriciteit incl. pv in Tabel 4) en de warmteprijs wordt ook hoger vanwege de grotere centrale warmtepomp. Toch weegt dit niet op tegen de hogere investering in de boosterwarmtepomp, zoals te zien is in de rij 'investering tapwatersysteem per huis' in Tabel 4 als de 40°C met de 50 °C scenario's worden vergeleken. In de uiteindelijke kosten per huishouden (zie rij 'Totale kosten per huis' Tabel 4) zijn de kosten per huishouden ruim 100 €/jaar (ca. 11%) lager in de scenario's met een hogere leveringstemperatuur voor warmte. Echter is de warmtelevering door het HTO systeem in dit scenario niet gegarandeerd, zoals in het vorige punt werd besproken. Ondanks de hogere kosten is het dus toch te overwegen om wel van boosterwarmtepompen gebruik te maken. Boosterwarmtepompen zijn nog geen gangbaar product, maar bij grootschalige toepassing zullen de kosten gaan dalen.

Restwarmte uit elektrolyser

- **Restwarmte gebruik leidt tot een beter en goedkoper warmtesysteem.** Als de restwarmte uit de elektrolyser kan worden gebruikt (scenario nr. 2,4,6,8), leidt dit zowel tot een beter functionerend warmtesysteem

waarin minder externe bronnen nodig zijn als een lagere warmteprijs, het scheelt ca 2 €/GJ (10-13% afhankelijk van het scenario) ten opzichte van de andere scenario's. De koppeling van het waterstof en warmte systeem heeft dus zeker meerwaarde. De kostenbesparingen zijn nu volledig toegerekend aan het warmtesysteem, maar kunnen ook gedeeld worden met het waterstofsysteem, waardoor de productieprijs van waterstof licht zou dalen.

Windturbines

- **Lagere waterstofproductieprijs bij inzet windturbines.** Waterstof kan voor ca 5 €/kg geproduceerd worden, met een totale productie van 220 ton per jaar. Dit is duurder dan grijze waterstof, maar voor toepassing in mobiliteit wel acceptabel, gezien de huidige verkoopprijs van 10 €/kg (ex. BTW). Echter, de berekende prijs bevat alleen de elektrolyser en 100 kg opslag, geen verder transport, opslag en tankinfrastructuur. De uiteindelijke verkoopprijs zal dus hoger liggen. De waterstofproductieprijs is 0,3 €/kg lager bij inzet van windturbines (scenario nr. 3,4,7,8), omdat er dan meer goedkopere groene stroom kan worden gebruikt. Het gebruik van groene stroom achter de meter scheelt namelijk energiebelasting en transportkosten. Daarnaast kan er ook voor een vrij gunstige prijs stroom uit het net worden ingekocht, omdat Waternet een grootverbruiker van stroom is zijn de tarieven voor energiebelasting en transportkosten laag. De stroomprijs bepaalt hier voor ongeveer tweederde de waterstofprijs, dus dit is een belangrijke factor in de business case voor waterstof.
- **Het Power-to-X systeem heeft veel potentie bij toevoeging windturbines.** Door toepassing van Power-to-X kan curtailment voor een deel worden voorkomen. In het geval groene stroom alleen vanuit het zonnepark wordt geproduceerd (scenario nr. 1,2,5,6), hoeft circa 0,13-0,15 GWh (van een totaal van 8,8 GWh opwek) niet "weggegooid" te worden. Maar als naast het zonnepark ook drie windmolens worden toegepast (scenario nr. 3,4,7,8) loopt dat op tot 13 GWh aan elektriciteit (van een totaal van 33 GWh) die niet gecurtailed hoeft te worden, uitgaande van de capaciteit van de bestaande netaansluiting. Zonder verzwaring en met Power-to-X is er dan dus nog altijd wel 20 GWh aan stroom die niet gebruikt kan worden als het net niet verzwaard wordt. Waarschijnlijk is een combinatie van (beperkte) netverzwaring en Power-to-X, met bijvoorbeeld een nog grotere elektrolyser uiteindelijk een goede optie. Dit kan nog verder worden uitgezocht als de windturbines er daadwerkelijk komen.

Water

- **Er is voldoende demiwater.** Demiwater kan voor 1,4 €/m³ geproduceerd worden, gebaseerd op productie uit regenwater middels reverse osmose, wat overeenkomt met de gemiddelde prijs voor drinkwater in Nederland (ex. btw) [43]. Met het opvangen van water van het zonnepark zou er ruimschoots voldoende water zijn voor de waterstof die met de elektrolyser geproduceerd zal gaan worden.

Tabel 3 Overzicht resultaten scenario's case Nieuwegein-Rijnhuizen voor het hele Power-to-X systeem, de scenario beschrijving bestaat uit warmte leveringstemperatuur (40 of 50°C), wel (hr1) of geen (hr0) warmteterugwinning uit de elektrolyser, en W geeft het aantal windturbines in dat scenario weer.

Warmteleverings-temperatuur	40°C				50°C			
	0		3		0		3	
Windturbines (W)								
Restwarmte uit elektrolyser (hr)	Nee	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja
Naam in dashboard	40_hr0_W0	40_hr1_W0	40_hr0_W3	40_hr1_W3	50_hr0_W0	50_hr1_W0	50_hr0_W3	50_hr1_W3
Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Resultaten totale systeem								
Totale kosten PtX [M€] ^a	27,8	27,3	28,1	27,3	28,0	27,5	28,3	27,5
Resultaten waterstof								
Productie kosten waterstof [€/kg] ^f	5,0	4,9	4,7	4,7	5,0	5,0	4,7	4,7
Waterstofproductie (ton/jaar)	220	226	250	252	215	220	245	246
Resultaten warmte								
Productie kosten warmte [€/GJ] ^g	16,4	14,4	17,3	14,6	18,7	16,8	20,8	18,9
Opslagkosten warmte [€/GJ] ^h	2,3	2,2	2,7	2,3	1,9	1,8	2,3	1,8
% warmte vraag onvervuld ⁱ	8%	<3%	<3%	<3%	27%	14%	9%	<3%
Resultaten water								
Productie kosten demiwater [€/m ³] ^j	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Resultaten elektriciteit								
Voorkomen Curtailment (GWh) ^k	0,13	0,14	12,9	13,2	0,12	0,13	12,5	12,8

^a Totale kosten PtX = totale investeringen in Power-to-X systeem, voor de warmtepomp, HTO warmteopslag systeem, elektrolyser, waterstofopslag, wateropvang en opslag en elektriciteitssysteem. Geen kosten PV of wind, deze zitten verwerkt in de stroomprijs

^b Productiekosten waterstof = productie waterstof met elektrolyser inclusief 100 kg opslag, exclusief langdurige opslag, transport en tankstation

^c Productiekosten warmte = productie warmte met warmtepomp en oppervlaktewater, zonder opslag en transport in warmtenet

^d Opslagkosten warmte = kosten voor opslag van warmte in HTO systeem

^e % warmtevraag onvervuld = deel van de warmtevraag waarin niet kan worden voorzien met HTO systeem, maar waar een andere bron nodig is. Indien dit <3%, gaat het naar verwachting lukken om het systeem het jaar rond werkend te krijgen.

^f Voorkomen curtailment = deel van de stroom die door zon en/of wind wordt opgewekt en door beperking in de netaansluiting niet kan worden

^g Productiekosten demiwater = kosten voor productie demiwater met opvangsysteem, RO en opslag

terug geleverd aan het net, maar in plaats daarvan door het Power-to-X systeem kan worden omgezet in andere producten.

Tabel 4 Overzicht resultaten scenario's case Nieuwegein-Rijnhuizen per huishouden, de scenario beschrijving bestaat uit warmte leveringstemperatuur (40 of 50°C), wel (hr1) of geen (hr0) warmteterugwinning uit de elektrolyser, en W geeft het aantal windturbines in dat scenario weer.

Warmteleverings-temperatuur	40°C				50°C			
	0		3		0		3	
Windturbines (W)								
Restwarmte uit elektrolyser (hr)	Nee	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja
Naam in dashboard	40_hr0_W0	40_hr1_W0	40_hr0_W3	40_hr1_W3	50_hr0_W0	50_hr1_W0	50_hr0_W3	50_hr1_W3
Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Investerings tapwatersysteem per huis [€/jaar] ^a	270	270	270	270	135	135	135	135
Kosten inkoop warmte+water ^b per huis [€/jaar]	210	200	215	200	215	205	230	215
Kosten elektriciteit incl. pv per huis[€/jaar] ^c	395	395	395	395	410	410	410	415
Totale kosten per huis [€/y] ^d	875	865	880	865	760	750	775	765

^a Investerings in boosterwarmtepomp of elektrische boiler met verwarmingselement, verdisconteerd over de levensduur

^b Kosten voor het inkopen van warmte en (demi)-water per jaar per huishouden.

^c Kosten voor in inkopen van elektriciteit per huishouden, inclusief (verdisconteerde) investering in pv-systeem op de woning.

^d Totale kosten jaar per huis = kosten voor warmtepomp en pv panelen (verdisconteerd over levensduur), en inkoopkosten voor warmte, water en elektriciteit, som van a, b en c (de drie rijen erboven).

5.2.2 Kosten, baten en risico's

In het traject dat gericht is op realisatie van het totale Power-to-X systeem voor de casus in Nieuwegein, is het van belang om naast de technische aspecten ook inzicht te krijgen in de maatschappelijke kosten en baten van het systeem (MKBA) én de risico's van dat traject. Er is een kwalitatieve MKBA gedaan voor warmtelevering en voor transport.

In de MKBA voor warmtelevering is het Power-to-X systeem vergeleken met 'autonome ontwikkeling' waarin vooral individuele systemen zoals luchtwarmtepompen zouden worden toegepast, de resultaten zijn samengevat in Tabel 5. Uit deze MKBA volgt dat bij autonome ontwikkeling er meer keuzevrijheid is voor bewoners en de lokale werkgelegenheid meer wordt bevorderd omdat het onderhoud aan de systemen door particulieren kan worden uitbesteed aan lokale ondernemers. Het Power-to-X systeem daarentegen heeft een positievere invloed op infrastructuur omdat er met de aanleg van een warmtenet minder druk komt te liggen op het elektriciteitsnet. Ook is een warmtenet een stille en emissieloze verwarming, wat een positieve invloed heeft op de leefomgeving.

Tabel 5 Samenvatting resultaten MKBA warmtelevering

	Autonome ontwikkeling	Power-to-X
Infrastructuur	-	+
Keuzevrijheid en kosten	+	0
Lokale werkgelegenheid ¹	++	+
Leefbaarheid woonomgeving	0	+

In de MKBA voor zwaar transport is groene waterstof, lokaal geproduceerd volgens het Power-to-X concept uit zonnestroom, vergeleken met biobrandstoffen (biodiesel en bio-LNG) en groene elektriciteit. In de MKBA zijn veiligheid, bruikbaarheid, maatschappelijke impact en lokale impact kwalitatief beoordeeld. De resultaten zijn samengevat in Tabel 6. Hierbij is gesteld dat bij ieder voertuig/brandstof voldaan dient te worden aan vigerende wet- en regelgeving t.a.v. veiligheidsaspecten, en aangezien geen kwalitatieve risico analyse is opgesteld is verondersteld dat het aspect "veiligheid" daarom niet onderscheidend is. Uit deze MKBA volgt dat de bruikbaarheid hoger is voor waterstof en biobrandstof gedreven voertuigen, i.v.m. een gunstige actieradius en laadsnelheid. Het aantal laadpunten is nu gunstig voor batterij elektrische voertuigen, op termijn zal dit verbeteren voor waterstof. Het aantal laadpunten voor biodiesel is groot, echter de beschikbaarheid van deze brandstof is limiterend. Maatschappelijke aspecten zijn het effect op de elektrische infrastructuur en verschillende emissies (geluid, uitstoot gassen, fijnstof). Waterstof scoort op alle aspecten positief, biobrandstoffen kennen hoge emissies maar zijn gunstig voor de impact op de elektrische infrastructuur, en batterij elektrische auto's hebben een negatieve impact op de elektrische infrastructuur en gunstige emissies. Voor werkgelegenheid is er geen onderscheidende invloed tussen de scenario's. Duurzaamheid van grondstoffen is uitgesloten van deze analyse gezien de complexiteit rondom dit punt. De aspecten werkgelegenheid, duurzaamheid (betrokken op grondstoffenverbruik) en locatie specifieke aspecten zijn hier niet onderscheidend. De locatie van specifiek het project in Nieuwegein is gunstig ten opzichte van verschillende vervoersknooppunten op het gebied van weg, water en rail. Dit levert voordelen op voor de productie van waterstof voor zwaar transport.

¹ Indien de werkgelegenheid op een grotere schaal beschouwd wordt kunnen de scores voor beide varianten elkaar naderen.

Tabel 6 Samenvatting resultaten MKBA transport

	Groene waterstof – Brandstofcel (FCEV) : Power-to-X	Groene elektriciteit – Elektromotor (BEV)	Biologische brandstof – Verbrandingsmotor (ICE)
Bruikbaarheid:			
Actieradius	+	-	+
Laadpunten ²	-	+	+
Laadtijd	+	-	+
Impact op elektrische infrastructuur	+	-	+
Leefomgeving:			
Geluid	+	+	-
Emissies (NOX, fijnstof)	+	+	-

Uit de risicoanalyse blijkt dat de belangrijkste risico's met betrekking tot realisatie van economische aard zijn. Het gaat om de aanleg van een warmtenet dat is aangesloten op een HTO opslagsysteem, een te hoge waterstofprijs veroorzaakt door een hoge stroomprijs en het te duur blijken van de aanleg van een DC-net in de wijk zijn. Voor deze risico's zijn beheersmaatregelen opgesteld, die ook al deels zijn opgepakt binnen het project. Een voorbeeld is dat er door goede contacten met en tussen de gemeente, een warmtebedrijf en stakeholders in Rijnhuizen nu serieus wordt gekeken naar de aanleg van een warmtenet aangesloten op een HTO opslagsysteem.

5.3 Op weg naar realisatie

Een integraal systeem zoals Power-to-X realiseren kan voordelen opleveren voor verschillende partijen, zoals netbeheerders, gemeenten of initiatiefnemers van het plaatsen van (veel) duurzame opwek. In dit project zijn een aantal factoren gesignaleerd die van belang zijn op weg naar realisatie:

1. *Inventariseer de noodzaak van netverzwaring:* Het is belangrijk om op voorhand goed in beeld te krijgen of er een noodzaak is voor het verzwaren van de netaansluiting op het moment dat geproduceerde groene stroom moet kunnen worden terug geleverd aan het net (nulscenario). Het gaat dan om de financiële consequenties, maar ook tijdsduur van realisatie van de netverzwaring speelt een rol.
2. *Curtailment kan een optie zijn naast opslag en conversie:* Het aftoppen van een klein deel van de hernieuwbare energie (curtailment) kan soms economische gunstiger zijn dan het streven naar volledige benutting van de geproduceerde elektriciteit. Dat komt omdat in dat laatste geval de elektrolyzers en/of batterijen aanzienlijk moeten worden overgedimensioneerd.
3. *Een lage stroomprijs leidt tot een hogere slagingskans:* Bij het produceren van waterstof is het (nog) nodig om ook stroom uit het net te importeren om een rendabele business case te krijgen. De waterstofprijs wordt in deze casus met een hoog aantal vollasturen voor ongeveer tweederde bepaald door de stroomprijs, daarom is het van belang een lage stroomprijs te hebben. In de casus Nieuwegein helpt het

² Score van de huidige infra, namelijk opgemerkt dient te worden dat t.a.v. FCEV zal het netwerk voor waterstof verbeteren in toekomst, t.a.v. BEV neemt het aantal laadpunten voor personenauto's en busjes snel toe maar voor zwaar transport zijn deze beperkt, en t.a.v. ICE geldt dat het huidige netwerk van tankstations dekkend is maar dat de beschikbaarheid van biodiesel beperkend is.

daarbij mee dat er een samenwerking kan worden aangegaan met een bedrijf dat veel stroom afneemt, zodat de tarieven voor stroom, energiebelasting en transport laag zijn.

4. *Zorg voor een flexibele organisatie en realisatie:* Het streven is de realisatie van een totaal systeem, maar sommige ontwikkelingen gaan nu eenmaal sneller dan andere en daar moet ruimte voor zijn in de uitvoering. In de casus Nieuwegein gingen de waterstofontwikkelingen sneller dan die op het gebied van warmte, voornamelijk omdat bij de ontwikkeling van het warmtesysteem veel meer partijen betrokken zijn. Op het gebied van waterstof wordt nu dan ook al sneller naar realisatie toegewerkt. Het is daarom belangrijk de partijen binnen het project ruimte te geven om op hun eigen tempo te ontwikkelen, maar tegelijk wel het overzicht over het totaalplaatje te houden. De modellering met het Power-to-X model (zie HS5) heeft hierbij geholpen, omdat hier ook in kaart wordt gebracht hoe de verschillende onderdelen op elkaar inwerken.

6 Conclusies en aanbevelingen

In dit rapport heeft u kunnen lezen over de verschillende onderdelen van het Power-to-X concept en hoe het systeem als geheel zou kunnen werken. Ook zijn er lessen gedeeld met betrekking tot de realisatie van een eerste Power-to-X systeem in Nieuwegein. Hier vatten we de belangrijkste conclusies en aanbevelingen samen, zowel specifiek voor Nieuwegein als met het oog op bredere toepassing van het concept.

6.1 Conclusies – Wat hebben we geleerd over Power-to-X?

1. **Elektriciteit: Een elektriciteitssysteem op DC levert energie en materiaalbesparingen op.**

In het project hebben we naar verschillende mogelijkheden gekeken om DC toe te passen. Het meest voor de hand liggend is een directe DC koppeling tussen het PV park en de elektrolyser plus de warmtepomp al dan niet samen met opslag (accu + waterstof/brandstofcel). Hier zijn potentieel de grootste besparingen te halen en dit deel is het meest innovatief. Echter, ondanks de ontwikkelingen op het gebied van DC, zijn deze nog niet zodanig dat het gehele Power-to-X systeem op DC gerealiseerd kan worden. De ontwikkelingen op het gebied van openbare verlichting zijn momenteel het verst gevorderd. Om delen van het Power-to-X systeem op DC te kunnen realiseren, zoals de elektrolyser of de warmtepomp, zal maatwerk. Hiervoor is overleg met leveranciers nodig want DC apparatuur is nu nog niet commercieel verkrijgbaar voor deze toepassingen.

2. **Warmte: Hoge temperatuur warmteopslag (HTO) in het eerste watervoerend pakket wordt aanbevolen voor de Power-to-X casus in Nieuwegein.**

In het onderzoek is een afweging gemaakt om de warmteopslag in watervoerend pakket (WVP) 1 of 3 te realiseren. Er is geconcludeerd dat opslag van warmte in het eerste watervoerend pakket niet leidt tot opwarming van watervoerend pakket 2&3, terwijl dat bij opslag in WVP3 wel het geval is. Bij opslag in WVP1 hoeft daarnaast ook geen afsluitende laag te worden doorboord, is het systeem goedkoper door minder diep boren en is de terugwin efficiëntie hoger dan bij opslag in WVP3. Het is dus aan te raden om in dit geval en op deze locatie het HTO systeem in WVP 1 te realiseren, bij deze afweging zijn zowel Waternet als de Provincie Utrecht nauw betrokken.

3. **Warmte: Warmtelevering op 40°C wordt aanbevolen in Nieuwegein.**

In het onderzoek is warmtelevering op 40°C en 50°C aan de woonwijk Rijnhuizen (1700 woningen) vergeleken. Uit de verschillende analyses blijkt dat de warmteproductie goedkoper is bij levering op 40°C dan op 50 °C en dat het opslagsysteem efficiënter werkt. Een andere belangrijke bevinding is dat het bij 50°C leveringstemperatuur (in een systeem gebaseerd op zon) niet mogelijk is om het hele jaar door warmte te leveren, maar voor 14-27% van de warmtevraag een andere bron moet worden gevonden. Deze bevindingen leiden ertoe dat wordt aanbevolen om bij levering van warmte met het Power-to-X systeem in Nieuwegein een leveringstemperatuur van 40°C aan te houden. Omdat bij een leveringstemperatuur van 40°C in de woningen een boosterwarmtepomp moet worden geïnstalleerd voor tapwater, leidt dit wel tot hogere kosten dan bij warmtelevering op 50°C, wanneer met elektrische naverwarming kan worden volstaan. De verwachting is wel dat bij grootschalige toepassing de kosten voor de boosterwarmtepomp gaan dalen. Belangrijk om hierbij op te merken is dat de resultaten alleen gelden voor de situatie in Nieuwegein en dat het ook voor Nieuwegein nog goed zou zijn om een integrale vergelijking met andere warmtesystemen te maken, dat is nu nog niet uitgebreid gebeurd.

4. **Waterstof: Er is een groeiende vraag naar zero-emissie vervoer.**

Nederland kent een stormachtige ontwikkeling rond onderling gerelateerde thema's als klimaatbeleid, energietransitie en aardgaswinning. Verduurzaming van onze economie is inmiddels een centraal thema geworden, en dat geldt ook voor het vervoer, zowel van vracht als van personen als van werkvoertuigen. Naast een besparing op CO₂, levert dit ook voordelen op voor de stikstofuitstoot. Zoals bij elke nieuwe beweging reageren bedrijven hier verschillend op, variërend van afwachten, conformeren tot het nemen van een voortrekkersrol. Bedrijven die zich hiermee strategisch kunnen positioneren vormen de meest krachtige basis. Groene waterstof is vooral interessant voor bedrijven of organisaties (1) met een strategische doelstelling rond duurzaamheid, (2) die afnemers bedienen die een duurzame oplossing voorschrijven, (3) een logistiek voordeel behalen (korte laad/vultijd vergeleken met BEV, grotere actieradius) en/of (4) bereid zijn hun leaserijders te faciliteren.

5. **Waterstof: Gebruik van netstroom is additioneel nodig om de waterstofproductie rendabel te maken.**

Productie van waterstof op basis van alleen zonnestroom leidt niet tot een rendabele business case omdat de bedrijfstijd dan te laag is. Het is daarom (nog) nodig om stroom uit het net te gebruiken om aan voldoende draaiuren te komen voor de elektrolyser. De prijs van de stroom is daarbij een doorslaggevende factor, omdat de stroomprijs een groot deel van de prijs van waterstof bepaald en deze invloed alleen maar toeneemt bij dalende CAPEX van elektrolyzers. In Nieuwegein kan 15% van de benodigde waterstof (250 ton/jaar) direct uit zon worden geproduceerd. Als er 3 windturbines aan het systeem worden toegevoegd gaat het om 55% van de waterstof die uit duurzaam opgewekte elektriciteit (uit zon en wind samen) wordt geproduceerd.

6. **Integraal: Curtailment kan deels worden voorkomen door het Power-to-X systeem als naast zon ook wind wordt aangesloten.**

De potentie om curtailment te voorkomen met alleen zonnestroom is beperkt (ca. 1,5% van de opgewekte zonnestroom), omdat de omvang van het huidige zonnepark is afgestemd op de netcapaciteit. Als er in de toekomst echter ook windturbines gerealiseerd worden op het terrein, dan is de potentie voor het voorkomen van netverzwaring vele malen groter. Bij gelijkblijvende netcapaciteit kan het Power-to-X systeem ervoor zorgen dat jaarlijks 13 GWh aan stroom niet verloren gaat als gevolg van curtailment.

7. **Integraal: Het Power-to-X systeem in Nieuwegein heeft kans van slagen.**

Technisch en economisch is de kans dat het eerste Power-to-X systeem in Nieuwegein gerealiseerd gaat worden in de loop van dit project alleen maar gegroeid. De factoren die hierbij hebben meegespeeld zijn de ontwikkelingen rondom klimaat- en energiebeleid in de afgelopen twee jaar, het vroeg betrekken van stakeholders gedurende het proces en toegenomen interesse voor zowel groene waterstof als het verduurzamen van warmte.

6.2 Aanbevelingen op weg naar realisatie

1. Inventariseer bij een nieuw project de noodzaak van netverzwaring

De potentie voor Power-to-X concepten is het grootst op die plekken waar het elektriciteitsnet in de knel komt. Netverzwaring kan duur zijn, maar kan ook veel tijd kosten, die ten koste gaat van het (snel) kunnen realiseren van PV systemen of windparken. Maar ook woonwijken met veel eigen opwek kunnen interessante plekken zijn om het potentieel van een Power-to-X concept te onderzoeken.

2. Betrek stakeholders vroeg in het proces

Bij het onderzoek naar en de realisatie van nieuwe en innovatieve concepten zoals Power-to-X is het van groot belang om de stakeholders (provincie, gemeente, waterschap, netbeheerder, bewoners(groepen), projectontwikkelaars, leveranciers, etc.) vroeg in het proces te informeren en/of te betrekken. Ook, of zelfs juist, als er nog kennis moeten worden ontwikkeld, zoals bij warmteopslag op hoge temperatuur (HTO) en waterstof. Deze partijen kunnen dan ook hun vragen en zorgen inbrengen, die dan in het project kunnen worden meegenomen. De uitkomsten kunnen dan ook in gezamenlijkheid worden besproken. Daarnaast werkt het in contacten met leveranciers vaak het beste als het bedrijf (deels) in Nederland zit. Dit bevordert de bereidheid tot meedenken over aangepaste systeemontwerpen.

3. De slagingskans van een Power-to-X project is groter bij samenwerking met een grootverbruiker van stroom

Bij het produceren van waterstof is het (nog) nodig om ook stroom uit het net te importeren om een rendabele business case te krijgen. De waterstofprijs wordt voor meer dan de helft bepaald door de stroomprijs, daarom is het van belang een lage stroomprijs te hebben. Als een project kan worden gerealiseerd op of bij een bedrijf met een hoog stroomverbruik, zijn de tarieven voor elektriciteit vaak lager, net als de tarieven voor transport en energiebelasting. Dit maakt de slagingskans van het project aanzienlijk groter.

4. Maak in het begin een ontwerp voor systeemintegratie

Bij een project waarin verschillende sectoren met elkaar geïntegreerd worden is het belangrijk om al aan het begin een eerste dimensionering te maken van de verschillende componenten. Daarbij gaat het zowel om de verschillende systeemonderdelen als de grootheden, zodat het totaalconcept overzien wordt door alle betrokkenen. Als regelmatig wordt afgestemd over het grote plaatje, dan kan er ook parallelle engineering plaatsvinden voor de verschillende systeemonderdelen zonder dat deze met elkaar uit de pas gaan lopen.

5. Zorg voor betrokkenheid binnen het project, maar laat verschillende delen ook los van elkaar ontwikkelen

Het streven is de realisatie van een totaal systeem, maar sommige ontwikkelingen gaan nu eenmaal sneller dan anderen en daar moet ruimte voor zijn in de uitvoering. In de casus Nieuwegein gingen de waterstofontwikkelingen sneller dan die op het gebied van warmte. Daar wordt nu dan ook al sneller naar realisatie toegewerkt. Het is dus belangrijk de partijen binnen het project ruimte te geven om op hun eigen tempo te ontwikkelen, maar tegelijk wel het overzicht over het totaalplaatje te houden. De modellering met het Power-to-X model (zie HS5) heeft hierbij geholpen, omdat hier ook in kaart wordt gebracht hoe de verschillende onderdelen op elkaar inwerken.

6. Ga aan de slag

De energietransitie is begonnen, maar het is nodig om te versnellen en op te schalen. De techniek is er wel, maar juist door opschaling en slimme koppeling van technieken en systemen kunnen duurzame energiesystemen ook economisch gerealiseerd gaan worden.

7 Meer weten?

Naast dit overkoepelende rapport zijn voor de deelonderwerpen uitgebreide rapportages opgesteld, beschikbaar op aanvraag bij KWR (penvoerder). Van WP6 (projectmanagement en disseminatie) is geen apart rapport beschikbaar. Het gaat om de volgende deelrapportages:

- Deelrapport WP1 – Prestaties en effecten van ondergrondse warmteopslag (Teun van Dooren, Stijn Beernink, Peer Timmers & Martin Bloemendal, KWR)
- Deelrapport WP2 – Waterstof (Jaco Reijerkerk, Ekinetix, Jos Boere, Allied Waters & Hans Huiting, KWR)
- Deelrapport WP3 – Elektriciteit (Theo Fens, TUD/TBM-KWR & Els van der Roest, KWR)
- Deelrapport WP4 – Technische systeemintegratie (Els van der Roest, KWR)
- Deelrapport WP5 – Niet Technische systeemintegratie + MKBA warmte & MKBA waterstof (Luc Ponsioen, Edzard Gelderman van Aveco de Bondt)
- Deelrapport WP7 – Doorvertaling naar de drinkwaterbedrijven (Frank Oesterholt & Els van der Roest, KWR)

Daarnaast heeft project heeft verschillende publicaties en presentaties en andere publieke uitingen opgeleverd, hier een (niet uitputtend) overzicht:

- Presentaties op TVVL Klimaattechniek Congres over Power-to-X door Ad van Wijk en Els van der Roest (20-06-2018)
- Presentatie 'Power-to-X' door Els van de Roest op Merosch Open Source middag over 'Leerpunten met en perspectieven van LT warmtenetten' (4 juli 2018) - <https://www.merosch.nl/download/CAwdEAwUUKVBWA==&inline=0>
- Sessie over Power-to-X op de Sustainable Urban Energy Systems Conference in Delft door Theo Fens, Niels Hartog en Els van der Roest (8 november 2018) - <https://www.tudelft.nl/energy/agenda/sustainable-urban-energy-systems-conference/>
- Workshop op KNW najaarscongres Water in de Energietransitie - *Waterstof in de Watersector* door Els van der Roest, Frank Oesterholt en Bastiaan du Pré (Infram) & Keynote Ad van Wijk – (30 november 2018) <https://www.h2owaternetwerk.nl/images/KNW/1811-NC2018-Waterstof.pdf>
- Presentatie bij TVVL bijeenkomst *Gelijkspanning en praktijkervaring met het SPX* project door Theo Fens [45] (september 2018)
- Presentatie *Power-to-X* op de Wice Roadshow over energie in Hoogezand bij Waterbedrijf Groningen (14 december 2018) - <https://www.kwrwater.nl/actueel/agenda/wice-roadshow-14-december-energie-wind-zon-en-water/>
- Artikel in De Telegraaf - *Energieneutrale woonwijk in Nieuwegein* (11 december 2018)
- Publicatie in TVVL Magazine over het SPX project - *SPX-project onderzoekt integratie van duurzame nutsfuncties* [46] (maart 2019)
- Presentaties tijdens benoeming Ad van Wijk tot Honorary Fellow KWR en het seminar 'Waterstof, Warmte en Water: sleutels tot het post-fossiele energietijdperk' door Jos Boere en Ad van Wijk. (11 maart 2019) - <https://www.h2owaternetwerk.nl/h2o-actueel/ontwikkelingen-bij-waterstof-gaan-hard-maar-nog-veel-uitdagingen>
- Flyer *Warmtenet Power-to-X en ontwikkelingen in Rijnhuizen*, door de Club Rijnhuizen in samenwerking met de gemeente Nieuwegein en Luc Ponsioen (Aveco de Bondt) (maart 2019) - <https://www.clubrijnhuizen.nl/wp-content/uploads/2019/04/Warmtenet-Power-to-X-en-ontwikkelingen-in-Rijnhuizen-120319r.pdf>
- Presentatie op Computing and Control for the Water Industry - *Predictive control to manage an Energy and Water System* door Dirk Vries en Oguzhan Kaya (2 september 2019)

- Presentatie over het project op de Smart Energy Systems Conference in Kopenhagen door Els van der Roest [47] (11 september 2019)
- Keynote speech op SIKB congres door Ad van Wijk inclusief interview (26 september 2019) - <https://www.sikb.nl/doc/congres2019/SIKB%20MAGAZINE%20def.pdf>
- Artikel op de website van de Club Rhijnhuizen (november 2019) - <https://www.clubrhijnhuizen.nl/energie/wijkwarmtenet/>
- Presentatie in Rusland door Theo Fens op de Russian Energy Week International Forum 2019, Power to X, integrate renewable electricity into the current network.
- Paper over het Power-to-X concept – *Introducing Power-to-H3: Combining renewable electricity with heat, water and hydrogen production and storage in a neighbourhood*: (januari 2020) [40]

8 Literatuur

- [1] “Klimaatwet,” 2019. [Online]. Available: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0042394/2019-09-01>. [Accessed: 19-Nov-2019]
- [2] Klimaatberaad, “Klimaatakkoord.” Den Haag, 2019 [Online]. Available: <https://www.klimaatakkoord.nl/documenten/publicaties/2019/06/28/klimaatakkoord>
- [3] Secretariaat Klimaatakkoord, “Innoveren met een missie: Integrale kennis- en innovatieagenda voor klimaat en energie,” p. 143, 2019 [Online]. Available: <https://www.klimaatakkoord.nl/themas/kennis--en-innovatieagenda/documenten/publicaties/2019/03/12/innoveren-met-een-missie>
- [4] CBS, “Aandeel hernieuwbare energie naar 7,4 procent,” 25-05-2019, 2019. [Online]. Available: <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2019/22/aandeel-hernieuwbare-energie-naar-7-4-procent>. [Accessed: 19-Nov-2019]
- [5] CBS, “Aandeel hernieuwbare energie naar 6,6 procent,” 2018. [Online]. Available: <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2018/22/aandeel-hernieuwbare-energie-naar-6-6-procent>. [Accessed: 22-Jan-2019]
- [6] A. van Wijk, E. van der Roest, and J. Boere, *Solar power to the people (NL)*, no. November. Nieuwegein: Allied Waters, 2017 [Online]. Available: <https://www.alliedwaters.com/news/solar-power-to-the-people/>
- [7] EBN, “Energie in Nederland 2019,” p. 2019, 2019 [Online]. Available: https://www.ebn.nl/wp-content/uploads/2019/03/EBN_Infographic-2019_14MRT19.pdf
- [8] D. Duijnmayr, “Groot deel Noord-Nederland is no-go-area voor wind- en zonneparken,” *Energieia*, 2019 [Online]. Available: <https://energieia.nl/energieia-artikel/40084649/groot-deel-noord-nederland-is-no-go-area-voor-wind-en-zonneparken>. [Accessed: 21-Oct-2019]
- [9] Energy Storage NL, “Nationaal Actieplan Energieopslag en Conversie 2019.” Zoetermeer, 2019 [Online]. Available: <https://www.fme.nl/en/node/9405>
- [10] Netbeheer Nederland, “Basisinformatie over energie-infrastructuur.” 2019 [Online]. Available: <https://www.regionale-energiestrategie.nl/Nieuws/1305967.aspx>
- [11] I. Thijssen, “Toespraak Ingrid Thijssen.” Alliander, pp. 1–8, 2019 [Online]. Available: [https://www.alliander.com/sites/default/files/Toespraak Ingrid Thijssen HAN 29 aug 2019.pdf](https://www.alliander.com/sites/default/files/Toespraak%20Ingrid%20Thijssen%20HAN%2029%20aug%202019.pdf)
- [12] TVVL and OTIB, “ET22: Gelijkspanning verbindt - Versneld naar een duurzame toekomst op DC,” Woerden, 2018 [Online]. Available: [https://www.tvvl.nl/l/library/download/14348/et+22+gelijkspanning+verbindt.pdf?format=save_to_disk&xt=.pdf](https://www.tvvl.nl/l/library/download/14348/et+22+gelijkspanning+verbindt.pdf?format=save_to_disk&ext=.pdf)
- [13] Berenschot and TKI Urban Energy, “Roadmap gelijkspanning,” 2018 [Online]. Available: [https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/Urban energy/publicaties/TKI Urban Energy - DC Roadmap.pdf](https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/Urban%20energy/publicaties/TKI%20Urban%20Energy%20-%20DC%20Roadmap.pdf)
- [14] R. Mooi, “Hogeschool werkt aan ombouwsets voor DC-woning,” *Installatiejournaal*, 2019. [Online]. Available: <https://www.installatiejournaal.nl/energie/artikel/2019/10/hogeschool-werkt-aan-ombouwsets-voor-dc-woning-10110119>. [Accessed: 21-Nov-2019]
- [15] B. Arts, “Striip-S Blok 61 : Smart DC Lofts Eindrapportage - Publiek,” 2017 [Online]. Available: <https://projecten.topsectorenergie.nl/storage/app/uploads/public/5c8/4fb/809/5c84fb80918ba233624120.pdf>

- [16] T. Fens, "Rapportage Systeemontwerp Power to X WP3 Elektriciteit," 2019.
- [17] TDK-Lambda, "DC-DC omzeters," 2019. [Online]. Available: <https://www.emea.lambda.tdk.com/nl/products/product-details.aspx?scid=1410>. [Accessed: 05-Dec-2019]
- [18] K. Mikhaylov, J. Tervonen, and D. Fadeev, "Development of Energy Efficiency Aware Applications Using Commercial Low Power Embedded Systems," in *Embedded Systems – Theory and Design Methodology*, no. March, K. Tanaka, Ed. IntechOpen, 2012 [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/embedded-systems-theory-and-design-methodology/development-of-energy-efficiency-aware-applications-using-commercial-low-power-embedded-systems>
- [19] M. Fedkin and J. A. Dutton, "6.5 Efficiency of Inverters," *Penn State University*. [Online]. Available: <https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/738>. [Accessed: 05-Dec-2019]
- [20] SolarEdge, "1-fase omvormers met HD-Wave technologie," 2019. [Online]. Available: <https://www.solaredge.com/nl/products/pv-inverter/single-phase#/>. [Accessed: 05-Dec-2019]
- [21] R. Mooi, "Straatverlichting op gelijkspanning succesvol," *Installatiejournaal*, 2018. [Online]. Available: <https://www.installatiejournaal.nl/energie/artikel/2018/07/straatverlichting-op-gelijkspanning-succesvol-1018527>. [Accessed: 05-Dec-2019]
- [22] The Green Village, "DC office research and testing," 2018. [Online]. Available: <https://www.thegreenvillage.org/news/dc-office-research-and-testing>. [Accessed: 05-Dec-2019]
- [23] Wind Energy Magazine, "TenneT to deploy 2 GW DC connections at IJmuiden Ver," 2019. [Online]. Available: <https://www.windenergie-magazine.nl/tennet-to-deploy-2-gw-dc-connections-at-ijmuiden-ver/>. [Accessed: 05-Dec-2019]
- [24] BGSV and Gemeente Nieuwegein, "Gebiedsvisie Mooi Rijnhuizen." Rotterdam, 2014.
- [25] Gemeente Nieuwegein, "Woningbouwprogramma 2030 Gemeente Nieuwegein." 2017 [Online]. Available: https://www.nieuwegein.nl/fileadmin/bestanden/Inwoner/Wonen_in_Nieuwegein/Woningbouwprogramma_2030_definitief.pdf
- [26] Gemeente Nieuwegein, "Nieuwegein Raadsbesluit Rijnhuizen," pp. 2–4, 2019 [Online]. Available: <https://ris2.ibabs.eu/Agenda/Details/Nieuwegein/c5409abe-db34-4995-9f9e-bad0acc5fd6d>
- [27] Milieu Centraal, "Gemiddeld energieverbruik," 2019. [Online]. Available: <https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/snel-besparen/grip-op-je-energierekening/gemiddeld-energieverbruik/>. [Accessed: 05-Feb-2019]
- [28] National Academies of Sciences Engineering and Medicine, *Management of Legionella in Water Systems*. Washington, DC: The National Academies Press, 2019 [Online]. Available: <https://www.nap.edu/catalog/25474/management-of-legionella-in-water-systems>
- [29] CE Delft and Deltares, "Nationaal potentieel van aquathermie," pp. 1–29, 2018 [Online]. Available: <https://www.ce.nl/publicaties/download/2605>
- [30] Provincie Utrecht, *Provinciale Milieuverordening Utrecht 2013*. 2013 [Online]. Available: https://decentrale.regelgeving.overheid.nl/cvdr/xhtmloutput/Historie/Utrecht/CVDR332293/CVDR332293_5.html
- [31] Ministerie van Infrastructuur en Milieu, *Drinkwaterbesluit*. 2018 [Online]. Available: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0030111/2018-07-01>
- [32] A. J. M. van Wijk and F. Wouters, "Shaping an Inclusive Energy Transition," in *Shaping an Inclusive Energy Transition*, no. 2, M. P. C. Weijnen and Z. Lukszo, Eds. Springer, 2020 [Online]. Available:

- <http://profadvanwijk.com/wp-content/uploads/2019/09/Hydrogen-the-bridge-between-Africa-and-Europe-5-9-2019.pdf>
- [33] J. De Vrieze *et al.*, “The hydrogen gas bio-based economy and the production of renewable building block chemicals, food and energy,” *N. Biotechnol.*, vol. 55, no. September 2019, pp. 12–18, 2020 [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.09.004>
- [34] IEA, “The Future of Hydrogen,” no. June, 2019 [Online]. Available: <https://www.iea.org/publications/reports/thefutureofhydrogen/>
- [35] Gemeente Nieuwegein, “Routekaart Energieneutraal Nieuwegein 2040,” 2017 [Online]. Available: <https://www.nieuwegein.nl/inwoner/energieneutraal-nieuwegein/routekaart-energieneutraal-nieuwegein-2040/>
- [36] CBS, “Emissies naar lucht op Nederlands grondgebied; totalen,” 2017. [Online]. Available: <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/37221/table?dl=110EB>. [Accessed: 06-Dec-2019]
- [37] J. Holstein, R. van Gerwen, J. Douma, Y. van Delf, and M. Sari, “Technologiebeoordeling van groene waterstofproductie,” Arnhem, 2018 [Online]. Available: https://www.enpuls.nl/media/2345/eindrapport-module-1-_technologiebeoordeling-groene-waterstof-_enpuls.pdf
- [38] KWR, “KWR installeert waterstofvulstation op eigen terrein,” 2019. [Online]. Available: <https://www.kwrwater.nl/actueel/kwr-installeert-waterstofvulstation-op-eigen-terrein/>. [Accessed: 16-Aug-2019]
- [39] E. van der Roest, L. Snip, M. Bloemendal, and A. van Wijk, “Power-to-X,” Nieuwegein, KWR 2018.032, 2018 [Online]. Available: https://www.kwrwater.nl/wp-content/uploads/2017/05/Power_to_X.pdf
- [40] E. van der Roest, L. Snip, T. Fens, and A. van Wijk, “Introducing Power-to-H3: Combining renewable electricity with heat, water and hydrogen production and storage in a neighbourhood,” *Appl. Energy*, vol. 257, Jan. 2020.
- [41] Haags Warmte Initiatief, “Energie voor de buurt,” 2015 [Online]. Available: [https://denhaag.raadsinformatie.nl/document/3323131/1/RIS285573 Bijlage Energie voor de buurt%2C Haags Warmte Initiatief](https://denhaag.raadsinformatie.nl/document/3323131/1/RIS285573%20Bijlage%20Energie%20voor%20de%20buurt%20Haags%20Warmte%20Initiatief)
- [42] N. M. (NMA), “Onderzoek inkoopkosten warmte,” Den Haag, 2011 [Online]. Available: [https://www.acm.nl/sites/default/files/old_download/documenten/nma/Onderzoek inkoopkosten warmte.pdf](https://www.acm.nl/sites/default/files/old_download/documenten/nma/Onderzoek%20inkoopkosten%20warmte.pdf)
- [43] P. J. J. G. Geudens, “Tarievenoverzicht drinkwater per 1 januari 2019.” Vewin, Den Haag, 2019 [Online]. Available: <http://www.vewin.nl/SiteCollectionDocuments/Publicaties/Cijfers/Tarievenoverzicht-drinkwater-2019.pdf>
- [44] E. van Vliet, J. de Keijzer, E. Slingerland, J. van Tilburg, W. Hofsteenge, and V. Haaksma, “Collectieve warmte naar lage temperatuur - Een verkenning van mogelijkheden,” 2016 [Online]. Available: <https://www.ecofys.com/files/files/collectieve-warmte-naar-lage-temperatuur.pdf>
- [45] T. Fens, “Gelijkspanning en praktijkervaring met het SPX project.” TVVL, 2018 [Online]. Available: https://www.tvvl.nl/l/library/download/urn:uuid:4847b643-3a98-4601-b41b-a4a307248850/presentatie+theo+fens++tvvl+et+symposium+27+sept.+2018+gelijkspanning+praktijkervaring+dc+office+project+spx+proct+tud.pdf?format=save_to_disk&ext=.pdf
- [46] T. Fens, E. van de Roest, A. van Wijk, and N. Hartog, “SPX-project onderzoekt integratie van duurzame nutsfuncties,” *TVVL Mag.*, no. 02, pp. 19–23, 2019 [Online]. Available: <https://www.tvvl.nl/l/library/download/15904/spx+project+onderzoekt+integratie+van+duurzame+nutsfuncties+-+tm02+2019.pdf>

- [47] E. van der Roest, L. Snip, T. Fens, and A. van Wijk, "Power to X - A novel, reliable, affordable and clean energy and water system for a neighbourhood," in *Smart Energy Systems Conference*, 2019 [Online]. Available: https://smartenergysystems.eu/wp-content/uploads/2019/09/16-3_ElsvdRoestSESAAU2019.pdf