

KWR 2018.032 | Mei 2018

Power-to-X

Werken aan de energietransitie in Nieuwegein

Power-to-X

Werken aan de energietransitie in Nieuwegein

KWR 2018.032 | Mei 2018

Opdrachtnummer

40173-001

Projectmanager

Luc Palmen

Projectpartners

PitPoint, Waternet, Aveco de Bondt (dochter van VolkerWessels), Allied Waters

Kwaliteitsborgers

Frank Oesterholt, Emile Cornelissen (rapport)
Erwin Vonk (model)

Auteurs

Els van der Roest
Laura Snip
Martin Bloemendal
Ad van Wijk

Verzonden aan

Projectpartners



TOPSECTOR
WATER &
MARITIEM



PITPOINT
CLEAN FUELS

waternet



Aveco de Bondt
ingenieursbedrijf



ALLIED WATERS®

Dit project is mede gefinancierd uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken.

Jaar van publicatie
2018

Meer informatie

Msc. Els van der Roest
T +31622937044
E els.van.der.roest@kwrwater.nl

Postbus 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 Watercycle
Research
Institute

KWR 2018.032 | Mei 2018 © KWR

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden veeleevoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, 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

In de overgang van een fossiel naar een volledig duurzaam energiesysteem zullen opslag en transport van duurzame energie op mondiale, regionale en lokale schaal een steeds belangrijkere rol gaan spelen. In een energiesysteem met zon en wind als basis, is opslag noodzakelijk om een constante energielevering te kunnen waarborgen, zodat energie op de juiste tijd en plaats beschikbaar is. Duurzame elektriciteit, opgewekt door zonnepanelen en windturbines, zal daarom deels in andere vormen moeten worden omgezet en opgeslagen. Hiervoor zijn verschillende technologieën denkbaar, variërend van vliegwielen en batterijen tot hydropower, waterstof en warmte. Daarbij is het van belang om zowel naar opslagcapaciteit als opslagduur te kijken. In een land als Nederland, waar in de zomer meer zonne-energie wordt opgewekt terwijl er in de winter een hogere energievraag is, zal seizoensopslag van groot belang gaan zijn. Technologieën met een lange opslagduur en grote opslagcapaciteit zijn daarbij essentieel.

Om die reden is in dit Power-to-X-project onderzocht op welke wijze vorm kan worden gegeven aan een duurzaam energiesysteem in een wijk, dorp of stad waarbij – vanuit een duurzame energiebron – zoveel mogelijk door het jaar heen in de vraag naar elektriciteit, warmte en mobiliteit kan worden voorzien. Die duurzame energiebron is bijvoorbeeld een zonnepark of windpark. Het is de bedoeling dat de stroom van dit zonne- of windpark deels direct wordt gebruikt, maar ook voor een groot deel wordt omgezet in warmte en in waterstof. De duurzame elektriciteit (Power) wordt daarbij dus in andere producten (X = warmte en waterstof) omgezet, ten behoeve van een meer constante energielevering. Een ander voordeel van het Power-to-X-concept is dat hiermee netverzwaring van het elektriciteitsnet wordt voorkomen, wat anders nodig zal zijn om een overschot aan duurzame stroom te kunnen transporteren.

Het Power-to-X-concept in Nieuwegein

In dit project ligt voor de realisatie van het Power-to-X-concept de focus op Nieuwegein, waar de bouw van in totaal 12 MWp aan zonnepanelen op het zogenaamde WRK-terrein (Waternet/PWN) gepland staat. Voor een klein deel kan de geproduceerde elektriciteit worden benut voor de pompen die het water van het Lekkanaal naar de duinen pompen. Maar voor het overgrote deel van de elektriciteitsproductie moet een andere toepassing worden gevonden. Daarnaast is er nieuwbouw- en renovatie in de wijk Rijnhuizen gepland, op slechts 2 kilometer afstand van het zonnepark. De koppeling tussen deze wijk en het zonnepark was onderwerp van onderzoek. In de wijk worden in de komende jaren 1200-1500 woningen ontwikkeld. Omdat nog niet duidelijk is of al deze woningen op het Power-to-X-concept kunnen worden aangesloten, is in dit onderzoek gerekend aan de warmtevraag van 900 woningen. Daarnaast wil PitPoint een waterstoftankstation gaan ontwikkelen in de regio Utrecht, met een uiteindelijke capaciteit van ca. 200 kilogram waterstof per dag, wat overeen zou komen met ca. 600 personenvoertuigen. Er wordt onderzocht of het Power-to-X concept dit tankstation zou kunnen bevoorraden. Een andere onderzoeksvraag is of uit regenwater, opgevangen van de zonnepanelen het zonnepark en de daken van de woningen, demiwater kan worden gemaakt ten behoeve van de waterstofproductie en toepassingen in de woonwijk (zoals in de wasmachine en vaatwasser). Het onderzoek focust zich op de locatie Nieuwegein, maar zou op andere locaties ook kunnen worden toegepast, waarbij kan worden afgestemd op de lokale situatie.

Het Power-to-X-concept bestaat in feite uit vier onderdelen die geïntegreerd worden tot één systeem:

Warmte - Een deel van de duurzame elektriciteit wordt in warmte omgezet via een warmtepomp, uitgaande van oppervlaktewater (of lucht) als warmtebron. Door dat juist in de zomerperiode te doen als veel duurzame elektriciteit beschikbaar is, kan de warmtepomp zo efficiënt mogelijk werken. De warmte wordt geproduceerd op een temperatuur van 40-65°C en wordt ondergronds opgeslagen in een aquifer. In de winter wordt de warmte weer naar boven gehaald om daarmee woningen of gebouwen te verwarmen.

Waterstof - Een ander deel van de duurzame elektriciteit wordt geconverteerd naar (groene) waterstof door elektrolyse van demiwater. Waterstof kent vele toepassingen, maar in dit geval ligt de focus op mobiliteit. De waterstof wordt hiervoor opgeslagen in tube trailers en kan naar een tankstation worden gebracht, waarna auto's, bussen en andere voertuigen er op kunnen rijden.

Demiwater - Voor de productie van waterstof is ultrapuur water nodig dat wordt geproduceerd uit opgevangen regenwater van de zonnepanelen. Het opgevangen regenwater wordt tot gebruik in de ondergrond opgeslagen in een aquifer. Na de productie van waterstof is er nog een overschot aan demiwater, wat ook in woningen zou kunnen worden toegepast voor bijvoorbeeld de wasmachine en afwasmachine.

Elektriciteit - Als er na omzetting in warmte en waterstof nog elektriciteit over is, kan dit aan het openbare elektriciteitsnet worden terug geleverd. Doordat een groot deel van de opgewekte capaciteit in andere producten wordt omgezet, kan de aansluitcapaciteit op het elektriciteitsnet worden verminderd en worden op die manier kosten bespaard.

Het model en de scenario's

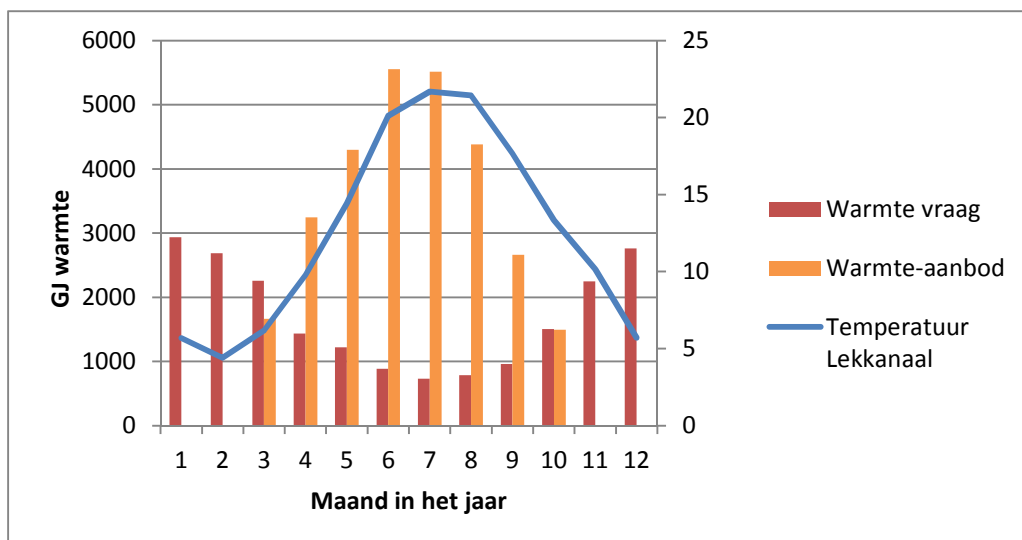
Ten behoeve van het Power-to-X-concept is een generiek dynamisch simulatiemodel ontwikkeld op uurbasis, waarin het aanbod van zon- en eventueel wind via conversie en opslag zijn gekoppeld aan de verschillende vraagpatronen voor warmte, waterstof en demiwater. Ook bestaat de mogelijkheid om stroom aan het elektriciteitsnet te leveren, of juist in te kopen. De hiërarchie voor de verdeling van de duurzame elektriciteit kan binnen het model worden gekozen en kan liggen bij de productie van warmte, of juist bij de productie van waterstof. Met het model kan zowel een energiebalans worden bepaald, als een economische analyse worden uitgevoerd.

Met dit model zijn verschillende scenario's doorgerekend. Het eerste scenario '*Wijk, zon, warmte prioriteit*' bevat gegevens over de casus in Nieuwegein op basis van 8,7 MWp aan zon, waarbij warmtelevering aan woningen prioriteit heeft. In het scenario '*Wijk, zon, waterstof prioriteit*' ligt de focus juist bij het produceren van zoveel mogelijk waterstof, waarbij ook stroom uit het net kan worden ingekocht. In het scenario '*Wijk, zon én wind*' zijn vijf windturbines aan de berekeningen toegevoegd, zodat de productie van waterstof met een factor zeven kan worden vergroot. Ten slotte is de woonwijk opgeschaald tot een *Stadsdeel* waarbij voornamelijk de invloed van schaalgrootte op de economische analyse is onderzocht.

Power-to-X voor een woonwijk

In alle scenario's kan op jaarbasis aan de vraag naar warmte en waterstof worden voldaan, met de opwekking van ca. 7400 MWh aan zonne-energie uit het zonnepark. Regenwater opvang op de zonnepanelen en op de daken van woningen is ruim voldoende voor de beoogde waterstofproductie en voor het voorzien van de woningen met een tweede waterkwaliteit via een demiwaternet. Er is zelfs regenwater over om in de zomer te gebruiken voor besproeiing van gewassen of gras.

In de zomermaanden kan met een warmtepomp van 2,5 MW, die gebruik maakt van het water van het Lekkanaal als warmtebron en elektriciteit van het zonnepark, voldoende warmte worden geproduceerd en opgeslagen op 65 °C in een aquifer, om in de winter aan de warmtevraag van de woonwijk te kunnen voldoen. De warmtevraag van de 900 woningen per jaar is 20,4 TJ. Om aan deze warmtevraag te voldoen is er 28,8 TJ aan warmte in het aquifer opgeslagen, hetgeen betekent dat tijdens opslag en transport 30% warmteverlies optreedt. Alleen zonne-energie is hiervoor dus voldoende, maar het is ook een optie om een deel van de elektriciteit uit het elektriciteitsnet te onttrekken om het energieniveau van de aquifer op peil te houden, zoals in het scenario 'Wijk, zon, waterstof prioriteit'. Figuur 1 laat duidelijk zien dat de opslag van warmte de mismatch tussen vraag en aanbod van zonne-energie wegneemt. Ook wordt de warmte efficiënter geproduceerd in de zomer dan in de winter, omdat de temperatuur van het Lekkanaal dan beduidend hoger ligt.



FIGUUR 1 WARMTEVRAAG EN WARMTEAANBOD (LINKER Y-AS) IN 'WIJK, ZON, WARMTE PRIORITEIT' SCENARIO, INCLUSIEF DE TEMPERATUUR VAN HET LEKKANAAL (BRON VOOR DE WARMTEPOMP), OP DE RECHTER Y-AS.

In elk scenario wordt op jaarbasis meer dan voldoende waterstof geproduceerd (ca. 85 ton) om aan de vraag van een tankstation van 200 kg/dag te voldoen. Er is zelfs sprake van een overschot aan waterstof (van ca. 15 ton). In het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit' bestaat echter wel een tekort aan waterstof in de winter, wat aangevuld kan worden door of stroom uit het net in te kopen, of waterstof in te kopen van derden.

In het onderzoek is de CO₂-emissie reductie bepaald door de functie van de producten uit Power-to-X te vergelijken met de CO₂-emissie van de op dit moment meest gebruikelijke invulling van die functie. Duurzame warmte is hiervoor vergeleken met warmte uit aardgas

via een cv-ketel, rijden op waterstof is vergeleken met het rijden op benzine en voor stroom is een gemiddelde waarde van CO₂ emissie van stroom in het Nederlandse elektriciteitsnet gebruikt. Hieruit blijkt dat bij het realiseren van een Power-to-X-systeem in een woonwijk 5-10% meer CO₂ kan worden bespaard dan wanneer de groene stroom uit de zonnepanelen alleen in de vorm van elektriciteit zou zijn gebruikt. Wanneer veel waterstof wordt geproduceerd (*scenario 'Wijk, zon én wind'*), neemt dit verschil af, en wordt er minder CO₂ bespaard in vergelijking met direct gebruik van de groene stroom. Voor warmte is de CO₂ besparing dus relatief groter dan voor waterstof, maar daarbij zijn andere vormen van uitstoot (bijv. NO_x en fijnstof) niet meegenomen.

De investeringen voor het Power-to-X-project op de schaal van 900 woningen en een tankstation van 200kg/dag zijn ca. 13 miljoen euro (zie Tabel 1). In deze kosten zijn de investeringen voor het zonnepark zelf niet meegenomen, omdat de investering hiervoor onafhankelijk van het project wordt gefinancierd. In plaats daarvan is gerekend met een inkoopprijs voor elektriciteit, die is meegenomen in de jaarlijkse kosten. De investeringen voor een waterstoftankstation zijn wel meegenomen. De jaarlijkse inkomsten uit de verkoop van warmte, waterstof en demiwater liggen rond de 1,2 miljoen euro, en de kosten voor onderhoud, inkoop van stroom en transport van waterstof zijn ca. 0,3 miljoen euro per jaar. Als prioriteit wordt gegeven aan waterstof en stroom uit het elektriciteitsnet wordt ingekocht, verlaagt dit de terugverdientijd van 15,5 naar 14 jaar. Als ook vijf windturbines aan het project worden toegevoegd (investering opnieuw niet meegenomen, maar verrekend in de stroomprijs) ten behoeve van een sterk toenemende waterstofproductie, dan zijn de investeringskosten ca. 27 miljoen euro en halveert de terugverdientijd van het project. De onzekerheidsmarges in deze eerste economische analyses zijn 30%, en zullen in het vervolgproject nauwkeuriger worden gemaakt.

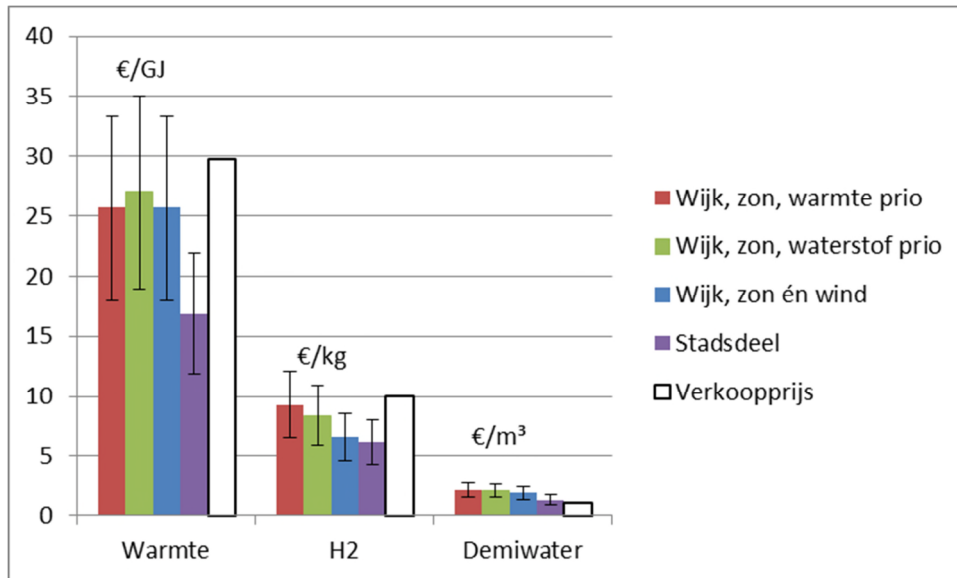
Bij het toepassen van het Power-to-X-concept op een stadsdeel zorgt de toegenomen schaalgrootte voor aanzienlijk lagere productieprijs (zie Tabel 1 & Figuur 2). Met 8 windturbines van 3,2 MW en 60MWp aan zon kan de volledige energievoorziening voor verlichting, apparaten, mobiliteit en warmte worden vervuld voor 10.000 huishoudens. Daarnaast kan voor 90% van de huishoudens demiwater voor vaatwasser, toilet en wasmachine worden geleverd.

TABEL 1 OVERZICHT ECONOMISCHE ANALYSE POWER-TO-X SCENARIO'S

	Investeringen	Inkomsten	Onderhoud en transport	Simpele terugverdientijd
Wijk, zon, warmte prioriteit	13,0 M€	1.150 k€/j	275 k€/j	15,5 j
Wijk, zon, waterstof prioriteit	13,0 M€	1.230 k€/j	275 k€/j	14,0 j
Wijk, zon én wind	27,3 M€	5.020 k€/j	1.020 k€/j	7,0 j
Stadsdeel	83,5 M€	11.600 k€/j	1.700 k€/j	7,5 j

De berekende productieprijs voor waterstof en warmte zoals weergegeven in Figuur 2 tonen aan dat er een marge is ten opzichte van de verkoopprijs voor deze producten. De productieprijs van warmte ligt in de wijk-scenario's rond de 26-27 €/GJ, terwijl de verkoopprijs voor warmte (inclusief vastrecht) bijna 30€/GJ is. Voor waterstof varieert de prijs sterker, door een hogere mate van inzet van de elektrolyser. De prijs voor waterstof inclusief productie, transport en tank infrastructuur is 9,4€/kg voor het scenario '*Wijk, zon, warmte prioriteit*', 8,7 €/kg voor het scenario '*Wijk, zon, waterstof prioriteit*'. Bij het

scenario 'Wijk, zon én wind' daalt de waterstofproductieprijs tot 6,0 €/kg. De huidige verkoopprijs van waterstof ligt op 10€/kg. Voor demiwater ligt de productieprijs altijd hoger (2,1 – 1,9 €/m³) dan de verkoopprijs van 1,0€/m³. Het effect hiervan op de totale business case is echter beperkt.



FIGUUR 2 PRODUCTIEPRIJZEN EN VERKOOPPRIJS VOOR DE POWER-TO-X SCENARIO'S

Een project als Power-to-X heeft een aantal voordelen die niet direct in de business case te verwerken zijn. Het gaat dan om vermeden kosten, zoals de besparing op de netaansluiting van het zonnepark en/of de woonwijk, de vermeden CO₂-emissies, verbetering van de luchtkwaliteit door elektrisch rijden en hogere mate van veiligheid in de woning omdat er geen gevaar meer is op bijvoorbeeld koolstofmonoxide vergiftiging. Als twee van deze posten (netaansluiting en CO₂- emissie besparing) wel in de vorm van lagere investeringen of jaarlijkse kosten in de business case zouden worden meegenomen, leidt dit tot een besparing van 30% in de productieprijs van warmte, en ruim 20% in de productieprijs van waterstof (zie Tabel 2). Deze analyse toont het belang aan van het uitvoeren van een Maatschappelijke Kosten Baten Analyse, die in het vervolgproject zal worden uitgevoerd.

TABEL 2 TOTALE VERMEDEN KOSTEN BEREKENING VOOR WARMTE EN WATERSTOF

	Productieprijs	Productieprijs	Productieprijs	Besparing (%) op productieprijs
	Zonder vermeden kosten (Wijk, zon, warmte prioriteit)	Met vermeden netkosten	Met vermeden netkosten en CO ₂ -emissie kostenbesparing	Totaal vermeden kosten
Warmte	25,7 €/GJ	21,6€/GJ	18,0€/GJ	30%
Waterstof	9,4 €/kg	8,7€/kg	7,3€/kg	22%

Vervolg en aanbevelingen

Als onderdeel van Power-to-X-project is een start gemaakt met de marktontwikkeling voor waterstof en warmte, en voor beide producten zijn mogelijke afnemers gevonden. In het geplande vervolgproject zal nog meer focus komen te liggen op deze marktontwikkeling. Daarbij is het van belang om op te merken dat voor de realisatie van het Power-to-X-concept enige schaalgrootte vereist is. Voor de warmtevoorziening zijn ten minste 900 woningen noodzakelijk om het concept zowel technisch als economisch te laten slagen. De uitdaging is om hiervoor zoveel mogelijk partijen te enthousiasmeren (gemeente, projectontwikkelaars, toekomstige bewoners). Belangrijk daarbij is dat het nieuwe warmteconcept in beleid kan worden verankerd. Daarnaast is meer onderzoek nodig naar het effect van hoge temperatuur opslag in de bodem.

Het systeem en model kunnen nog verder worden uitgebreid en geoptimaliseerd, waarbij wordt toegewerkt naar een uiteindelijk systeemontwerp op basis waarvan daadwerkelijke investeringen gedaan kunnen worden. Daarnaast is het ook van belang om een organisatievorm te gaan ontwikkelen waarin de investeringen en jaarlijkse kosten en opbrengsten over verschillende partijen worden verdeeld. De bedrijfsstrategie van het systeem zal hier ook een belangrijk onderdeel van zijn, aangezien een voorkeur voor waterstof- of warmteproductie leidt tot hogere of lagere productieprijsen.

Met de onderzoeksresultaten zoals beschreven dit rapport heeft het Power-to-X-concept voldoende onderbouwing gekregen. Er is aangetoond dat een woonwijk kan worden voorzien in de behoefte aan warmte, mobiliteit en (een deel van het) huishoudelijk water. Het biedt aanknopingspunten om het concept verder te verdiepen, en vervolgens toe te werken naar realisatie, zowel in Nieuwegein als daarbuiten.

Na afronding van dit project is begin 2018 een vervolgproject van start gegaan waarin wordt toegewerkt naar een gedetailleerd systeemontwerp, met steun vanuit de Topsector Energie (TKI Urban Energy). Partners in dit project zijn Allied Waters, Aveco de Bondt (dochter van VolkerWessels), KWR, PitPoint, TU Delft en Waternet.

Inhoud

1	Inleiding	12
1.1	Naar een duurzaam energiesysteem	12
1.2	Opslag van duurzame energie nodig om vraag en aanbod in balans te brengen	12
1.3	Verduurzaming van het energiegebruik voor wonen en mobiliteit	13
1.4	Waternet en PWN ontwikkelen grootschalige zonne-energiecentrales in Nieuwegein	14
1.5	Ontwikkeling woon-werk gebied Rijnhuizen in Nieuwegein	15
1.6	Het Power-to-X-systeem in Nieuwegein-Utrecht	15
1.7	Doel van dit onderzoek	16
2	Het Power-to-X-systeem in Nieuwegein	18
2.1	Van elektriciteit naar warmte	20
2.2	Van elektriciteit en regen naar waterstof	22
2.3	Van regen en elektriciteit naar demiwater	24
2.4	Een slim DC-elektriciteitsnet	25
2.5	Power-to-X – overzicht en deelsystemen	26
3	Opbouw model	27
3.1	Algemene opbouw	27
3.2	Aanbod en vraagpatronen	28
3.3	Technisch-energetische parameters	30
3.4	Economische parameters	31
3.5	Economische berekeningen	32
3.6	Regelsysteem/Integratie	33
4	Scenario's	35
4.1	Scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit'	35
4.2	Scenario 'Wijk, zon, waterstof prioriteit'	37
4.3	Scenario 'Wijk, zon én wind'	38
4.4	Scenario 'Stadsdeel'	38
4.5	Overzicht	40
5	Resultaten	41
5.1	Scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit'	41
5.2	Scenario 'Wijk, zon, waterstof prioriteit'	52
5.3	Scenario 'Wijk, zon én wind'	62
5.4	Scenario 'Stadsdeel'	69
6	Vermeden kosten	79
6.1	Vermeden elektriciteitsnet kosten	79
6.2	Besparingen door vermeden CO ₂ emissies	81
6.3	Andere vermeden emissies, milieu en andere effecten	82

6.4	Hoe kunnen vermeden kosten worden geïncorporeerd in de business case?	82
7	Discussie	84
8	Conclusies	91
9	Aanbevelingen	98
	Literatuur	101
	Bijlage I	106
•	Input zon, wind, regen in Power-to-X	106
	Aanpassing formules	108
	Verschillende opstellingen	109
	Voorbeeldberekening	109
	Bijlage II	115
•	Warmtesysteem Power-to-X	115
	Warmtevraag ruimteverwarming	116
	Warm tapwatervraag	118
	Mogelijke situaties	124
	Warmtevraag uit warmtenetwerk	124
	Warmtepomp	125
	Warmtewisselaar	126
	Warme bron	129
	Medium bron	130
	Boring en behuizing	132
	Leidingwerk	133
	Pompen, frequentieomvormer en injectiekleppen	133
	Warmtewisselaar	133
	Technische ruimte	134
	Vergunning, voorontwerp, effectenstudie	134
	Definitief Ontwerp, Bestek	134
	Onderhoudskosten aquifers	135
	Kosten grote warmtepomp	135
	Kosten warmtenet	135
	Bijlage III	137
•	Waterstofsysteem Power-to-X	137
	Bijlage IV	141
•	Watersysteem Power-to-X	141
	Waterbehandelingssysteem – efficiëntie van de systemen	145
	Bijlage V	149
•	Keuzes warmte in scenario ‘Wijk, zon, warmte prioriteit’	149
	Terugwinefficiëntie	155
	Bijlage VI	156

•	Waterkwaliteitsonderzoek	156
	Methoden	156
	Resultaten experimenteel onderzoek	160
	Discussie resultaten experimenteel	162
	Conclusies experimenteel	163
	Aanbevelingen experimenteel onderzoek	164
	Bijlage VII	165
•	Model beperkingen en aanbevelingen	165
	Beperkingen model	165
	Aanbevelingen voor het model	166
	Bijlage VIII	169
•	Parameters ‘Wijk, zon, warmte prioriteit’	169
	Bijlage IX	177
•	Parameters ‘Wijk, zon, waterstof prioriteit’	177
	Bijlage X	185
•	Parameters ‘Wijk, zon én wind’	185
	Bijlage XI	193
•	Parameters ‘Stadsdeel’	193

1 Inleiding

Het project "Power-to-X" behelst een eerste technisch-economische verkenning van een systeem waarbij zonne-energie en mogelijk windenergie samen met regenwater worden gebruikt voor de productie van elektriciteit, warmte, gedemineraliseerd water en waterstof. Elektriciteit en warmte worden daarbij geleverd aan een nieuw te ontwikkelen woon- en werkgebied in de gemeente Nieuwegein. Het demiwater wordt gebruikt voor de productie van waterstof en wordt via een apart leidingennet aan nieuwbouwwoningen geleverd voor de was-, afwasmachine en toiletspoeling. En waterstof wordt ingezet als brandstof in brandstofcel-elektrische voertuigen, auto's bestelwagens, vuilniswagens, trucks, bussen, etc.

Een dergelijk integraal energie- en watersysteem is uniek in Nederland, Europa en mogelijk zelfs in de wereld. Maar waarom ontwikkelen we een dergelijk integraal systeem, wat is de aanleiding daarvoor?

1.1 Naar een duurzaam energiesysteem

Er is een vergaande reductie van broeikasgasemissies nodig om klimaatverandering op aarde te kunnen beperken. De doelstelling van de internationale klimaatafspraken, vastgelegd in het Parijs-akkoord, is om de opwarming van de aarde te beperken tot ruim onder de 2 graden Celsius, het liefst tot maximaal 1,5 graden Celsius [1]. In het regeerakkoord van het kabinet Rutte III staat dat het de plicht van Nederland is er alles aan te doen om deze doelstellingen van het Parijs-akkoord te halen. Het kabinet wil daarom maatregelen nemen om de broeikasgasemissies met 49% terug te dringen in 2030 [2]. Op de COP23 in Bonn heeft minister Wiebes van het Ministerie EZK (Economische Zaken en Klimaat) aangegeven dat Nederland tot de koplopers in de EU wil behoren en daarbij wil streven naar een broeikasemissiereductie van 55% [3].

Vervanging van fossiele energie door duurzame energie is uiteindelijk noodzakelijk om de broeikasgasemissies volledig en blijvend te reduceren. Zonne- en windenergie spelen daarbij een grote rol. Zonne-energie kan zeer lokaal worden toegepast op woningen en gebouwen, maar ook in grote zonneparken. Windenergie is een wat grootschaligere vorm van duurzame energieopwekking en kan toegepast worden op land, maar zeker ook op zee. Daarnaast kunnen duurzame biomassa en geothermie een rol spelen in een duurzame energievoorziening.

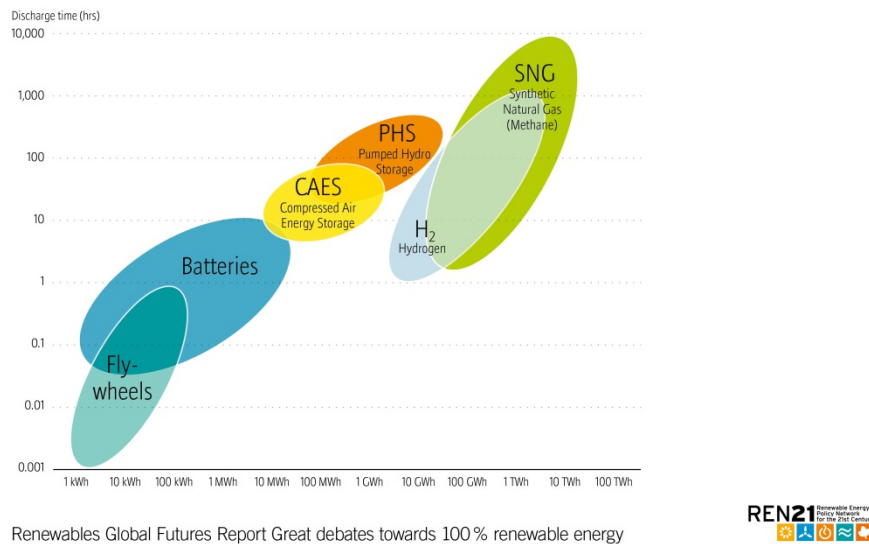
Het aanbod van zonne-energie en windenergie varieert echter met de zoninstraling en windsnelheid. Inpassing en benutting van deze bronnen is dan ook één van de grote uitdagingen in de realisatie van duurzame energiesystemen. Hoe brengen we duurzame energie op de juiste tijd en plaats bij de gebruikers. Een visie op dit vraagstuk hebben we gegeven in het boek 'Solar Power to the People'[4]. Conversie van zonne- en wind-energie naar waterstof speelt daarin een cruciale rol.

1.2 Opslag van duurzame energie nodig om vraag en aanbod in balans te brengen

In een ontwikkeling naar een volledig duurzaam energiesysteem zal opslag en transport van duurzame energie op mondiale, regionale en lokale schaal een steeds belangrijkere rol gaan spelen. Verschillende vormen van energieopslag zullen op verschillende tijdschalen en geografische schalen een rol gaan spelen. Zo zullen b.v. vliegwielen en batterijen een belangrijke rol gaan spelen in opslag van elektriciteit in tijdspannes van milliseconden, uren,

dag-nacht tot dagen (zie Figuur 3). Maar opslag van energie op grote schaal en transport van energie over de wereld zal voornamelijk gaan plaatsvinden in de vorm van waterstof, vloeibaar of gecomprimeerd, dan wel in de vorm van ammoniak of een andere van waterstof afgeleide energiedrager, zie daarvoor het boek *Solar Power to the People*.

Overview storage capacity of different energy storage systems



FIGUUR 3 ENERGIEOPSLAG TECHNOLOGIEËN, VERGELEKEN OP DUUR VAN ONTLADING EN OPSLAGCAPACITEIT [5]

Mede doordat de productie van elektriciteit met zonnepanelen en windturbines zeer goedkoop wordt op die plaatsen waar de zon veel schijnt dan wel de wind hard en veelvuldig waait zal waterstof in de toekomst naar verwachting (naast elektriciteit) een cruciale en zelfs centrale rol gaan spelen als energiedrager. Dit wordt kernachtig samengevat met de term *waterstofeconomie*. Ook voor Nederland wordt de potentie voor waterstof als energiedrager en grootschalige opslagmedium van energie onderkend, zowel door de overheid, zie het rapport 'Contouren van een Routekaart Waterstof' [6], als door de chemische industrie[7] en netbeheerders[8].

1.3 Verduurzaming van het energiegebruik voor wonen en mobiliteit

Het energieverbruik van een huishouden bestaat ruwweg uit 3 componenten. In woningen en gebouwen wordt energie gebruikt voor het *verwarmen en koelen*. Daarnaast wordt energie in de vorm van elektriciteit gebruikt voor *verlichting en apparaten*. Ten slotte wordt energie gebruikt voor *mobiliteit* (auto's, bussen, treinen), nu vaak nog in de vorm van fossiele brandstoffen als benzine of diesel. In onderstaande tabel (zie Tabel 3) is ruwweg aangegeven hoeveel energie voor deze drie componenten wordt gebruikt, gemiddeld per woning in 2017. Hierbij is uitgegaan van een auto per woning.

TABEL 3 ENERGIEGEBRUIK VOOR VERWARMING, ELEKTRICITEIT EN VERVOER VOOR EEN WONING IN NEDERLAND

	Energiegebruik	Energiegebruik in GJ/jaar	Energiegebruik in %
Verwarming Woning [9] Milieucentraal	1.470 m ³ gas per jaar	46,5 GJ/jaar	52%
Elektriciteit Woning Milieucentraal [9]	3.000 kWh per jaar	10,8 GJ/jaar	12%
Benzine gebruik Auto [10]	13.000 km per jaar Gemiddeld 1 liter benzine op 14 kilometer = 930 liter	32,5 GJ/jaar	36%
Totaal		89,8 GJ/Jaar	100%

Uit deze tabel blijkt dat we verreweg de meeste energie gebruiken voor het verwarmen van onze woning, 52%. Voor nieuwbouwwoningen kan dit gebruik echter eenvoudig worden terug gebracht door betere isolatie naar minder dan de helft. Ook de auto, die gemiddeld 13.000 km per jaar rijdt gebruikt ruim 1/3 van de energiebehoefte van een huishouden. Dat dit zo hoog ligt komt door het lage rendement van een verbrandingsmotor, gemiddeld zo'n 25-30%. Het kleinste deel van de energie in een woning wordt verbruikt in de vorm van elektriciteit. De verwachting is wel dat dit gebruik in de toekomst zal stijgen. Enerzijds zal het elektriciteitsverbruik afnemen door efficiëntere apparaten en verlichting, maar anderzijds zal de penetratie van elektrische apparaten nog verder toenemen.

Uit Tabel 3 komt duidelijk naar voren dat het energiegebruik niet alleen uit elektriciteit bestaat. Dus als er straks geen gas en olie, maar alleen nog duurzame elektriciteit wordt geproduceerd met zonnepanelen en windturbines, moet nagegaan worden of verwarming en mobiliteit ook geëlektrificeerd kunnen worden, dan wel elektriciteit omgezet kan worden in warmte of brandstof.

1.4 Waternet en PWN ontwikkelen grootschalige zonne-energiecentrales in Nieuwegein

In Nieuwegein wordt door WRK (Watertransportmaatschappij Rijn-Kennemerland), een samenwerking van Waternet en PWN, water ingenomen uit de Lek. Dit water wordt vorgezuiverd en naar de Kennemerduinen gepompt voor verdere zuivering en uiteindelijke productie van drinkwater voor de stad Amsterdam en een deel van de provincie Noord-Holland. Dit terrein heeft een omvang van ca 70 ha waarvoor Waternet het plan heeft ontwikkeld om op het terrein duurzame energie op te gaan wekken middels een zonnepark en indien toegestaan ook met windturbines. Voor het terrein is een eerste zonnepark van 3 MWp ontwikkeld en aanbesteed, en zal in de eerste helft van 2018 gebouwd gaan worden. Daarnaast is een 8,7 MWp zonnepark in ontwikkeling, waarvoor de SDE+ subsidie inmiddels is toegezegd. Dit zonnepark moet de komende jaren worden gerealiseerd.

Voor een klein deel kan de geproduceerde elektriciteit worden benut voor de pompen die het water van het Lekkanaal naar de duinen pompen. Maar voor het overgrote deel van de

elektriciteitsproductie moet een andere toepassing worden gevonden. Normaal gesproken betekent dit de realisatie van een grote elektriciteitsaansluiting op het openbare elektriciteitsnet en wordt de overtollige zonne-energie aan het openbare net terug geleverd. Als bijvoorbeeld iedereen in Nederland met zonnepanelen elektriciteit gaat produceren, dan moet de capaciteit van het elektriciteitsnet aanzienlijk verhoogd worden, om de piek aan energieopwekking in de zomer te kunnen afvoeren. Maar bovendien moet het overschot aan elektriciteit in de zomer ergens in het systeem worden gebruikt, weggegooid of omgezet in een andere energiedrager. Conversie van elektriciteit naar een andere energiedrager die wel gemakkelijker is op te slaan, is dan het meest voor hand liggend, zodat de energie ook in andere seizoenen te gebruiken is. Dit noemen we “Power-to-X”, waarbij “X” staat voor andere energiedragers of materialen.

1.5 Ontwikkeling woon-werk gebied Rijnhuizen in Nieuwegein

Op ongeveer 2 kilometer afstand van het WRK-terrein bevindt zich de wijk Rijnhuizen in Nieuwegein, waar zo'n 1.200-1.500 nieuwbouwwoningen en woningen in omgebouwde kantoorgebouwen worden ontwikkeld. De ambitie van de gemeente Nieuwegein is om de nieuwbouwwoningen als “nul op de meter” woningen te ontwikkelen [11], [12]. Dit houdt in dat gemiddeld in een jaar het energiegebruik gelijk is aan de energieproductie. Maar dit betekent niet dat vraag en aanbod van energie op elk moment in evenwicht zijn. In het kader van de routekaart Nieuwegein Energieneutraal 2040 is opslag dan ook één van de peilers, zodat vraag en aanbod meer met elkaar in balans komen [13].

In Rijnhuizen bestaat een behoefte aan wooncomfort, in de vorm van warmte, water en elektriciteit. Daarnaast bestaat er een mobiliteitsbehoefte (conform Tabel 3). De vraag is hoe al deze behoeftes duurzaam ingevuld kunnen worden, waarbij vraag en aanbod van energie door tussenkomst van opslagsystemen door het jaar heen meer in evenwicht zijn.

1.6 Het Power-to-X-systeem in Nieuwegein-Utrecht

Op basis van de hierboven geschetste aanleidingen en mogelijkheden is een integraal Power-to-X-concept ontwikkeld, waarbij de wijk Rijnhuizen kan worden voorzien van zowel elektriciteit, warmte, waterstof voor mobiliteit en een deel van het huishoudelijk water. De basis hiervoor is het 8,7 MWp zonnepark op het terrein van WRK (Waternet en PWN). Mogelijk in een later stadium, indien daarvoor de vergunningen kunnen worden verkregen, zouden ook enkele windturbines kunnen worden geplaatst.

Een deel van de duurzame elektriciteit wordt in de zomer met een warmtepomp omgezet in warmte en ondergronds opgeslagen in een aquifer. In de winter wordt de warmte weer naar boven gehaald om minimaal 900 renovatie- en nieuwbouw woningen in Rijnhuizen te verwarmen.

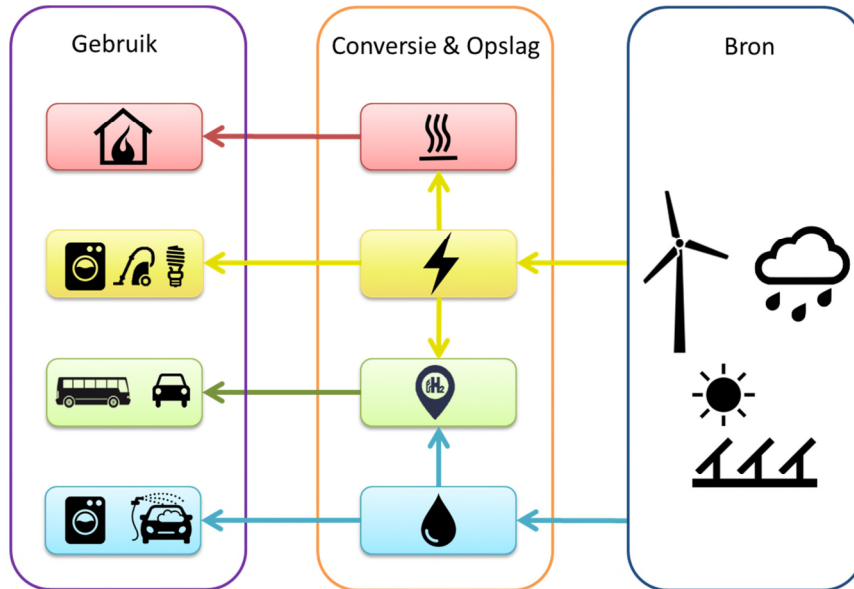
Een ander deel van de elektriciteit wordt geconverteerd in waterstof middels elektrolyse van gedemineraliseerd water. Deze waterstof kan vervolgens worden gebruikt voor mobiliteitstoepassingen in een waterstoftankstation van ca. 200 kg/dag.

Voor de productie van waterstof is ultrapuur water nodig, wat wordt geproduceerd uit regenwater wat wordt opgevangen op de zonnepanelen. Het opgevangen regenwater wordt tot gebruik in de ondergrond opgeslagen in een aquifer. Het overschot aan geproduceerd ultrapuur water wordt via een apart leidingennet aan nieuwbouwwoningen geleverd voor de was-, afwasmachine en toiletspoeling.

Het overschot aan elektriciteit wordt tenslotte op het openbare elektriciteitsnet ingevoerd. Door dit Power-to-X systeem kan de aansluitcapaciteit op het openbare net worden

verminderd en dus kosten worden uitgespaard. Dat geldt ook voor de woonwijk, omdat geen warmtepompen in de woningen noodzakelijk zijn hoeft het elektriciteitsnet in de woonwijk minder zwaar te worden gedimensioneerd.

Het Power-to-X-systeem en de samenhang tussen productie, conversie en opslag en het gebruik is in onderstaand figuur schematisch weergegeven.



FIGUUR 4 SAMENHANG TUSSEN DE VERSCHILLENDE VORMEN VAN ENERGIE BINNEN POWER-TO-X.

1.7 Doel van dit onderzoek

Het geschetste Power-to-X-systeem is uniek voor Nederland en Europa, en wellicht voor de wereld. Het huidige onderzoek is de eerste fase, met als uiteindelijk doel het realiseren van het onderzochte concept in Nieuwegein, maar ook daarbuiten. In deze eerste fase is de casus Nieuwegein verder onderzocht. De focus van het onderzoek behelst een technisch-economische verkenning of en hoe de elektriciteitsopbrengst van het 8,7 MWp zonnepark in de vraag naar warmte van 900 nieuwbouw en renovatiewoningen in Rijnhuizen-Nieuwegein en de vraag naar waterstof voor een gemiddeld tankstation waar 200 kilo waterstof per dag wordt getankt, kan voldoen. Daarnaast is onderzocht of er genoeg regenwater kan worden opgevangen om in de vraag naar demiwater, voor de waterstofproductie en voor het gebruik in woningen, te kunnen voorzien. Voor deze analyses is een dynamisch simulatiemodel ontwikkeld, wat inzicht geeft in het technische functioneren van de systemen, de energiebalansen, dimensionering van de verschillende systeemonderdelen, evenals een eerste inschatting van de kosten en opbrengsten van het Power-to-X-systeem.

Het huidige project richt zich daarom op de volgende doelen:

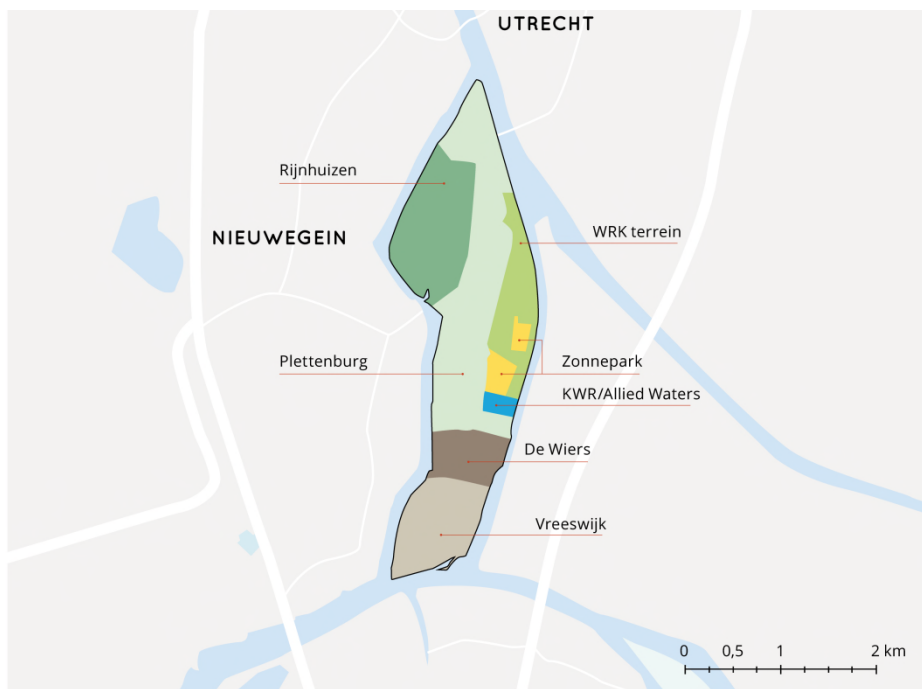
- Ontwikkeling en eerste dimensionering van specifieke deelsystemen, met name: waterstofproductie (regenwateropvang via de PV-panelen, ultrapuur water en elektrolyser), productie van hogere temperatuur warmte en opslag in de ondergrond. Voor al deze deelsystemen is een dynamisch systeemmodel ontwikkeld.
- Ontwikkeling van het integrale systeemconcept, middels dynamische systeemmodellering. Hierin zijn alle verschillende deelsystemen gekoppeld en vindt een prioritering plaats voor de verdeling van elektriciteit.

- Verkenning en analyse van de kosten van alle verschillende onderdelen en een schatting voor de investeringen voor het totale project.
- Een eerste ruwe verkenning van de vermeden kosten van netverzwaring, CO₂-emissies en diverse andere milieueffecten.
- Gezamenlijk met de projectpartners een start maken met het onderzoeken en ontwikkelen van de markt voor waterstof en warmte.

De verkenning en analyse van de veiligheid- en gezondheidsaspecten, het juridische en vergunning technische kader en de governance en eigendomsstructuur zijn ook van wezenlijk belang voor realisatie van het Power-to-X-systeem in Nieuwegein. De uitvoer van deze activiteiten wordt in een vervolgproject ter hand genomen, waarbij ook specifieke vragen die volgen uit het huidige Power-to-X-project verder worden uitgediept.

2 Het Power-to-X-systeem in Nieuwegein

In Nieuwegein gaan we een eerste fase van een duurzaam Power-to-X energie- en watersysteem realiseren, in een gebied omgeven door twee kanalen en de rivier de Lek. In het boek *Solar Power to the People* is dit systeem uitvoerig beschreven [4].



FIGUUR 5 OVERZICHT PROJECTLOCATIES IN NIEUWEGEIN

Het gebied (zie Figuur 5) is omgeven door twee kanalen en de rivier de Lek in het zuiden. Aan de oostkant loopt het Lekkanaal en aan de westkant het Merwedekanaal. In het zuiden, tegen de Lek aan, ligt het oude historische dorpje Vreeswijk, met daarboven een stukje woningbouw en industrie in De Wiers. Boven De Wiers ligt het bedrijventerrein Plettenburg. Daarin, tegen het Lekkanaal aan, ligt het terrein van de Amsterdamse - en Noord-Hollandse drinkwaterbedrijven, en daaronder het nieuwe gebouw van KWR Watercycle Research Institute. Tussen de N408 en het Merwedekanaal, in het Noordwesten van Plettenburg, bevindt zich Rijnhuizen, met een oud historisch waterliniefort.



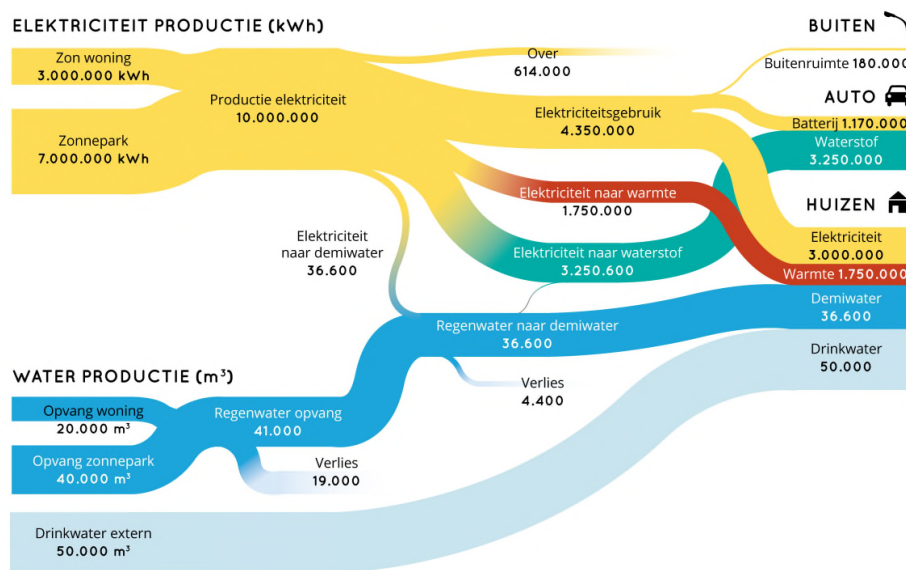
FIGUUR 6 INITIATIEVENKAART RIJNHUIZEN, ALLE NUMMERS ZIJN MOGELIJKE WONINGBOUW-ONTWIKKELINGEN

In het gebied Rijnhuizen vindt een gebiedsontwikkeling plaats van grotendeels kantoren (85%) naar een gemengd woon-werk gebied. Een deel van de panden zal worden vervangen door nieuwbouwwoningen, een ander deel wordt getransformeerd. De ambitie bij transformatie is energielabel A, bij nieuwbouw nul op de meter [12]. In totaal gaat het om 1.200-1.500 woningen, verdeeld over verschillende locaties (zie Figuur 6).

Het bedrijventerrein Plettenburg herbergt verder een busremise en diverse opleidingsinstituten voor de transportsector. De drinkwaterbedrijven halen op hun terrein oppervlaktewater uit het Lekkanaal. Ze zuiveren het water voor, en pompen het via grote leidingen naar een duingebied waar het verder gezuiverd wordt. Dit water is uiteindelijk bestemd voor de drinkwatervoorziening van Amsterdam en de Provincie Noord-Holland. Het terrein is ongeveer 70 hectare groot en ligt deels braak. Het Amsterdamse drinkwaterbedrijf ontwikkelt dan ook een paar grote zonneparken op dit terrein. Een park van 3 megawattpiek (MWp) is in aanbouw, waarvan de elektriciteit vooral bestemd is voor de pompen op het terrein. Het geplande zonnepark heeft een piekvermogen van 8,7 MWp en wordt in 2019-2020 gerealiseerd. Door de gekozen oost-west oriëntatie is de geschatte opbrengst van dit zonnepark ca. 7 miljoen kWh per jaar.

De elektriciteit van dit zonnepark kan deels op het terrein zelf worden gebruikt, en voor een groot deel aan het openbare elektriciteitsnet worden terug geleverd, maar dan moet de netaansluiting worden verzwakt. Dit onderzoek is erop gericht deze energie op een andere manier in te zetten, om zo een duurzaam energiesysteem voor dit gebied kunnen realiseren.

Het zonnepark levert elektriciteit, maar we hebben niet alleen elektriciteit nodig voor verlichting en het laten werken van apparaten. Zoals te zien in Tabel 3 is er in een huishouden meer energie nodig voor verwarming en voor vervoer. Bovendien levert dit zonnepark veel elektriciteit in de zomer, maar weinig in de winter. Daarom is dé oplossing een deel van de elektriciteit om te zetten in een andere energiedrager, die een andere energiefunctie kan vervullen. Op die manier kan de woonwijk worden voorzien in de behoefte voor zowel mobiliteit, warmte en een deel van het water. Dit wordt ook geïllustreerd in het sankey-diagram in Figuur 7. Hier is overigens een uitgebreider systeem weergegeven, waarbij ook zonne-energie op daken en het elektriciteitsgebruik van woningen zelf is meegenomen. In de volgende paragrafen zullen de verschillende omzettingsmechanismen en energiedragers verder worden besproken.



FIGUUR 7 SANKEY DIAGRAM VAN ENERGIE EN WATER STROMEN VOOR EEN WOONWIJK

2.1 Van elektriciteit naar warmte

2.1.1 Waarom warmteopslag?

Op 2 kilometer afstand van het zonnepark bevindt zich de wijk Rijnhuizen, waar zo'n 1.200-1.500 nieuwe woningen worden ontwikkeld. De ambitie is om deze woningen zo duurzaam mogelijk te bouwen. Een duurzame warmtevoorziening is dan ook noodzakelijk. Wanneer dit gebeurt met een klassiek warmte-koudeopslagsysteem, moet in elke woning een warmtepomp worden geplaatst, die in de winter warmte uit de bodem op een gewenste temperatuur kan brengen. Deze warmtepomp gebruikt dus veel elektriciteit in de winter, wanneer weinig zonne-energie wordt geproduceerd. In het Power-to-X-systeem is dit niet meer nodig. In dit geval gebruiken we juist in de zomer elektriciteit, wanneer veel zonne-energie beschikbaar is, om met een centrale warmtepomp warmte te produceren en op te slaan in de ondergrond voor gebruik in de winter.

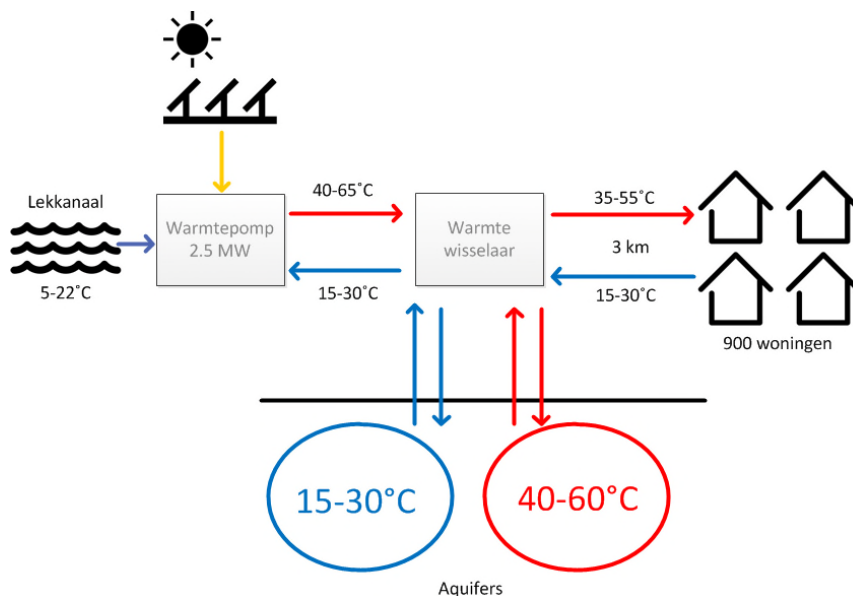
2.1.2 Het systeem

Warmte uit het oppervlaktewater van het Lekkanaal wordt gecombineerd met de duurzame elektriciteit in een warmtepomp om warm water te maken van zo'n 40- 60 °C. Dit water wordt vervolgens in de bodem in een aquifer opgeslagen en in de winter gebruikt voor verwarming van de woningen. Nieuw hieraan is niet alleen de productie van warmte met

zonne-energie, maar ook de opslag van deze warmte in de grond. Normaal wordt warmte in de grond opgeslagen met een temperatuur die niet hoger is dan 20 °C, maar hier is de ambitie om dit te doen op een temperatuurniveau van 40- 60 °C.

Via een warmtenet komt de warmte in de woningen terecht. In de woning is alleen een warmtewisselaar (en opslagvat) nodig om het huis te verwarmen. In het opslagvat zit ook een verwarmingselement, waarmee de inhoud van het vat minimaal eens per week boven de 60°C wordt gebracht in verband met legionellapreventie. Met het warmtenet en warmteafgifte systeem wordt bespaard op warmtepomp in de woning, en daarnaast hoeft het elektriciteitsnet in de wijk niet te worden uitgebreid, omdat de warmtepompen in de winter veel elektriciteit vragen en vaak gelijktijdig aan moeten staan.

In Figuur 8 is het warmtesysteem weergegeven. Het warmtedeelsysteem bestaat onder andere uit een warme (40-60°C) en medium (15-30°C) bron in de bodem (de aquifers). Wanneer warmte in de woningen nodig is, wordt water uit de warme bron door het warmtenet naar de woningen gebracht, via een warmtewisselaar. Het water wat terugkomt van de huishoudens wordt in de medium bron opgeslagen. Als er duurzame energie beschikbaar is, kan met de warmtepomp via de warmtewisselaar de warme bron worden gevuld. Water uit de medium bron gaat dan via de warmtewisselaar naar de warmtepomp en het opgewarmde water wordt vervolgens aan de warme bron toegevoegd. De warmtepomp gebruikt oppervlaktewater om warmte uit te onttrekken en deze warmte wordt met een relatief kleine hoeveelheid elektriciteit (gele pijl) met een hele hoge efficiëntie in de warmtepomp tot het juiste niveau (40-60°C) gebracht. Er kan ook voor worden gekozen om elektriciteit van het net in te kopen om warmte te produceren.



FIGUUR 8 OVERZICHT VAN HET WARMTESYSTEEM

2.1.3 De warmtevraag

De warmtevraag van de goed geïsoleerde nieuwbouwwoningen wordt ingeschat op 12 gigajoule (GJ) voor verwarming en 7,3 GJ voor warm tapwater (Persoonlijke communicatie, Frank Schipper, Aveco de Bondt, 3 april 2017). In totaal is er dus 18,3 GJ aan warmte nodig per woning per jaar. Bij renovatie is de warmtevraag voor ruimteverwarming hoger, 19,7 GJ/jaar [15]. Voor 900 woningen die half nieuwbouw en half renovatie zijn komt dit dan neer op ca. 20,5 TJ aan warmtevraag per jaar.

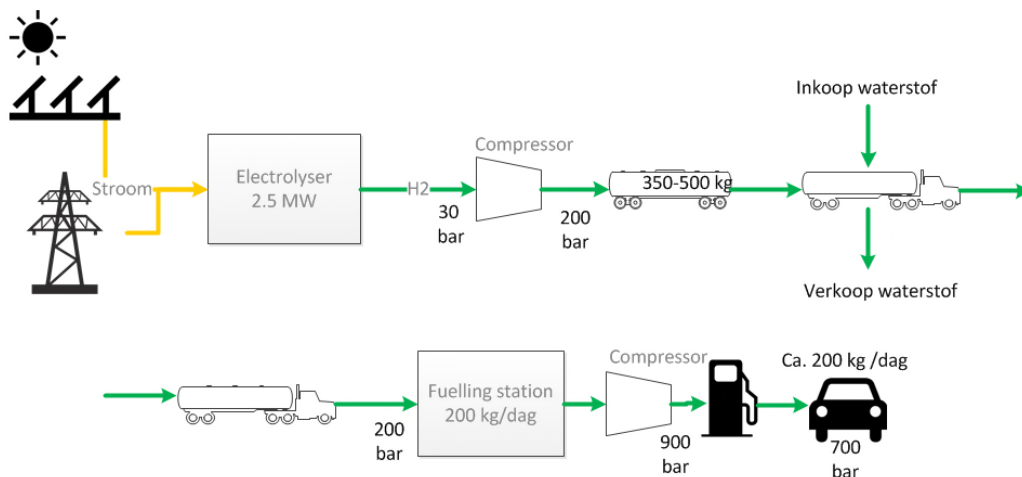
2.2 Van elektriciteit en regen naar waterstof

2.2.1 Waarom waterstofproductie

Naast energie voor verwarming van woningen en gebouwen en elektriciteit voor apparaten en verlichting is er ook energie nodig voor mobiliteit. Die energie is nu nog voornamelijk benzine of diesel, maar de toekomst is aan elektrisch rijden. Dat betekent dat een elektromotor de wielen aandrijft, waarbij de elektriciteit geleverd kan worden uit batterijen (BEV, Battery Electric Vehicles) of uit een brandstofcel, die waterstof omzet in elektriciteit (FCEV, Fuel Cell Electric Vehicles). Zonnepanelen en windturbines leveren elektriciteit die via het elektriciteitsnet ook geladen kan worden in de batterijen van auto's. Het elektriciteitsnet moet hiervoor wel de juiste capaciteit hebben en ook opslag van elektriciteit om vraag en aanbod op elkaar af te stemmen is belangrijk. Hier kan een omzetting van elektriciteit naar waterstof een oplossing bieden om de overschotten aan elektriciteit in de zomer om te zetten in waterstof. Die waterstof kan dan ook door auto's worden getankt, en in de auto worden omgezet naar elektriciteit om de elektromotor aan te drijven.

2.2.2 Het systeem

In Figuur 9 is een overzicht gegeven van het waterstofdeelsysteem. De duurzame elektriciteit die is gegenereerd met zonnepanelen (of windmolens) wordt omgezet in waterstof door een elektrolyser. Naast het gebruik van de duurzame energie kan ook elektriciteit ingekocht worden van het net om waterstof te produceren. In een elektrolyser wordt ultrapuur water (demiwater) met behulp van elektriciteit omgezet in waterstof en zuurstof. De waterstof wordt geproduceerd op 30 bar en vervolgens in een compressor verder gecomprimeerd tot 200 bar, zodat het efficiënt kan worden getransporteerd naar een tankstation. Bij het tankstation wordt de druk verhoogd tot 900 bar zodat er op 700 bar auto's kunnen worden getankt. Voor bussen geldt momenteel een druk van 350 bar, in dit geval hoeft de waterstof dus op minder hoge druk te worden gebracht. Vervolgens kunnen (personen)voertuigende waterstof tanken.



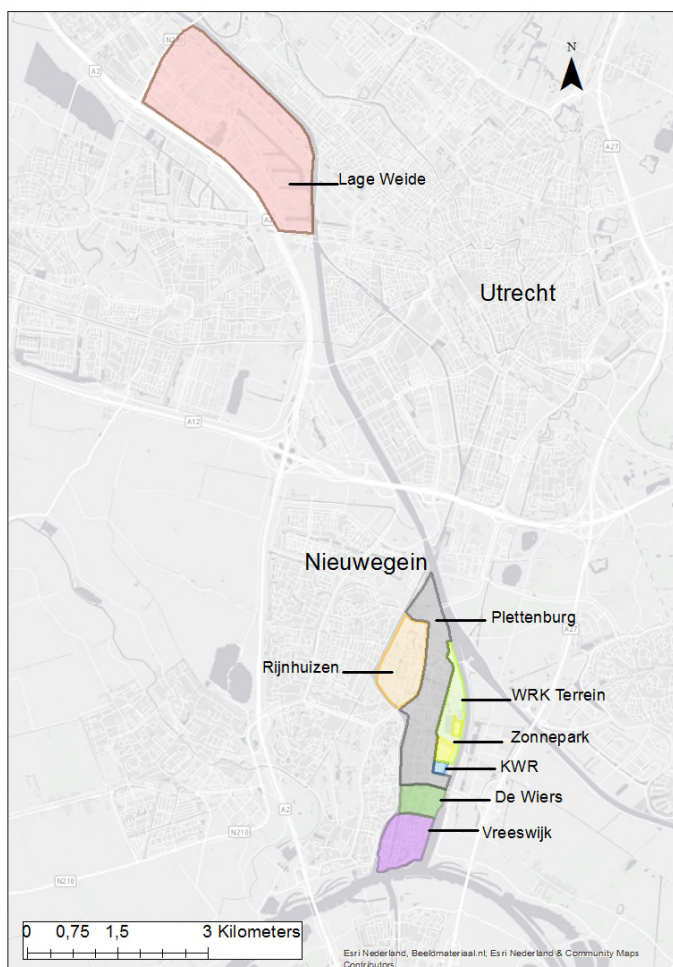
FIGUUR 9 OVERZICHT VAN HET WATERSTOFDEELSYSTEEM.

2.2.3 De waterstofvraag

Waterstof is een brandstof die kan worden gebruikt in brandstofcelvoertuigen. Dit kunnen auto's zijn, maar ook bussen, vorkheftrucks, plantsoenendienstwagens of vuilnisauto's. Een auto in Nederland rijdt gemiddeld zo'n 13.000 kilometer per jaar [10]. Bij een brandstofcel-waterstofauto is het waterstofverbruik 1 kilo waterstof per 100 kilometer. Dit betekent dat een normale auto per jaar 130 kilo waterstof verbruikt. Een bus rijdt ongeveer 10km op één

kilo waterstof. Per jaar rijdt een bus 70.000-90.000 km (persoonlijke communicatie Han van der Wall, Qbuzz, 27-02-2017) en heeft daarvoor dus 700-900 kg waterstof nodig.

De industrie op Plettenburg is gefocust op auto's en vervoer, wat veel mogelijkheden biedt voor afname van waterstof. Ook een deel van het wagenpark van de gemeente Nieuwegein zou op waterstof kunnen gaan rijden. Er bevindt zich een busremise van Qbuzz direct aan de oostkant van de zonneweide. In de loop van het project is met Qbuzz gesproken over de aankoop van waterstofbussen, maar de (Europese) subsidie hiervoor is helaas niet doorgegaan (rond tweede kwartaal 2017). Een ander initiatief in Utrecht is het industrieterrein Lage Weide (zie Figuur 10), waar onder andere het Energie Collectief Utrechtse Bedrijven en PitPoint spreken over vlootontwikkeling en een waterstoftankstation. Dit tankstation zou een capaciteit van 200 kg/dag krijgen, genoeg voor 40 tankbeurten van 5kg/waterstof per auto.



FIGUUR 10 DE LIGGING VAN HET INDUSTRIETERREIN LAGE WEIDE TEN OPZICHTE VAN NIEUWEGEIN

2.3 Van regen en elektriciteit naar demiwater

2.3.1 Waarom demiwaterproductie

Voor de productie van waterstof is demiwater nodig, dat wordt geproduceerd uit regenwater dat wordt opgevangen op zonnepanelen. Maar de hoeveelheid regenwater die op de zonnepanelen opvangen, is vele malen groter dan nodig is voor de waterstofproductie. Bij opvang van al het regenwater en na de productie van waterstof bestaat er een overschot van ongeveer 30.000 kuub (m³) demiwater per jaar.

Ook op daken van woningen kan regenwater worden opgevangen. Met een gemiddeld dakoppervlak van 40m² en een regenval van 800 mm per jaar [16] gemiddeld ca. 32 kuub per woning of 29.000 kuub voor alle woningen samen. Deze hoeveelheid demiwater kan weer worden ingezet in de wijk Rijnhuizen. In de wijk kan naast de gewone drinkwaterleiding, een tweede demiwaterleiding worden aangelegd. Dit demiwater kan worden gebruikt in de vaatwasser en de wasmachine, en worden gebruikt voor toiletspoeling (om een groter volume te creëren). Door demiwater te gebruiken in de vaatwasser en de wasmachine besparen we op het gebruik van wasmiddelen. Dit scheelt uiteraard in de kosten, maar is zeker ook goed voor het milieu [17].

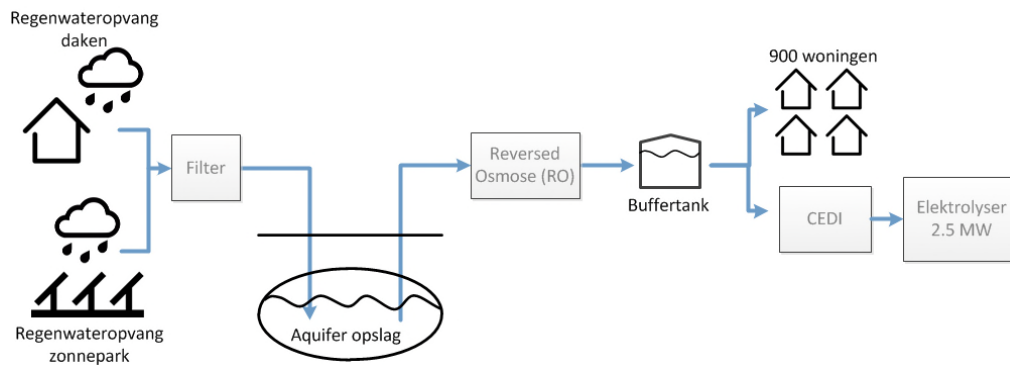
2.3.2 Voordelen waterberging

In de wereld zullen door de toenemende watervraag, klimaatverandering en relatieve zeespiegelstijging, kustgebieden te kampen krijgen met verzilting. Ook Nederland kent problemen met de beschikbaarheid van zoetwater, met name in het westen van het land. Zoetwatertekorten moeten worden voorkomen, de zoetwatervoorziening moet robuuster. Ondanks de dreigende zoetwatertekorten, laten we in Nederland nog altijd zoetwater ongebruikt wegllopen: watertekorten zijn dan ook het gevolg van een gebrek aan zoetwater op het juiste moment en op de juiste plaats. Het jaar rond is geen sprake van zoetwatertekort, maar van een gebrek aan opslagcapaciteit. Ondergrondse berging van zoetwater kan een belangrijke bijdrage leveren aan grootschalige opslag van zoetwater [18].

Daken van woningen, maar ook zonnepanelen in een zonnecentrale kunnen regenwater opvangen, waarna het in een aquifer in de ondergrond kan worden opgeslagen voor gebruik op een later tijdstip.

2.3.3 Het systeem

Een schets van het (demi)watersysteem is weergegeven in Figuur 11. Het begint met de opvang van regenwater op daken en zonnepanelen, waar dan een opvanggoot onder wordt gemaakt. Dit regenwater wordt gefilterd in een zeef en opgeslagen in een ondergrondse waterbuffer. Wanneer er een vraag is naar demiwater wordt het water gezuiverd door een omgekeerde osmose (RO) installatie tot demiwaterkwaliteit. Na de zuivering bevindt zich nog een buffertank, zodat er altijd een voorraad demiwater is. Uit deze tank wordt water onttrokken voor de woonwijk. Ook dient dit water als basis voor een Continue Electro Delonisatie (CEDI) installatie, waar ionen onder invloed van een elektrisch veld in combinatie met kation en anion wisselmembranen nog verder uit het water worden verwijderd. Ook wordt er in de CEDI nog ionen uitwisselhars gebruikt om het proces te versnellen. Na deze stap heeft het water een geleidbaarheid van < 0,1 µS/cm, zodat het gebruikt kan worden in de elektrolyser.



FIGUUR 11 OVERZICHT VAN HET WATERDEELSYSTEEM.

2.3.4 De demiwater vraag

Een elektrolyser gebruikt ca. 9 liter water per kg waterstof, bij een waterstofvraag van ca. 200 kg/dag komt dit jaarlijks neer op 650 m³ aan ultrapuur water. Per dag per persoon wordt 120 liter water verbruikt, daarvan is zo'n 50 liter voor de toiletten, wasmachine en vaatwasser [19]. Gemiddeld wonen er 2,2 mensen in een huis in Nederland [20], dus in totaal verbruikt een woning dan $2,2 \cdot 50 \cdot 365 = 40.150$ liter per jaar, oftewel zo'n 40 m³ per jaar. De negenhonderd woningen gebruiken dan in totaal 36.000 m³ demi-water.

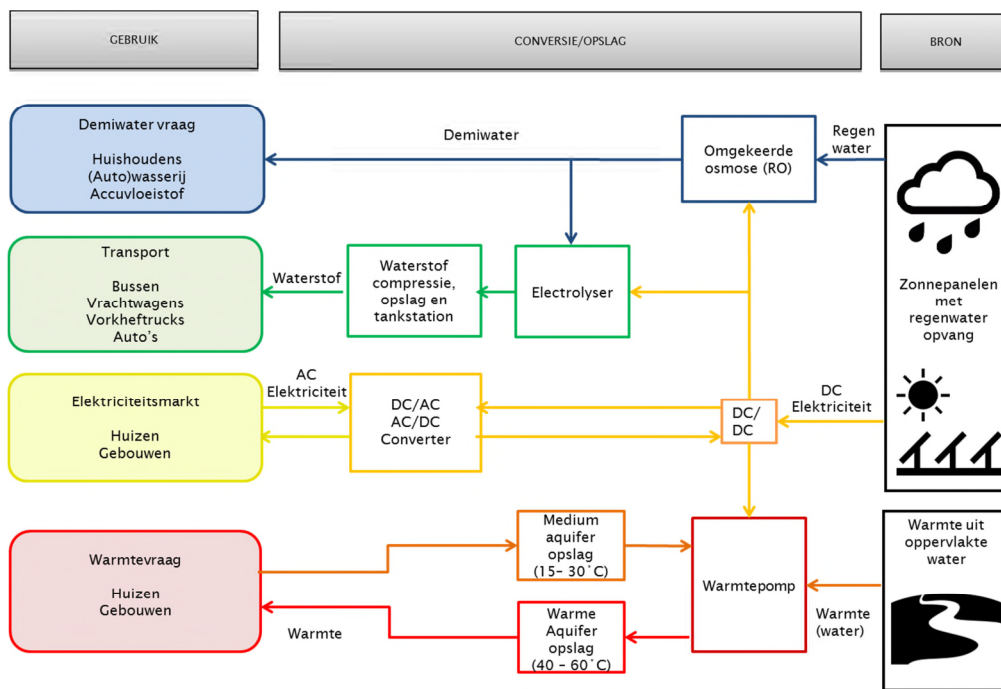
2.4 Een slim DC-elektriciteitsnet

Zonnepanelen produceren elektriciteit, maar deze elektriciteit is gelijkstroom, oftewel DC (*Direct Current*). Daarom is een omvormer nodig om de gelijkstroom van de zonnepanelen om te zetten in wisselstroom. Het elektriciteitsnet levert namelijk wisselstroom, oftewel AC (*Alternating Current*). Werkten vroeger al onze apparaten op wisselstroom, inmiddels werkt bijna elk apparaat op gelijkstroom. Dus in elk apparaat zit een omvormer die van wisselstroom gelijkstroom maakt.

In het Power-to-X-systeem werken de zonnepanelen, de omgekeerde osmose-installatie, de warmtepomp en de elektrolyser op gelijkstroom. Het ligt daarom voor de hand om een gelijkstroomnet aan te leggen tussen het zonnepark en deze installaties, waardoor de omzettingsverliezen, van DC naar AC en weer terug naar DC, worden vermeden. Daarnaast kan op kosten worden bespaard omdat een omvormer van AC naar DC in het apparaat zelf niet meer nodig is. Wel is er een DC/DC step up systeem nodig, om tussen verschillende voltages te kunnen wisselen. Pas als er elektriciteit over is die aan het net geleverd wordt, moet de omzetting van DC naar AC plaatsvinden in een DC/AC-omvormer. Hetzelfde geldt voor de ingekochte elektriciteit van het net welke AC is en omgezet wordt naar DC voor gebruik in het Power-to-X-systeem.

2.5 Power-to-X – overzicht en deelsystemen

Als alle onderdelen zoals beschreven in bovenstaande paragrafen worden geïntegreerd in één systeem ziet dat er in grote lijnen uit zoals in Figuur 12. Door integratie van de verschillende onderdelen wordt één systeem gecreëerd waarmee de bronnen worden via omzetting en opslag worden verbonden met de vraag naar demiwater, waterstof, elektriciteit en warmte.



FIGUUR 12 OVERZICHT SYSTEEM MET BELANGRIJKSTE ONDERDELEN

3 Opbouw model

3.1 Algemene opbouw

Om de werking van het Power-to-X-systeem goed te kunnen modelleren is een simulatiemodel gemaakt. In dit model worden vraag en aanbod van water en energie per uur berekend en wordt bepaald hoe de input aan energie en water over de verschillende systeemonderdelen wordt verdeeld. Elektriciteit van zon of wind kan worden gebruikt voor de productie van warmte of waterstof, of kan worden teruggeleverd aan het net. Ook bestaat de optie om elektriciteit van het net in te kopen. Het model bevat een regelsysteem waarmee een hiërarchie wordt toegepast op deze verdeling met twee opties; optie 1 is warmte-waterstof-elektriciteitsnet en optie 2 is waterstof-warmte-elektriciteitsnet. Hier is meer over te lezen in 3.6.

De berekeningen per uur worden uitgevoerd voor minimaal één jaar aan data, maar kunnen ook voor meerdere jaren achter elkaar worden uitgevoerd. Na het doorlopen van de uurberekeningen worden de data geaggregeerd als totaal per maand of per jaar, en waar nodig worden gemiddeldes berekend. Met deze geaggregeerde data worden vervolgens de economische berekeningen uitgevoerd.

Om het model zo overzichtelijk mogelijk te maken is voor ieder deelsysteem -waterstof, elektriciteit, water, en warmte- een bestand aangemaakt in het model met beschrijvingen van de onderdelen van dat systeem (zie lichtgroene blokjes in Figuur 13). Deze systeemonderdelen, zoals een warmtepomp, zonnepaneel of compressor, hebben nog geen vaststaande grootte of efficiëntie. Dit soort parameters kan apart worden ingesteld door de gebruiker van het model in een bestand met technisch-energetische parameters (zie ook 3.3). En dit geldt ook voor de kosten (functies) van de systemen of systeemonderdelen (zie ook 3.4). Op deze manier is het model flexibel, en kunnen er ook makkelijk onderdelen aan worden toegevoegd. De taal waarin het model is geschreven is Python, een open-source programmeertaal.

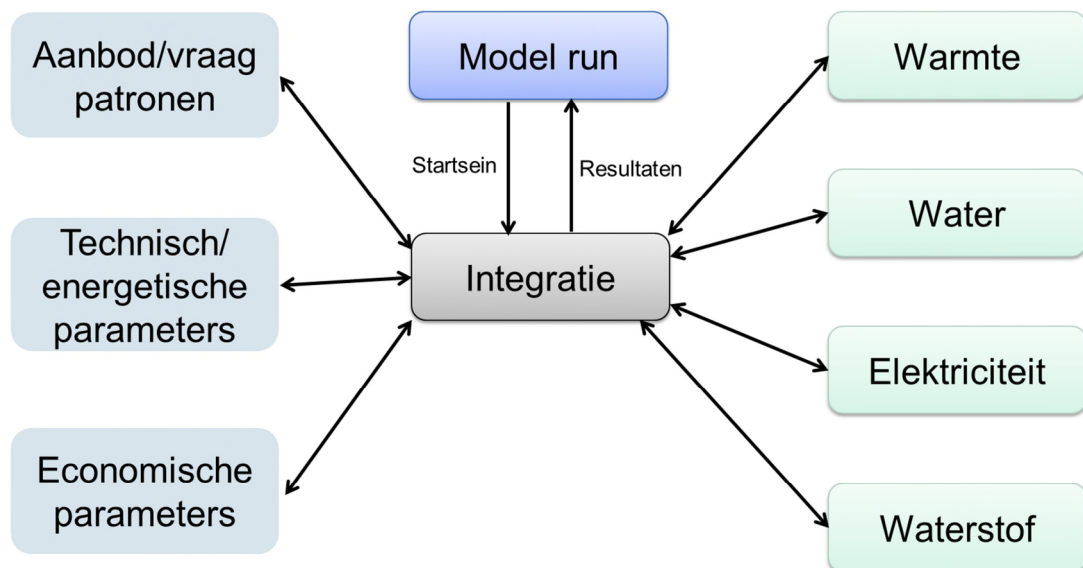
Het daadwerkelijk instellen van alle systeemonderdelen gebeurt in het bestand 'Integratie'. Hier worden de technisch-energetische en economische parameters gekoppeld aan de verschillende systeemonderdelen. Dit wordt ook wel 'initialiseren' genoemd. Vervolgens gaat het model per uur het aanbod en vraagpatroon van elektriciteit, warmte, waterstof en demiwater bepalen, met behulp van externe data. Dat gaat dan bijvoorbeeld om weerdata van het KNMI en/of een vraagpatroon voor demiwater.

De verdeling van de energie geschiedt volgens een regelmechanisme, waarbij informatie wordt uitgewisseld tussen het integratiebestand en de verschillende deelsystemen. In het integratiebestand wordt bijvoorbeeld bepaald hoeveel energie er in dat uur naar de warmtepomp wordt gestuurd en wat de temperatuur van het Lekkanaal is op dat moment, en in het onderdeel warmtepomp in het warmtesysteem wordt vervolgens berekend hoeveel warmte dan kan worden geproduceerd met behulp van een functie voor de efficiëntie van de warmtepomp (COP). Deze gegevens worden dan weer teruggespeeld naar het integratiebestand, die deze warmte dan weer toevoegt aan de warme bron (in het warmtesysteem), en zo worden gegevens over en weer uitgewisseld. Als alle verschillende stappen voor een bepaald uur zijn doorlopen begint de cyclus weer opnieuw, voor minimaal één jaar achter elkaar. Als de energetische data compleet zijn wordt vervolgd met de

economische berekeningen. Dit gebeurt opnieuw in het integratiebestand, waarbij gebruik wordt gemaakt van de datareeksen en totalen uit de energetische berekeningen. Zo wordt de lijst met inkooprijzen voor elektriciteit uit het net (per uur) vermenigvuldigd met de berekende data over inkoop van elektriciteit uit het net in kWh (per uur) en vervolgens gesommeerd om de kosten voor inkoop van elektriciteit uit het net te berekenen. Ook in dit geval vindt communicatie plaats tussen de economische parameters en de verschillende deelsystemen, via het integratiebestand.

De uitkomsten van de energetische berekeningen worden per uur in een excelbestand gezet, en de uitkomsten van de kostenberekeningen komen in een tekstbestand terecht. Door de technische en economische parameters anders in te stellen, kunnen verschillende systeemvarianten van het Power-to-X-concept worden doorgerekend.

De verschillende modelonderdelen zullen in dit hoofdstuk beknopt worden toegelicht, waarbij voor meer details van alle verschillende deelsystemen naar de bijlagen zal worden verwezen.



FIGUUR 13 OVERZICHT STRUCTUUR POWER-TO-X-MODEL

3.2 Aanbod en vraagpatronen

Om het model te kunnen laten werken zijn verschillende vraag- en aanbodpatronen nodig. Deze worden in het model ingevoerd van buitenaf, of worden in het model zelf berekend. Het gaat dan om de volgende patronen, allen bestaande uit excelbestanden:

Aanbodpatronen

- Regen (per 0.1 mm)
Data per uur van het KNMI [21]. Er is gekozen voor weerstation De Bilt als dichtstbijzijnde weerstation. Neerslagdata worden omgezet naar L/m² en gecorrigeerd met de hoek waaronder panelen (of daken) staan om de hoeveelheid opgevangen regenwater te bepalen. Bij echt grote stortbuien zal een deel van het water over de opvanggoten heen stromen, daarom wordt de opvang van regenwater beperkt tot het 99^{ste} percentiel.

- Zoninstraling (J/cm^2)
Data zijn per uur en komen van het KNMI [21], met weerstation De Bilt als dichtstbijzijnde weerstation. De zoninstraling wordt gecorrigeerd met data over de stand van de zon (azimuth) per uur die ook per jaar varieert [22]. Data wordt uiteindelijk omgezet in $\text{kWh}/\text{hr}/\text{m}^2$, voor meer informatie zie Bijlage I.
- Temperatuur ($^{\circ}\text{C}$)
Data zijn per uur en komen van het KNMI [21], met weerstation De Bilt als dichtstbijzijnde weerstation. De temperatuur wordt gebruikt om de opbrengst van de zonnepanelen mee te corrigeren, want een zonnepaneel gaat minder goed functioneren als de temperatuur hoger wordt. Ook dient de temperatuur als input voor de warmtevraag.
- Windsnelheid (m/s)
Data zijn per uur en komen van het KNMI [21], weerstation De Bilt op 10 m hoogte. De windsnelheid wordt gecorrigeerd tot de hoogte van de rotor van de windturbine (90m) (*hub height*) en worden gebruikt om de windopbrengst mee te bepalen. Voor meer informatie zie Bijlage I.
- Temperatuur oppervlaktewater
De temperatuur van het oppervlaktewater bestaat uit een lijst waarden van de temperatuur van het oppervlaktewater in het Lekkanaal per maand, en komt van Rijkswaterstaat [23].

Voor meer gedetailleerde informatie over het aanbod aan zon, wind en regen en hoe deze data worden omgezet tot bruikbare informatie voor het model kunt u Bijlage I raadplegen.

Vraagpatronen

- Warmtevraag
De warmtevraag is gebaseerd op de jaarlijkse warmtevraag per woning, die met behulp van de temperatuurgegevens wordt omgezet in een warmtevraagpatroon voor ruimteverwarming per uur. Er wordt aangenomen dat warmtelevering alleen kan plaatsvinden aan woningen van nieuwbouwkwaliteit, of renovatie met energielabel A of B, waarbij warmtelevering op 50°C volstaat. In de woning bevindt zich dan een opslagvat met een verwarmingselement, waarmee de inhoud van het vat minimaal eens per week boven de 60°C wordt gebracht in verband met legionellapreventie. Voor tapwater wordt een constant patroon aangehouden, in verband met aanwezige buffercapaciteit in de woningen. De warmtevraag per jaar wordt verdeeld over de tijd op basis van de temperatuurgegevens van het KNMI. Voor meer details over deze berekeningen zie Bijlage IIa.
- Tankpatroon voor waterstof
Een tankpatroon voor waterstof per uur is verkregen via PitPoint, gebaseerd op een tankstation van 200 kg/dag doordeweeks, en 126 kg/dag in het weekend.
- Patroon voor demiwater
Het patroon voor demiwater is gebaseerd op gegevens over watergebruik voor vaatwassers, wasmachines en toiletten, per uur, en is verder gespecificeerd in Bijlage IVa.

De vraagpatronen voor waterstof en demiwater worden per uur bepaald, maar zijn verder per week of weekenddag constant. Dit is echter niet heel realistisch en daarom is er ruis over deze vragen gemodelleerd, om te zorgen dat dagen onderling van elkaar verschillen. Deze ruis is gegenereerd door willekeurige getallen met een gemiddelde van 1 en een afwijking van 0,1 te creëren welke met de vraag wordt vermenigvuldigd. Hierna worden negatieve getallen omgezet in positieve getallen, zodat er geen negatieve vraag kan ontstaan. Door de toevoeging van deze ruis wordt bij iedere simulatie ook een andere vraag gecreëerd waardoor niet exact dezelfde uitkomsten gegenereerd worden.

De jaren waarover is gemodelleerd zijn 2010-2014. In deze jaren zat een goede afwisseling qua temperatuur en neerslag (zie Tabel 4), zodat te zien is hoe het systeem daarop reageert. Daarnaast kan op deze manier een meer representatief gemiddelde worden bepaald. Het valt overigens op dat ten opzichte van het langjarig gemiddelde (1981-2010) het in de periode 2010-2014 vrij zonnig was en de windsnelheid ook hoger was dan gemiddeld.

TABEL 4 KNMI JAAROVERZICHT KLIMAAT 2010-2014 [24], [25]

	Temperatuur	Zoninstraling	Neerslag	Windsnelheid
2010	koud - 9.1 °C	zonnig -1772u	normaal - 801 mm	4,5 m/s
2011	warm -10.9 °C	zonnig - 1836u	vrij droog - 781 mm	4,5 m/s
2012	normaal - 10.3 °C	zonnig - 1730u	vrij nat- 876 mm	7,5 m/s
2013	vrij koud - 9.8°C	vrij zonnig - 1705u	droog - 750mm	7,0 m/s
2014	warm - 11.7 °C	zonnig - 1844u	vrij droog - 776mm	3,4 m/s
langjarig gemiddelde	10.1 °C	1602u	833mm	3,4 m/s

3.3 Technisch-energetische parameters

In het model kunnen veel parameters worden ingesteld, waarvan de belangrijkste worden uitgelicht in Tabel 5. Hier zijn alleen het energiegebruik of de efficiëntie van belangrijke onderdelen als een zonnepaneel, warmtepomp, elektrolyser en RO systeem weergegeven. De precieze grootte van de verschillende systemen kan per simulatie verschillen (hoofdstuk 4).

TABEL 5 BELANGRIJKE TECHNISCH-ENERGETISCHE PARAMETERS MODEL

Systeemonderdeel	Energiegebruik/efficiency
Zonnepaneel	17% ^a
Warmtepomp	$COP = 7,5 - 0,07 (T_{cond (out)} - T_{evap (in)})^b$
Infiltratietemperatuur warme bron ($T_{cond (out)}$)	65°C ^c
Elektrolyser	56,2 kWh/kg ^d
RO systeem	90% ^e
Elektriciteit (AC/DC en DC/AC)	95% ^f

^aGebaseerd op informatie over de te gebruiken panelen van Waternet, zie verder Bijlage Ia

^bInformatie via Anne Spoor (Aveco de Bondt, 25-10-2017) met hulp van De Kleijn Energy Consultants & Engineers

^cGebaseerd op analyse zoals beschreven in Bijlage V

^dGecombineerd getal voor elektrolyse, zuivering en compressie tot 200 bar van de waterstof [26]

^eGebaseerd op expert knowledge (Hans Huiting & Emile Cornelissen, KWR, 21-02-2017)

^fAanname

Ook is berekend wat de vermeden CO₂-emissies zijn. Hiervoor is een conventionele situatie met warmtelevering door aardgas via een cv ketel en fossiel brandstofverbruik in auto's vergeleken met het Power-to-X-concept. Voor waterstof is gerekend met een verbruik van 1 kg waterstof voor 100 km bij een personenvoertuig. Het verschil in de CO₂-emissies is berekend met emissiefactoren van co2emissiefactoren.nl [27].

TABEL 6 CO₂-EMISSIONFACTOREN GEBRUIKT IN MODEL [27]

	Hoeveelheid	Eenheid	Referentie
CO ₂ emissie warmte	59,7	kg CO ₂ /GJ	Ketel gestookt op aardgas
CO ₂ emissie auto	0,22	kg CO ₂ /km	Onbekend voertuig en onbekende brandstof
CO ₂ emissie elektriciteit	0,413	kg CO ₂ /kWh	Representatieve Nederlandse elektriciteitsmix

3.4 Economische parameters

Bij de economische parameters is voor elk systeemonderdeel een prijs of kostenfunctie gedefinieerd. Daarnaast is rekening gehouden met een percentage voor onderhoud en operatie van het systeem (OM) gekoppeld aan een levensduur. Voor de belangrijkste systeemonderdelen zijn deze kosten(funcities) weergegeven in Tabel 7. De overige kosteninformatie van alle verschillende onderdelen is ook terug te vinden in de bijlages per systeem (Bijlage I, Bijlage II, Bijlage III en Bijlage IV).

TABEL 7 BELANGRIJKE ECONOMISCHE PARAMETERS

Systeemonderdeel	Kosten(funcie)	OM	Levensduur jaren
Zonnepark - inkoop	3,9€¢/kWh ^a		
Warmtepomp	1.400€/kW ^b	1% [28]	20 [29]
Warmtenet	$(214 + 1.725 * d_{\text{pipe}}) * L_{\text{network}}$ ^c met d_{pipe} de diameter netwerk in m en L_{network} de lengte van het netwerk in m	1% [29]	50 [30]
Elektrolyser	1.100€/kW ^d	2% ^e	20 [26]
Waterstoftankstation	1,3M€ ^e	70.000€/j ^e	15 ^f
RO systeem	15.000 + 8.000*V _{RO} met V _{RO} in m ³ /uur ^f	2.5% ^f	15 ^f
Elektriciteitssysteem	500.000€ ^g	1% ^g	50 ^g
Elektriciteit - inkoop	APEX (2016) + 3,3€¢/kWh ^h		
Discount rate	3% ⁱ		

^a Deze waarde is gekozen in overleg met Waternet omdat dit het bedrag is waarvoor Waternet ook terug aan het net zou kunnen leveren (persoonlijke communicatie, Gijs van der Meer, 12-01-2018).

^b Op basis van informatie van Frank Schipper (Aveco de Bondt, 28-08-2017), en gevalideerd met verschillende offertes van warmtepompleveranciers.

^c De diameter van de buis wordt momenteel ingesteld als parameter, verder worden kosten gebruikt die gelden voor buitengebieden van een stad uit een document van de IEA over District Heating [29]

^d Kosten gebaseerd op informatie van Ekinetix (november 2017).

^e Gebaseerd op informatie van PitPoint, zonder de medium compressor, want die is opgenomen bij de waterstofproductiekosten.

^f Gebaseerd berekeningen met een membraan dat 20 L/m²/uur kan produceren (Hans Huiting, 09-10-2017).

^g Gebaseerd op expert judgement van Ad van Wijk, conservatieve schatting. Precieze informatie was hierover nog niet beschikbaar

^h De kosten van elektriciteit inkoop uit het net worden de APX prijzen per uur uit 2016 gebruikt. Daar bovenop komt een bedrag bestaande uit de netwerkprijs van 1,7€¢/kWh plus de belastingen (zonder btw, 1,6€¢/kWh), samen 3,3 €¢/kWh in 2016, gebaseerd op CBS cijfers voor grootverbruikers van 200-200.000 MWh/jaar [31]. Vastrecht wordt hierbij niet meegenomen, deze kosten vallen onder de aansluiting die in het bezit is van Waternet.

ⁱ De algemeen geadviseerde discontovoet van de Werkgroep Discontovoet [32]

Het is belangrijk om op te merken dat voor de zonnepanelen zelf geen prijs is opgenomen in het model. De investering in het zonnepark van Waternet is niet meegenomen in economische analyse, omdat deze los van het project wordt gerealiseerd en gefinancierd. In plaats van de investeringskosten wordt daarom een stroomprijs gekozen voor het 'inkopen' van de zonnestroom door het Power-to-X-systeem. Er is hierbij gerekend met de volledige opbrengst van het 8,7 MWp zonnepark, en de stroom die niet kan worden gebruikt door het Power-to-X-systeem wordt teruggeleverd aan het net. Binnen het systeem betekent dit dan het verkopen van de stroom voor dezelfde prijs als waarvoor deze is ingekocht, zodat er

netto geen kosten zijn, maar ook geen verdiensten. Daarnaast is aangenomen dat de stroom van het zonnepark achter de meter wordt ingekocht, zodat geen energiebelasting betaald hoeft te worden.

Uiteindelijk is voor alle producten een productieprijs berekend, die is vergeleken met een verkoopprijs (Tabel 8). Voor waterstof is dit 10 €/kg, een prijs die niet gestuurd is door de markt, maar per km overeenkomt met de prijs van benzine. Voor warmte is gebruik gemaakt van de prijzen die de autoriteit consument en markt rekent voor warmtelevering, exclusief btw [33]. In de uiteindelijke verkoopprijs is naast de prijs per GJ warmte ook het vastrecht verrekend. De aansluitbijdrage is met het aantal huizen vermenigvuldigd en vervolgens van de investeringskosten voor het warmtenet afgetrokken. Voor demiwater is een prijs van 1€/m³ aangehouden, een fractie lager dan de huidige prijs voor drinkwater in Vitens gebied [34].

TABEL 8 VERKOOPPRIJZEN VOOR DE VERSCHILLENDE PRODUCTEN

Product	Prijs (ex. btw)
Waterstof	10 €/kg
Warmte - prijs per eenheid	19 €/GJ
Warmte - vastrecht	244,5€/jaar
Warmte - eenmalige aansluitbijdrage	819,8€
Demiwater	1€/m ³

In principe worden alle kosten in het warmtesysteem doorberekend in de prijs van warmte, net als voor waterstof en demiwater. Echter, de kosten voor het watersysteem worden op basis van gebruikt volume verdeeld over de kosten voor demiwater en voor waterstofproductie. Daarbij komen de kosten het demiwaternet geheel voor rekening van het watersysteem, terwijl de kosten voor de CEDI installatie geheel toegeschreven worden aan het waterstofsysteem, aangezien de CEDI alleen water zuivert voor de elektrolyser.

3.5 Economische berekeningen

3.5.1 Totale systeem

In het model worden de kosten en baten van het Power-to-X-model berekend. De uitsplitsing van de verschillende onderdelen van de afzonderlijke systemen zijn beschreven in de daarbij behorende bijlagen (Bijlage I, Bijlage II, Bijlage III en Bijlage IV). Alle CAPEX kosten worden bij elkaar opgeteld om de totale investeringen te bepalen. Hetzelfde geldt voor de onderhoudskosten en de kosten voor elektriciteit (van het zonnepark en uit het net). De omzet (B) wordt uitgerekend door het vermenigvuldigen van de hoeveelheid geproduceerde warmte, waterstof en demiwater met de verkoopprijs zoals benoemd in Tabel 8. De netto opbrengst wordt dan bepaald door van de omzet de kosten voor onderhoud (OM) en elektriciteit (F) af te trekken. Dan kan de simpele terugverdientijd worden berekend door de investeringskosten te delen door de netto opbrengst per jaar:

$$PBT_{simple} = \frac{\text{Totale investeringen}}{(B - OM - F)}$$

Omdat er geen verdisontering van kosten in deze berekening wordt meegenomen, wordt deze terugverdientijd de 'simpele' terugverdientijd genoemd.

Productieprijs warmte, waterstof, demiwater

Hierna wordt bepaald wat de productieprijs van warmte, waterstof (met en zonder tankstation) en demiwater is, waarin de verdiscontering van geldstromen wordt meegenomen. Door deze prijs te bepalen, is een vergelijking met de gangbare verkoopprijs van deze producten mogelijk. De totale kosten van een systeemonderdeel worden uitgerekend als totale jaarlijkse kosten. Om deze berekeningen uit te voeren worden investeringen verdisconteerd over hun verwachte levensduur. Hierbij wordt gewerkt met een zogenoemde annuity factor/capital recovery factor die als volgt kan worden uitgedrukt:

$$\alpha = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-L_i}}$$

Met α de annuïteiten factor (geen eenheid), r de discontovoet in % en L de levensduur van het systeem(onderdeel). Deze annuity factor wordt vervolgens gebruikt om de investeringskosten voor een systeem om te rekenen naar een jaarlijkse kostenstroom. Wanneer hierbij de jaarlijkse onderhoudskosten en brandstofkosten worden opgeteld wordt een kostenindicatie per jaar verkregen:

$$Total\ cost\ year_i = \alpha \cdot CAPEX_i + OM_i + F_i$$

Met $Total\ cost\ year_i$ de totale jaarlijkse kosten voor een systeemonderdeel in €/jaar, $CAPEX_i$ de investeringskosten van een systeemonderdeel in €, OM_i de jaarlijkse onderhoudskosten in €/jaar en F_i de brandstofkosten (= elektriciteit) van het systeemonderdeel per jaar.

3.5.2 Kosten per woning voor warmte en demiwater

Daarnaast wordt berekend wat de kosten per woning zijn voor het installeren van het warmtesysteem (inclusief grote warmtepomp en warmtenet) en het deel van het watersysteem dat aan demiwater kan worden toegeschreven (wateropvangsysteem, waterberging, RO installatie, tweede leidingnet voor demiwater). Dezelfde berekening wordt gemaakt voor het onderhoud van deze systemen. Daarnaast wordt berekend wat de jaarlijkse brandstofkosten per woning worden in termen van elektriciteit, die voornamelijk voor de (grote, centrale) warmtepomp wordt gebruikt. Deze kosten komen dus niet voor rekening van de bewoner zelf, omdat deze al voor de warmte betaald. Ze moeten gezien worden als brandstofkosten voor de exploitant.

3.5.3 Kosten voor waterstof

Voor waterstof worden de kosten in termen van investeringen, onderhoud en elektriciteitskosten opgesplitst voor de productie van waterstof en de tankinfrastructuur. Tot de productie van waterstof behoren de elektrolyser en de eerste compressor (tot 200 bar). Bij de tankinfrastructuur hoort het transport naar het tankstation en de investeringen in het tankstation zelf.

3.6 Regelsysteem/Integratie

De opgewekte duurzame elektriciteit in het Power-to-X-systeem kan op verschillende manieren worden ingezet. In het model kan de keuze gemaakt worden om prioriteit te geven aan warmte of aan waterstofproductie.

3.6.1 Warmte als prioriteit

Wanneer de prioriteit gegeven wordt aan warmteproductie wordt de opgewekte energie ingezet om eerst de warmtebron te vullen. De maximale energie die hiervoor gebruikt wordt, hangt af van de maximale capaciteit van de warmtepomp en in hoeverre de bron al gevuld is. Daarbij wordt ook rekening gehouden met een vulpatroon voor de warme bron per maand, waarbij in de zomer een groter percentage van de bron wordt gevuld dan in het voorjaar, en

in de winter geen warmte aan de bron wordt toegevoegd. De berekening van de verwachte benodigde warmte in de bron per maand is beschreven in Bijlage II-*Warmtesysteem Power-to-X*.

Indien de warmtebron vol genoeg is, of wanneer er meer duurzame energie gegenereerd wordt dan de warmtepomp aankan, wordt de resterende energie gebruikt voor waterstofproductie. Ook bij de waterstofproductie moet rekening gehouden worden met de maximum capaciteit van de elektrolyser. Verdere details over het waterstofsysteem staan beschreven in Bijlage III-*Waterstof in Power-to-X*. Indien er meer energie is dan de elektrolyser aankan, wordt de resterende elektriciteit aan het net geleverd. Bij een prioriteit van warmte, wordt er geen rekening gehouden met een maximaal volume voor de opslag van waterstof en ook niet met de vraag naar waterstof. Dus indien geen waterstof beschikbaar is, terwijl er op dat moment wel een vraag is, zal waterstof moeten worden ingekocht door het tankstation.

3.6.2 Waterstof als prioriteit

Bij een prioriteit voor de waterstofproductie wordt er bij beschikbaarheid van elektriciteit eerst waterstof geproduceerd. Hierbij is weer rekening gehouden met de maximale capaciteit van de elektrolyser. Indien er nog energie overblijft na de waterstofproductie wordt deze ingezet voor het vullen van de warmtebron. Net als bij het geven van prioriteit aan warmte, wordt ook hier rekening gehouden met de maximale capaciteit van de warmtepomp en de hoeveelheid aanwezige warmte in de bron. Ook hier geldt dat de overgebleven elektriciteit kan worden terug geleverd aan het elektriciteitsnet. De productie van waterstof moet in deze configuratie altijd aan de vraag kunnen voldoen. Daarom is een minimum ingesteld voor de waterstofbuffertank. Wanneer de hoeveelheid waterstof onder dit minimum komt, en geen elektriciteit uit zon of wind beschikbaar is, wordt elektriciteit uit het net ingekocht om de waterstofbuffer op niveau te houden.

Daarnaast kan er bij een lage elektriciteitsprijs ook voor gekozen worden om elektriciteit te kopen uit het net om warmte en waterstof te produceren. De minimum elektriciteitsprijs kan voor warmte en waterstof apart worden ingesteld in als parameter. Wanneer er een leveringsplicht is voor warmte terwijl waterstof prioriteit is, kan het ook nodig zijn om stroom voor de warmtepomp uit het net te halen wanneer de warme bron niet vol genoeg is. Dit kan het model nog niet zelf bepalen, de maximale prijs voor stroom uit het net zal door de gebruiker in het bestand met parameters moeten worden opgehoogd tot er genoeg warmte wordt opgeslagen om de gehele periode te voorzien in de vraag. Daarnaast is er een mechanisme ingebouwd voor als de warme bron leeg zou raken, waarbij automatisch stroom uit het net wordt ingekocht als onvoldoende stroom uit duurzame energie beschikbaar is.

3.6.3 Het watersysteem

Na de berekening van de verdeling van de opgewekte energie wordt het watersysteem berekend, waarbij de opgevangen regen de input is. De hoeveelheid geproduceerde waterstof bepaalt in combinatie met de demiwatervraag hoeveel regenwater omgezet moet worden in demiwater. Er is hierbij vanuit gegaan dat het regenwater in de bodem wordt opgeslagen waardoor al het opgevangen regenwater kan worden gebruikt. De elektriciteit die nodig is voor het watersysteem is minimaal ten opzichte van het warmte- en waterstofsysteem, namelijk 0.1% van het totale energiegebruik in het Power-to-X-systeem. Deze elektriciteitsbehoefte is daarom niet meegenomen in de hiërarchie van het beslissingsmechanisme, maar kan wel worden berekend. Meer informatie over het watersysteem is te vinden in Bijlage IV- *Watersysteem – Power-to-X*. Ook zijn er waterkwaliteitsmetingen gedaan voor het afstromend water van een zonnepaneel, zie hiervoor Bijlage VI.

4 Scenario's

Het Power-to-X-model simuleert een energiesysteem voor een woonwijk, waarbij met zon, wind en regen in de behoefte aan warmte, elektriciteit, transport en water kan worden voorzien. Het Power-to-X-model is zo ingericht dat met aanpassing van input parameters, diverse systeemvarianten scenario's kunnen worden doorgerekend.

4.1 Scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit'

Het eerste scenario is gebaseerd op de wijk Rijnhuizen en het door Waternet op het WRK terrein te bouwen zonnepark.

De stroom van het zonnepark wordt daarbij niet direct aan de woningen geleverd. De woningen in de wijk en het zonnepark hebben ieder hun eigen netaansluiting. Het zonnepark levert direct stroom aan een elektrolyser en een warmtepomp. Het teveel aan stroom gaat het openbare elektriciteitsnet op. De zonnepanelen op de woningen in de wijk zijn op hun beurt niet gekoppeld aan de elektrolyser en de warmtepomp. Het teveel aan stroom geproduceerd door de zonnepanelen op de woningen gaat ook het openbare elektriciteitsnet op. En als er minder stroom door de zonnepanelen op de woningen wordt geproduceerd dan de vraag is, wordt deze stroom uit het openbare net betrokken.

De warmte wordt geproduceerd door een warmtepomp bij het zonnepark, die als bron het water uit het Lekkanaal gebruikt. Deze warmte wordt gebufferd in een aquifer. De warmte wordt geleverd aan de woningen. De woningen worden voorzien van warmte voor ruimteverwarming en tapwater via een 3 km lange pijplijn, met een buffervat voor tapwater in ieder huis. Dit buffervat bevat ook een verwarmingselement om het water in de tank eens per week boven de 60°C te brengen, in verband met legionellapreventie.

Waterstof wordt geproduceerd door een elektrolyser bij het zonnepark uit gedemineraliseerd water. De geproduceerde waterstof wordt via tube trailers aan een tankstation geleverd. Het tankstation wordt verondersteld een waterstofafname van 200 kg/dag te hebben.

Regenwater wordt opgevangen op de zonnepanelen van het zonnepark en op de woningen en gebufferd in een aquifer. Het regenwater wordt via een omgekeerde osmose installatie die bij het zonnepark staat, omgezet in gedemineraliseerd water. Dit demiwater wordt gebruikt voor de productie van waterstof en voor het gebruik in woningen voor de vaatwasser, wasmachine en toiletten, geleverd via een apart demiwater leidingennet.

De uitgangspunten in dit scenario zijn:

Bronnen

- 8,7 MWp zonnepark, met een oost-west oriëntatie, in totaal ruim 32.000 panelen.
- Regenwater opvang op alle panelen.
- De temperatuur van het Lekkanaal als bron voor de warmtepomp.

Omzetting

- Een 2.5 MW warmtepomp die warmte levert op 65°C met Lekwater als warmtebron aan de verdamperzijde.
De grootte van de warmtepomp is een compromis tussen de kosten van een warmtepomp en het opvangen van stroompieken. De keuze voor 65°C is gebaseerd op het kunnen leveren van een voldoende hoge temperatuur warmte aan de woningen, zie Bijlage V. Daarnaast wordt er vanuit gegaan dat de warme aquifer bron al is opgewarmd.
- Een 2,5 MW elektrolyser
De grootte van de elektrolyser is ook afgestemd op het opvangen van elektriciteitspieken, en niet op de waterstofvraag.
- Een 150 m³ per uur omgekeerde osmose installatie
De grootte van de omgekeerde osmose installatie is berekend op basis van de demiwater vraag voor waterstofproductie en gebruik in de woningen.

Vraag

- Warmtevraag gebaseerd op 900 woningen voor tapwater en ruimteverwarming
Zie Bijlage V. Van deze woningen zijn 450 nieuwbouw en de andere 450 renovatie, voor nieuwbouw geldt een warmtevraag van 11 GJ/jaar voor ruimteverwarming en 7,3GJ/jaar voor warm tapwater. Bij renovatie is de warmtevraag voor ruimteverwarming hoger, 19,7 GJ/jaar (zie Bijlage IIa). Het warmtenet is 3 km lang en bedient deze 900 huishoudens. De wijk Rijnhuizen zou in totaal uiteindelijk 1500 woningen kunnen omvatten. Maar aan de andere kant is er een kans dat minder woningen worden aangesloten dan nu is aangenomen. Om het effect van het aantal huizen op de werking en economie van het systeem te onderzoeken is de warmtevraag ook gebaseerd op 600 woningen en 1200 woningen. De verhouding nieuwbouw en renovatie blijft hierbij gelijk.
- Demiwater vraag voor 900 huishoudens en waterstofproductie
Het gaat om water voor vaatwasser, wasmachine en toiletten, totaal ca. 50 L/persoon/dag, zie Bijlage IVa. Voor waterstofproductie is 9 m³ per ton waterstof aan demiwater benodigd.
- Waterstofvraag
De waterstofproductie is niet gekoppeld aan de waterstofvraag. Er wordt wel een waterstof vraag van 200 kg per dag voor een tankstation aangenomen. Bepaald wordt hoeveel waterstof direct kan worden geleverd uit de productie en hoeveel waterstof geëxporteerd en geïmporteerd moet worden.

Regelsysteem

- Warmteproductie heeft prioriteit
In dit scenario ligt de prioriteit op de productie van warmte. Omdat er geen andere warmtebronnen zijn is het belangrijk de woonwijk altijd van warmte te kunnen voorzien. Er wordt dus altijd eerst gekeken of de bron al genoeg gevuld is alvorens elektriciteit voor waterstofproductie te gebruiken of terug te leveren aan het elektriciteitsnet.
- Geen inkoop van elektriciteit uit het elektriciteitsnet voor productie van warmte en waterstof
In het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit' is ervoor gekozen om geen stroom in te kopen uit het net. Alleen als de warme bron bijna leeg is, dan wordt er wel stroom ingekocht om de warme bron aan te vullen en warmte te kunnen leveren.

Inkoop van elektriciteit

- Elektriciteit wordt van het zonnepark ingekocht tegen 3,9 Eurocent/kWh, zonder BTW. De stroom wordt ingekocht achter de meter, zonder energiebelasting en netwerkkosten.
- Elektriciteit wordt van het openbare net ingekocht tegen de APX prijzen voor stroom uit 2016, plus energiebelasting en netwerkkosten.

De waarden van alle parameters in het scenario '*Wijk, zon, warmte prioriteit*' zijn weergegeven in Bijlage VIII.

4.2 Scenario '*Wijk, zon, waterstof prioriteit*'

In het scenario '*Wijk, zon, warmte prioriteit*' heeft de warmteproductie voorrang over de productie van waterstof. Als variant is doorgerekend dat de waterstofproductie prioriteit heeft, maar dat ook voldaan moet worden aan de warmtevraag. Ten opzichte van het scenario '*Wijk, zon, warmte prioriteit*' zijn daarbij de volgende aannames gewijzigd.

Vraag

- Waterstofvraag
De waterstofvraag van het tankstation (200 kg/dag) zit nu wel gekoppeld aan de productie via twee waterstofbuffers van 500 kg waterstof elk. Als de bufferinhoud van de 2 buffers gezamenlijk onder de negentig kilogram waterstof komt, wordt er automatisch elektriciteit uit het net ingekocht om waterstof te produceren. De waterstofbuffers zijn waterstoftubes, die met een tubetrailer eenvoudig over de weg aan- en afgevoerd kunnen worden. Als twee buffertanks van vijfhonderd kilogram vol zijn, wordt er één verkocht voor een ander tankstation of ander doeleinde en wordt weer een lege waterstofbuffer bijgeplaatst.

Regelsysteem

- Waterstof prioriteit
Dit betekent dat de productie van waterstof altijd de eerste prioriteit heeft. Er wordt dus altijd zoveel mogelijk waterstof geproduceerd, en pas als de elektrolyser op volle capaciteit draait gaat er ook stroom naar de warmtepomp. Als de warmtepomp ook op volle capaciteit aan staat, of er zit voldoende warmte in de bron, dan wordt er stroom aan het elektriciteitsnet terug geleverd.

Inkoop van elektriciteit

- Inkopen
Er wordt nu wel op diverse momenten elektriciteit van het openbare net ingekocht. De volgende uitgangspunten worden gehanteerd.
 - o Als de APX markt prijs (2016) onder de inkoopprijs van elektriciteit uit het zonnepark ligt (3,9 Eurocent/kWh) dan wordt er stroom ingekocht voor de productie van waterstof.
 - o Als de APX markt prijs onder de 5 Eurocent/kWh ligt dan wordt er stroom ingekocht voor warmteproductie
 - o Er wordt stroom ingekocht tegen de APX prijs, ongeacht de prijs, op die momenten dat er warmte of waterstof geproduceerd moet worden, omdat de warme bron leeg is of de waterstofbuffer onder de 90 kg komt.

In Bijlage IX zijn alle waarden van de input parameters voor dit scenario van '*Wijk, zon, waterstof prioriteit*' terug te vinden.

4.3 Scenario ‘Wijk, zon én wind’

In de vorige scenario's bestaat de input alleen uit stroom van het zonnepark. Bij Waternet bestaat al langere tijd de ambitie om op het WRK terrein ook windturbines te realiseren. Het effect van het bijplaatsen van windturbines wordt in dit scenario geanalyseerd. De windturbines leveren gezamenlijk meer elektriciteit dan het zonnepark, en zijn minder seizoensafhankelijk. Daardoor kan naast de productie van warmte ook veel meer waterstof geproduceerd gaan worden. Ten opzichte van het scenario ‘Wijk, zon, warmte prioriteit’ zijn de volgende aanpassingen gemaakt:

Bronnen

- Naast het zonnepark worden nu ook vijf windturbines van elk 3,2 MW toegevoegd aan het systeem. In Bijlage I is beschreven hoe de opbrengst van deze turbines wordt bepaald.

Omzetting

- Omdat er meer windenergie is, kan er ook meer waterstof worden geproduceerd. Daarom wordt de elektrolyser capaciteit vergroot tot 10 MW.
- De elektriciteitsinfrastructuur moet door de toevoeging van windturbines worden uitgebreid. Dit is ingeschat op 750.000 euro.

Vraag

- Als er meer waterstof geproduceerd wordt is het ook belangrijk dat er een afzet is voor deze waterstof. De waterstofvraag wordt daarom evenredig verhoogd met de opbrengst uit wind, naar een waterstofvraag van 1.400 kg per dag (gelijk aan 7 tankstations).

Overige instellingen

- Verondersteld is dat de investeringskosten voor de elektrolyzers en waterstoftankstations door schaalvoordelen goedkoper worden. Hierbij geldt een schaalfactor van 0,9 voor deze installaties, dit betekent dan bij een tienmaal zo grote installatie oorspronkelijke prijs niet met tien wordt vermenigvuldigd, maar met $10^{0,9} = 7,9$. Bij een tweemaal zo grote installatie zou dan gelden dat de oorspronkelijke prijs wordt vermenigvuldigd met $2^{0,9} = 1,9$. Hoe groter de installatie wordt, hoe groter dus ook de schaalvoordelen.

In Bijlage X zijn alle waarden van de input parameters voor dit zon én wind scenario terug te vinden.

4.4 Scenario ‘Stadsdeel’

Elke gemeente in Nederland moet een klimaatbeleid formuleren en meer specifiek de komende tijd een warmteplan maken voor de bebouwde omgeving. Het is daarom interessant om te onderzoeken of het Power-to-X-concept op een gemeentelijke schaal ook een belangrijke rol zou kunnen spelen in de verdere verduurzaming. Daarvoor is een eerste verkenning uitgevoerd. Het uitgangspunt is een stedelijk gebied met 10.000 woningen, nieuwbouw en renovatie van bestaande woningen, met een verdeling van 7.500 gerenoveerde woningen, en 2.500 nieuwbouwwoningen.

Dit scenario is zoveel mogelijk opgebouwd zoals beschreven in het boek *Solar Power to the People* [4]. Daarin is een woonwijk of stadsdeel beschreven met een volledige energiebalans van warmte, elektriciteit, demiwater en mobiliteit, zoals eerder getoond in Figuur 7, maar dan op grotere schaal. Warmte wordt voorzien vanuit het warmte-opslag systeem met behulp

van een zonnepark. De watervoorziening bestaat deels uit tot demiwater gezuiverd regenwater, en deels uit extern aangeleverd drinkwater door het drinkwaternet. De elektriciteitsbehoefte voor verlichting en apparaten komt van de zonnepanelen op de woningen. De mobiliteitsbehoefte is half batterij-elektrisch en half brandstofcel-elektrisch, waarbij de elektriciteit voor het opladen uit zon en windenergie wordt geleverd. In dit scenario worden voor warmte, demiwater en warmtevraag en -aanbod door de seizoenen heen gematched op basis van uurdata. Voor de elektriciteitsvraag wordt met jaarcijfers gerekend.

De volgende aanpassingen ten opzichte van het scenario *'Wijk, zon, warmte prioriteit'* zijn gedaan:

Bronnen

- 60MWp aan zon door een zonnepark van 30MWp in combinatie met zonnepanelen op de woningen (3 kWp gemiddeld per woning). Dit komt neer op ruim 225.000 zonnepanelen.
- Ten behoeve van het stedelijk gebied komen 8 windmolens van 3,2 MW te staan.

Omzetting

- De warmtepomp heeft een capaciteit van 20 MW en staat bij de zonnepanelen.
- De elektrolyser heeft een capaciteit van 8 MW en staat bij de windturbines.
- Een 1500 m³ per uur omgekeerde osmose installatie.
- De elektriciteitsinfrastructuur is ingeschat op 1 miljoen euro.

Vraag

- 10.000 woningen, waarvan 7.500 gerenoveerd en 2.500 nieuwbouw.
- Het warmtetransportnet heeft een lengte van 15 km
- Het demiwatertransport net heeft een lengte van 15 km
- De waterstofvraag voor mobiliteit wordt verondersteld 1600 kg waterstof per dag te zijn, voldoende voor de mobiliteitsvoorziening van de helft van alle woningen.
- Per jaar heeft een woning een elektriciteitsvraag van 3.000 kWh [9], in totaal 30 miljoen kWh, en voor het laden van de elektrische auto's is nogmaals 2.600 kWh * 5.000 = 13 miljoen kWh nodig [4].

Overige instellingen

- Naast de elektrolyzers en waterstoftankstations geldt nu ook voor de warmtepomp de schaalfactor van 0,9.

Belangrijk om op te merken is dat de investeringen in wind en zon in dit scenario, net als in de andere scenario's, niet zijn meegenomen, maar in de elektriciteitsprijs zijn verrekend. Dit maakt het scenario beter te vergelijken met de overige scenario's, maar is in werkelijkheid wel minder realistisch.

In Bijlage XI zijn alle waarden van de inputparameters voor dit scenario terug te vinden.

4.5 Overzicht

In Tabel 9 zijn de belangrijkste uitgangspunten per scenario samengevat.

TABEL 9 OVERZICHT VAN DE BELANGRIJKSTE UITGANGSPUNTEN PER SCENARIO

Bronnen	Wijk, zon, warmte prioriteit 8,7 MWp zon	Wijk, zon, waterstof prioriteit 8,7 MWp zon	Zon én Wind 8,7 MWp zon 5x 3,2MW wind	Stadsdeel – zon en wind 60MWp zon 8x 3,2MW wind
Omzetting	2,5 MW elektrolyser 2,5 MW warmtepomp	2,5 MW elektrolyser 2,5 MW warmtepomp	10 MW elektrolyser 2,5 MW warmtepomp	8 MW elektrolyser 20 MW warmtepomp
Vraag	900 woningen warmte en demiwater tankstation 200 kg/dag	900 woningen warmte en demiwater tankstation 200 kg/dag	900 woningen warmte en demiwater 7x tankstation 200 kg/dag	10,000 woningen warmte en demiwater, elektriciteit 8x tankstation 200 kg/dag
Regelsysteem	Warmte prioriteit	Waterstof prioriteit	Warmte prioriteit	Warmte prioriteit
Elektriciteitsprijs	Zonnepark: 3,9 €ct/kWh Net: APX 2016	idem	idem	idem

5 Resultaten

Voor de drie scenario's zijn voor een periode van vijf jaar (2010-2014) op uurbasis simulaties uitgevoerd. De resultaten van deze simulaties geven inzicht in de energie- en waterbalans én de economische performance van het Power-to-X-systeem.

5.1 Scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit'

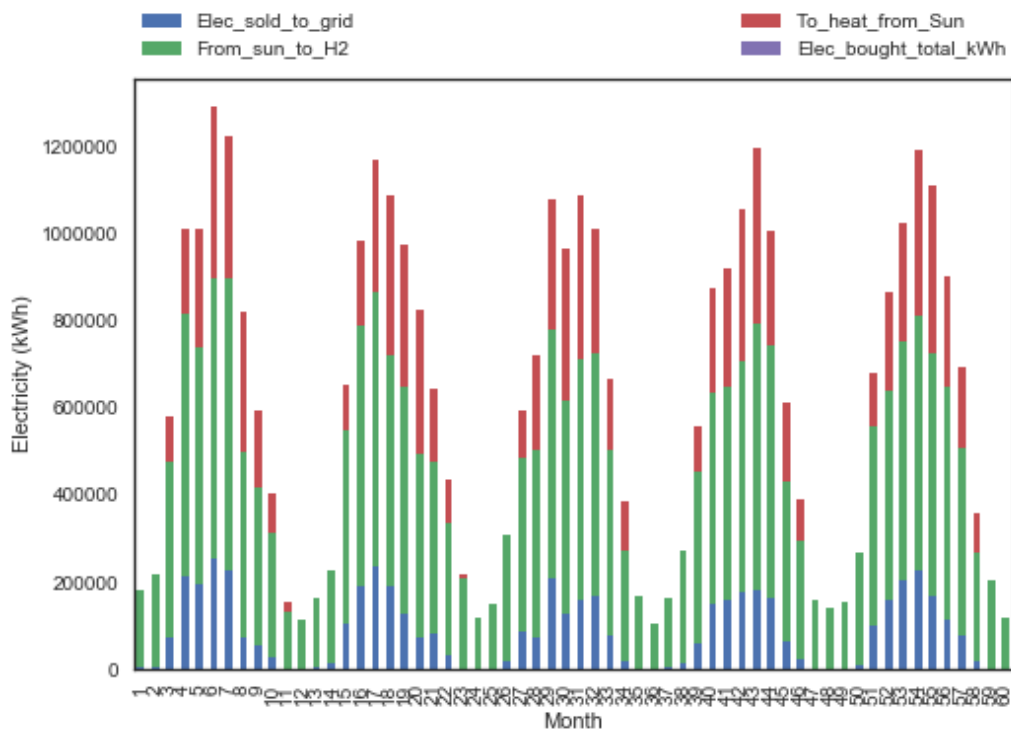
Het wijk, zon, warmteprioriteit scenario omvat een woonwijk van 900 woningen in Rijnhuizen-Nieuwegein en een zonnepark van 8,7 MWp op enkele kilometers afstand gelegen op het WRK terrein. De uitgangspunten en inputgegevens zijn te vinden in hoofdstuk 4.1 en Bijlage VIII.

5.1.1 Elektriciteitsbalans

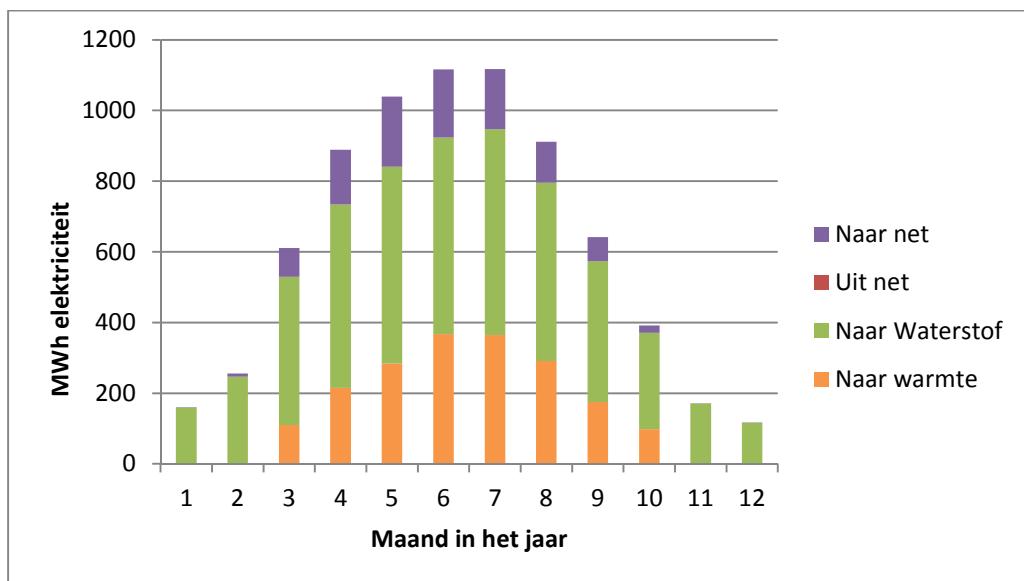
Voor de elektriciteitsproductie van het zonnepark is voor ieder uur in een periode van vijf jaar bepaald waar de elektriciteit aan wordt besteed. De elektriciteit wordt besteed aan warmteproductie, aan waterstofproductie en het dan nog resterende deel van de elektriciteitsproductie is teruggeleverd aan het openbare elektriciteitsnet. In Figuur 14 is per maand, voor de vijfjaarsperiode, te zien hoe de elektriciteit is verdeeld over warmte, waterstof en teruglevering aan het elektriciteitsnet. Figuur 15 en Tabel 10 geven ook de maandelijkse verdeling van de elektriciteitsproductie, maar hier betreft het voor elke maand een gemiddelde over vijf jaar.

Op basis van de resultaten kan het volgende worden vastgesteld:

- De verdeling van de elektriciteitsproductie door het jaar heen kent een grote seizoens-fluctuatie. In de maand juli wordt bijna 10 keer zoveel elektriciteit geproduceerd met het zonnepark als in de maand december.
- De jaarlijkse elektriciteitsproductie van het zonnepark van 7.400 MWh, gaat voor meer dan de helft, namelijk 60%, naar de waterstofproductie. Een kwart, 25%, gaat naar de warmteproductie en 15% wordt teruggeleverd aan het elektriciteitsnet.
- De elektriciteitsconsumptie van de RO (omgekeerde osmose) installatie is verwaarloosbaar (0,1%) evenals de elektriciteitsconsumptie van de pompen in het warmtenet (0,5%). Beide zijn daarom niet in de elektriciteitsverdeling meegenomen.
- In vier wintermaanden wordt geen elektriciteit van het zonnepark aan warmteproductie besteed en bijna geen elektriciteit teruggeleverd. Alle elektriciteit gaat naar waterstofproductie. In de andere maanden is sprake van zowel warmteproductie, waterstofproductie als teruglevering aan het net.



FIGUUR 14 ELEKTRICITEITSVERDELING SCENARIO 'WIJK, ZON, WARMTE PRIORITEIT' 2010-2014



FIGUUR 15 ENERGIEVERDELING GEMIDDELD PER MAAND (OVER VIJF JAAR) SCENARIO 'WIJK, ZON, WARMTE PRIORITEIT'

TABEL 10 ENERGIEVERDELING PER MAAND EN TOTAAL SCENARIO 'WIJK, ZON, WARMTE PRIORITEIT' IN MWH

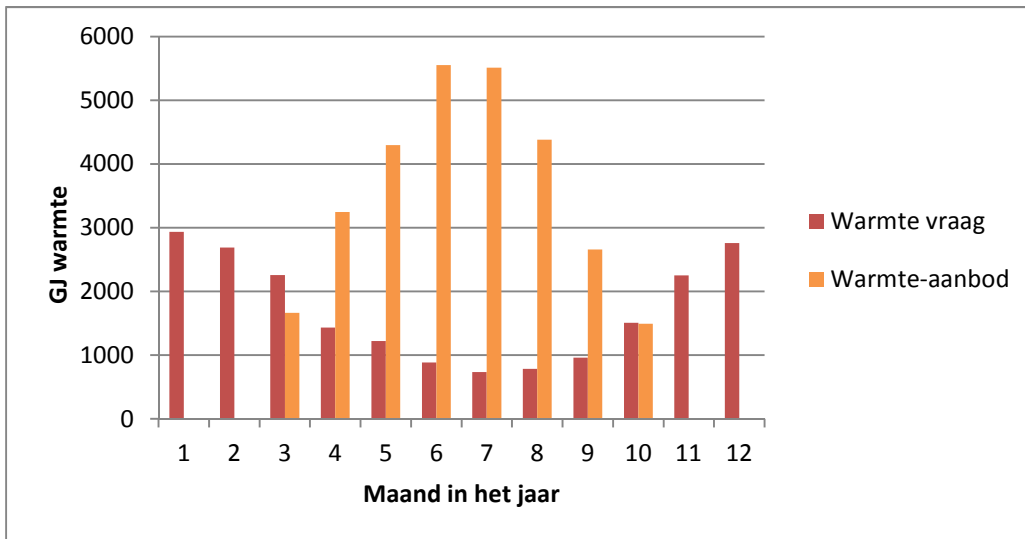
	Naar net	Naar Waterstof	Naar warmte
Januari	1	160	0
Februari	10	246	0
Maart	82	419	110
April	155	519	215
Mei	198	557	284
Juni	192	557	367
Juli	171	582	364
Augustus	116	505	290
September	68	397	176
Oktober	21	272	99
November	0	171	0
December	0	116	0
Totaal	1.013	4.503	1.905

5.1.2 Warmtebalans

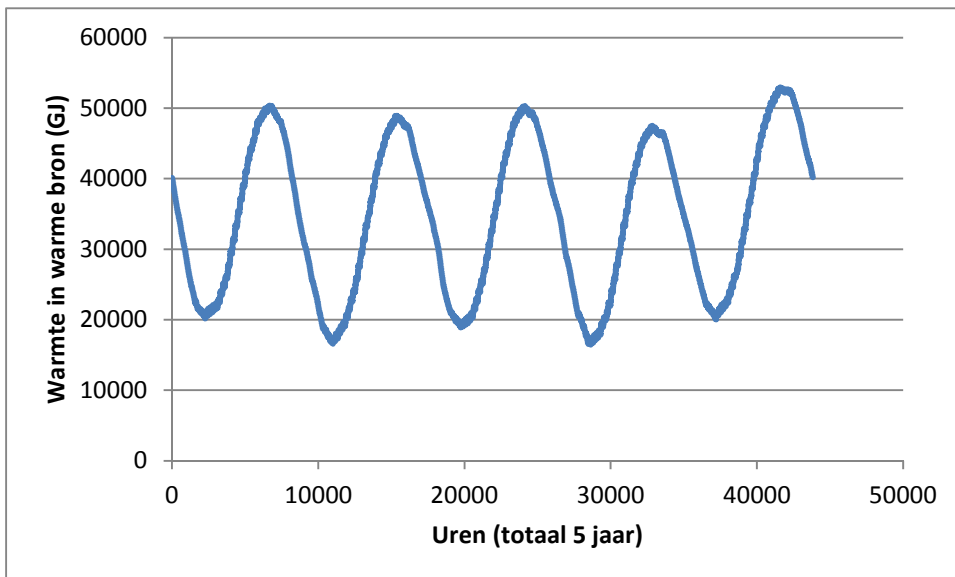
In totaal wordt per jaar zo'n 1.900 MWh van de elektriciteit uit het zonnepark besteed aan de productie van warmte. Deze warmte wordt vooral in de zomermaanden geproduceerd en opgeslagen in een aquifer. In de wintermaanden wordt de warmte onttrokken aan het aquifer om vervolgens aan de woningen te worden geleverd, zie Figuur 16. Het is fraai te zien hoe met een dergelijk Power-to-X-systeem de seizoens-onbalans tussen zonne-energieproductie en warmtevraag kan worden opgelost.

Op basis van de resultaten kan het volgende worden vastgesteld:

- In totaal wordt 1.900 MWh in warmte omgezet. De warmtepomp met als bron de temperatuur van het Lekkanaal water, heeft gemiddeld een C.O.P (coëfficiënt of performance) van 4,2. Dit betekent dat in totaal 28,8TJ aan warmte wordt geproduceerd die moet worden opgeslagen in de aquifer.
- Er hoeft geen elektriciteit uit het net te worden ingekocht voor warmteproductie. Het zonnepark levert dus alle stroom voor de warmteproductie met de warmtepomp.
- De warmtebron is over de jaren heen goed in evenwicht (zie Figuur 17). In de zomermaanden wordt de warme bron gevuld en in de wintermaanden wordt er warmte aan onttrokken, zie Figuur 16.
- De warmtevraag van de 900 woningen per jaar is 20,4 TJ. Er is 28,8 TJ aan warmte in het aquifer gepompt, hetgeen betekent dat tijdens opslag en transport 30% warmteverlies optreedt.



FIGUUR 16 AANTAL GJ AAN WARMTEVRAAG EN WARMTE-AANBOD PER MAAND, GEMIDDELD OVER 5 JAAR

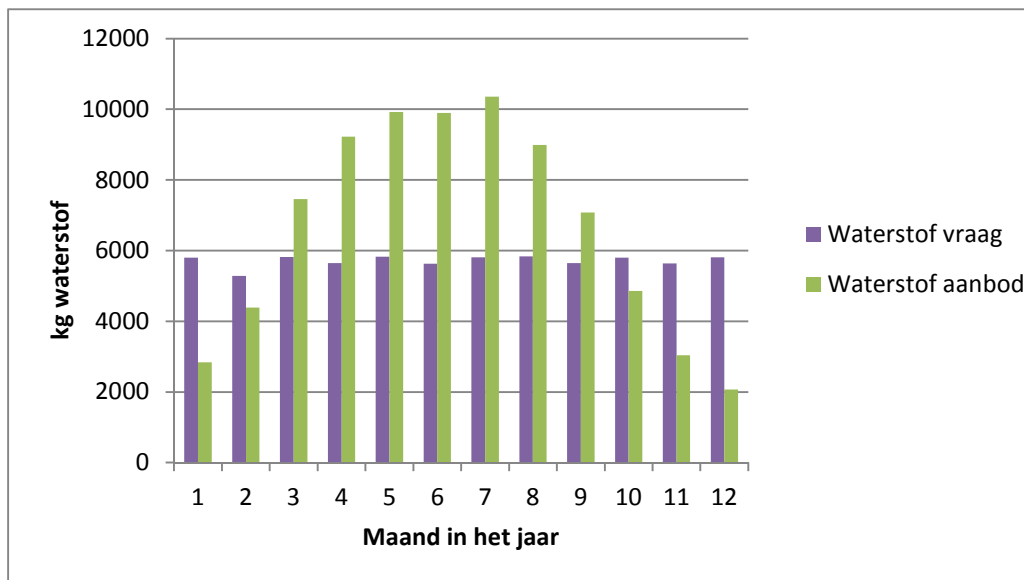


FIGUUR 17 WARMTE IN WARMTE BRON OVER DE TIJD

5.1.3 Waterstofbalans

In totaal wordt per jaar zo'n 4.500 MWh aan zonne-energie gebruikt voor de productie van waterstof. De geproduceerde waterstof wordt per tube trailer naar een waterstoftankstation gereden. Het waterstoftankstation levert zo'n 200 kg waterstof per dag aan waterstofbrandstofcel voertuigen. Dit is zomer en winter hetzelfde, terwijl de waterstofproductie door elektriciteit uit het zonnepark veel hoger is in de zomer dan in de winter. Er is een duidelijke onbalans tussen productie van waterstof en consumptie van waterstof, zoals blijkt uit Figuur 18. Door verkoop van waterstof in de zomer aan andere partijen en inkoop van waterstof in de winter van andere partijen, kan het waterstoftankstation deze onbalans opheffen. Op basis van de resultaten kan het volgende worden vastgesteld:

- Er wordt 4.500 MWh aan elektriciteit gebruikt voor de productie van waterstof. Daarmee wordt ongeveer 80.000 kg waterstof per jaar geproduceerd en opgeslagen onder een druk van zo'n 200 bar.
- De waterstofvraag bij een tankstation is zo'n 200 kg per dag door de week en 126 kg per dag in het weekend. In totaal is de waterstofvraag 70.000 kilo per jaar.
- De productie van waterstof is zo'n 10.000 kilo meer dan de vraag naar waterstof, maar in de wintermaanden is er een tekort aan waterstofproductie en in de zomermaanden een overschot.
- Het tekort aan waterstof is vooral in de wintermaanden. Op de totale vraag gaat het om een tekort van 16%, waarbij het verschil tussen vraag en aanbod op maandbasis is berekend.
- Balancering van vraag en aanbod van waterstof vindt plaats door import en export van waterstof door middel van tube trailers. De waterstof kan worden verkocht aan andere partijen, zoals andere waterstof tankstations. De waterstof kan worden ingekocht van waterstofleveranciers, zoals Linde en Air Liquide. In alle gevallen zou er naar moeten worden gestreefd om groene waterstof in te kopen.



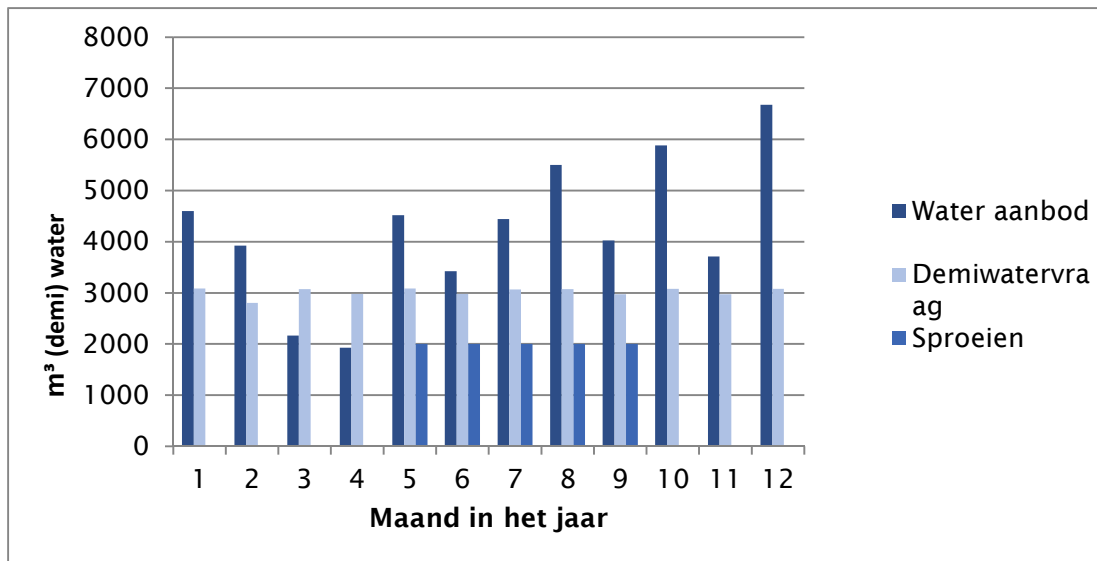
FIGUUR 18 WATERSTOF AANBOD EN VRAAG PER MAAND, GEMIDDELD OVER 5 JAAR

5.1.4 Waterbalans

Op zowel de zonnepanelen van het zonnepark als ook de daken van woningen wordt regenwater opgevangen. Het regenwater wordt opgeslagen in een aquifer in de grond en daaruit opgepompt en via een RO installatie in demiwater omgezet, voor huishoudelijk gebruik in vaatwassers, wasmachines en toiletten en voor gebruik als grondstof voor waterstofproductie. De hoeveelheid regenwater die neervalt, kent een sterk fluctuerend patroon door het jaar heen. Het gebruik van demiwater in huishoudens is echter door het jaar heen vrij constant. Het blijkt dat er een jaarlijks overschot van regenwater is. Dit overschot aan regenwater kan bijvoorbeeld ingezet worden voor het sproeien tijdens droogte. Op basis van de resultaten kan het volgende worden vastgesteld:

- De opvang van regenwater op de zonnepanelen bedraagt 34.000 m³ per jaar. De opvang van regenwater op de daken bedraagt 17.000 m³ per jaar. In totaal wordt 51.000 m³ regenwater opgevangen.

- De vraag naar demiwater voor huishoudelijk gebruik in vaatwassers, wasmachines en toiletten is 36.000 m³ per jaar. Terwijl de vraag naar demiwater voor waterstofproductie slechts een fractie daarvan is, namelijk 720 m³ per jaar. Met verliesfactoren meegerekend is in totaal 40.800 m³ regenwater nodig.
- Gemiddeld in een jaar is er een overschot van 10.000 m³ regenwater. Dit overschot wordt in de maanden mei tot en met september tijdens droge perioden gebruikt voor besproeiing van gewassen en bomen (zie Figuur 19).
- Het surplus aan regenwater zou ook kunnen worden omgezet in demiwater voor gebruik in autowasstraten, kleding reiniging, in accu's of voor andere toepassingen.



FIGUUR 19 REGENWATEROPSLAG EN GEBRUIK- SCENARIO WIJK, ZON - WARMTE

5.1.5 Kosten en Baten Power-to-X-systeem

Het Power-to-X-systeem produceert en levert warmte aan woningen, waterstof aan brandstofcel-waterstof voertuigen en demiwater aan woningen en voor de productie van waterstof. De opbrengsten van dit systeem bestaan dus uit de verkoop van warmte, waterstof en demiwater. De kosten van het Power-to-X-systeem omvatten de investeringen, onderhoudskosten en de kosten voor inkoop van elektriciteit uit het zonnepark. De investeringen in het zonnepark vormen dus geen onderdeel van de investeringen in het Power-to-X-systeem.

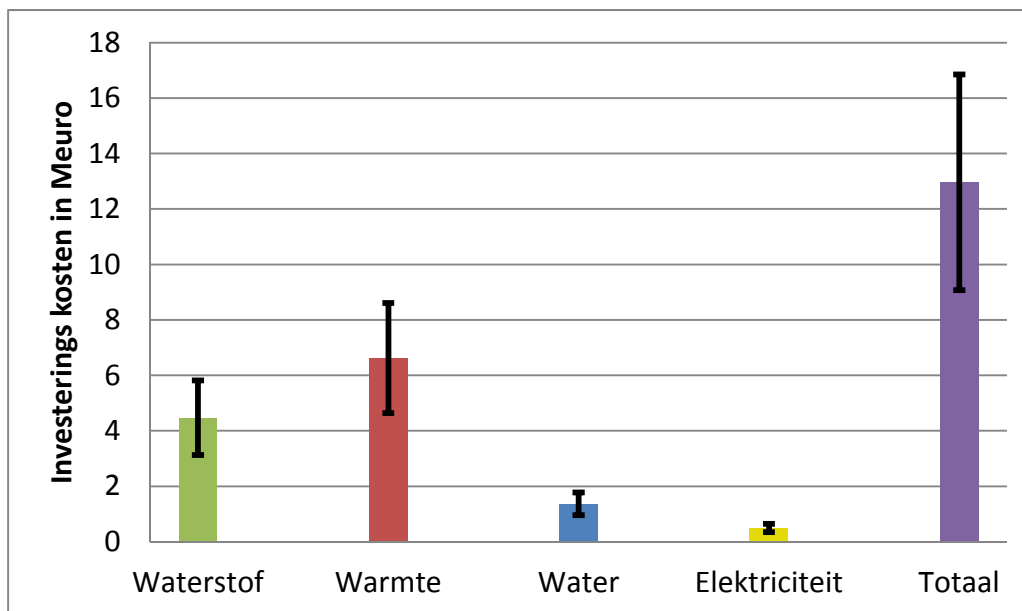
Alle economische inputgegevens zijn terug te vinden in de bijlagen van de verschillende deelsystemen, zie Bijlage II d, Bijlage III c en Bijlage IV c. Deze inputgegevens zijn afkomstig uit literatuur, informatie van websites, van fabrikanten of van experts. De inputgegevens zijn in de meeste gevallen niet gebaseerd op offertes en kennen derhalve nog een onzekerheidsmarge van 30%.

De investeringen in het Power-to-X-systeem zijn weergegeven in Tabel 11 en Figuur 20. De totale investeringen bedragen 13,7 miljoen Euro (M€), met een onzekerheid van 30%. Het warmtesysteem neemt 53% van de investeringen voor zijn rekening, het waterstofsysteem 33 %, het watersysteem 10 % en het elektriciteitssysteem 4%.

De jaarlijkse onderhoudskosten zijn bepaald op basis van een onderhoudspercentage per systeemonderdeel, en zijn gemiddeld 2% van de investeringskosten, een bedrag van 275.000 € per jaar.

TABEL 11 INVESTERINGEN POWER-TO-X-SYSTEEM

	Totaal	Onderhoud + transport
Warmteproductie, opslag, transport, distributie en afgifte	7,4 M€	80 k€
Waterstof productie, opslag en waterstoftankstation	4,5 M€	180 k€
Regenwater opvang, opslag, demiwaterproductie, transport en distributie	1,3 M€	10 k€
Elektriciteitsinfrastructuur binnen het systeem	0,5 M€	5 k€
TOTAAL Power-to-X-systeem investeringen	13,7 M€	
Onderhoudskosten per jaar		275 k€/jaar



FIGUUR 20 VERDELING INVESTERINGSKOSTEN OVER DE DEELSYSTEMEN - SCENARIO WIJK, ZON- WARMTE PRIORITEIT

De inkomsten van het Power-to-X-systeem zijn weergegeven in Tabel 12. De totale netto inkomsten per jaar bedragen zo'n 1,15 miljoen Euro. De inkomsten komen voor 47% uit de verkoop van warmte, voor 50% uit de verkoop van waterstof en voor 3% uit de verkoop van demiwater. De netto inkomsten zijn berekend door van de bruto inkomsten (geleverde warmte maal gemiddelde verkoopprijs) de inkoopkosten voor elektriciteit uit het zonnepark af te trekken.

Naast de netto inkomsten per jaar is er bij de levering van warmte nog een eenmalige inkomstenpost, de aansluitbijdrage die de ontwikkelaar en uiteindelijk de huiseigenaar moet betalen aan degene die het warmtesysteem aanlegt (zie ook 3.4). Deze inkomsten zijn eenmalig, en kunnen dus van de investeringen worden afgetrokken. Omdat de elektriciteit van het zonnepark die niet wordt gebruikt voor dezelfde prijs wordt 'verkocht' als dat deze wordt ingekocht, zijn de kosten daarvan niet meegenomen bij de inkomsten. Voor het overzicht is dit onderdeel wel opgenomen in de tabel.

TABEL 12 INKOMSTEN POWER-TO-X-SYSTEEM

	Warmte	Waterstof	Demiwater	Elektriciteit	TOTAAL
Geleverd per jaar	20,4 TJ	69.000 kg /11.000 kg	36.000m ³	1.013MWh	
Gemiddelde verkoop prijs	29,8€/GJ	10€/kg en 6 €/kg	1€/m ³	- €/MWh	
Bruto Inkomsten per jaar	610 k€/jr	750 k€/jr	40 k€/jr	- k€/jr	1.400 k€/jr
Inkoop elektriciteit uit zonnepark	1.900MWh	4.500MWh	-MWh	1.013MWh	
Gemiddelde inkoop prijs elektriciteit	39€/MWh	39€/MWh	39€/MWh	- €/MWh	
Inkoopkosten elektriciteit uit zonnepark per jaar	75 k€/jr	175k€/jr	-k€/jr	- k€/jr	250 k€/jr
Netto Inkomsten per jaar	535k€/jr	575k€/jr	40k€/jr	- k€/jr	1.150 k€/jr
Aansluitbijdrage, eenmalige inkomsten	740k€/jr				

Op basis van kosten en baten van het Power-to-X-systeem is nu een simpele terugverdientijd uit te rekenen. Hiervoor wordt van de investeringen de eenmalige aansluitbijdrage voor warmte afgetrokken, en deze wordt vervolgens gedeeld door de netto-inkomsten minus de onderhoudskosten per jaar. De simpele terugverdientijd komt hiermee uit op zo'n 15,5 jaar.

5.1.6 Warmte kosten en baten per woning

Het Power-to-X-systeem voorziet woningen in de warmtevraag op ca. 50°C middels een warmtenet. Hiervoor moet een warmtenet worden aangelegd waarop alle woningen worden aangesloten, deze kosten moeten door de exploitant worden betaald. Een bewoner in het Power-to-X-project betaalt hiervoor een eenmalige aansluitbijdrage, en verder wordt warmte geleverd volgens de warmtewet van ACM [33] en het zogenaamde 'Niet-Meer-Dan-Anders'-principe. In Tabel 13 zijn de kosten en baten per woning (i) voor de exploitant van Power-to-X, (ii) voor een bewoner die warmte krijgt van Power-to-X en (iii) voor een bewoner in een huis met een gasaansluiting naast elkaar gezet. Voor een nieuwbouwwoning geldt een warmtevraag van 18,3 GJ/jaar, voor renovatie 27 GJ/jaar. Op basis van de resultaten kan het volgende worden vastgesteld:

- De kosten voor een exploitant zijn bij het Power-to-X-systeem €8.200, maar de kosten voor onderhoud en elektriciteit voor de warmtepomp zijn samen 170 €/jaar, terwijl een bewoner ongeveer 600-750 €/jaar betaalt. Op deze manier kan de investering worden terugverdiend, want de productieprijs is met 25.7 €/GJ later dan de verkoopprijs en de kosten per woning zijn 580 €/jr. Er zou ook voor kunnen worden gekozen om in plaats van de door ACM opgegeven maximumprijs voor warmte [33], een lagere warmteprijs aan te bieden aan de bewoners van Power-to-X, zolang dit nog binnen de marge past.
- De totale kosten per woning per jaar zijn voor een bewoner die warmte ontvangt van het Power-to-X-systeem 684-850€/jr. Een bewoner met gasaansluiting betaalt 770-880 €/jr. Een gerenoveerde woning heeft meer warmte nodig dan een nieuwbouwwoning, en dit is terug te zien in de prijs. Echter, in beide gevallen is aansluiting op het Power-to-X-systeem goedkoper dan een gasaansluiting.

TABEL 13 WARMTE KOSTEN EN BATEN PER WONING, ALLEN ZONDER BTW

	Exploitant – PtX (i)	Bewoner – PtX – warmte ^a (ii)		Bewoner – gas ^b (iii)	
		Nieuwbouw	Renovatie	Nieuwbouw	Renovatie
Investeringskosten per woning	8.200 €	820 €	820 €	1.277€	
Installaties in de woning		660 €	660 €	1.660€	1.660€
Onderhoudskosten per woning	90 €/jr	-	-	80€/jr	80€/jr
Vastrecht per woning	-	245€/jr	245€/jr	145€/jr	145€/jr
Soort 'brandstof'	<i>elektriciteit</i>	<i>warmte</i>	<i>warmte</i>	<i>gas</i>	<i>gas</i>
Brandstofkosten per woning	85 €/jr	350€/jr	515€/jr	355€/jr	475€/jr
Productieprijs	25,7 €/GJ	37,3€/GJ	31,4€/GJ	42,0€/GJ	32,5€/GJ
Totale kosten per woning per jaar	585 €/jr	685 €/jr	850 €/jr	770€/jr	880€/jr

^a De kosten die hier genoemd staan zijn gebaseerd op of komen overeen met 3.4. Alleen de kosten voor het warm tapwater vat van 660 euro [35] zijn toegevoegd.

^b Een analyse van deze kosten inclusief bronnen is terug te vinden in Bijlage II f

De kosten en baten voor warmte zijn ook bepaald voor een Power-to-X-project met 600 of 1200 woningen. In dit geval zijn alle andere uitgangspunten hetzelfde gebleven, maar is alleen de warmtevraag aangepast. Indien meer huizen bediend worden vanuit het Power-to-X-systeem gaat de prijs voor warmte omlaag met 20% naar 20,5€/GJ. Bij 600 woningen stijgt de prijs voor warmte met 40% naar 36,0 €/GJ (zie Tabel 14). Deze analyse laat zien dat het van belang is om zoveel mogelijk woningen aan te sluiten op het warmtesysteem, en 600 woningen is dan te weinig. Ook technisch gezien is het bij een klein aantal woningen lastig om te gewenste aflevertemperatuur te halen, zie Bijlage V. Er zal naar gestreefd moeten worden om de 900 woningen daadwerkelijk te halen om het warmte-deel van het Power-to-X-concept te laten slagen.

TABEL 14 KOSTEN EN BATEN WARMTE BIJ VERSCHILLENDE WIJKGROOTTES

	Exploitant – PtX 900 woningen	Exploitant – PtX 600 woningen	Exploitant – PtX 1200 woningen
Investeringskosten per woning	8.200 €	11.630 €	6.500 €
Onderhoudskosten per woning per jaar	90 €/jr	125 €/jr	70 €/jr
Brandstofkosten per woning per jaar	85 €/jr	85 €/jr	85 €/jr
Productieprijs	25,7 €/GJ	36,0 €/GJ	20,5€/GJ
Totale kosten per woning per jaar	585 €/jr	820 €/jr	465 €/jr

5.1.7 Demiwater kosten en baten per woning

Naast warmte, voorziet het Power-to-X-systeem ook in een deel van het huishoudelijk water in de vorm van demiwater voor onder andere vaatwassers en wasmachines. Opgevangen regenwater wordt hiervoor opgeslagen in de ondergrond en middels een omgekeerde osmose installatie zo ver gezuiverd dat water van demiwaterkwaliteit wordt verkregen. Dit water wordt middels een extra waterleiding naar de woningen gebracht. Een bewoner betaald hiervoor in principe niet meer dan voor gewoon drinkwater, ca. 1,0 €/m³. Voor de exploitant van het demiwater-systeem zijn de kosten 2,1€/m³ (zie Tabel 15). De kosten

liggen dus hoger dan de baten in dit deelsysteem, dit onderdeel moet dan ook als een proef worden gezien en meer in het licht van andere maatschappelijke effecten. Het geproduceerde water is van hogere kwaliteit dan drinkwater, maar hier kun je de afnemer niet voor laten betalen. In de testopzet kan verder worden uitgezocht wat de precieze besparingen zijn in zeep, de levensduur van apparaten, en de milieu-impact. Pas dan kan echt worden vastgesteld of het iets oplevert een dergelijk systeem op andere plekken uit te rollen.

TABEL 15 KOSTEN EN BATEN DEMIWATER PER WONING – SCENARIO ‘WIJK, ZON, WARMTE PRIORITEIT’

	Exploitant – PtX	Bewoner – Ptx
Investeringskosten per woning	1.500 €	- €
Onderhoudskosten per woning per jaar	10 €/jr	- €/jr
Elektriciteitskosten per woning per jaar	1 €/jr	- €/jr
Waterkosten per woning per jaar	- €/jr	40 €/jr
Productieprijs	2,1 €/m ³	1,0 €/m ³
Totale kosten per woning per jaar	85 €/jr	40 €/jr

5.1.8 Waterstofproductie en tankkosten

De waterstof die geproduceerd wordt met het Power-to-X-systeem wordt gebruikt om een tankstation mee te bevoorraden. Het overschot aan waterstof wordt ook verkocht voor dit doeleinde, voor 6,0€/kg de prijs die het kost om waterstof te produceren (zie Tabel 16, onder waterstofproductie). Voor het produceren van waterstof zijn onder andere een elektrolyser en een compressor tot 200 bar nodig. Het transport naar het tankstation en de kosten voor het tankstation zelf zijn onder ‘tanken’ berekend. Deze kosten staan samengevat in Tabel 16.

Het produceren en comprimeren van de waterstof tot 200 bar kost in het scenario ‘Wijk, zon en warmte prioriteit’ 6,0€/kg, en voor de tankinfrastructuur en het transport is de prijs 3,4€/kg waterstof. De totale productieprijs voor de hele keten is 9,4€/kg. Het produceren van waterstof neemt dus 64% van de totale productieprijs voor zijn rekening, en de tankinfrastructuur de overige 36%.

TABEL 16 KOSTENOVERZICHT WATERSTOF – SCENARIO ‘WIJK, ZON, WARMTE PRIORITEIT’

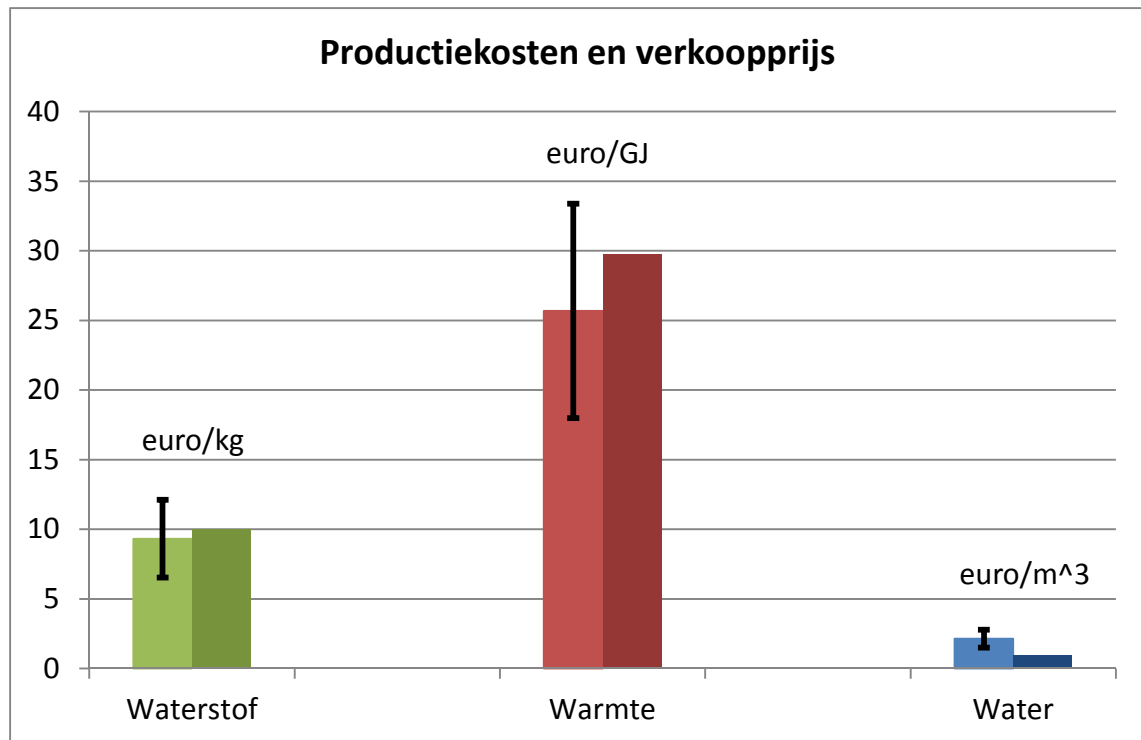
	Waterstof productie	Tanken
Investeringskosten	3,2 M€	1,3M€
Onderhoudskosten per jaar (incl. transport)	70 k€	110 k€
Elektriciteitskosten per jaar	175 k€	10 k€
Productieprijs	6,0 €/kg	3,4 €/ kg

5.1.9 Vergelijking productiekostprijs versus verkoopprijs

In de voorgaande secties zijn de productieprijsen voor warmte, demiwater en waterstof bepaald, en in Figuur 21 zijn deze uitgezet tegen de verkoopprijsen voor deze producten. Voor waterstof geldt dat de prijs voor productie en tanken samen op 9,4€/kg uitkomt, bij een verkoopprijs van 10€/kg. Voor warmte is de verkoopprijs van 29,8 €/GJ hoger dan de productieprijs van 25,7 €/GJ, waardoor daar ook ruimte ontstaat in de business case. Voor demiwater geldt een hogere productieprijs (2,1€/m³) dan de kostprijs (1,0 €/m³). Zoals eerder benoemd valt te verwachten dat de kosten hier hoger uitvallen omdat het hier om een

proef gaat waarbij nog moet worden uitgezocht wat de daadwerkelijke baten zijn en of en hoe die in de business case kunnen worden verrekend. De simpele terugverdiertijd van het totale concept is momenteel 15,5 jaar.

In een vervolgproject zal meer detailinformatie over de verschillende systeemonderdelen worden verkregen, en dan kan ook deze analyse verder worden uitgediept. De huidige resultaten tonen in elk geval aan het systeem zowel energetisch als economisch gezien zou kunnen werken, en dat het verder uitwerken de moeite waard is.



FIGUUR 21 KOSTENVERGELIJKING PRODUCTIEKOSTEN EN VERKOOPPRIJS SCENARIO 'WIJK, ZON, WARMTE PRIORITEIT'. LINKS DE BEREKENDE PRIJS UIT HET MODEL, RECHTS DE VERKOOPPRIJS

5.1.10 CO₂ emissie besparing

De CO₂ emissie besparing van het systeem is doorgerekend naar het gebruik van de producten. Door de waterstof te gebruiken voor mobiliteit wordt per jaar zo'n 1.760 ton CO₂ bespaard. En door de warmte te gebruiken in huishoudens in plaats van een cv-ketel op aardgas wordt 1.220 ton CO₂ bespaard. Met de elektriciteit die het net op gaat wordt nog eens 420 ton bespaard, wat samen neerkomt op bijna 3.400 ton CO₂ per jaar. Als alle elektriciteit als zodanig zou worden gebruikt, levert dit in totaal een CO₂-besparing op van 3.070 ton. Relatief bespaart het rijden op waterstof minder CO₂ dan als de stroom direct gebruikt zou worden. Echter, in deze berekening zijn de effecten van andere uitstoot zoals NO_x, fijnstof en VOS (vluchtige organische stoffen) niet meegenomen.

TABEL 17 OVERZICHT CO2 EMISSIEBESPARING – SCENARIO ‘WIJK, ZON, WARMTE PRIORITEIT’

	Warmte	Waterstof	Elektriciteit	Totaal
Energie geleverd	20,4 TJ/jaar	80.000 kg/jaar	1.013 kWh/jaar	
emissiefactor	59,7 kg CO ₂ /GJ	220 gr CO ₂ /km	0,413 kg CO ₂ /kWh	
CO2 emissiebesparing Power-to-X-systeem	1.220 ton CO ₂ /jaar	1.760 ton CO ₂ /jaar	420 ton CO ₂ /jaar	3.400 ton CO ₂ /jaar
Elektriciteitsgebruik van zonnepark	1.905 MWh/jaar	4.500 MWh/jaar	1.013 kWh/jaar	
Emissiefactor elektriciteit	0,413 kg CO ₂ /kWh	0,413 kg CO ₂ /kWh	0,413 kg CO ₂ /kWh	
CO2 emissiebesparing elektriciteit	790 ton CO ₂ /jaar	1.860 ton CO ₂ /jaar	420 ton CO ₂ /jaar	3.070 ton CO ₂ /jaar

5.2 Scenario ‘Wijk, zon, waterstof prioriteit’

In dit scenario zijn alle instellingen precies hetzelfde als voor het scenario ‘Wijk, zon, warmte prioriteit’, behalve de prioritering. In plaats van voorkeur te geven aan het maken van warmte, heeft waterstof maken nu prioriteit. Mocht hierdoor een tekort ontstaan aan warmte, dan wordt er stroom uit het net ingekocht. Voor waterstof is een vergelijkbaar mechanisme ingebouwd, zodat altijd kan worden voldaan aan de waterstofvraag. Ook is het mogelijk om bij lage tarieven elektriciteit uit het net in te kopen. De uitgangspunten en inputgegevens zijn te vinden in hoofdstuk 4.2 en Bijlage IX. De waterbalans wordt nu niet weergegeven, omdat deze identiek is aan het scenario ‘Wijk, zon, warmte prioriteit’.

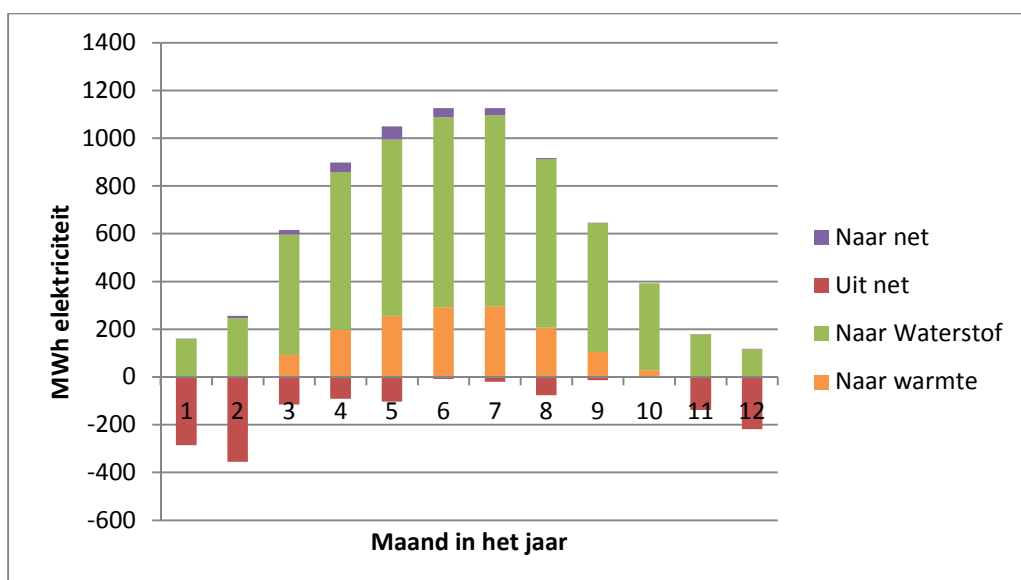
5.2.1 Elektriciteitsbalans

In Tabel 18 en Figuur 22 is de gemiddelde energieverdeling per maand te zien over 2010-2014, evenals de hoeveelheid stroom die moet worden ingekocht. Op basis van de resultaten kan het volgende worden vastgesteld:

- In totaal is er, net als in het scenario wijk – zon - warmte prioriteit, een elektriciteitsproductie van 7.400 MWh van het zonnepark. Van deze elektriciteit wordt 78% wordt gebruikt voor waterstofproductie, 20% voor productie van warmte en 2% wordt aan het net geleverd.
- Naast de elektriciteit uit het zonnepark, wordt er ook bijna 1.430 MWh aan stroom ingekocht. Hiervan is 840 MWh voor de productie van warmte, en 590 MWh voor de productie van waterstof. De inkoop vindt vooral plaats in de winter, als er weinig zonne-energie beschikbaar is.

TABEL 18 ELEKTRICITEITSVERDELING PER MAAND EN TOTAAL WATERSTOF PRIORITEIT IN MWH

	Naar net	Naar Waterstof	Naar warmte	Uit net
Januari	1	160	0	287
Februari	10	246	0	355
Maart	19	503	93	116
April	39	661	197	92
Mei	55	738	256	103
Juni	38	796	292	8
Juli	30	801	296	19
Augustus	4	707	206	76
September	0	541	104	13
Oktober	0	365	28	1
November	0	178	0	140
December	0	116	0	220
Totaal	197	5813	1472	1429



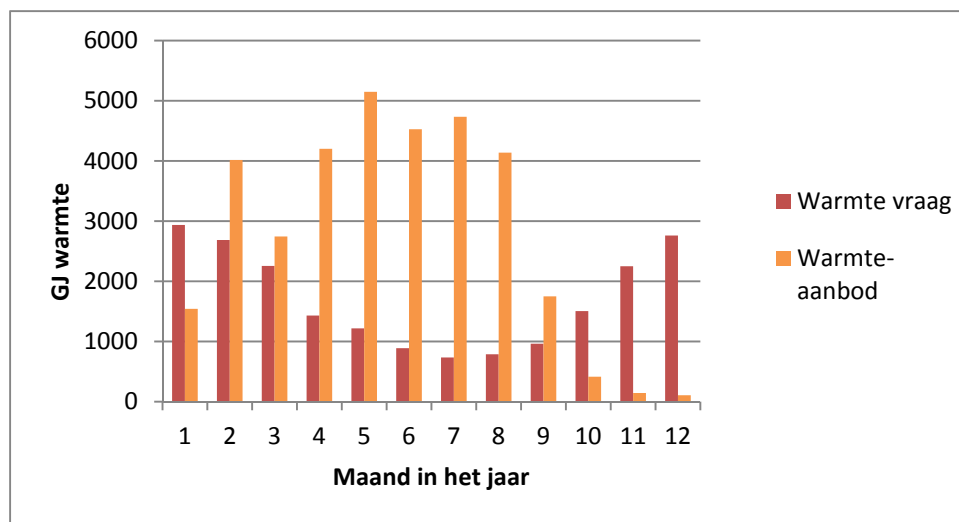
FIGUUR 22 ELEKTRICITEITSVERDELING GEMIDDELD PER MAAND (OVER VIJF JAAR) – ‘WIJK, ZON, WATERSTOF PRIORITEIT’

5.2.2 Warmtebalans

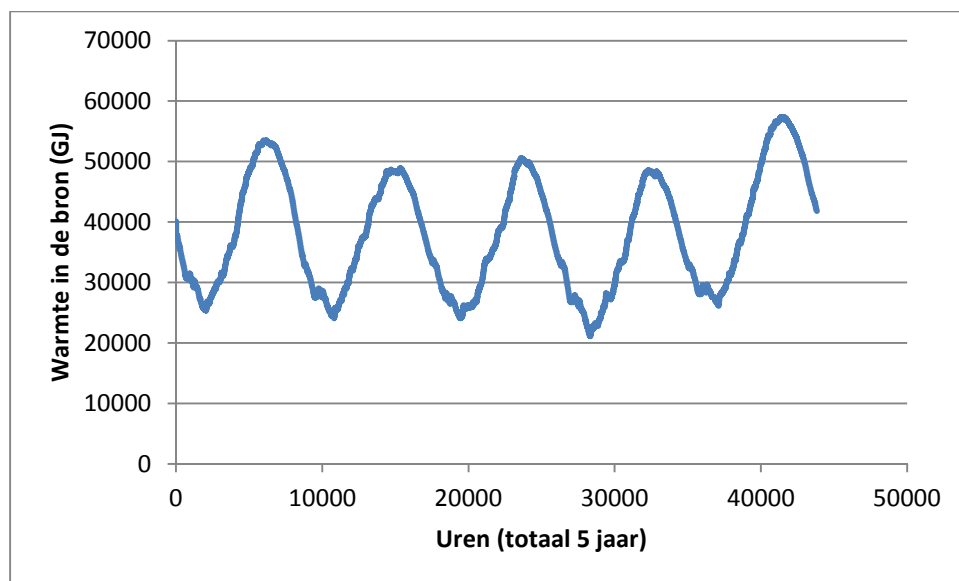
Als waterstof prioriteit heeft dan wordt er in totaal ruim 2.300 MWh aan elektriciteit in warmte omgezet. In tegenstelling tot het scenario wijk, zon, warmte wordt nu niet alleen in de zomer warmte geproduceerd, maar ook in de winter, zoals te zien is in Figuur 23. Op basis van de resultaten kan het volgende worden vastgesteld:

- In totaal komt er 1.470 MWh aan elektriciteit van het zonnepark ter beschikking aan de warmteproductie, met een gemiddelde COP van 4,2, dit betekent dat er in totaal 22,2 TJ aan warmte uit zon wordt opgeslagen.
- Als de stroomprijs onder de 5,05 eurocent/kWh daalt, wordt er stroom uit het net bijgekocht wanneer de warme bron nog niet vol genoeg zit. In totaal wordt op deze

- manier 840 MWh aan elektriciteit ingekocht. Omdat deze stroom voornamelijk in de winter wordt ingekocht, is de temperatuur in het Lekkanaal lager en daarom de COP ook, gemiddeld 3,7. De elektriciteit uit het net wordt omgezet in 11,1 TJ aan warmte.
- De warme bron is door de jaren heen goed in evenwicht, zie Figuur 24. Om dit te bereiken, is de inkoopprijs voor elektriciteit uit het net op 5,05 eurocent/kWh gezet, bij een lagere prijs wordt er namelijk te weinig warmte ingekocht om de bron in evenwicht te houden.
 - De warmtevraag van de woningen is met 20,4 TJ gelijk gebleven aan het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit'. Er is in totaal 33,3 TJ aan warmte in de aquifer gepompt, wat betekent dat er in totaal een warmteverlies is van 39% tijdens opslag en transport van warmte. Dit verlies is hoger dan in het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit'. Deels komt dat doordat er wat meer warmte in de bron zit na vijf jaar, en deels is er waarschijnlijk meer verlies omdat de warmte voor langere periode wordt opgeslagen.



FIGUUR 23 AANTAL GJ AAN WARMTEVRAAG EN WARMTE-AANBOD PER MAAND, GEMIDDELD OVER 5 JAAR. SCENARIO 'WIJK, ZON, WATERSTOF PRIORITEIT'

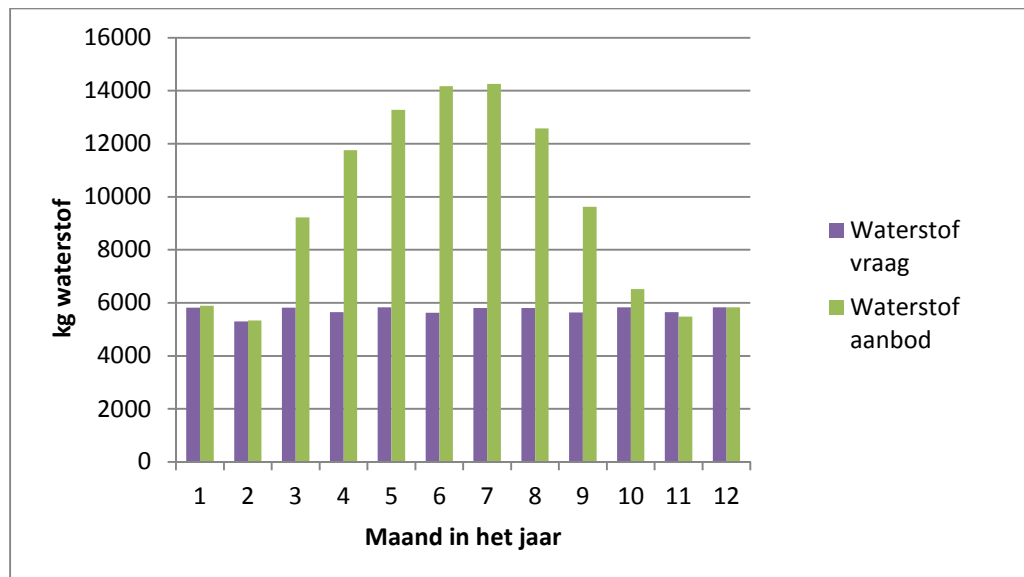


FIGUUR 24 WARMTEOPSLAG IN WARME BRON IN GJ - SCENARIO 'WIJK, ZON, WATERSTOF PRIORITEIT'

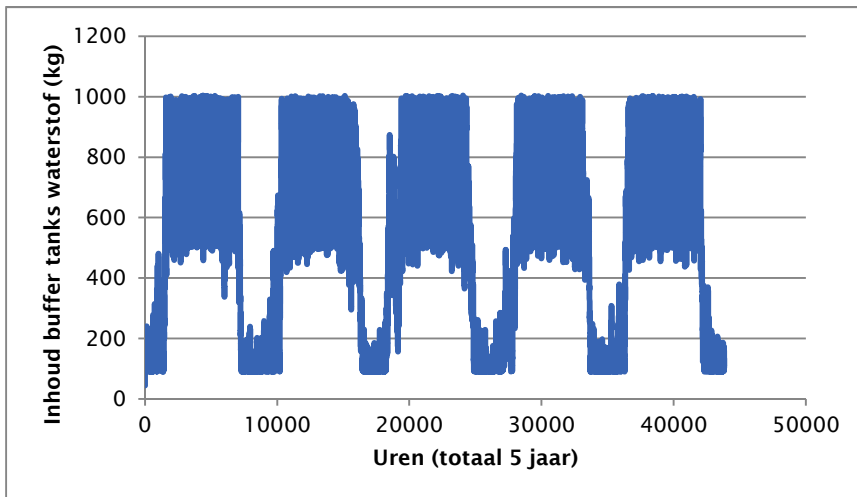
5.2.3 Waterstofbalans

Voor de waterstofproductie zijn in dit scenario twee opslagtanks aanwezig op het terrein van 500 kilogram. Deze tanks worden één voor één gevuld. Als de eerste tank vol is dan blijft deze als buffer aanwezig. Als ook de tweede tank vol is (dus 1.000 kg waterstof geproduceerd) wordt er één volle tank verkocht. Als het volume van de buffer onder de 90 kg komt dan wordt er uit het elektriciteitsnet waterstof ingekocht. Ook bij lage stroomprijzen (onder de 3,9 eurocent/kWh) wordt elektriciteit uit het net ingekocht voor de waterstofproductie, zie Figuur 25 en Figuur 26. Op basis van de resultaten kan het volgende worden vastgesteld:

- Er wordt 5.810 MWh aan elektriciteit uit het zonnepark gebruikt voor de productie van waterstof, genoeg voor ruim 100.000 kg aan waterstof.
- Daarnaast wordt 590 kWh aan elektriciteit uit het net ingekocht, voornamelijk om in de winter aan de waterstofvraag te kunnen voldoen, dit komt overeen met ruim 10.000 kg waterstof.
- In beide figuren is een duidelijk seizoenspatroon te zien, maar er is altijd een minimale hoeveelheid waterstof aanwezig om het tankstation te kunnen voorzien. Daarnaast ontstaat er in de zomer een overschot aan waterstof, in totaal 45.000 kg/jaar.



FIGUUR 25 WATERSTOF AANBOD EN VRAAG PER MAAND, GEMIDDELD OVER VIJF JAAR, SCENARIO 'WIJK, ZON, WATERSTOF PRIORITEIT'



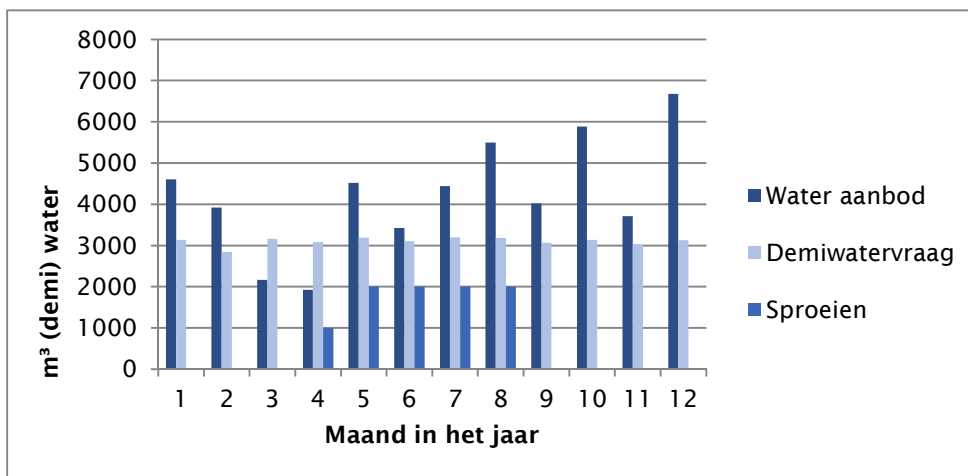
FIGUUR 26 INHOUD BUFFERTANKS WATERSTOF (2 X 500 KG). BIJ 1.000KG WORDT EEN TANK VAN 500 KG VERKOCHT.

5.2.4 Waterbalans

In dit scenario wordt meer waterstof geproduceerd dan bij 'Wijk, zon, warmte prioriteit'. Daardoor ziet de waterbalans er net iets anders uit, zie Figuur 27. Op basis van de resultaten kan het volgende worden vastgesteld:

- De regenwateropvang is net als bij 'Wijk, zon, warmte prioriteit' 51.000 m³ in totaal, waarvan regenwateropvang van de zonnepanelen 34.000 m³ per jaar is en de opvang op daken 17.000 m³ per jaar.
- De vraag naar demiwater voor huishoudelijk gebruik is onveranderd 36.000 m³ per jaar. Terwijl de vraag naar demiwater voor waterstofproductie is toegenomen tot 1025 m³ per jaar. Met verliesfactoren meegerekend is in totaal 41.400 m³ regenwater nodig.

Gemiddeld in een jaar is er dan een overschot van 9.600 m³ regenwater. Een overschot van 9000 m³ wordt in de maanden mei tot en met september tijdens droge perioden gebruikt voor besproeiing van gewassen en bomen.



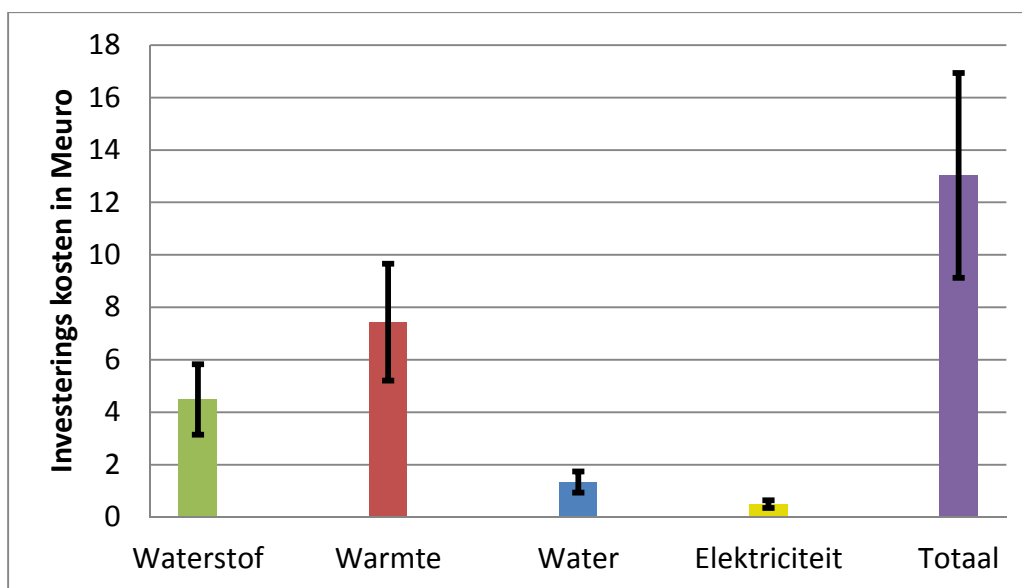
FIGUUR 27 REGENWATEROPSLAG EN GEBRUIK- SCENARIO WIJK, ZON - WARMTE

5.2.5 Kosten en baten Power-to-X-systeem

De investeringen en onderhoudskosten zijn vrijwel gelijk gebleven aan het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit', zie Figuur 28 en Tabel 19. Er is dan ook alleen een verschil in aansturing van het systeem, maar niet in de investeringen.

TABEL 19 INVESTERINGEN POWER-TO-X SYTEEM - 'WIJK, ZON, WATERSTOF PRIORITEIT'

	Totaal	Onderhoud + transport
Warmteproductie, opslag, transport, distributie en afgifte	7,4 M€	80 k€
Waterstof productie, opslag en waterstoftankstation	4,5 M€	180 k€
Regenwater opvang, opslag, demiwaterproductie, transport en distributie	1,3 M€	10 k€
Elektriciteitsinfrastructuur binnen het systeem	0,5 M€	5 k€
TOTAAL Power-to-X-systeem investeringen	13,7 M€	
Onderhoudskosten per jaar		275 k€/jaar



FIGUUR 28 VERDELING INVESTERINGSKOSTEN OVER DE DEELSYSTEMEN SCENARIO WATERSTOF PRIORITEIT

De inkomsten in het scenario Wijk, zon en waterstof prioriteit zijn weergegeven in Tabel 20. Ten opzichte van het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit' zijn er rijen toegevoegd met daarin de inkoop van elektriciteit uit het net, en de gemiddelde kosten hiervoor. Op basis van de resultaten kan het volgende worden vastgesteld:

- De bruto inkomsten bij 'Wijk, zon, waterstof prioriteit' zijn met 14 % toegenomen in vergelijking met het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit' door de toegenomen waterstofproductie.

- De netto inkomsten voor warmte zijn met 5% gedaald in dit scenario ten opzichte van scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit', omdat er voor warmteproductie stroom uit het net moet worden ingekocht voor een hogere prijs (4,7 eurocent/kWh) dan uit het zonnepark.
- De inkoopprijs van elektriciteit voor waterstof vanuit het net is met 7,6 eurocent/kWh bijna tweemaal zo hoog als voor inkoop uit het zonnepark. Deze prijs is hoger dan voor de productie van warmte met stroom uit het elektriciteitsnet. Dit heeft er mee te maken dat de stroom voor warmte op gunstiger momenten kan worden ingekocht omdat dit over een langere periode kan gebeuren. Voor de waterstofproductie is dat minder eenvoudig, omdat de buffers kleiner zijn.
- De netto inkomsten zijn met ruim 7% toegenomen ten opzichte van het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit'. Het verschil met de toename in bruto-inkomsten wordt veroorzaakt door de inkoop van stroom uit het net, maar leidt alsnog tot een hogere netto-omzet in vergelijking met het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit'.

TABEL 20 INKOMSTEN POWER-TO-X-SYSTEEM – WIJK, ZON, WATERSTOF PRIORITEIT

	Warmte	Waterstof	Demiwater	Elektriciteit	TOTAAL
Geleverd per jaar	20,4 TJ	69.000 kg / 45.000 kg	36.000m ³	200MWh	
Gemiddelde verkoop prijs	29,8€/GJ	10€/kg en 6€/kg	1€/m ³	- €/MWh	
Bruto Inkomsten per jaar	610 k€/jr	960 k€/jr	40 k€/jr	- k€/jr	1.610 k€/jr
Inkoop elektriciteit uit zonnepark	1.470MWh	5.800MWh	-MWh	200MWh	
Gemiddelde inkoop prijs elektriciteit	39€/MWh	39€/MWh	39€/MWh	- €/MWh	
Inkoopkosten elektriciteit uit zonnepark per jaar	60 k€/jr	230 k€/jr	-k€/jr	- k€/jr	290 k€/jr
Inkoop elektriciteit uit net	840 MWh	590 MWh	-	-	
Gemiddelde inkoop prijs elektriciteit uit net	47 €/MWh	75 €/MWh	-	-	
Gemiddelde inkoopkosten elektriciteit per jaar	40 k€/jr	45 k€/jr	-k€/jr	-k€/jr	85 k€/jr
Netto Inkomsten per jaar	510 k€/jr	685 k€/jr	40 k€/jr	- k€/jr	1.235 k€/jr
Aansluitbijdrage, eenmalige inkomsten	740 k€/jr				

De simpele terugverdientijd van het systeem is nu 14 jaar, en daarmee bijna 2 jaar lager dan voor 'Wijk, zon, warmte prioriteit'. Omdat de elektrolyser niet is afgesteld op de waterstofproductie maar op het verwerken van zoveel mogelijk pieken in de elektriciteitsopwekking, is de elektrolyser eigenlijk overgedimensioneerd. Als de elektrolyser vaker aanstaat, leidt dit dus tot betere economische resultaten.

5.2.6 Warmte kosten en baten per woning

De kosten per woning voor de warmtevoorziening (Tabel 21) zijn ruim 4% hoger dan in het scenario *'Wijk, zon, warmte prioriteit'*. Dit verschil wordt veroorzaakt door de hogere elektriciteitskosten die gepaard gaan met inkoop van elektriciteit uit het elektriciteitsnet voor een hogere prijs dan inkoop van elektriciteit uit het zonnepark.

TABEL 21 KOSTEN EN BATEN PER WONING – WATERSTOF PRIORITEIT

	Exploitant - PtX <i>waterstof prioriteit</i>	Exploitant - PtX <i>warmte prioriteit</i>
Investeringskosten per woning	8.200 €	8.200 €
Onderhoudskosten per woning per jaar	90 €/jr	90 €/jr
Vastrecht per woning per jaar	-	-
Elektriciteitskosten per woning per jaar	110 €/jr	85 €/jr
Productieprijs	26,8 €/GJ	25,7 €/GJ
Totale kosten per woning per jaar	610 €/jr	585 €/jr

5.2.7 Waterstof productie en tankkosten

In dit scenario zijn de investeringen gelijk gebleven aan het scenario *'Wijk, zon, warmte prioriteit'* terwijl er meer waterstof wordt geproduceerd. Door de toegenomen waterstofproductie zijn de elektriciteitskosten per jaar hoger dan bij het scenario *'Wijk, zon, warmte prioriteit'*, maar de productieprijs is wel gedaald met bijna 17% van 6 €/kg naar 5 €/kg (zie Tabel 22). De kosten voor de tankinfrastructuur blijven gelijk, omdat de vraag naar waterstof onveranderd is gebleven. De totale prijs voor waterstof is nu 8,4 €/kg in plaats van 9,4 €/kg, een afname van 10%.

TABEL 22 KOSTENOVERZICHT WATERSTOF – WATERSTOF PRIORITEIT

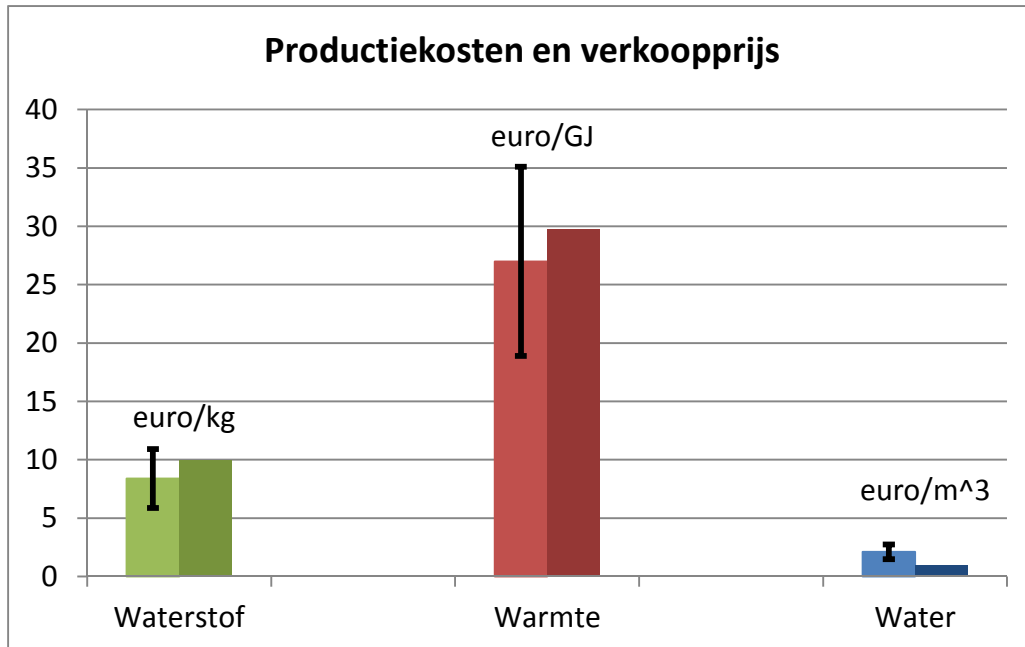
	Waterstof productie	Tanken
Investeringskosten	3,2 M€	1,3 M€
Operatie en onderhoud per jaar (incl transport)	70 k€	110 k€
Elektriciteitskosten per jaar	270 k€	10 k€
Productieprijs	5,0 €/kg	3,4 €/ kg

5.2.8 Vergelijking productiekosten versus verkoopprijs

Voor het scenario *'Wijk, zon, waterstof prioriteit'* zijn de productieprijsen uitgezet tegen de verkoopprijzen in Figuur 29. De marge tussen de productieprijs en verkoopprijs van waterstof is nu 1,6 €/kg, wat een sterkere business case oplevert. Ondanks dat er stroom wordt ingekocht voor de productie van waterstof tegen een prijs die bijna tweemaal zo hoog is als de elektriciteit uit het zonnepark, resulteert de verhoogde productie toch in een kostendaling. De elektrolyser is dus voor een groot deel van het jaar te groot uitgevoerd. De capaciteit van de elektrolyser kan in het vervolgonderzoek nog verder worden geoptimaliseerd.

De prijs voor warmte neemt in dit scenario toe met 1,5 €/GJ ten opzichte van het scenario zon, wind, warmte prioriteit, door de inkoop van elektriciteit uit het net tegen een hogere prijs dan uit het zonnepark. Echter, de prijs blijft met bijna 27 €/GJ nog wel onder de verkoopprijs van warmte. Voor het watersysteem treden geen veranderingen op.

Samenvattend levert het prioriteren van de waterstofproductie een positievere business case op dan voor 'Wijk, zon, warmte prioriteit', met een bijna 2 jaar lagere terugverdiëntijd. Voor zowel waterstof als warmte blijft er een marge tussen de productieprijs en verkoopprijs bestaan. Echter, (grijze) stroom inkoop uit het net leidt wel tot een minder grote CO₂ emissie reductie, zoals te zien is in de volgende paragraaf.



FIGUUR 29 KOSTENVERGELIJKING MET VERKOOPPRIJS (RECHTER KOLOM) – SCENARIO WATERSTOF PRIORITEIT, LINKS DE PRODUCTIEPRIJS, RECHTS DE VERKOOPPRIJS

5.2.9 CO₂ emissie besparing

Bij het berekenen van de CO₂ emissie besparing in het scenario 'Wijk, zon, waterstof prioriteit' (zie Tabel 23) moet rekening worden gehouden met de inkoop van elektriciteit uit het net. Om die reden is er een verschil tussen de bruto en netto CO₂-emissies. Netto wordt er in dit scenario 3240 ton CO₂ bespaard. In het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit' was dit bijna 3400 ton. Door de inkoop van (grijze) elektriciteit uit het net is de CO₂-besparing in dit geval 5% lager. Ook betekent dit dat een deel van de warmte en de waterstof in principe 'grijs' zijn, en niet groen, zoals eigenlijk de opzet is van het systeem. In de toekomst worden echter lagere stroomprijzen verwacht op het moment dat er een overschot aan zon of wind is, en van dit soort situaties kan het Power-to-X-systeem juist gebruik maken door het overschot aan groene energie te verwerken.

TABEL 23 CO₂ EMISSIE BESPARINGEN – SCENARIO 'WIJK, ZON, WATERSTOF PRIORITEIT'

	Warmte	Waterstof	Elektriciteit- van zon	Totaal
Energie geleverd	20,4 TJ/jaar	115.000 kg/jaar	200 MWh/jaar	
emissiefactor	59,7 kg CO ₂ /GJ	220 gr CO ₂ /km	0,413 kg CO ₂ /kWh	
Bruto CO ₂ emissiebesparing	1.220 ton CO ₂ /jaar	2.530 ton CO ₂ /jaar	83 ton CO ₂ /jaar	3.830 ton CO ₂ /jaar
Inkoop uit net	840 MWh	580MWh	-	
Emissiefactor elektriciteit	0,413 kg CO ₂ /kWh	0,413 kg CO ₂ /kWh	0,413 kg CO ₂ /kWh	
CO ₂ emissie	350 ton CO ₂ /jaar	240 ton CO ₂ /jaar		
Netto CO ₂ emissiebesparing	870 ton CO ₂ /jaar	2290 ton CO ₂ /jaar	83 ton CO ₂ /jaar	3.240 ton CO ₂ /jaar
Elektriciteitsgebruik van zonnepark	1.470 MWh/jaar	5.800 MWh/jaar	200 kWh/jaar	
Emissiefactor elektriciteit	0,413 kg CO ₂ /kWh	0,413 kg CO ₂ /kWh	0,413 kg CO ₂ /kWh	
CO ₂ emissiebesparing elektriciteit	607 ton CO ₂ /jaar	2.400 ton CO ₂ /jaar	83 ton CO ₂ /jaar	3.070ton CO ₂ /jaar

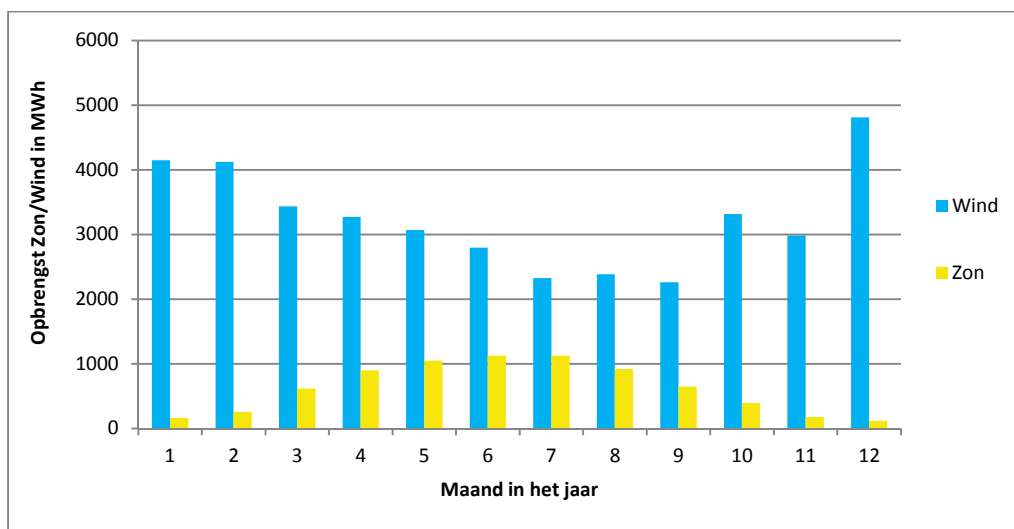
5.3 Scenario ‘Wijk, zon én wind’

Bij Waternet bestaat al langere tijd de ambitie om op het WRK terrein naast zonnepanelen ook windturbines te plaatsen. Voor het Power-to-X-systeem betekent dit dat seizoens-effecten een kleinere rol spelen, daarnaast kan veel meer en op een constanter niveau waterstof worden geproduceerd. De elektrolyser is in dit scenario dan ook groter gemaakt (10 MW), maar de warmtepomp en de warmtevraag zijn gelijk gebleven.

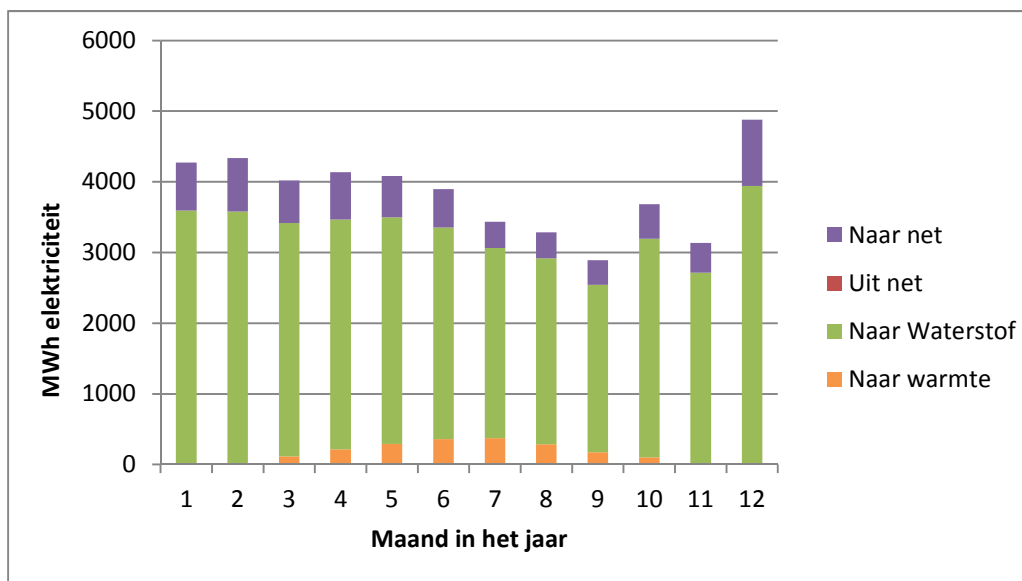
5.3.1 Elektriciteitsbalans

In Figuur 30 is de opbrengst van zon en wind per maand te zien, en in Figuur 31 en Tabel 24 is een overzicht gegeven van de verdeling van energie in het scenario ‘Wijk, zon én wind’, gemiddeld over de jaren 2010-2014. Op basis van de resultaten kan het volgende worden vastgesteld:

- De totale opbrengst uit zonne-energie is ruim 7.400 MWh per jaar, net als in de eerdere twee scenario's. Echter, zonne-energie is nu goed voor 16% van de totale opbrengst, terwijl de opbrengst uit windenergie de overige 84% omvat, met bijna 39.000 MWh per jaar.
- Doordat windenergie nu de overhand heeft in plaats van zon, is de energieopbrengst veel regelmatig. Wind en zon zijn wel redelijk complementair, zoals te zien is in Figuur 30. In de herfstmaanden (9,10,11) is er wel beduidend minder opbrengst dan in de rest van het jaar, met een dip in september.
- In totaal wordt er ruim 46.400 MWh opgewekt met zon en wind, waarvan 4% nodig is voor warmteproductie. Voor het produceren van waterstof wordt 81% van de duurzame elektriciteit gebruikt, en 15% van de stroom gaat naar het net. De terug levering aan het net is nu meer verdeeld over het jaar in plaats van seizoensafhankelijk, omdat door de toevoeging van wind de elektrolyser ook in andere maanden op volle capaciteit draait. Er hoeft geen stroom te worden ingekocht uit het net.



FIGUUR 30 OPBRENGST ZON EN WIND IN SCENARIO WIJK, ZON, WIND



FIGUUR 31 ENERGIEVERDELING GEMIDDELD PER MAAND (OVER VIJF JAAR) – WIND & WATERSTOF

TABEL 24 ENERGIEVERDELING PER MAAND EN TOTAAL SCENARIO WIND & WATERSTOF IN MWH

	Naar net	Naar Waterstof	Naar warmte
Januari	677	3.595	0
Februari	756	3.581	0
Maart	602	3.302	114
April	666	3.254	214
Mei	584	3.210	290
Juni	541	2.994	360
Juli	369	2.693	372
Augustus	368	2.630	286
September	349	2.367	173
Oktober	489	3.097	99
November	421	2.715	0
December	937	3.941	0
Totaal	6.760	37.378	1.909

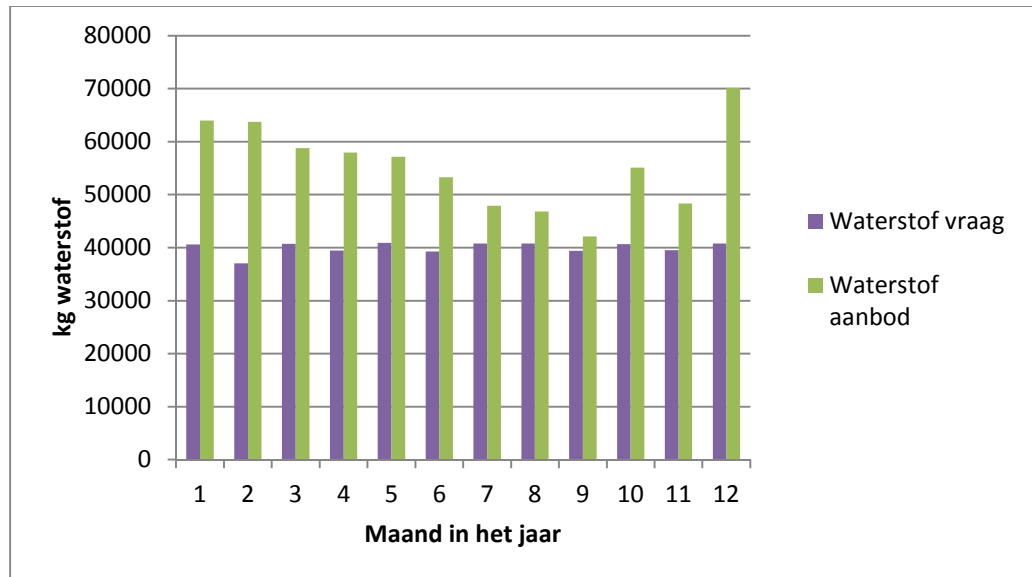
In het scenario 'Wijk, zon én wind' treden geen veranderingen op in het warmtesysteem ten opzichte van het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit'. Zowel de vraag en aanbod patronen als de kosten voor deze systeemonderdelen blijven gelijk, en worden om die reden hier niet herhaald.

5.3.2 Waterstofbalans

Toevoeging van wind aan het Power-to-X-systeem leidt tot een veel constantere waterstofproductie, waardoor geen waterstof meer hoeft te worden ingekocht. In de maand september is de productie van waterstof het laagst, maar ook in deze maand kan aan de vraag worden voldaan. Op basis van de resultaten kan het volgende worden vastgesteld:

- In totaal wordt er ruim 37.000 MWh aan elektriciteit gebruikt voor de productie van waterstof. Daarmee wordt ongeveer 665.000 kg waterstof geproduceerd op een druk van 200 bar.

- De waterstofvraag is gelijk aan 1.400 kg/dag door de week en 875 kg/dag in het weekend. In totaal is de waterstofvraag bijna 480.000 kg waterstof per jaar.
- De vraag naar waterstof is in dit scenario nooit groter dan de aanbod, op basis van de cijfers per maand. Er hoeft dus niet extern waterstof te worden ingekocht.
- Daarnaast is er elke maand nog een overschot, in totaal 185.000 kg per jaar. Dit overschot kan worden verkocht aan waterstofafnemers.

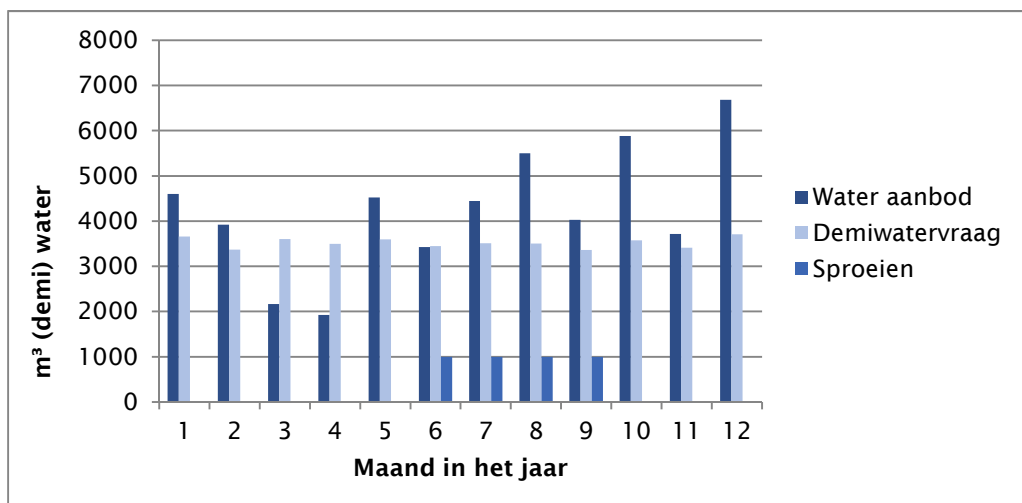


FIGUUR 32 OVERSCHOT EN TEKORT AAN WATERSTOF - SCENARIO WIND & WATERSTOF

5.3.3 Waterbalans

Het scenario 'Wijk, zon én wind' heeft een hogere waterstofproductie in verhouding tot eerdere scenario's, waardoor de waterbalans er iets anders uit komt te zien:

- De regenwateropvang is nog steeds verdeeld over de zonnepanelen (34.000 m³ per jaar), en de woonwijk (17.000 m³ per jaar). De totale opgevangen hoeveelheid regenwater is onveranderd 51.000 m³ per jaar.
- De vraag naar demiwater voor waterstofproductie is nu bijna 6.000 m³ per jaar, en hiervoor is bijna 7.000 m³ per jaar aan demiwater nodig. De demiwateraanvraag van de huishoudens is gelijk gebleven op 36.000 m³ per jaar. De totale vraag naar regenwater (inclusief verliezen) komt hiermee bijna 47.000 m³ per jaar.
- Het overschot aan regenwater is hiermee kleiner geworden, en is niet meer dan 4.000 m³, daarom is ervoor gekozen om de hoeveelheid bestemd voor sproeien in de zomermaanden te beperken tot 1.000 m³.



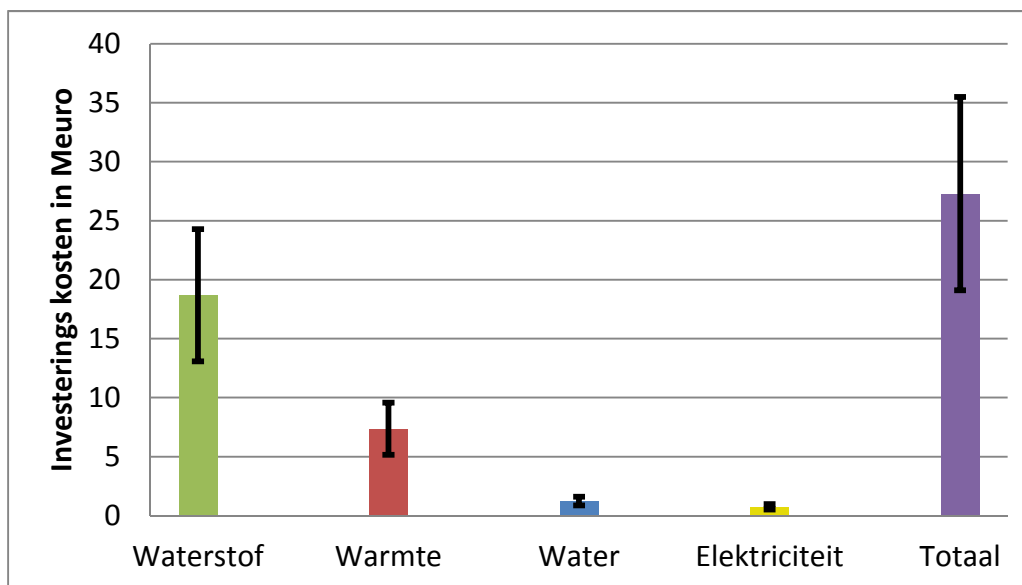
FIGUUR 33 WATERBALANS SCENARIO 'WIJK, ZON ÉN WIND'

5.3.4 Kosten en baten

Een overzicht van de investeringen en onderhoud- en transportkosten is weergegeven in Tabel 25 en Figuur 34. De investeringen voor het warmtesysteem en demiwatersysteem zijn gelijk gebleven aan eerdere scenario's. De kosten voor waterstofproductie, opslag en de tankinfrastructuur zijn gestegen met ruim een factor 4. De elektrolyser is vijfmaal zo groot geworden, en aan het systeem zijn zeven tankstations toegevoegd. Ook de compressor moest zevenmaal zo groot worden. Al met al is het waterstofsysteem nu zo groot geworden dat het 67% van de investeringen en 90% van de kosten voor onderhoud en transport voor zijn rekening neemt (927k€/jaar). Door de toevoeging van windturbines aan het systeem zijn ook de kosten voor het elektriciteitssysteem gestegen met 250 k€.

TABEL 25 INVESTERINGEN SCENARIO 'WIJK, ZON ÉN WIND'

	Totaal	Onderhoud + transport
Warmteproductie, opslag, transport, distributie en afgifte	7,4 M€	80 k€
Waterstof productie, opslag en waterstoftankstation	18,7 M€	930 k€
Regenwater opvang, opslag, demiwaterproductie, transport en distributie	1,2 M€	10 k€
Elektriciteitsinfrastructuur binnen het systeem	0,75 M€	10 k€
TOTAAL Power-to-X-systeem investeringen	28 M€	
Onderhoudskosten per jaar		1030 k€/jaar



FIGUUR 34 VERDELING INVESTERINGSKOSTEN OVER DE DEELSYSTEMEN SCENARIO 'WIJK, ZON ÉN WIND'

De inkomsten bij het scenario 'Wijk, zon én wind' zijn weergegeven in Tabel 26. De totale netto inkomsten per jaar bedragen 5 miljoen Euro. De inkomsten komen voor 89% uit de verkoop van waterstof, voor 11% uit de verkoop van warmte en voor minder dan 1% uit de verkoop van demiwater. De netto inkomsten zijn ruim 4 maal groter dan in de eerdere scenario's met alleen zonne-energie.

TABEL 26 OVERZICHT INKOMSTEN SCENARIO 'WIJK, ZON ÉN WIND'

	Warmte	Waterstof	Demiwater	Elektriciteit	TOTAAL
Geleverd per jaar	20,4 TJ	480.000 kg / 185.000 kg	36.000m ³	6.760MWh	
Gemiddelde verkoop prijs	29,8€/GJ	10€/kg en 6 €/kg	1€/m ³	- €/MWh	
Bruto Inkomsten per jaar	610 k€/jr	5910 k€/jr	40 k€/jr	- k€/jr	6.560k€/jr
Inkoop elektriciteit uit zonnepark	1.900MWh	37.400MWh	-MWh	6.760MWh	
Gemiddelde inkoop prijs elektriciteit	39€/MWh	39€/MWh	39€/MWh	- €/MWh	
Inkoopkosten elektriciteit uit zonnepark per jaar	70 k€/jr	1.460 k€/jr	-k€/jr	- k€/jr	1.530 k€/jr
Netto Inkomsten per jaar	530 k€/jr	4.450 k€/jr	40 k€/jr	- k€/jr	5.020 k€/jr
Aansluitbijdrage, eenmalige inkomsten	740 k€/jr				

Met de gegevens over de investeringen en de netto omzet komt de simpele terugverdientijd van dit systeem op 7 jaar. De terugverdientijd is hiermee de helft van de scenario's waarin

alleen zon en geen wind is meegenomen. Deze halvering van de terugverdientijd wordt veroorzaakt door de toevoeging van windenergie, die zorgt voor een hogere productie en verkoop van waterstof.

Aan het warmtesysteem is in dit scenario verder niets veranderd, dus hier zijn geen wijzigingen in de resultaten ten opzichte van het scenario *'Wijk, zon, warmte prioriteit'* (zie 5.1.6). De resultaten van de economische analyse voor warmte worden dan ook niet nogmaals getoond.

5.3.5 Demiwater kosten en baten per huishouden

De kosten voor de productie van demiwater zijn in dit scenario 1,9 €/m³, een daling van bijna 10% ten opzichte van de eerdere scenario's. De daling zit in de investeringskosten per woning, en de oorzaak hiervoor is dat het waterstofsysteem groter is geworden. De productie van demiwater voor waterstofproductie is toegenomen, wat er toe leidt dat het waterstofsysteem een groter deel van de kosten voor het demiwatersysteem voor zijn rekening neemt.

De totale kosten per woning per jaar zijn nu twee maal hoger voor de exploitant dan voor de bewoner (zie Tabel 27). Zoals eerder is toegelicht gaat het bij de levering van demiwater aan woningen om een proef die verder moet worden onderzocht. Met de huidige berekeningen is het uitgangspunt dat er nog geen positieve business case mogelijk is.

TABEL 27 DEMIWATER KOSTEN EN BATEN PER HUISHOUDEN - SCENARIO *'WIJK, ZON ÉN WIND'*

	Exploitant – PtX	Bewoner - Ptx
Investeringskosten per woning	1370 €	- €
Onderhoudskosten per woning per jaar	10 €/jr	- €/jr
Elektriciteitskosten per woning per jaar	1 €/jr	- €/jr
Waterkosten per woning per jaar	- €/jr	40 €/jr
Productieprijs	1,9 €/m ³	1,0 €/m ³
Totale kosten per woning per jaar	80 €/jr	40 €/jr

5.3.6 Waterstof productie en tankkosten

In het scenario *'Wijk, zon én wind'* zijn de kosten voor waterstofproductie op 200 bar teruggelopen van 6 €/kg, naar 3,7€/kg, een daling van bijna 40%. De tankinfrastructuur kost nu 2,9 €/kg in plaats van 3,4 €/kg, een daling van 15%.

Dat de kosten voor de productie harder dalen dan voor de tankinfrastructuur, ligt aan de grootte van de elektrolyser. De elektrolyser is in dit scenario namelijk vijf maal zo groot geworden, terwijl de jaarlijkse productie met een factor zeven is gestegen. De elektrolyser is nu dus beter aangepast op de waterstofvraag dan in de eerdere scenario's. De tankinfrastructuur is met een factor zeven opgeschaald, wat wel leidt tot lagere kosten, maar niet zo drastisch als aan de productiekant. De productie bedraagt nu 56% van de totale kosten van 6,6 €/kg, en voor de tankinfrastructuur is dat 44%.

TABEL 28 KOSTENOVERZICHT WATERSTOF - 'WIJK, ZON ÉN WIND'

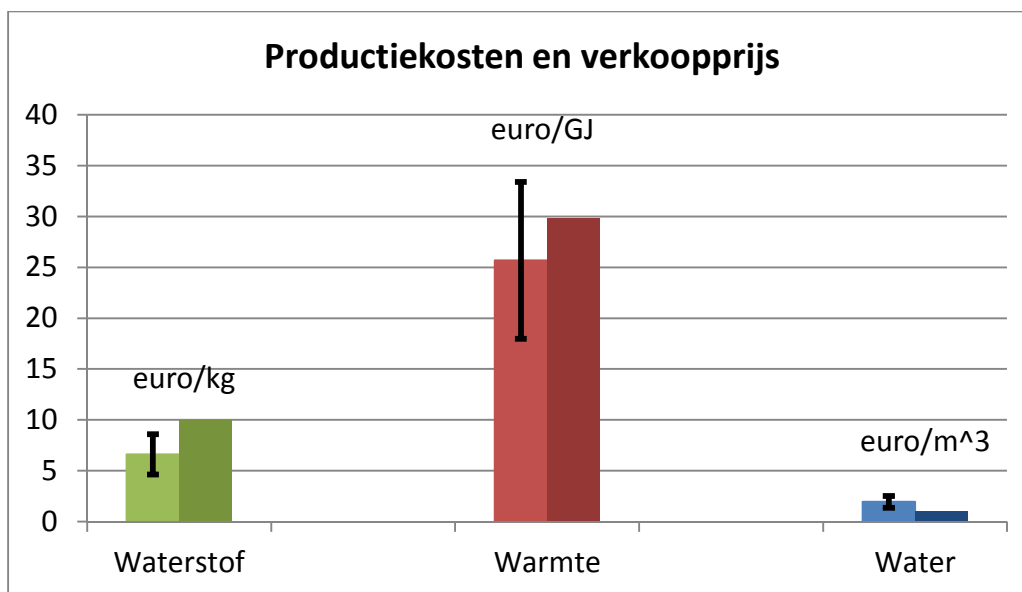
	Waterstof productie	Tanken
Investeringskosten	11,2 M€	7,4M€
Operatie en onderhoud per jaar (incl transport)	250 k€	680 k€
Elektriciteitskosten per jaar	1460 k€	96 k€
Productieprijs	3,7 €/kg	2,9 €/ kg

5.3.7 Vergelijking productiekosten en verkoopprijs

In Figuur 35 zijn de productieprijs en uitgezet tegen de verkoopprijzen voor het scenario 'Wijk, zon én wind'. Voor waterstof bestaat nu een marge tussen de productieprijs en de verkoopprijs van 3,4 €/kg, en voor warmte 4,1 €/GJ. De productieprijs van demiwater is gedaald, maar wel nog 0,9 €/m³ hoger dan de verkoopprijs.

De toevoeging van windturbines aan het systeem zorgt voor een veel constantere energieproductie, waarin zon en wind deels complementair zijn aan elkaar. Hierdoor kan er zes tot acht keer meer waterstof worden geproduceerd dan in de scenario's met alleen zonne-energie. Hierdoor dalen de kosten voor het waterstofsysteem in totaal met 21-30% ten opzichte van eerdere scenario's. Dat is ook te zien in de simpele terugverdientijd, die gehalveerd wordt tot ca. 7 jaar.

De toevoeging van windenergie aan een Power-to-X-systeem leidt dus tot positieve resultaten, zowel in de vorm van een hogere en een meer continue energieopwekking als in de economische resultaten.



FIGUUR 35 KOSTENVERGELIJKING PRODUCTIEKOSTEN EN VERKOOPPRIJS - SCENARIO 'WIJK, ZON ÉN WIND', LINKS DE PRODUCTIEPRIJS, RECHTS DE VERKOOPPRIJS

5.3.8 CO₂-emissie besparing

In het scenario 'Wijk, zon én wind', wordt in totaal 18.600 ton CO₂ per jaar bespaard, waarbij 7% van de CO₂-besparing vanuit de warmtelevering komt, 78% door het rijden op waterstof in plaats van met een verbrandingsmotor, en de overige 15% door de teruglevering van

elektriciteit aan het net (zie Tabel 29). Als alle elektriciteit niet zou worden omgezet in producten, maar als zodanig wordt gebruikt, levert dit theoretisch gezien een 2% hogere besparing op. Relatief bespaart het rijden op waterstof namelijk minder CO₂ dan als de stroom direct gebruikt zou worden. Echter, zoals eerder ook gesteld, zijn in deze berekening de effecten van andere uitstoot zoals NO_x, fijnstof en VOS (vluchtige organische stoffen) bij het rijden met een voertuig met verbrandingsmotor niet meegenomen.

TABEL 29 CO₂ EMISSIE BESPARING - SCENARIO 'WIJK, ZON ÉN WIND'

	Warmte	Waterstof	Elektriciteit	Totaal
Energie geleverd	20,4 TJ/jaar	665.000 kg/jaar	6.760 kWh/jaar	
emissiefactor	35,97 kg CO ₂ /GJ	220 gr CO ₂ /km	0,413 kg CO ₂ /kWh	
CO ₂ emissiebesparing Power-to-X-systeem	1.220 ton CO ₂ /jaar	14.600 ton CO ₂ /jaar	2.800 ton CO ₂ /jaar	18.620 ton CO ₂ /jaar
Elektriciteitsgebruik van zonnepark	1.909 MWh/jaar	37.380 MWh/jaar	6.760 kWh/jaar	
Emissiefactor elektriciteit	0,413 kg CO ₂ /kWh	0,413 kg CO ₂ /kWh	0,413 kg CO ₂ /kWh	
CO ₂ emissiebesparing elektriciteit	790 ton CO ₂ /jaar	15.440 ton CO ₂ /jaar	2.800 ton CO ₂ /jaar	19.030 ton CO ₂ /jaar

5.4 Scenario 'Stadsdeel'

Elke gemeente in Nederland moet een klimaatbeleid formuleren en meer specifiek de komende tijd een warmteplan maken voor de gebouwde omgeving. Het is daarom interessant om te onderzoeken of het Power-to-X-concept op een gemeentelijke schaal ook een belangrijke rol zou kunnen spelen in de verdere verduurzaming, waarbij het concept zoals omschreven in *Solar Power to the People* [4] als leidraad dient.

Door de grotere volumes wordt de warmteopslag efficiënter, en kan er ook op kosten worden bespaard. In dit scenario worden de zonnepanelen op woningen gecombineerd met een zonnepark. Daarnaast wordt ook de energie van tien windturbines meegenomen, die stroom produceren ten behoeve van het stadsdeel.

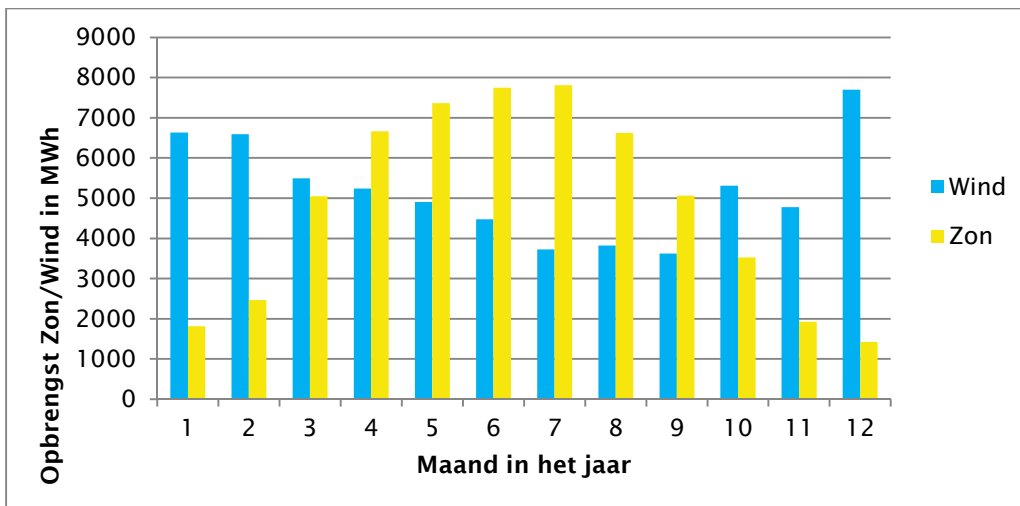
5.4.1 Elektriciteitsbalans

In het scenario 'Stadsdeel' zal de productie en verdeling van energie over 2010-2014 er gemiddeld per maand uitzien zoals in Figuur 36, Figuur 37 en Tabel 30. Door het grote aandeel aan zonne-energie is er weer een duidelijk seizoenspatroon herkenbaar, hoewel een stuk minder dan in de wijk, zon scenario's. Op basis van de resultaten kan het volgende worden vastgesteld:

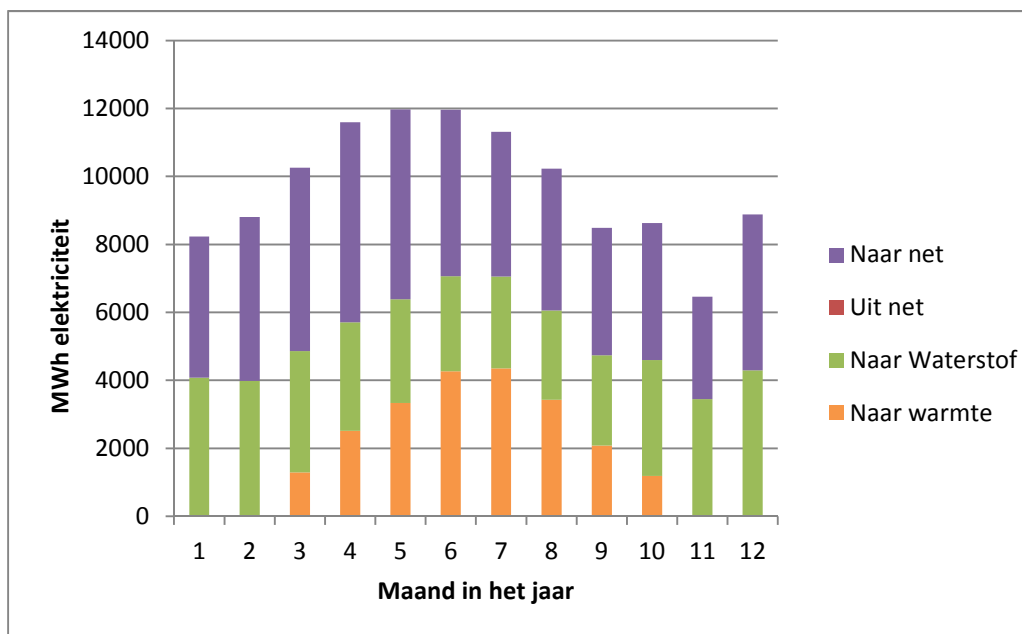
- De totale opbrengst uit zonne-energie is ruim 57.000 MWh per jaar, en de opbrengst uit wind is 62.000 MWh per jaar, samen goed voor een totale opbrengst van bijna 120.000 MWh aan duurzame elektriciteit. In dit scenario wordt met wind 52% van de elektriciteit opgewekt, en 48% door zon, een heel gelijke verdeling, zoals ook terug te zien is in Figuur 36.
- De meer gelijke verdeling tussen zon en wind vergroot ook de mate waarin ze complementair zijn aan elkaar. In Figuur 36 is goed te zien dat er meer zonne-energie

wordt opgewekt in de zomermaanden, wanneer het minder waait, terwijl dit in de winter precies andersom is.

- In totaal wordt er bijna 120 miljoen kWh opgewekt met zon en wind, waarvan 19% nodig is voor warmteproductie. Voor het produceren van waterstof wordt 33% van de duurzame elektriciteit gebruikt, en 48% van de stroom gaat naar het net, waarvan door verliesfactoren uiteindelijk 45% echt wordt teruggeleverd.
- De hoeveelheid stroom die wordt geproduceerd bij de windturbines is zowel in absolute hoeveelheid als per maand voldoende om te voorzien in de waterstofproductie. Dat betekent dat de waterstofproductie ook daadwerkelijk bij de windturbines kan plaatsvinden, en dat alleen het overschot daarvan het net op gaat, dat is 22 miljoen kWh per jaar.
- De opgewekte stroom van het zonnepark van 60MWp is ruim voldoende om de warmtepomp van 20MW aan te drijven. Er blijft dan op jaarbasis nog bijna 16 miljoen kWh over, naast de stroom die wordt opgewekt op de daken van woningen.
- De overige stroom is bedoeld voor in de wijk, voor verlichting, apparaten en het laden van elektrische auto's. In totaal is hier 43 miljoen kWh voor nodig op jaarbasis (zie 4.4). In totaal is er bijna 55 miljoen kWh beschikbaar, wat betekent dat er op jaarbasis in elk geval ruim voldoende duurzame stroom wordt opgewekt om de huishoudens van stroom te voorzien en elektrische auto's te laden.



FIGUUR 36 OPBRENGST WIND EN ZON PER MAAND – SCENARIO 'STADSDEEL'



FIGUUR 37 ENERGIEVERDELING GEMIDDELD PER MAAND (OVER VIJF JAAR)- SCENARIO 'STADSDEEL' IN MWH

TABEL 30 ENERGIEVERDELING PER MAAND EN TOTAAL – SCENARIO 'STADSDEEL' IN MWH

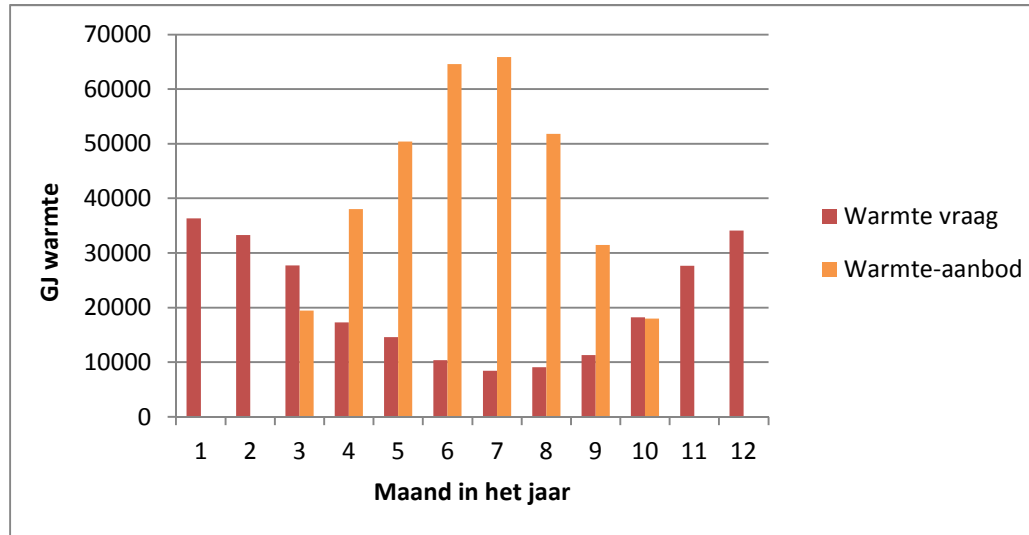
	Naar net	Naar Waterstof	Naar warmte
Januari	4.156	4.078	0
Februari	4.820	3.983	0
Maart	5.395	3.574	1.288
April	5.888	3.190	2.514
Mei	5.585	3.052	3.335
Juni	4.897	2.795	4.269
Juli	4.251	2.702	4.356
Augustus	4.167	2.632	3.426
September	3.749	2.661	2.080
Oktober	4.029	3.406	1.188
November	3.016	3.448	0
December	4.585	4.294	0
Totaal	54.539	39.814	22.457

5.4.2 Warmtebalans

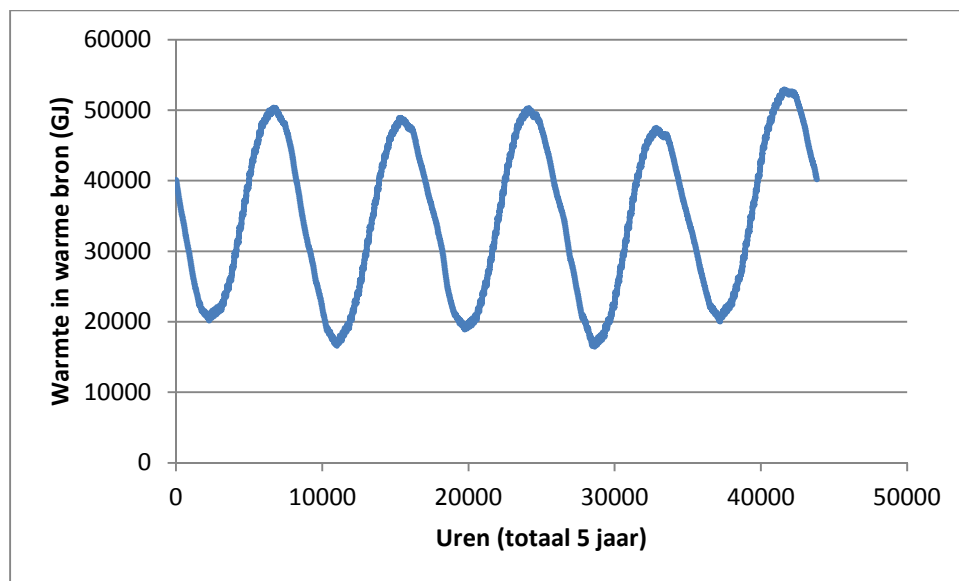
In het scenario 'Stadsdeel' wordt bijna 22.500 MWh aan stroom in warmte omgezet. Dit gebeurt alleen met stroom uit de zonnepanelen, en in de zomermaanden, zoals te zien in Figuur 38. Op basis van de resultaten kan het volgende worden vastgesteld:

- De warmtepomp met als bron de temperatuur van het Lekkanaal water, heeft ook in dit scenario een gemiddelde C.O.P (coëfficiënt of performance) van 4,2. Dit betekent dat 340 TJ aan warmte wordt geproduceerd dat wordt opgeslagen in de aquifer.
- Zonder elektriciteitsinkoop uit het net blijft de bron goed in evenwicht, wat ook te zien is in Figuur 39.

- De warmtevraag in het scenario 'Stadsdeel' met 10.000 woningen is bijna 250 TJ. Er is 340 TJ aan warmte geproduceerd, dat betekent dat het totale verlies in opslag en transport 27% is, en daarmee 3-13% lager dan in eerdere scenario's



FIGUUR 38 WARMTEVRAAG EN AANBOD PER MAAND – SCENARIO 'STADSDEEL'

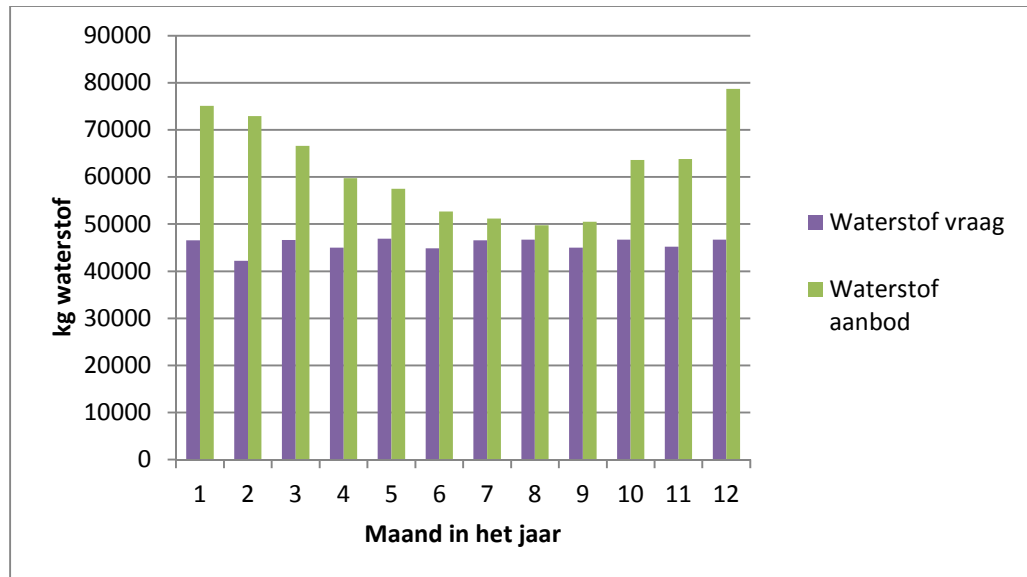


FIGUUR 39 VERLOOP VAN DE ENERGIE IN DE WARME BRON OVER DE TIJD – SCENARIO 'STADSDEEL'

5.4.3 Waterstofbalans

In het 'Stadsdeel'-scenario was het uitgangspunt dat de helft van alle huishoudens met een waterstofauto zou moeten kunnen rijden. De stroom hiervoor is voornamelijk afkomstig uit de windenergie, zodat de elektrolyser bij de windturbines kan staan en de waterstof vanaf daar vervoerd kan worden naar tankstations. Op basis van de resultaten kan het volgende worden vastgesteld:

- In totaal is bijna 40.000 MWh aan windenergie omgezet in waterstof. Dat komt overeen met 710.000 kg waterstof. De waterstofvraag is 550.000 kg, dus er is in totaal een overschot van 160.000 kg waterstof per jaar.
- Er kan in iedere maand aan de waterstofvraag worden voldaan zoals blijkt uit Figuur 40. In de maanden juli, augustus en september is het verschil tussen aanbod en vraag per maand het kleinst, in de overige maanden is het overschot groter.

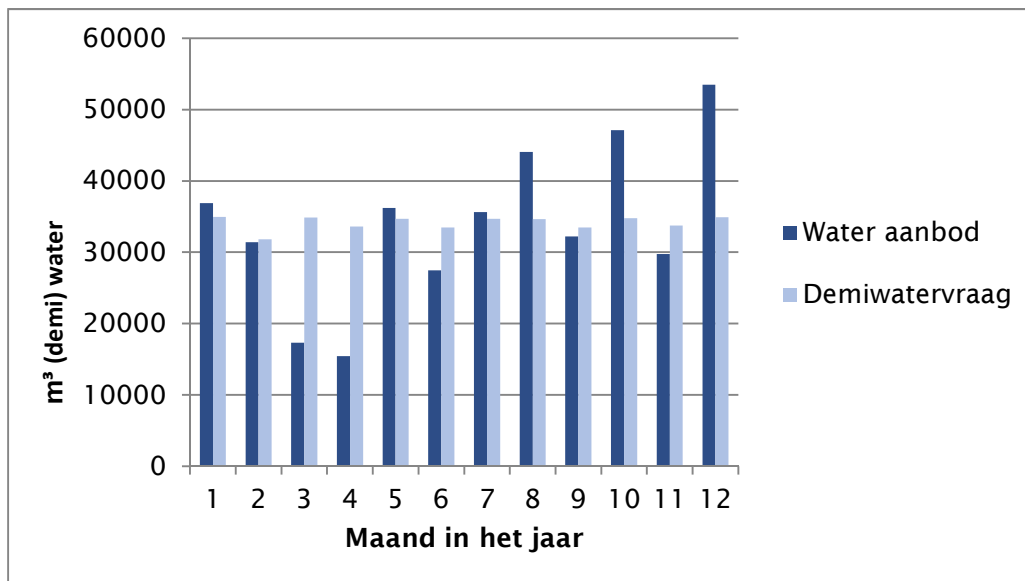


FIGUUR 40 AANBOD EN VRAAGPATTERN WATERSTOF – SCENARIO ‘STADSDEEL’

5.4.4 Waterbalans

De demiwaterlevering aan huishoudens is in dit scenario tienmaal groter dan in eerdere scenario's. Dat levert een andere verdeling op (zie Figuur 41):

- De regenwateropvang op de zonnepanelen is bijna 220.000 m³, terwijl er op de daken van woningen bijna 190.000 m³ kan worden opgevangen. Samen is dit ruim 400.000 m³ regenwater.
- Voor de productie van waterstof is 6.400 m³ aan demiwater nodig, wat overeenkomt met ruim 7.400 m³ aan regenwater. De demiwateraanvraag van alle woningen is 400.000 m³ aan demiwater. Rekening houdend met verlies in de RO komt dit neer op ca. 446.000 m³ aan regenwater. Samen met de regenwateraanvraag voor waterstof is dit ruim 450.000 m³.
- Het opgevangen regenwater kan dus, na rekening te houden met verliesfactoren, niet geheel voldoen aan de vraag naar demiwater voor waterstofproductie en de demiwateraanvraag in woningen. De regenwateropvang zou hiervoor met 9% moeten toenemen. Dat zou kunnen, door de opvang uit te breiden naar andere gebouwen dan woningen, zoals bedrijven, scholen en kantoren, maar dat is nu nog niet meegenomen.
- In dit scenario bestaat momenteel geen overschot aan regenwater wat in de zomer gebruikt kan worden om te sproeien.



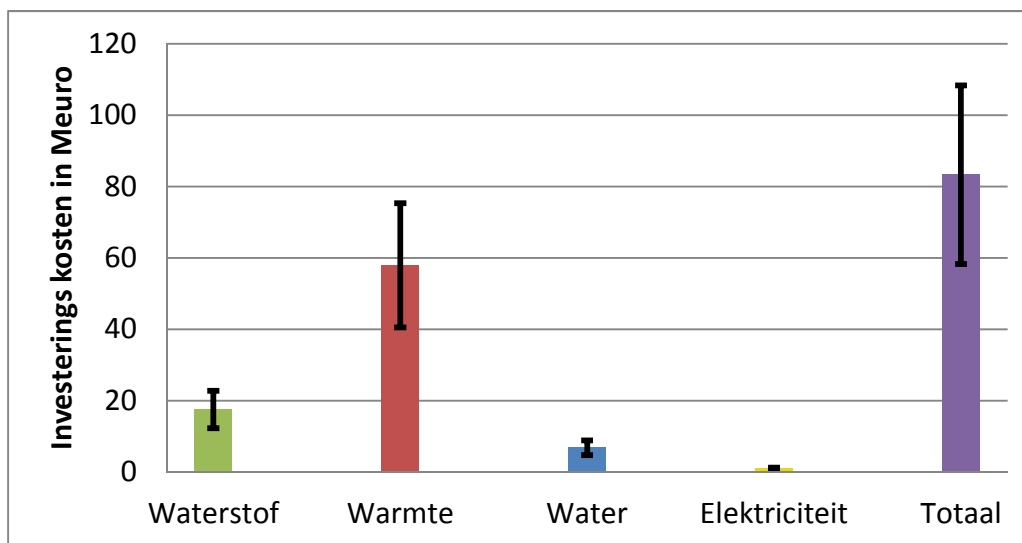
FIGUUR 41 REGENWATERAANBOD EN DEMIWATERVRAAG

5.4.5 Kosten en baten

De totale investeringen voor het systeem zijn ruim 83 miljoen euro, waarvan het warmtesysteem bijna 70% van de kosten omvat, waterstof 21%, demiwater ruim 8% en de elektriciteitsinfrastructuur ruim 1% (zie Tabel 31 en Figuur 42). De schaal van dit scenario is ruim tien maal groter dan voor de scenario's wijk-zon, maar de investeringen zijn door schaalgrootte en hogere inzetbaarheid van systeemonderdelen niet met 10, maar met 6 vermenigvuldigd. De onderhoudskosten zijn 1,7 miljoen euro per jaar, en daarmee ruim een factor zes hoger dan in de wijk-zon scenario's.

TABEL 31 OVERZICHT INVESTERINGEN - 'STADSDEEL' SCENARIO

	Totaal	Onderhoud + transport
Warmteproductie, opslag, transport, distributie en afgifte	58M€	620 k€
Waterstof productie, opslag en waterstoftankstation	17,5 M€	980 k€
Regenwater opvang, opslag, demiwaterproductie, transport en distributie	7 M€	90 k€
Elektriciteitsinfrastructuur binnen het systeem	1 M€	10 k€
TOTAAL Power-to-X-systeem investeringen	83.5 M€	
Onderhoudskosten per jaar		1700 k€/jaar



FIGUUR 42 INVESTERINGEN PER DEELSYSTEEM EN TOTAAL – SCENARIO ‘STADSDEEL’

De inkomsten in het ‘Stadsdeel’ scenario zijn weergegeven in Tabel 32. De totale netto inkomsten zijn 11.6 M€/jaar. De inkomsten bestaan voor 54% uit de verkoop van warmte, voor 42% uit de verkoop van waterstof en voor (afgerond) 4% uit de verkoop van demiwater. Warmte is in dit scenario dus de grootste inkomstenbron. De netto inkomsten zijn ruim negen keer hoger dan bij de scenario’s wijk-zon en ruim 2 maal hoger dan bij het scenario ‘Wijk, zon én wind’.

TABEL 32 INKOMSTEN SCENARIO ‘STADSDEEL’

	Warmte	Waterstof	Demiwater	Elektriciteit	TOTAAL
Geleverd per jaar	248,6 TJ	550.000 kg / 160.000 kg	400.000m ³	55.000 MWh	
Gemiddelde verkoop prijs	29,8€/GJ	10€/kg en 6€/kg	1€/m ³	- €/MWh	
Bruto Inkomsten per jaar	7.170 k€/jr	6450 k€/jr	400 k€/jr	- k€/jr	14.020 k€/jr
Inkoop elektriciteit uit zonnepark	22.500MWh	41.700 MWh	-MWh	55.000 MWh	
Gemiddelde inkoop prijs elektriciteit	39€/MWh	39€/MWh	39€/MWh	- €/MWh	
Inkoopkosten elektriciteit uit zonnepark per jaar	870 k€/jr	1.550 k€/jr	-k€/jr	- k€/jr	2.420 k€/jr
Netto Inkomsten per jaar	6.300 k€/jr	4.900 k€/jr	400 k€/jr	- k€/jr	11.600 k€/jr
Aansluitbijdrage, eenmalige inkomsten	8.200 k€/jr				

De simpele terugverdientijd voor dit scenario is 7,5 jaar, wat net als bij ‘Wijk, zon én wind’ bijna een halvering is van de terugverdientijden voor de scenario’s wijk-zon. Ten opzichte van ‘Wijk, zon én wind’ is de terugverdientijd juist iets hoger (ca een half jaar). Dit verschil

heeft te maken met de kosten voor het warmtesysteem die minder sterk dalen wanneer het systeem groter wordt dan bij waterstof. Het warmtesysteem is de grootste investeringspost in het systeem, en daarom duurt het ook iets langer voor het volledige systeem is terugverdiend. De kosten voor het hoofdwarmtenetwerk worden bijvoorbeeld wel goedkoper, maar het stuk leiding naar ieder huis moet nog steeds voor ieder huis worden aangelegd zonder dat de kosten hiervoor echt minder worden. De investeringen zijn bij het ‘*Stadsdeel*’ scenario dan ook driemaal hoger dan voor ‘*Wijk, zon én wind*’, terwijl de netto opbrengsten 2,3 maal zo groot zijn.

5.4.6 Warmte kosten en baten per huishouden

Om de kosten voor warmte goed te kunnen vergelijken zijn in Tabel 33 voor de verschillende scenario's de kosten voor de exploitant naast elkaar gezet. Bij 10.000 woningen is aangenomen dat het hoofdwarmtenetwerk vijfmaal zo groot wordt in plaats van tienmaal, omdat de hoofdleiding van de warmteopslag naar het ‘*Stadsdeel*’ toe maar één keer hoeft te worden aangelegd. De warmtepomp is bovendien ook niet tienmaal, maar achtmaal groter geworden en wordt goedkoper door schaalvoordelen. Deze punten zijn vooral terug te zien in de investeringskosten per woning. De elektriciteitskosten per jaar zijn wel 6% hoger dan bij ‘*Wijk, zon, warmte prioriteit*’ / ‘*Wijk, zon én wind*’. De oorzaak hiervoor ligt in het soort woningen wat van warmte wordt voorzien, in eerdere scenario's ging dit om half renovatie en half nieuwbouw. Deze verhouding renovatie/nieuwbouw ligt bij het ‘*Stadsdeel*’ scenario meer op renovatie, en daarom is de warmtevraag groter en is er dus ook meer elektriciteit nodig. De kosten voor onderhoud per woning vallen wel weer goedkoper uit, waardoor de prijs voor de exploitant uiteindelijk ca. 17 €/GJ en 420€/jaar per woning is.

TABEL 33 WARMTE KOSTEN EN BATEN PER HUISHOUDEN - SCENARIO ‘STADSDEEL’

	Exploitant - PtX <i>waterstof prioriteit</i>	Exploitant - PtX <i>warmte prioriteit & zon én wind</i>	Exploitant - PtX <i>Stadsdeel</i>
Investeringskosten per woning	8.200 €	8.200 €	5.800 €
Onderhoudskosten per woning per jaar	90 €/jr	90 €/jr	60 €/jr
Vastrecht per woning per jaar	-	-	-
Elektriciteitskosten per woning per jaar	110 €/jr	85 €/jr	90 €/jr
Productieprijs	26,8 €/GJ	25,7 €/GJ	16,9 €/GJ
Totale kosten per woning per jaar	610 €/jr	585 €/jr	420 €/jr

5.4.7 Demiwater kosten en baten per huishouden

Demiwaterproductie is in dit scenario opnieuw goedkoper geworden, en kost nu 1,5 €/m³. Daarmee is de prijs 30% lager dan voor de wijk, zon scenario's, en 22% lager dan voor ‘*Wijk, zon én wind*’. Net als bij het warmtenet is het demiwater net vijfmaal zo groot in plaats van tienmaal. Ook de kosten voor wateropvang zijn aanzienlijk minder omdat wateropvang op daken geen extra geld kost. We zagen echter wel dat er in dit scenario niet genoeg water wordt opgevangen om alle woningen van demiwater te voorzien (5.4.4), om de berekening zuiver te houden is daarom de demiwater vraag aangepast op 9.000 woningen.

Op een schaal van 9.000 woningen is het systeem net als in eerdere scenario's niet economisch rendabel, hoewel de marges kleiner worden. Het systeem zou de exploitant nu ca 20 €/jaar kosten. Zoals eerder gesteld zitten besparingen op zeep en levensduur nog niet inbegrepen in deze berekeningen, en moet een proef op kleinere schaal uitwijzen wat deze besparingen exact zijn, zodat die ook in de business case kunnen worden verwerkt.

TABEL 34 DEMIWATER KOSTEN EN BATEN PER HUISHOUDEN – SCENARIO ‘STADSDEEL’

	Exploitant – PtX	Bewoner - Ptx
Investeringskosten per woning	750 €	- €
Onderhoudskosten per woning per jaar	10 €/jr	- €/jr
Elektriciteitskosten per woning per jaar	1 €/jr	- €/jr
Waterkosten per woning per jaar	- €/jr	40 €/jr
Productieprijs	1,5 €/m ³	1,0 €/m ³
Totale kosten per woning per jaar	60 €/jr	40 €/jr

5.4.8 Waterstofproductie en tankkosten

De kosten voor waterstofproductie en de tankinfrastructuur dalen de kosten nog verder ten opzichte van het scenario ‘Wijk, zon én wind’. De kosten voor waterstofproductie nemen met 9% af van 3,7€/kg naar 3,4€/kg. De elektrolyzer is in dit scenario kleiner (8MW) dan bij ‘Wijk, zon én wind’ (10MW). Maar er wordt relatief wel meer waterstof geproduceerd (710.000 kg/jaar) dan bij ‘Wijk, zon én wind’ (665.000 kg/jaar). Er wordt dus met een kleinere elektrolyzer aan een grotere vraag voldaan, waardoor de kosten worden gedrukt. De tankinfrastructuur is relatief goedkoper omdat er een extra tankstation is geïnstalleerd, maar het verschil in kosten is hier nog geen 4%. De totale productieprijs voor waterstof is nu 6,2€/kg.

TABEL 35 KOSTENOVERZICHT WATERSTOF – SCENARIO ‘STADSDEEL’

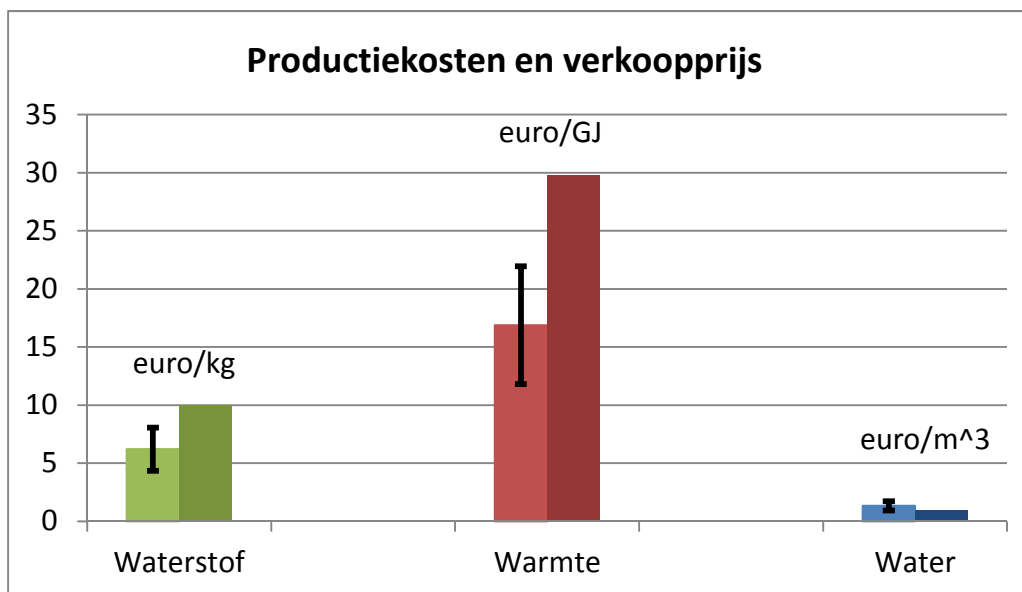
	Waterstof productie	Tanken
Investeringskosten	9.1 M€	8.4 M€
Operatie en onderhoud per jaar (incl transport)	205 k€	770 k€
Elektriciteitskosten per jaar	1550 k€	100 k€
Productieprijs	3,4 €/kg	2,8 €/ kg

5.4.9 Vergelijking productiekosten en verkoopprijs

De productiekosten voor waterstof, warmte en demiwater zijn weer uitgezet tegen de verkoopprijzen. De marge voor waterstof is inmiddels 3,8€/kg en voor warmte is het verschil bijna 13 €/GJ. De productie van demiwater ligt nog altijd hoger dan de verkoopprijs, het verschil is nog 0,5€/m³.

Qua energieverdeling kan dit concept voor een ‘Stadsdeel’ ook werken, waarbij zowel aan de vraag naar waterstof voor mobiliteit, warmte, elektriciteit voor verlichting, apparaten als een deel van de mobiliteit kan worden voldaan. De regenwateropvang moet nog iets worden uitgebreid (ca 10%) om aan alle huishoudens voldoende demiwater te kunnen leveren. Op jaarbasis is de levering van energie ook vrij constant, doordat zonne- en wind- energie elkaar in dit scenario goed complementeren.

De totale investeringen voor een stadsdeel zijn uiteraard een stuk groter dan voor een woonwijk, maar de terugverdientijd ligt veel lager, op circa 7,5 jaar. Daarmee wordt nog extra duidelijk dat een energieconcept als Power-to-X baat heeft bij schaalgrootte.



FIGUUR 43 KOSTENVERGELIJKING PRODUCTIEKOSTEN EN VERKOOPPRIJS STADSDEEL SCENARIO, LINKS DE PRODUCTIEPRIJS, RECHTS DE VERKOOPPRIJS

5.4.10 CO₂-emissie besparingen

In het 'Stadsdeel' scenario wordt relatief veel stroom terug geleverd aan het net (of direct gebruikt in een huishouden). Om die reden is de teruglevering van elektriciteit ook een belangrijk onderdeel van de totale CO₂-emissie reductie, namelijk bijna 43% van in totaal 53.000 ton CO₂ reductie per jaar. Het gebruik van waterstof in plaats van een fossiele brandstof voor mobiliteit is in dit scenario goed voor 29% van de totale CO₂-besparing, en warmte voor 28%.

Wanneer alle opgewekte elektriciteit alleen als zodanig zou worden gebruikt zou dit een totale besparing van 48.300 ton CO₂ per jaar opleveren. Met het Power-to-X-systeem wordt op dus een bijna 10% hogere CO₂ besparing gerealiseerd.

TABEL 36 CO₂ EMISSIE BESPARING - SCENARIO 'STADSDEEL'

	Warmte	Waterstof	Elektriciteit	Totaal
Energie geleverd	249 TJ/jaar	710.000 kg/jaar	545.000 kWh/jaar	
emissiefactor	59,7 kg CO ₂ /GJ	220 gr CO ₂ /km	0,413 kg CO ₂ /kWh	
CO ₂ emissiebesparing Power-to-X-systeem	14.900 ton CO ₂ /jaar	15.600 ton CO ₂ /jaar	22.500ton CO ₂ /jaar	53.000 ton CO ₂ /jaar
Elektriciteitsgebruik van zonnepark	22.500 MWh/jaar	40.000 MWh/jaar	54.500 kWh/jaar	
Emissiefactor elektriciteit	0,413 kg CO ₂ /kWh	0,413 kg CO ₂ /kWh	0,413 kg CO ₂ /kWh	
CO ₂ emissiebesparing elektriciteit	9.300 ton CO ₂ /jaar	16.500 ton CO ₂ /jaar	22.500ton CO ₂ /jaar	48.300 ton CO ₂ /jaar

6 Vermeden kosten

6.1 Vermeden elektriciteitsnet kosten

Het project Power-to-X is gestart vanuit de filosofie om een lokaal duurzaam energiesysteem te realiseren waarbij vraag naar energie voor warmte, elektriciteit en mobiliteit met het aanbod van duurzame energie in balans zijn. Niet alleen in balans op jaarbasis, waarbij de energie infrastructuur de benodigde flexibiliteit en opslag van energie levert, maar ook in balans door het jaar heen door conversie, flexibiliteit en opslag van energie lokaal op te lossen en te organiseren. Het aanbod van duurzame energie is vooral in de vorm van elektriciteit van zonnepanelen en windturbines. Terwijl de vraag naar energie vooral bestaat in de vorm van warmte voor verwarming en warm tapwater, waterstof voor mobiliteit en elektriciteit voor apparatuur, verlichting en mobiliteit .

In een fossiel energiesysteem zijn de infrastructuur voor elektriciteit, warmte en mobiliteit gescheiden. Elektriciteit wordt gemaakt in grote centrales en via het elektriciteitsnet naar de vraag gebracht, waarbij het op en afregelen dan wel uit of aanschakelen van centrales de benodigde flexibiliteit levert om vraag en aanbod in evenwicht te brengen. Warmte wordt geleverd door een aardgasgestookte ketel, waarbij het aardgas via een pijpleiding naar de woningen en gebouwen wordt gebracht. De flexibiliteit in het aardgassysteem wordt daarbij vooral geleverd door grootschalige opslag van gas in onder meer zoutkoepels. Mobiliteit, auto's, bussen, etc., hebben voornamelijk een verbrandingsmotor, die benzine of dieselbrandstof gebruikt. De flexibiliteit wordt hierbij vooral geleverd door grootschalige opslag van olie, benzine en diesel in grote opslagtanks.

In de overgang naar een duurzaam energiesysteem, worden anno 2018, vooral all-electric energiesystemen ontwikkeld. Elektriciteit wordt opgewekt met zonnepanelen op het dak en windturbineparken op land en op zee. Zonnepanelen besparen op het eigen elektriciteitsgebruik, terwijl de resterende elektriciteit via het elektriciteitsnet wordt aangevoerd. Warmte wordt geleverd via elektrisch aangedreven warmtepompen, waarbij de warmtebron lucht, oppervlaktewater, bodem of opslag van warmte in aquifers (Warmte Koude Opslag) kan zijn. De benodigde elektriciteit voor de warmtepompen, met vooral een elektriciteitsvraag in de winter, wordt door het elektriciteitsnet geleverd. Ook voor mobiliteit wordt gedacht aan elektrisch rijden, waarbij batterijen in de auto's de elektriciteit leveren. Deze elektriciteit wordt 'getankt' uit het elektriciteitsnet. De flexibiliteit moet in al deze gevallen door het elektriciteitssysteem worden geleverd, dus nog steeds door fossiel gestookte elektriciteitscentrales. Omdat het een all-electric systeem is, moet de elektriciteitsaansluiting ook aanzienlijk verzaamd worden. Enerzijds voor het terugleveren van zonnestroom in de zomer en anderzijds voor de extra vraag naar elektriciteit van de warmtepompen en de batterij-elektrische auto's. Recent zijn een paar projecten met buurtbatterijen en bi-directionele laadpalen en BEV's gerealiseerd, om meer flexibiliteit in het elektriciteitssysteem te realiseren [36]. Dit biedt wel een oplossing voor dag/nacht-fluctuaties, maar niet voor seizoensfluctuaties.

In een volledig duurzaam energiesysteem zijn er geen fossiel gestookte centrales meer die de benodigde flexibiliteit in het elektriciteitssysteem kunnen leveren. Als de flexibiliteit in het elektriciteitssysteem centraal geregeld moet worden, dan betekent dat bovendien een enorme uitbreiding van de capaciteit van het elektriciteitsnet; de zogenaamde koperen plaat

oplossing. Met dit Power-to-X-project, wordt de flexibiliteit en opslag van duurzame energie meer lokaal geregeld, waardoor kosten worden bespaard voor netverzwaring. Door de elektriciteit van het zonnepark in de zomer te gaan gebruiken om via een warmtepomp, warmte te produceren en via een elektrolyser waterstof te produceren is een minder zware netaansluiting voor het zonnepark nodig. De warmte kan op een temperatuur van 40-60 graden wordt opgeslagen in een aquifer en kan in de winter direct gebruikt worden voor verwarmen van gebouwen. Hierdoor hoeft geen warmtepomp in de woning te worden geplaatst en aangesloten en is dus ook geen grotere aansluiting op het elektriciteitsnet noodzakelijk.

Het zonnepark heeft een capaciteit van 8,7 MWp, in principe zou dus ook een netaansluiting van 8,7 MW moeten worden geïnstalleerd. Maar nu zijn een warmtepomp met een capaciteit van 2,5 MW en een elektrolyser met een capaciteit van 2,5 MW geplaatst, waardoor nog maar 3,7 MW-netaansluiting nodig is. Uit communicatie met Stedin en Waternet blijkt dat dit een besparing van 1,5 miljoen Euro kan opleveren. Normaal gesproken bespaart de zonnepark eigenaar, in dit geval Waternet, deze aansluitkosten.

In communicatie met Volker Wessels is verondersteld dat in de woningen geen warmtepomp hoeft te worden geplaatst, maar slechts een boiler voor warm tapwater dat langzaam kan worden gevuld vanuit het warmtenet. Het vermogen van de warmtepomp die daarmee wordt uitgespaard, is 2,5 kW [37], [38]. Een studie van Ecofys over de waarde van slimme netten kwam uit op een range van 204-700 €/kW voor de kosten van het vergroten van netaansluitingen [37]. In deze studie nemen we waarde van 204€/kW, omdat deze waarde in de Ecofys-studie bij een casus voor de bebouwde kom hoort, en daarvan is in Rijnhuizen ook sprake. Desondanks zijn het grove schattingen, en kan het per situatie verschillen wat de kosten zijn, afhankelijk van hoe oud het net is, hoe het is uitgelegd en hoeveel ruimte het net nog heeft om uit te breiden. Wanneer we de 204 €/kW zouden overnemen voor het Power-to-X scenario Wijk-Zon in Nieuwegein komt dit voor 900 woningen neer op vermeden kosten voor netverzwaring van € 459.000. De bewoner betaalt vastrecht voor de netaansluiting die afhankelijk is van de maximale aansluitcapaciteit. Maar dit vastrecht is tot 3*25A aansluitvermogen hetzelfde, en dus levert dit niet direct voor de consument/bewoner een besparing op. Toch is deze besparing reëel. De besparing wordt echter gerealiseerd door de netbeheerder, in dit geval Stedin.

In totaal zijn de vermeden kosten voor netverzwaring in te schatten op 2 miljoen Euro, waarvan 1,25 miljoen Euro vermeden kosten ten bate van het warmte systeem en 0,75 miljoen Euro vermeden kosten voor het waterstof systeem (zie Tabel 37).

TABEL 37 VERMEDEN ELEKTRICITEITSNET KOSTEN

	Investerings ^a (overgenomen uit tabel 11)	Vermeden Kosten	Netto-Investerings
Warmteproductie, opslag, transport, distributie en afgifte	7,3 M€	-1,25 M€	6,05 M€
Waterstof productie, opslag en waterstoftankstation	4,5 M€	-0,75 M€	3,75 M€
Regenwater opvang, opslag, demiwaterproductie, transport en distributie	1,4 M€		1,4 M€
Elektriciteitsinfrastructuur binnen het systeem	0,5 M€		0,5 M€
TOTAAL Power-to-X-systeem	13,7 M€	-2,0 M€	11,7 M€

^a Deze investeringen gelden voor het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit'

Deze vermeden kosten kunnen worden doorberekend in de productieprijzen van warmte en waterstof, wat het volgende beeld oplevert (zie Tabel 38). De productieprijzen voor warmte in het Wijk, zon, warmteprioriteit scenario in Nieuwegein neemt af van 25,7 €/GJ naar 21,6 €/GJ. En de productieprijzen voor waterstof neemt af van 9,4 €/kg naar 8,7 €/kg.

TABEL 38 PRODUCTIEPRIJZEN WATERSTOF EN WARMTE INCLUSIEF VERMEDEN NETKOSTEN

	Productieprijzen Zonder vermeden netkosten	Productieprijzen Met vermeden netkosten	Besparing in % Door vermeden netkosten
Warmte	25,7 €/GJ	21,6€/GJ	16%
Waterstof	9,4 €/kg	8,7€/kg	7 %

De ingeschatte vermeden netkosten zijn een eerste ruwe inschatting. Ze moeten met de nodige voorzichtigheid worden gehanteerd. In een vervolgstudie, zullen deze vermeden netkosten beter en met meer nauwkeurigheid moeten worden bepaald.

6.2 Besparingen door vermeden CO₂ emissies

In het 'Wijk, zon, warmte prioriteit'-scenario zijn de vermeden CO₂-emissies zo'n 3.400 ton per jaar. De vermeden CO₂-emissies hebben een waarde. Om de klimaatdoelen uit het Klimaatakkoord van Parijs te kunnen halen, is berekend dat een CO₂-prijs van 60 €/ton CO₂ nodig is [39]. Deze prijs zouden bedrijven moeten betalen, wanneer ze een ton CO₂ emitteren. In een handelssysteem zou dus een prijs van 60 €/ton vermeden CO₂-emissies kunnen worden betaald. Dit zou betekenen dat dit meegenomen kan worden als inkomsten in het Power-to-X-systeem. Deze inkomsten kunnen vertaald worden in een verlaging van de productieprijzen voor warmte en waterstof. De productieprijzen voor warmte en waterstof wordt in beide gevallen verlaagd met zo'n 14%, zie Tabel 39.

TABEL 39 PRODUCTIEPRIJZEN INCLUSIEF VERMEDEN KOSTEN DOOR CO₂-EMISSIE BESPARING

	Warmte	Waterstof	Elektriciteit	Totaal
Energie geleverd	20,4 TJ/jaar	80.000 kg/jaar	1013 kWh/jaar	
Emissiefactor	35,97 kg CO ₂ /GJ	220 gr CO ₂ /km	0,413 kg CO ₂ /kWh	
CO ₂ emissie besparing	1.220 ton CO ₂ /jaar	1.760 ton CO ₂ /jaar	420 ton CO ₂ /jaar	3.400 ton CO ₂ /jaar
CO ₂ prijs	60 €/ton	60 €/ton	60 €/ton	
CO ₂ -emissie kostenbesparing	73.200 €/jaar	105.600 €/jaar	25.200 €/jaar	204.000 €/jaar
Productievolume	20.400 GJ/jaar	80.000 kg/jaar		
Productieprijzen zonder CO ₂ emissie kostenbesparing	25,7 €/GJ	9,4 €/kg		
Productieprijzen met CO ₂ emissie kostenbesparing	22,1 €/GJ	8,0 €/kg		

6.3 Andere vermeden emissies, milieu en andere effecten

Het Power-to-X-project draagt bij aan het verbeteren van de kwaliteit van de leefomgeving. Concreet draagt elektrische mobiliteit, zowel batterij elektrisch als waterstof-brandstofcel elektrisch bij aan een verbetering van de luchtkwaliteit in de directe woon/werkomgeving. Auto's met een verbrandingsmotor stoten NO_x , fijnstof en VOS (vluchtige organische stoffen) uit, wat een negatief effect heeft op de luchtkwaliteit en gezondheid [40], [41]. Het vervangen van deze auto's of andere voertuigen door elektrisch aangedreven voertuigen kan zeker een positief effect hebben op deze emissies, vooral in stedelijke, dichtbevolkte gebieden. Naast een verbetering van de luchtkwaliteit, neemt ook de geluidsoverlast af bij het inzetten van elektrisch aangedreven auto's.

In de woningen zijn er diverse positieve effecten. Er zijn minder veiligheidsrisico's dan bij het gebruik van aardgas, onder meer geen risico meer op ontploffing van de branders in een cv-ketel en geen kans op vergiftiging door koolstofmonoxide. In vergelijking met een WKO-warmtepompsysteem, hoeft bij het Power-to-X-concept geen warmtepomp in de woning geïnstalleerd te worden, hetgeen minder ruimtebeslag betekent, geen geluidsoverlast geeft en leidt tot minder onderhoudskosten en geen inkoop van elektriciteit voor de warmtepomp.

Bij gebruik van demiwater in huis voor de wasmachine en vaatwasser slaan er geen (calcium)zouten meer neer in de machine, en door minder zeepgebruik daalt de milieubelasting. Het verminderde zeepgebruik leidt ook tot een kostenbesparing op verschillende fronten, waarbij het gebruik van minder wasmiddel het meest direct te kwantificeren is op ca. 28 €/jaar [42]. In totaal wordt in 900 woningen op zeep zo'n 25.000 Euro per jaar bespaard.

Tenslotte leidt het opvangen en bergen van regenwater tot een betere waterhuishouding, waarbij zowel wateroverlast als droogte kunnen worden tegengegaan. Bij hevige regenbuien wordt het regenwater opgevangen en in de bodem opgeslagen. In tijden van droogte kan dit opgeslagen water worden opgepompt en gebruikt voor besproeiing.

Alhoewel deze effecten moeilijk kwantificeerbaar zijn, dragen ze onmiskenbaar bij aan een schonere, stillere, veiligere en groenere leefomgeving.

6.4 Hoe kunnen vermeden kosten worden geïncorporeerd in de business case?

De vermeden kosten voor netaansluiting van het zonnepark, de vermeden kosten van de benodigde netverzwaring in de woonwijk en de kostenbesparing door de vermeden CO_2 -emissies zijn gekwantificeerd, zie Tabel 40. Indien deze vermeden kosten worden meegenomen, zou de productieprijs van warmte met 30% afnemen. De productieprijs van waterstof zou met ruim 20% afnemen.

TABEL 40 TOTALE VERMEDEN KOSTEN BEREKENING VOOR WARMTE EN WATERSTOF

	Productieprijs Zonder vermeden kosten	Productieprijs Met vermeden netkosten	Productieprijs Met vermeden netkosten en CO_2 - emissie kostenbesparing	Besparing in % Totaal vermeden kosten
Warmte	25,7 €/GJ	21,6€/GJ	18,0€/GJ	30%
Waterstof	9,4 €/kg	8,7€/kg	7,3€/kg	22%

Hoewel de vermeden kosten een grote invloed kunnen hebben op de rendabiliteit van het project, lijken deze vermeden kosten moeilijk in de business case te incorporeren. Op grond van bovenstaande kan het volgende worden vastgesteld:

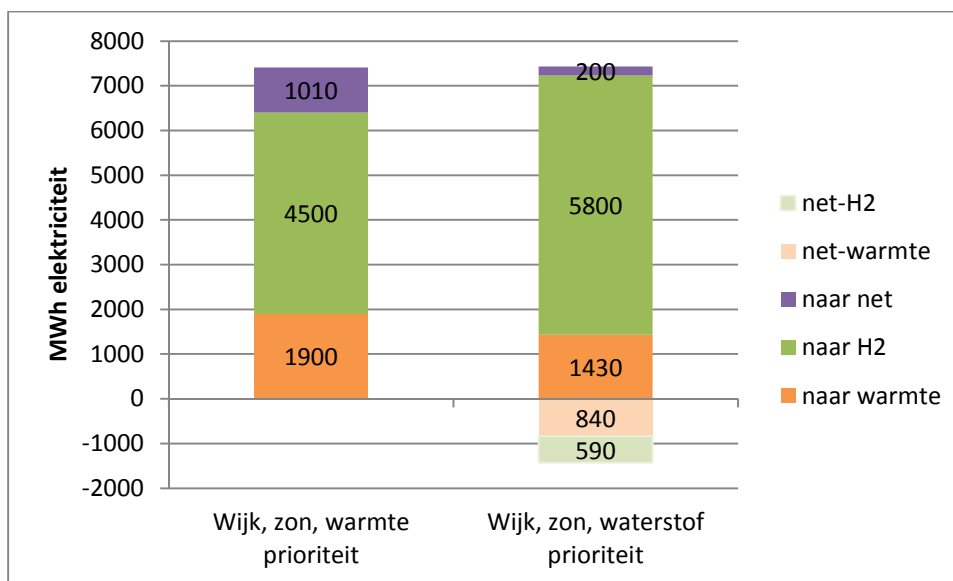
- De vermeden netaansluitingskosten voor het zonnepark zijn nog het meest concreet en ook het makkelijkst te incorporeren. Indien namelijk het zonnepark onderdeel van het totale Power-to-X-project zou zijn, dan komen de besparing ook daadwerkelijk ten goede van het totale project. Daarom is de organisatievorm, samenwerking, afspraken en de allocatie van kosten en baten tussen de verschillende partijen een belangrijk onderwerp voor verder onderzoek.
- De bespaarde netverzwakingskosten in de woonwijk leiden niet direct tot een kostenbesparing voor de bewoner of woningeigenaar. Deze besparingen zijn eigenlijk verminderde investeringskosten voor het netwerkbedrijf. Deze besparingen moeten nader worden onderzocht. Enerzijds zou het netwerk in de wijk door andere ontwikkelingen zoals elektrisch laden toch verder verzwakt moeten worden maar anderzijds zijn de besparingen in de rest van het elektriciteitssysteem niet meegenomen. Daarnaast is de vraag hoe deze besparingen uiteindelijk in de business case verrekend zouden kunnen worden. Dit dient verder onderzocht te worden.
- Een prijs per ton CO₂ is een goed systeem om de kosten van vervuiling in rekening te brengen bij de vervuiler. Voor grote energieverbruikers is dit een goed te hanteren systeem. Maar voor een lokaal duurzaam energiesysteem in een woonwijk, met vele partijen en vele transacties en tariefssystemen die landelijk worden bepaald, is CO₂-emissie besparing en een prijs voor een vermeden ton CO₂ nu niet in de business case te incorporeren.
- Andere vermeden emissies, vermeden kosten, veiligheidsaspecten, etc. zijn moeilijk te kwantificeren. Door normstelling kunnen mogelijk bepaalde wenselijke oplossingen gerealiseerd worden.

Suboptimale allocatie van kosten en baten, kan in de meeste gevallen alleen via een overheidsinterventie worden opgelost, via financiële maatregelen zoals subsidies, fiscale maatregelen of SDE-regelingen of via normstelling, wet- en regelgeving. In een vervolgproject zal een meer omvattende Maatschappelijke Kosten-Baten Analyse moeten worden uitgevoerd. Daarnaast moet verder worden verkend op welke wijze de maatschappelijk vermeden kosten en andere effecten, het effectiefst in de business case kunnen worden geïncorporeerd dan wel het minder duurzame alternatief niet of tegen hogere kosten gerealiseerd kan worden.

7 Discussie

In hoofdstuk 5 is een overzicht gegeven van de energiebalans en economische analyse van het Power-to-X-concept onder verschillende condities. De woonwijk stond daarbij centraal, maar ook een groter stadsdeel scenario is nader bekeken. Op de resultaten wordt in dit hoofdstuk verder gereflecteerd. Daarnaast worden ook een aantal aannames verder onder de loep genomen.

- Regelmechanisme vereist zeer goede afstemming tussen verschillende partijen**
 Het verschil tussen de scenario's 'Wijk, zon, warmte prioriteit' en 'wijk, zon, waterstof prioriteit' ligt in het regelmechanisme, wat bepaald of warmteproductie voorrang krijgt, of juist de productie van waterstof. Daaraan gekoppeld zit ook de inkoop van stroom uit het net. De resultaten hebben een duidelijk verschil laten zien in de energiebalans, evenals de prijs voor warmte en waterstof (zie Figuur 44 & Tabel 41). Bij het aansturen van het Power-to-X-systeem moet dus heel goed worden afgestemd hoe de verdeling van energie plaatsvindt. Dit geldt ook voor bijvoorbeeld de stroom die Waternet zelf zou willen afnemen van het zonnepark voor gebruik in hun pompen. In dit rapport wordt het systeem als geheel bekeken, maar in werkelijkheid zullen er altijd meerdere partijen zijn die andere (en mogelijk tegengestelde) belangen hebben.



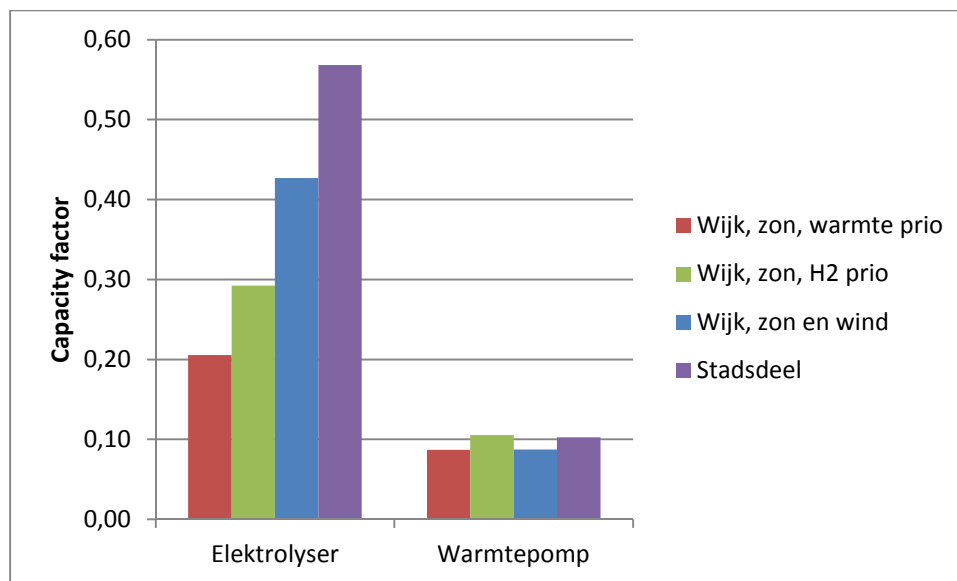
FIGUUR 44 VERDELING TUSSEN ELEKTRICITEIT UIT ZON (BOVEN DE X-AS) EN INGEKOCHE STROOM (ONDER DE X-AS) BIJ DE SCENARIO'S 'WIJK, ZON, WARMTE PRIORITEIT' EN 'WIJK, ZON, WATERSTOF PRIORITEIT'.

TABEL 41 VERGELIJKING PRODUCTIEPRIJS EN TERUGVERDIENTIJD WIJK, ZON SCENARIO'S

	Prijs warmte	Prijs waterstof	Prijs demiwater	Simpele terugverdiëntijd
Wijk, zon, warmte prioriteit	25,7€/GJ	9,4€/kg	2,1€/m ³	15,5j
Wijk, zon, waterstof prioriteit	27,0€/GJ	8,4€/kg	2,1€/m ³	14j

- **Optimale grootte systeemonderdelen**

De elektrolyser en warmtepomp zijn niet ingesteld op het verbruik, maar op het kunnen verwerken van zoveel mogelijk zonnestroom en staan daarom ingesteld op 2,5 MW. Dit heeft invloed op de capacity factor, in dit geval de totale gebruikte energie gedeeld door de hoeveelheid energie die het apparaat had kunnen omzetten in warmte of waterstof. Een overzicht hiervan is gegeven in Figuur 45. Het verschil tussen de wijk & zon scenario's komt hier weer duidelijk naar voren; door de prioriteit aan waterstof te geven en stroom in te kopen gaat de capacity factor van de elektrolyser met ruim 8% omhoog. Daardoor dalen de kosten voor waterstof met 10% (Tabel 41). In de andere scenario's wordt dit effect nog sterker, omdat de elektrolyzer voor een steeds groter deel van de tijd aan staat. Voor de warmtepomp geldt dit effect niet, de capacity factor is hier over het algemeen laag, ook omdat deze 4 maanden per jaar uit staat. Uit deze analyse blijkt dat de grootte van de elektrolyzer een factor is waar verder mee gevarieerd kan worden, om tot een optimale grootte te komen die zowel de productieprijs voor waterstof laag houdt, als zoveel mogelijk zonnestroom kan verwerken en genoeg waterstof kan produceren, vooral in de wijk scenario's.

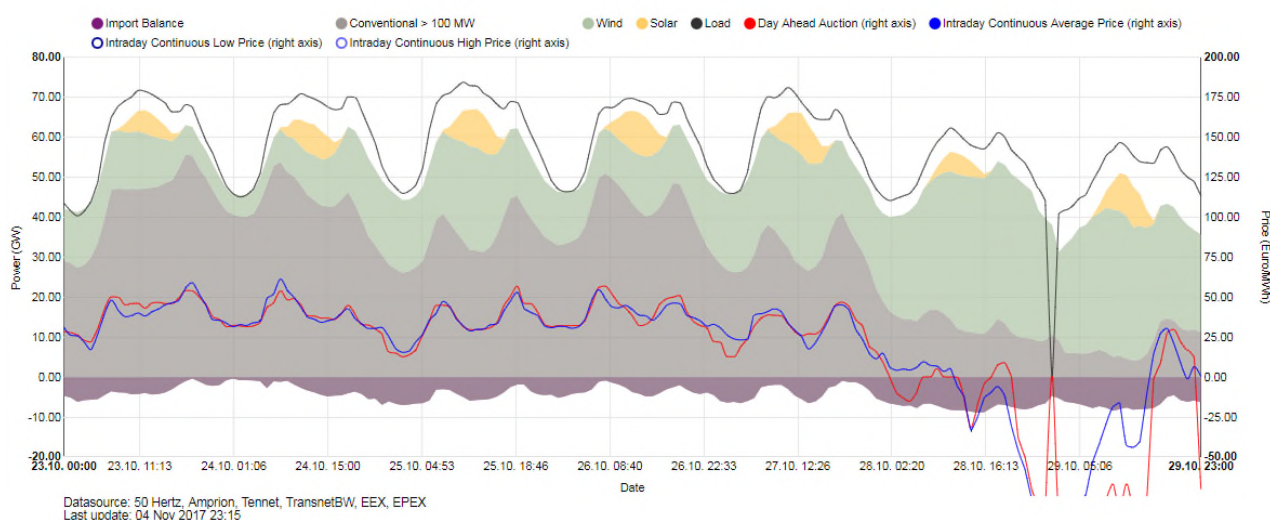


FIGUUR 45 CAPACITY FACTOR VAN DE ELEKTROLYSER EN DE WARMTEPOMP IN ALLE SCENARIO'S

- **Stroom inkoop uit het net**

De vergelijking tussen de scenario's 'Wijk, zon, warmte prioriteit' en 'Wijk, zon, waterstof prioriteit' laat zien dat inkoop van stroom uit het net leidt tot een sterkere business case. Dat komt omdat de elektrolyser in beide scenario's even groot is, maar vaker aan staat als aan waterstof prioriteit wordt gegeven. Dit brengt de waterstofprijs naar beneden. De prijs voor warmte gaat enigszins omhoog, omdat (duurdere) stroom

uit het net moet worden ingekocht om de warme bron op peil te houden (zie Tabel 41). Vanuit economisch perspectief kan er dus beter aan waterstof prioriteit worden gegeven dan aan warmte. Hierdoor gaat echter de CO₂-besparing wel omlaag. De stroom die geïmporteerd wordt is nu nog voornamelijk grijze stroom, waardoor de elektrolyser in feite grijze waterstof gaat produceren en de warmte ook niet meer volledig duurzaam is. Op continue basis grijze stroom importeren voor het op peil houden van de waterstof en warmteproductie verlaagt dus de duurzaamheidswinst van het systeem. In de toekomst zal dit zeker veranderen, als de energievoorziening steeds duurzamer wordt. Wanneer bijvoorbeeld bij veel wind in Duitsland de elektriciteitsprijzen negatief worden (zie Figuur 46), kan het Power-to-X-systeem het elektriciteitsnet ontlasten door inkoop van stroom.



FIGUUR 46 DUITSE ELEKTRICITEITSOPWEKKING IN DE LAATSTE WEEK VAN OKTOBER, IN ROOD DE PRIJSONTWIKKELING. OP 28-29 OKTOBER WAREN DE PRIJZEN RUIM ONDER NUL [43].

- **DC-systeem**

Onderdeel van het Power-to-X project was informatie verzamelen over een gelijkstroom (direct current, DC) systeem. De stroom die door zonnepanelen wordt opgewekt is gelijkstroom, en de meeste grote apparaten (elektrolyzer, warmtepomp) gebruiken uiteindelijk ook gelijkstroom. Door de omvormers bij zowel de zonnepanelen als in de apparaten weg te laten, kan op kosten worden bespaard en wordt de efficiëntie van het systeem groter. Het is in dit project met de huidige projectpartners echter niet gelukt om hier genoeg informatie over te verzamelen. Kennis over DC-systemen is nog vrij beperkt. In het vervolgproject wordt de TU Delft betrokken om deze kennis aan te vullen zodat duidelijk wordt welke rol DC precies kan gaan spelen in het Power-to-X-concept. In de berekeningen is nu nog geen rekening gehouden met de omschakeling van voltages (step up/step down) tussen de zonnepanelen en andere deelsystemen. Daardoor kan het uiteindelijke stroomgebruik licht zijn overschat. Aan de andere kant zijn de mogelijke kostenbesparingen die bij DC systemen kunnen optreden ook niet meegenomen. In een 2,5MW elektrolyser gaat het bijvoorbeeld om een omvormer die een halve 40 voet container in beslag neemt, van de 2,5 containers in totaal.

- **Warmteverlies in de bodem en warmteterugwinning**

Over warmteverlies bij infiltreren op hoge temperatuur in de bodem is nog niet genoeg inzicht verkregen. Er zijn wel eerder proeven gedaan op hoge temperatuur [44], waar lage rendementen werden geconstateerd. Echter, nieuw ontwikkelde technieken zoals multi-partially-penetrating-well techniek [45] (zie Bijlage V) kunnen het rendement aanzienlijk verhogen. In de huidige berekeningen is nu een constante temperatuur in de warmtebron aangenomen van 55°C. Dit is een versimpelde aanname, die er toe kan leiden dat de daadwerkelijke hoeveelheid energie die nodig is voor warmteproductie is onderschat. In het vervolgproject zullen hier betere berekeningen voor worden ontwikkeld. Bijvoorbeeld door een koppeling te maken tussen het Power-to-X-model en een bodem-stromingsmodel (SEAWAT), zodat er communicatie over en weer plaats kan vinden. Aan de andere kant kan de warmteterugwinning verder worden geoptimaliseerd. De elektrolyser werkt namelijk op 60-70°C, en heeft een grote koelinstallatie. Als een deel van deze warmte kan worden gebruikt voor het opwarmen van het kanaalwater, dan wordt daarmee juist energie bespaard. Deze mogelijkheden moeten verder worden geanalyseerd en afgewogen in een vervolgproject.
- **Modelbeperkingen**

Het Power-to-X-model is in staat om per uur te berekenen wat de vraag naar waterstof, warmte en demiwater is, en kan deze vraag koppelen aan de opwekking van duurzame elektriciteit en/of inkoop van stroom uit het elektriciteitsnet, inclusief conversiemechanismen en (seizoens)opslag. Het model kent echter ook beperkingen, die deels hierboven al zijn beschreven (dc-elektriciteitsstelsel en warmteopslag in de bodem). Daarnaast kan het warmteverlies nauwkeuriger worden bepaald en het warmteopslagpatroon verder worden geoptimaliseerd. Elektriciteitsverliezen binnen het stelsel moeten nog worden vastgesteld en geïntegreerd, evenals het (beperkte) stroomgebruik van de RO en de pompen in het warmtenetwerk. Uiteindelijk zou er ook toegewerkt moeten worden naar een voorspellend model zodat op basis van bijvoorbeeld weersvoorspellingen een regeltechniek voor de komende dag kan worden bepaald. Een nadere uitwerking van deze punten is te vinden in Bijlage VI.
- **Demiwater levering**

De prijs van demiwater kan zeker omlaag worden gebracht door schaafeffecten, maar in alle berekende scenario's ligt de productieprijs hoger dan de verkoopprijs. Het effect hiervan op de totale terugverdientijd van het project is niet heel groot, omdat het om een beperkte hoeveelheid water gaat. Het demiwater leveringsconcept is wel een punt waar nog nader naar moet worden gekeken. Het moet worden gezien als een proefproject, om de besparingen in de woningen op zeep en langere levensduur van apparaten daadwerkelijk te kunnen kwantificeren. Als deze besparingen in de business case worden meegenomen, dan kan er een hogere prijs worden gevraagd voor het demiwater. Een eerste berekening voor wasmiddelenbesparing kwam uit op ca. 28 €/jaar per huishouden [42]. Als deze kosten kunnen worden verrekend in de demiwaterprijs, dan is er in het 'Stadsdeel' scenario wel een marge tussen de productieprijs en de verkoopprijs (zie Tabel 42). Een proef met minder woningen zal echter eerst in de praktijk moeten uitwijzen wat de besparingen precies zijn.

TABEL 42 VERGELIJKING VAN DEMIWAAR KOSTEN EN BATEN PER HUISHOUDEN

	Exploitant – PtX Wijk, zon	Exploitant – PtX Wijk, zon én wind	Exploitant – PtX Stadsdeel	Bewoner – PtX
Investeringskosten per woning	1.500 €	1370 €	750 €	- €
Onderhoudskosten per woning per jaar	10 €/jr	10 €/jr	10 €/jr	- €/jr
Elektriciteitskosten per woning per jaar	1 €/jr	1 €/jr	1 €/jr	- €/jr
Waterkosten per woning per jaar	- €/jr	- €/jr	- €/jr	40 €/jr
Extra bijdrage demiwater				28 €/jr
Productieprijs	2.1 €/m ³	1,9 €/m ³	1,5 €/m ³	1.7 €/m ³
Totale kosten per woning per jaar	85 €/jr	80 €/jr	60 €/jr	68 €/jr

- **De invloed van schaalgrootte**

Door een aantal variaties op het scenario ‘Wijk, zon, warmte prioriteit’ door te rekenen is duidelijk dat het voor het warmtesysteem cruciaal zal zijn om zoveel mogelijk woningen aan te sluiten. Bij zeshonderd woningen loopt de productieprijs van warmte op tot 36€/GJ (zie Tabel 43). Ook technisch gezien is het beduidend ingewikkelder om een kleinere hoeveelheid warmte op te slaan in de bodem omdat er dan relatief een veel groter uitwisselend oppervlak is en dus meer warmteverlies plaatsvindt. Het aansluiten van zoveel mogelijk woningen op het warmtenet, en dus het betrekken van zoveel mogelijk projectontwikkelaars die actief zijn in Rijnhuizen, moet daarom een focus zijn in het vervolg van het project. Meer dan negenhonderd woningen aansluiten op het warmtenet behoort zeker tot de mogelijkheden, al vraagt dit misschien een kleine aanpassing in de grootte van de elektrolyser. De discontovoet is ook van belang voor de uitkomsten van het project, en moet daarom in overleg met investeerders goed worden afgestemd.

TABEL 43 KOSTEN EN BATEN WARMTE BIJ VERSCHILLENDE WIJKGROOTTES

	Exploitant – PtX 900 woningen	Exploitant – PtX 600 woningen	Exploitant – PtX 1200 woningen
Investeringskosten per woning	8.200 €	11.630 €	6.500 €
Onderhoudskosten per woning per jaar	90 €/jr	125 €/jr	70 €/jr
Brandstofkosten per woning per jaar	85 €/jr	85 €/jr	80 €/jr
Productieprijs	25.7 €/GJ	36 €/GJ	20.5€/GJ

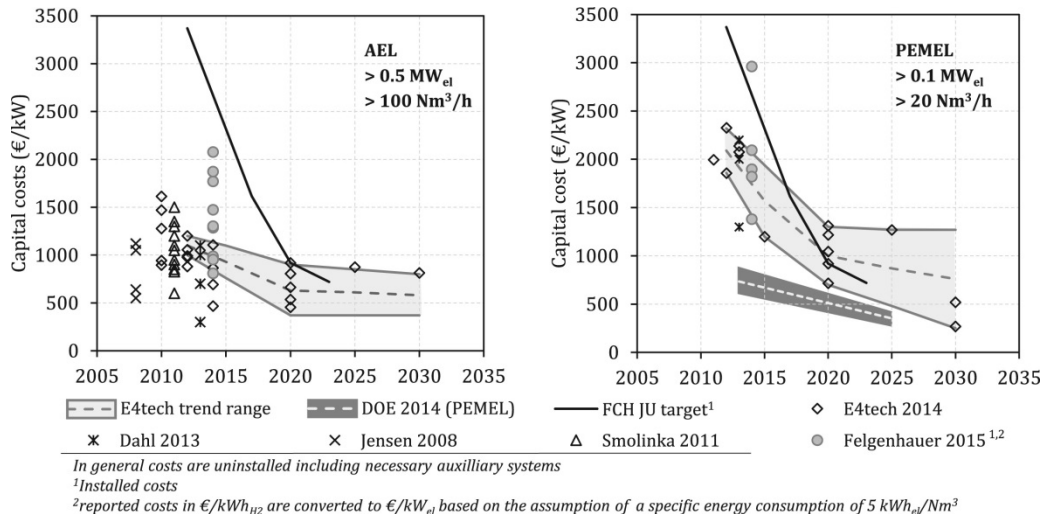
- **Ketenkosten versus efficiëntie**

Een veelgehoorde opmerking is dat rijden op waterstof inefficiënt is, door de omzetting van elektriciteit in waterstof, en in de auto weer terug van waterstof in elektriciteit. In het ‘Stadsdeel’ scenario zie je dat ook terug, voor elektrische auto’s is ca. 13 miljoen kWh nodig, terwijl er voor een gelijke hoeveelheid auto’s op waterstof 31 miljoen kWh nodig is, dus 2,4 keer zoveel energie. Dit effect zorgt er ook voor dat de CO₂-besparing bij rijden op waterstof lager is dan als de duurzame elektriciteit als zodanig zou worden

gebruikt. In het warmtesysteem is ook sprake van verliezen van 30-40% in het proces van opwekking en opslag. Echter, deze opslag is precies het punt waarom de vergelijking met een elektrische auto of een warmtepomp niet op gaat. De (groene) stroom voor die elektrische auto's en warmtepompen moet namelijk wel ergens vandaan komen. En op de opwekking van duurzame energie hebben we veel minder invloed dat op het aanzetten van een gas- of kolencentrale. Daarentegen zijn de zon en de wind wel onuitputtelijke bronnen, en gaan we toe naar een wereld met een overschot aan energie. Alleen wordt deze energie niet altijd opgewekt op de juiste plek en op het juiste tijdstip. Opslag van energie wordt daarom dus steeds belangrijker, en daarbij gaat het niet meer om de efficiëntie van het systeem maar om de kosten. Zolang die laag genoeg zijn, maakt het minder uit dat er energie verloren gaat. Met de economische analyse van het Power-to-X-systeem tonen we dan ook aan dat er ondanks de efficiëntie verliezen, toch een business case mogelijk is.

- **Onzekerheid in economische gegevens**

In de economische analyse wordt rekening gehouden met een onzekerheidsmarge van 30%, omdat er nog te weinig informatie is over de precieze kosten van systeemonderdelen. Deze onzekerheidsmarge moet in het vervolgproject worden teruggebracht, op basis van een meer gedetailleerd systeemontwerp en offertes van verschillende partijen. Op dat moment kunnen ook eventuele besparingen door een DC-systeem of besparingen in een koelsysteem (door warmteterugwinning) worden meegenomen. De onzekerheid zal dus steeds kleiner worden. Daarbij is het ook belangrijk om voor de grotere systeemonderdelen een specifieke learning curve te bepalen. Daarmee kan de toekomstige prijsontwikkeling worden bepaald op het moment dat elektrolyzers op grotere schaal worden toegepast (zie Figuur 47).



FIGUUR 47 ILLUSTRATIE VAN LEARNING CURVES VOOR ELEKTROLYSERS, OVERGENOMEN UIT [46]

- **Uitbreiding economische analyse**

In de economische analyse worden nu de productieprijzen van waterstof, warmte en demiwater bepaald, en daarnaast de simpele terugverdientijd van het gehele systeem. Op basis van deze uitkomsten kan een eerste gevoel worden verkregen om te kunnen beoordelen of er een business case bestaat voor een (deel)systeem. Om extra inzicht te geven in de economische kanten van het systeem, zouden hier de internal rate of return

(IRR) van de verschillende deelsystemen en het totale systeem, evenals de netto contante waarde aan moeten worden toegevoegd. Er moet in dit geval wel meer gedetailleerde informatie worden verkregen over de totale levensduur van het project, inclusief herinvesteringen van alle onderdelen en de index voor verschillende stromen (kostenstijgingen en dalingen). Met behulp van de IRR kunnen investeerders beter inschatten of zij in het project zouden willen investeren, door deze te vergelijken met de door hen gehanteerde weighted average cost of capital (WACC), die vergelijkbaar is met een discontovoet. De IRR is de discontovoet waarbij de netto contante waarde (net present value, NPV) van het gehele project (of een deel daarvan) op nul uitkomt. Andersom kan ook de NPV juist worden bepaald, waarbij dan de discontovoet moet worden ingeschat. In de huidige berekeningen is de discontovoet ingesteld op 3%, op basis van de Werkgroep Discontovoet [32]. Echter, de discontovoet kan worden aangepast op basis van de verhouding tussen vreemd vermogen, eigen vermogen en publiek geld.

- **Vermeden kosten**

De vermeden kosten zoals die beschreven staan in hoofdstuk 6 zijn van belang om het Power-to-X-concept economisch sterker te maken. De beschreven onderdelen gingen voornamelijk over besparingen op netverzwaringskosten en vermeden CO₂-emissies. Deels zijn deze kosten wel op te nemen in de business case, door in overleg met projectpartners (Waternet) af te stemmen hoe de besparing op de netaansluiting aan het Power-to-X-project kan worden toegeschreven. Voor een ander deel kan er over vermeden kosten worden onderhandeld met andere partijen, bijvoorbeeld met Stedin over de besparing in de woonwijk als het elektriciteitsnet daar in mindere mate hoeft te worden uitgebreid. Een derde categorie kosten zijn de vermeden CO₂-emissies, die als maatschappelijke vermeden kosten kunnen worden gezien, en nu nog niet direct in de business case kunnen worden meegenomen. In dit geval zijn subsidies de beste optie, naast een verhoging van de CO₂-prijs. Maar in dit geval gaat het niet om CO₂ alleen, ook aspecten als geluidsoverlast en gezondheidseffecten moeten nog nader worden bekeken. De uitstoot van NO_x en fijnstof door voertuigen met een verbrandingsmotor heeft schadelijke effecten op de volksgezondheid, en om deze reden worden sommige oudere auto's ook al uit de (binnen)stad verbannen. In de toekomst is het misschien alleen nog mogelijk om met emissievrije voertuigen door een stad te rijden. De geluidsoverlast wordt ook beperkt door het rijden met (waterstof)elektrische voertuigen. En woningen worden veiliger als er geen kans meer bestaat op koolstof mono-oxide vergiftiging. In een vervolgpunt kunnen ook deze punten worden meegenomen in een maatschappelijke kosten-baten analyse.

8 Conclusies

In dit Power-to-X-project is onderzocht op welke wijze een duurzaam energiesysteem in een wijk, dorp of stad kan worden vormgegeven dat in de vraag naar elektriciteit, warmte en mobiliteit kan voorzien. De productie van duurzame energie vindt plaats door zonnepanelen op daken van huizen en gebouwen, een zonnepark en indien mogelijk een aantal grote windturbines. Deze duurzame energieproductie is dus duurzame elektriciteitsproductie, waarbij een deel van de elektriciteit wordt omgezet in warmte én een deel wordt omgezet in waterstof (Power-to-X = warmte en waterstof).

Er is een concrete situatie onderzocht, de casus Nieuwegein-Wijk Rijnhuizen. In een gebied tussen de Lek, Lekkanaal en Merwedekanaal, wordt door Waternet een groot zonnepark gerealiseerd van 8,7 MWp, op het WRK-terrein naast het kantoor van KWR. Er bestaat eveneens de ambitie om een vijftal windturbines te realiseren op dit terrein, van ruim 3 MW elk. Een paar kilometer daarvandaan vindt een woningbouwontwikkeling Rijnhuizen plaats, waar 1.200-1.500 woningen worden gerealiseerd. Een deel hiervan is nieuwbouw en een ander deel gerenoveerde woningen. Deze woningen zullen worden voorzien van zonnepanelen. Onderzocht is hoe het zonnepark en eventueel de windturbines in de vraag naar warmte en mobiliteit (waterstof-elektriciteit) kunnen voorzien. En dan niet alleen op jaarbasis, maar door het jaar heen. Daarvoor zijn de volgende 3 scenario's onderzocht:

- **Wijk, zon, warmte prioriteit** ; Nieuwegein, Zonnepark met warmteproductie als prioriteit
- **Wijk, zon, waterstof prioriteit**; Nieuwegein, Zonnepark met waterstof productie als prioriteit
- **Wijk, zon én wind**; Nieuwegein, Zonnepark en Windturbines met warmteproductie als prioriteit

Voor de productie van waterstof is gedemineraliseerd water de grondstof, dat door elektrolyse wordt gesplitst in waterstof en zuurstof. Dit gedemineraliseerde water wordt geproduceerd uit regenwater, dat wordt opgevangen op de zonnepanelen op de daken van de woningen en het zonnepark en ondergronds wordt geborgen. Er is een groot overschot aan regenwater als dit alleen maar gebruikt zou worden voor waterstofproductie. Daarom is onderzocht of een apart gedemineraliseerd waternet in de woningen, voor wasmachine, vaatwasser en toiletspoeling interessant kan zijn.

De energie- en waterbalans, kosten-baten en CO₂-emissiebesparingen zijn onderzocht met behulp van een ontwikkeld simulatiemodel, "Solar Power to the People" genaamd. Dit model simuleert op uurlijkse basis voor een periode van vijf jaar de energie- en water flows en de financiële cash flows. De input van dit model bestaat uit uurlijkse tijdreeksen van klimatologische gegevens, technisch-energetische parameters en economische parameters.

Daarnaast zijn de vermeden kosten door uitgespaarde elektriciteitsnet-kosten en vermeden CO₂-emissies ingeschat. Tevens is kwalitatief aangegeven welke andere milieuvoordelen en kostenvoordelen er kunnen optreden.

Naast 3 scenario's voor de wijk Rijnhuizen in Nieuwegein, is een scenario uitgewerkt voor een veelomvattender fictief stadsdeel. Dit stadsdeel omvat 10.000 woningen, waarvan 25%

nieuwbouw en 75% gerenoveerde woningen. In totaal wordt met zonnepanelen op de daken van de woningen en in zonneparken 60 MWp geplaatst. Eveneens worden 8 windturbines van elk ruim 3 MW elders geplaatst, die bedoeld zijn om de waterstof te kunnen produceren. Dit is het vierde scenario;

- **Stadsdeel;** Stadsdeel met 10.000 woningen, zon en wind.

Conclusie 1; Energiebalans Nieuwegein

In alle 3 de scenario's wordt voldoende elektriciteit geproduceerd om (in combinatie met het net) in de vraag naar warmte en waterstof van de wijk Rijnhuizen te kunnen voorzien.

TABEL 44 OVERZICHT ENERGIEBALANS WIJK SCENARIO'S NIEUWEGEIN

	Elektriciteitsproductie	Naar warmte	Naar waterstof	Naar elektriciteitsnet
Wijk, zon, warmte prioriteit	7.400 MWh/jaar Zon	25% =28.800 GJ/jaar	60% =80.000 kg/jaar	15% =1.000 MWh
Wijk, zon, waterstof prioriteit	7.400 MWh/jaar Zon 1.430 MWh/jaar uit Net	20% =22.200 GJ 59% = 11.100 GJ	78% =100.000 kg/jaar 41% = 15.000 kg/jaar	2% =200 MWh/jaar
Wijk, zon én wind	46.400 MWh/jaar 7.400 MWh/jaar Zon + 39.000 MWh/jaar Wind	4% = 28.800 GJ	81% = 665.000 kg/jaar	15% = 6.800 MWh

Conclusie 2; Waterbalans Nieuwegein

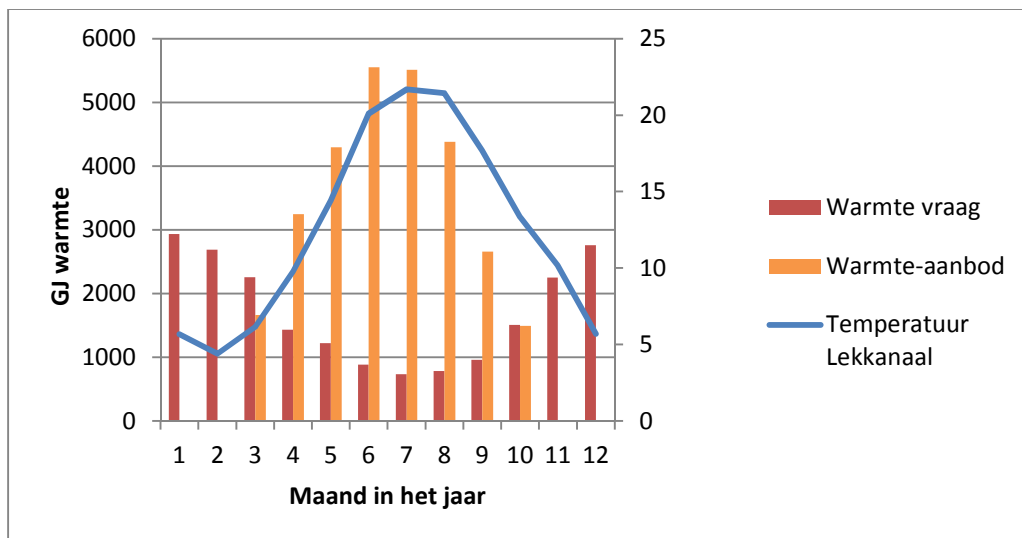
Regenwateropvang op de zonnepanelen op woningen en van het zonnepark is ruim voldoende voor waterstofproductie en voor het gebruik als demiwater in de woningen van de wijk Rijnhuizen. Er is zelfs regenwater over voor bijvoorbeeld sproeiwater.

TABEL 45 OVERZICHT WATERBALANS WIJK SCENARIO'S NIEUWEGEIN

	Regenwater opvang	Demiwater waterstof	Demiwaternet woningen	Sproeiwater, geïnfiltreerd regenwater
Wijk, zon, warmte prioriteit	51.000 m ³ /jaar = 34.000 m ³ /jaar zonnepark + 17.000 m ³ /jaar woningen	720 m ³ /jaar	36.000 m ³ /jaar	10.000 m ³ /jaar
Wijk, zon, waterstof prioriteit	51.000 m ³ /jaar = 34.000 m ³ /jaar zonnepark + 17.000 m ³ /jaar woningen	1.025 m ³ /jaar	36.000 m ³ /jaar	9.000 m ³ /jaar
Wijk, zon én wind	51.000 m ³ /jaar = 34.000 m ³ /jaar zonnepark + 17.000 m ³ /jaar woningen	6.000 m ³ /jaar	36.000 m ³ /jaar	4.000 m ³ /jaar

Conclusie 3; Warmtebalans Nieuwegein

In de zomermaanden kan met een warmtepomp van 2,5 MW, met als warmtebron het water van het Lekkanaal en elektriciteit van het zonnepark, voldoende warmte worden geproduceerd en opgeslagen in een aquifer, om in de winter aan de warmtevraag van de wijk Rijnhuizen te kunnen voldoen.



FIGUUR 48 WARMTEVRAAG EN WARMTEAANBOD (LINKER Y-AS) IN WIJK, ZON, WARMTE PRIORITEIT SCENARIO, INCLUSIEF DE TEMPERAATUUR VAN HET LEKKANAAL (BRON VOOR DE WARMTEPOMP), OP DE RECHTER Y-AS

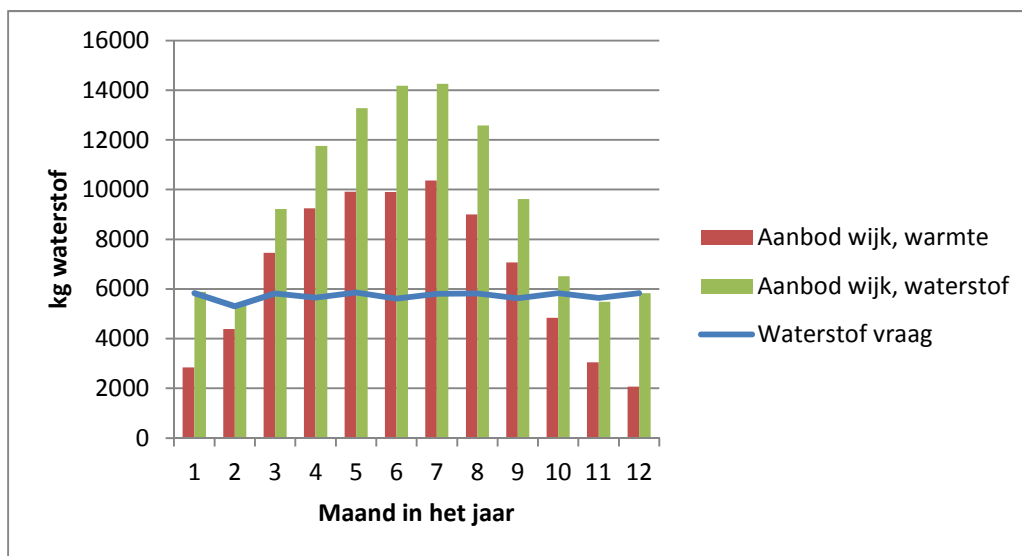
Conclusie 4; Waterstofbalans Nieuwegein

In ieder scenario wordt op jaarbasis meer dan voldoende waterstof geproduceerd om aan de vraag van een tankstation van 200 kg/dag te voldoen, er is in alle gevallen zelfs een overschot aan waterstof.

Toevoeging van windturbines ('Wijk, zon én wind') leidt tot een veel constantere waterstofproductie, waardoor de waterstofvraag kan worden vergroot naar 1.000 kg/dag. In het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit' bestaat er op maandbasis wel een mismatch tussen de waterstofvraag en het aanbod in de wintermaanden gedurende 16% van de tijd (zie Figuur 49). Als prioriteit wordt gegeven aan waterstofproductie en stroom uit het net wordt ingekocht (scenario 'wijk, zon waterstof prioriteit'), kan wel op ieder moment in de vraag worden voorzien. En ook bij toevoeging van wind bestaan er op maandbasis geen tekorten meer.

TABEL 46 WATERSTOFBALANS WIJK SCENARIO'S NIEUWEGEIN

	Waterstof vraag	Waterstofproductie uit zon/net	Overschot per jaar
Wijk, zon, warmte prioriteit	70.000 kg/jaar	80.000 kg/jaar	10.000 kg/jaar
Wijk, zon, waterstof prioriteit	70.000 kg/jaar	zon: 100.000 kg/jaar net: 15.000 kg/jaar	45.000 kg/jaar
Wijk, zon én wind	480.000 kg/jaar	665.000 kg/jaar	185.000 kg/jaar



FIGUUR 49 VERGELIJKING TUSSEN DE WATERSTOFVRAAG EN HET AANBOD VAN WATERSTOF IN DE WIJK, ZON SCENARIO'S

Conclusie 5; Businesscase Nieuwegein

De investeringen voor Power-to-X in Nieuwegein komen uit rond de 13 miljoen euro ('Wijk, zon, warmte prioriteit'/waterstof prioriteit). Waterstof prioriteit geven en stroom inkopen leidt tot een kortere terugverdientijd dan wanneer warmte prioriteit heeft. Met windturbines erbij en met een grotere elektrolyser ('Wijk, zon én wind') zijn de investeringen net boven de 27 miljoen euro. Extra waterstof produceren ten behoeve van transport halveert de terugverdientijd van het project. De onzekerheidsmarge is in deze analyses 30%, en de investeringen voor het zonnepark en de windturbines zijn niet meegenomen, maar zijn via de elektriciteitsprijs verrekend in de jaarlijkse kosten.

TABEL 47 OVERZICHT ECONOMISCHE ANALYSE WIJK SCENARIO'S NIEUWEGEIN

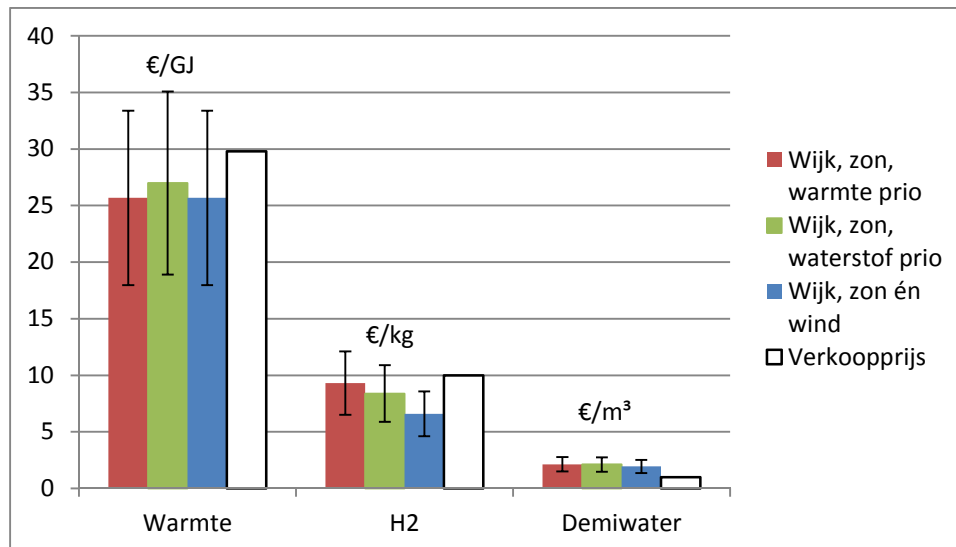
	Investeringen	Inkomsten	Onderhoud en transport	Simpele terugverdientijd
Wijk, zon, warmte prioriteit	13,0 M€	1.150 k€/j	275 k€/j	15,5j
Wijk, zon, waterstof prioriteit	13,0 M€	1.230 k€/j	275 k€/j	14j
Wijk, zon én wind	27,3 M€	5.020 k€/j	1.020 k€/j	7 j

Conclusie 6; Productiekosten versus verkoopprijs voor waterstof, warmte en water

In ieder scenario ligt de productieprijs voor warmte en waterstof onder de verkoopprijs. Voor demiwater ligt de productieprijs in ieder scenario hoger dan de verkoopprijs.

De verkoopprijs voor waterstof is momenteel 10 €/kg, deze prijs is gekozen zodat de prijs per kilometer gelijk is aan die voor benzine. De productiekosten voor waterstof liggen tussen de 9,4€/kg ('Wijk, zon, warmte prioriteit') en 6,6 €/kg ('Wijk, zon én wind'), en neemt vooral af door de inzet van de elektrolyser te vergroten. De verkoopprijs voor warmte is gebaseerd op de Warmtewet [47], en bestaat uit de prijs per GJ warmte plus een verrekening van de jaarlijkse kosten, samen 29,8€/GJ. De productiekosten voor warmte variëren tussen

de 25 en 27€/GJ. Voor demiwater is de verkoopprijs gelijk gesteld aan die van drinkwater (ca. 1,0 €/m³), en ligt de productieprijs in alle scenario's hoger, tussen de 1,9-2,1€/m³.



FIGUUR 50 VERGELIJKING PRODUCTIEKOSTEN EN VERKOOPPRIJS VOOR WARMTE, WATERSTOF EN DEMIwater

Conclusie 7; Vermeden kosten

Vermeden kosten in de aansluiting van het zonnepark op het elektriciteitsnet en in de woonwijk en de kostenbesparing door vermeden CO₂-emissies leiden tot een besparing van 30% in de productieprijs van warmte, en ruim 20% in de productieprijs van waterstof.

TABEL 48 TOTALE VERMEDEN KOSTEN BEREKENING VOOR WARMTE EN WATERSTOF

	Productieprijs Zonder vermeden kosten (Wijk, zon, warmte prioriteit)	Productieprijs Met vermeden netkosten	Productieprijs Met vermeden netkosten en CO ₂ - emissie kostenbesparing	Besparing in % Totaal vermeden kosten
Warmte	25,7 €/GJ	21,6€/GJ	18,0€/GJ	30%
Waterstof	9,4 €/kg	8,7€/kg	7,3€/kg	21%

Conclusie 8; CO₂ emissie besparingen

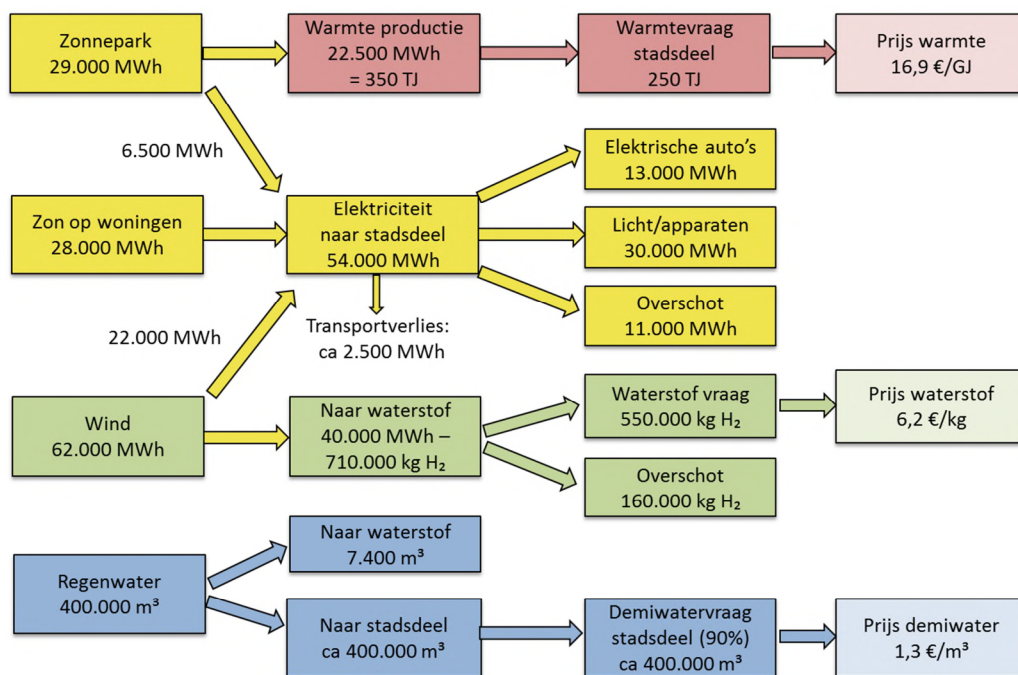
CO₂-emissie besparingen bij het realiseren van een Power-to-X-systeem in een woonwijk kunnen 5-10% hoger zijn dan voor het besparen van de CO₂-emissie bij het opwekken van duurzame elektriciteit alleen. Wanneer er veel waterstof wordt geproduceerd ('Wijk, zon én wind'), neemt dit verschil af, en draait de verhouding om. Voor warmte is de CO₂ besparing dus relatief groter dan voor waterstof, maar daarbij zijn andere vormen van uitstoot (bijv. NO_x en fijnstof) niet meegenomen.

TABEL 49 CO₂-EMISSIEBESPARINGEN IN WIJK SCENARIO'S NIEUWEGEIN

	CO ₂ -besparing met Power-to-X	Referentie besparing – alleen elektriciteit
Wijk, zon, warmte prioriteit	3.400 ton CO ₂ /jaar	3.070 ton CO ₂ /jaar
Wijk, zon, waterstof prioriteit	3.240 ton CO ₂ /jaar	3.070 ton CO ₂ /jaar
Wijk, zon én wind	18.620 ton CO ₂ /jaar	19.030 ton CO ₂ /jaar

Conclusie 9; Power-to-X voor een stadsdeel

Het Power-to-X-systeem kan ook worden toegepast op een stadsdeel, waarbij schaalgrootte zorgt voor lagere productieprijzen. Met 8 windturbines van 3,2 MW en 60MWp aan zon kan de volledige energievoorziening voor verlichting, apparaten, mobiliteit en warmte voor 10.000 huishoudens worden vervuld. Daarnaast kan voor 90% van de huishoudens demiwater voor vaatwasser, toilet en wasmachine worden geleverd. De terugverdientijd van dit scenario is 7,5 jaar. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat net als in de andere scenario's de investeringen in wind- en zonne-energie via de elektriciteitsprijs zijn meegenomen, hoewel het meenemen van de investering zelf in deze situatie realistischer zou zijn.



FIGUUR 51 OVERZICHT ENERGIESTROMEN EN PRODUCTIEPRIJZEN VOOR HET 'STADSDEEL' SCENARIO

Conclusie 10; Marktonwikkeling en vervolgproject

Er is een start gemaakt met de marktonwikkeling voor waterstof en warmte, en voor beide producten zijn mogelijke afnemers gevonden. In het vervolgproject worden deze ontwikkelingen verder uitgewerkt.

Voor de waterstofmarkt zijn verschillende opties overwogen gedurende het project. Zowel gemeentelijk vervoer als bedrijven uit de buurt zouden gezamenlijk de eerste markt voor een

waterstoftankstation in Nieuwegein kunnen vormen. Momenteel ligt het meeste momentum in Lage Weide, waar ondernemers op eigen initiatief een markt voor waterstof willen creëren door (een deel van) de eigen voertuigen op waterstof te laten rijden. PitPoint heeft in de loop van dit jaar de regio Utrecht toegewezen gekregen voor de bouw van een tankstation en is een eind gevorderd in de financiering.

De markt voor warmte zal vooral liggen in de nieuwbouw/transformatiewijk Rijnhuizen, op ca. 2 km afstand van het zonnepark. Zowel de gemeente als andere initiatiefnemers rondom de gebiedsontwikkeling in Rijnhuizen (Club Rijnhuizen) ondersteunen het Power-to-X-concept en het idee voor de aanleg van een warmtenet. Er is gepresenteerd voor ondernemers en projectontwikkelaars in Rijnhuizen. Een dochteronderneming van VolkerWessels (KondorWessels) gaat een deel van de woningen in Rijnhuizen bouwen. Tot slot is er initiatief genomen om de projectontwikkelaars op meer individuele basis en met hulp van de gemeente Nieuwegein verder te informeren.

9 Aanbevelingen

Zoals eerder genoemd is dit project de eerste fase tot realisatie van het Power-to-X-concept. Hoewel er in het afgelopen jaar al veel informatie is verzameld, blijven er altijd vraagstukken over, of komen er zelfs nieuwe vraagstukken bovendrijven. De belangrijkste aanbevelingen betreffende vervolgonderzoek zijn hier op een rij gezet.

Aanbeveling 1; Onderzoek in hoeverre het warmteconcept voor Rijnhuizen in beleid kan worden verankerd

Om het warmteconcept te laten slagen, is het van groot belang om zoveel mogelijk woningen aan te sluiten. Dat geldt zowel voor de technische aspecten van het systeem (minder warmteverlies bij een groter opslagvolume), als voor de economische (meer woningen is minder kosten per woning). Het is dus belangrijk om op de ontwikkelingen in Rijnhuizen goed in te spelen en te onderzoeken in hoeverre het Power-to-X-concept in gemeentelijk beleid kan worden verankerd. Daarbij is het van belang om te weten wat zowel projectontwikkelaars als toekomstige bewoners verwachten en welke informatie zij nodig hebben. Een stakeholder analyse is hiervoor een goed instrument, evenals het voortzetten van goede contacten met de gemeente en het vormen van een 'toekomstige bewoners' panel.

Aanbeveling 2; Ontwikkel een markt voor waterstof

Dat waterstof een belangrijke rol gaat spelen in het toekomstige duurzame energiesysteem, beaamen steeds meer partijen, zoals de VNCI [7] en Netbeheer Nederland [8], die waterstof een grote rol toedichten in hun toekomstscenario's. Voor een project als Power-to-X is de transportbranche de beste markt om in te stappen, omdat de waterstofprijs hier hoger ligt dan in de industrie. Het ontwikkelen van een nationaal netwerk van tankstations is van belang om het rijden op waterstof mogelijk te maken. Daarnaast moet worden ingezet op het ontwikkelen van een markt voor waterstof, zowel bij ondernemers als bij gemeentelijk en provinciaal vervoer. Er valt dan te denken aan plantsoendienstes, vuilniswagens, veegwagens, auto's van gemeentes en provincies zelf, taxibusjes voor ouderen en ov-bussen. Op die manier kan een eerste afzetmarkt worden gerealiseerd van waaruit verdere groei mogelijk is.

Aanbeveling 3; Onderzoek hoe vermeden kosten onderdeel van het systeem kunnen worden, hiervoor is een Maatschappelijke Kosten Baten analyse nodig

De vermeden kosten hebben een significante invloed op de business case, zoals in hoofdstuk 8 duidelijk is geworden. Het is belangrijk om te verkennen op welke wijze deze vermeden kosten en andere effecten het effectiefst in de business case kunnen worden meegenomen. Daarvoor is ook een bredere kijk nodig op meer verschillende (maatschappelijke) effecten van het Power-to-X-concept, waarin naast het tegengaan van netverzwaring en vermeden CO₂-emissies ook het effect van regenwaterberging en de veiligheid voor bewoners worden meegenomen. Een Maatschappelijke Kosten Baten Analyse is daar een goede methode voor.

Aanbeveling 4; Meer onderzoek naar het effect van hoge temperatuur opslag in de bodem

Omtrent de effecten van het opslaan van water met een temperatuur van 40-60°C in de bodem is nog weinig bekend. Het is belangrijk om hier meer experimenteel onderzoek naar te doen om tot een veilig temperatuurniveau te komen waarop het HTO project kan worden uitgevoerd. Het gaat dan om zowel de microbiologische als de chemische bodemeffecten. Dit is onderdeel van het vervolgonderzoek.

Aanbeveling 5; Meer onderzoek naar het DC elektriciteitssysteem

Over DC-stroom is binnen het huidige project nog slechts weinig informatie verkregen. Dit moet dus een plaats krijgen in het vervolgproject, waarbij het belangrijk is om de kostenbesparingen en mogelijke efficiëntieverbeteringen helder te krijgen. Ook zal moeten worden uitgezocht of van alle belangrijke systeemcomponenten (elektrolyser, warmtepomp, RO installatie) een DC-versie kan worden geleverd.

Aanbeveling 6; Optimaliseer de groottes van de warmtepomp en elektrolyser

Zowel de warmtepomp als de elektrolyser zijn groter uitgevoerd dan nodig om aan de vraag te voldoen. Ze zijn gedimensioneerd op het 'verwerken' van zoveel mogelijk duurzame elektriciteit. Echter, de grootte van deze apparaten moet verder worden geoptimaliseerd om de business case sterker te maken, waarbij de hoeveelheid stroom die aan het net wordt terug geleverd –en daarmee de netuitbreiding – beperkt moet blijven.

Aanbeveling 7; Onderzoek welke andere concepten het systeem nog robuuster en economisch rendabeler kunnen maken

Het Power-to-X-systeem biedt al vrij veel flexibiliteit door de verschillende omzettingmogelijkheden. Echter, toevoeging van bijvoorbeeld een vliegwiel geeft de mogelijkheid om bij de dragen aan het stabiel houden van de netspanning, waarmee extra opbrengsten kunnen worden gegenereerd. Ook moet worden nagedacht over back-up opties voor bijvoorbeeld de warmtepomp, zoals een biomassa-ketel. Daarnaast kan het combineren van warmtevraag en -aanbod binnen het systeem nog een beter concept opleveren, zoals het gebruiken van de restwarmte van de elektrolyser voor het verder opwarmen van het water uit het Lekkanaal.

Aanbeveling 8; Professionaliseer en verbeter het model

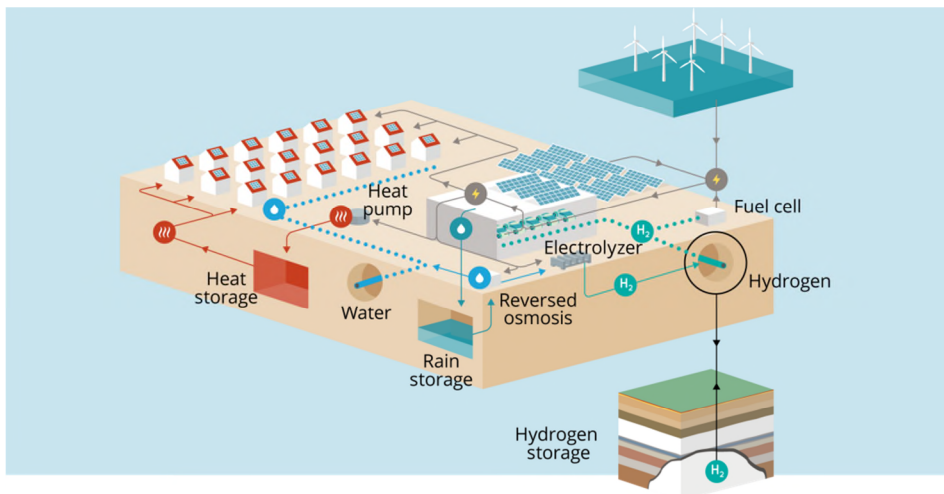
Het Power-to-X-model kan verder worden verbeterd met nieuwe gegevens over het hoge-temperatuur-opslagsysteem, informatie over DC-systemen, en met toevoeging van meer modules zoals het elektriciteitsgebruik in woningen. Daarnaast werkt het Power-to-X-model met historische data, maar als het Power-to-X-systeem uiteindelijk is gerealiseerd, moeten het model voorspellend gaan werken. De weersvoorspellingen in combinatie met randvoorwaarden voor warmte en waterstofproductie moeten dan de stroomverdeling en eventuele inkoop of verkoop uit het elektriciteitsnet gaan bepalen. Een overzicht van alle aanbevelingen betreffende het model is te vinden in Bijlage VI.

Aanbeveling 9; Breng de onzekerheid in de economische analyse verder omlaag

Voordat er investeringsbeslissingen worden genomen, moeten de kosten van alle verschillende systeemonderdelen helder zijn. De nu gehanteerde onzekerheidsmarge van 30% moet daarom verder naar beneden. Dit kan door meer gedetailleerde systeemontwerpen te maken en offertes aan te vragen. Daarnaast is op sommige punten nog meer onderzoek nodig om te kosten te kunnen vaststellen, zoals de precieze opslagtemperatuur van het hoge temperatuur opslagsysteem.

Aanbeveling 10; Ontwikkel een organisatievorm voor allocatie van de kosten en opbrengsten, inclusief eigenaarschap van verschillende systeemonderdelen

In dit rapport is het systeem als geheel geanalyseerd, maar in feite zijn er veel verschillende partijen betrokken die ieder hun eigen belang hebben. Er zal ook niet één partij alle benodigde investeringen gaan doen, en voor de verdeling van de elektriciteit uit het zonnepark of uit het net moet ook een strategie worden bepaald die zowel de business case voor de zonnestroom, voor warmte en waterstof ten goede komt. Er moet dus een organisatievorm worden ontwikkeld waarin onderling belangen kunnen afgestemd, en beslissingen over de allocatie van investeringen, onderhoudskosten en opbrengsten kunnen worden genomen.



FIGUUR 52 DE WOONWIJK VAN DE TOEKOMST

Literatuur

- [1] United Nations, “Adoption of the Paris Agreement,” in *Conference of the Parties on its twenty-first session*, 2015, no. December, p. 32 [Online]. Available: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/I09r01.pdf>
- [2] M. Rutte, S. van Haersma Buma, A. Pechtold, and G.-J. Segers, “Vertrouwen in de toekomst,” p. 70, 2017.
- [3] E. Wiebes, “Resultaten COP23 te Bonn,” *Ministerie van Economische Zaken en Klimaat*. 2017 [Online]. Available: <file:///D:/Users/roestel/Downloads/kamerbrief-over-resultaten-cop23-te-bonn.pdf>
- [4] 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/>
- [5] REN21, *Renewables Global Futures Report*. Paris: REN21, 2017 [Online]. Available: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/10/GFR-Full-Report-2017_webversion_3.pdf
- [6] J. Gigler and M. Weeda, “Contouren van een Routekaart Waterstof,” 2018.
- [7] M. Stork, J. de Beer, N. Lintmeijer, and B. den Ouden, “Chemistry for Climate: Acting on the need for speed Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050,” Utrecht, 2018.
- [8] M. Alman and F. Rooijers, “Net voor de toekomst,” 2017 [Online]. Available: https://www.netbeheernederland.nl/_upload/RadFiles/New/Documents/20171122_Rapport_Net_voor_de_Toekomst_def.pdf
- [9] Milieucentraal, “Gemiddeld Energieverbruik,” 2018. [Online]. Available: <https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/snel-besparen/grip-op-je-energierekening/gemiddeld-energieverbruik/>. [Accessed: 05-Sep-2017]
- [10] CBS, “Personenauto’s rijden gemiddeld 37 kilometer per dag,” 2012. [Online]. Available: <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2012/10/personenauto-s-rijden-gemiddeld-37-kilometer-per-dag>. [Accessed: 06-Sep-2017]
- [11] BGSV and Gemeente Nieuwegein, “Gebiedsvisie Mooi Rijnhuizen.” Rotterdam, 2014.
- [12] Club Rijnhuizen, LPB Sight, Gemeente Nieuwegein, and Provincie Utrecht, “Plan van aanpak Rijnhuizen geeft Energie.” 2017 [Online]. Available: <http://www.clubrijnhuizen.nl/wp-content/uploads/2017/10/Club-Rijnhuizen-Plan-van-Energie-161117.pdf>
- [13] Gemeente Nieuwegein, “Routekaart Energieneutraal Nieuwegein 2040,” 2017 [Online]. Available: <https://www.nieuwegein.nl/inwoner/energieneutraal-nieuwegein/routekaart-energieneutraal-nieuwegein-2040/>
- [14] R. Check, P. S. Space-based, K. Percent, and E. Shingles, “The Future of Solar Energy,” 2015.
- [15] LPB Sight, “Gebiedsvisie Rijnhuizen - Verbetering energielabel irt terugverdientijd.” LPB Sight, Nieuwegein, 2015.
- [16] KNMI, “Zware neerslag.” [Online]. Available: <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/zware-neerslag>. [Accessed: 29-Jan-2018]
- [17] J.-P. Janssens, “Wasmiddelen & Onthard water,” 2017.
- [18] Allied Waters, “COASTAR: Robuuste zoetwatervoorziening voor laag-nederland schuilt in de ondergrond.” 2016 [Online]. Available: https://www.alliedwaters.com/wp-content/uploads/2016/08/ALWA_Coastar-Rapport_Web_spreads.pdf
- [19] Vitens, “Hoeveel water gebruiken we per dag?,” 2013. [Online]. Available: <https://www.vitens.nl/meer-informatie/hoeveel-water-gebruiken-we-per-dag>. [Accessed: 06-Sep-2017]
- [20] CBS, “Bevolking; Kerncijfers,” 2017. [Online]. Available:

- [http://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?VW=T&DM=SLNL&PA=37296ned&D1=a&D2=0,10,20,30,40,50,60,\(l-1\),l&HD=180314-1015&HDR=G1&STB=T%0A](http://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?VW=T&DM=SLNL&PA=37296ned&D1=a&D2=0,10,20,30,40,50,60,(l-1),l&HD=180314-1015&HDR=G1&STB=T%0A). [Accessed: 14-Mar-2018]
- [21] KNMI, "Klimatologie - Uurgegevens van het weer in Nederland." [Online]. Available: <http://projects.knmi.nl/klimatologie/uurgegevens/selectie.cgi>. [Accessed: 22-Feb-2017]
- [22] SunEarthTools, "Sun position - elevation and azimuth," 2017. [Online]. Available: http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=en#annual. [Accessed: 22-Feb-2017]
- [23] Rijkswaterstaat, "Waterinfo," 2017. [Online]. Available: <https://waterinfo.rws.nl/#!/nav/index/>. [Accessed: 07-May-2017]
- [24] KNMI, "Archief Maand/Seizoen/Jaaroverzichten." [Online]. Available: <http://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/maand-en-seizoensoverzichten>. [Accessed: 20-Dec-2017]
- [25] Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), "De Bilt, langjarige gemiddelden, tijdvak 1981-2010." KNMI, p. 1, 2010 [Online]. Available: http://www.klimaatatlas.nl/tabel/stationsdata/klimtab_8110_260.pdf
- [26] V. Oldenbroek, L. A. Verhoef, and A. J. M. van Wijk, "Fuel cell electric vehicle as a power plant : Fully renewable integrated transport and energy system design and analysis for smart city areas," *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1-31, 2017 [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.155>
- [27] SKAO, Stimular, Connekt, Milieu Centraal, and Ministerie van Infrastructuur en Milieu, "CO2 emissiefactoren," 2017. [Online]. Available: <https://co2emissiefactoren.nl/>. [Accessed: 13-Dec-2017]
- [28] Energinet.dk and The Danish Energy Agency, "Technology data for energy plants." p. 212, 2012.
- [29] IEA ETSAP, "District Heating," no. January. IEA ETSAP, p. 7, 2013.
- [30] M. Blom and S. Ahdour, "Socialiseren van netkosten van warmtenetten," Delft, 2017.
- [31] CBS, "Aardgas en elektriciteit, gemiddelde prijzen van eindverbruikers," 2017. [Online]. Available: <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/81309NED/table?dl=59C6>. [Accessed: 09-Jan-2018]
- [32] Werkgroep Discontovoet, "Rapport werkgroep discontovoet 2015," Den Haag, 2015.
- [33] ACM, "Warmtetarieven," 2018. [Online]. Available: <https://www.acm.nl/nl/onderwerpen/energie/energiebedrijven/warmte/warmtetarieven>. [Accessed: 31-Jan-2018]
- [34] P. J. J. G. Geudens, "Tarievenoverzicht drinkwater 2016." Vewin, Den Haag, 2016 [Online]. Available: <http://www.vewin.nl/SiteCollectionDocuments/Publicaties/Tarieven2016-DEF-WEB.pdf>
- [35] De Groene Hoed, "Boilervat met warmtewisselaar." [Online]. Available: <http://www.groenehoedduurzaam.nl/eldom-green-line-200l-boiler-met-1-warmtewisselaar.html>. [Accessed: 23-May-2017]
- [36] Utrecht Sustainability Institute and LomboXnet, "Smart Solar Charging – regio Utrecht," 2018. [Online]. Available: <http://smartsolarcharging.eu/>. [Accessed: 13-Mar-2018]
- [37] T. v. Melle, L. Ramaekers, and W. Terlouw, "Waarde van slimme netten," 2014.
- [38] Dutch Heat Pump Association, "Warmtepompen in de woningbouw & vraagsturing," 2015 [Online]. Available: http://dhp-online.nl/wp-content/uploads/2011/03/DHPA-32-pag.NL_LR_.pdf
- [39] J. Stiglitz, N. Stern, M. Duan, O. Edenhofer, G. Giraud, G. Heal, E. Lèbre la Rovere, A. Morris, E. Moyer, M. Pangestu, P. Shukla, Y. Sokona, and H. Winkler, "Report of the High-Level Commission on Carbon Prices," 2017.
- [40] R. Maas, P. Fischer, J. Wesseling, D. Houthuijn, and F. Cassee, "Luchtkwaliteit en gezondheidswinst," Bilthoven, 2015 [Online]. Available: <http://www.rivm.nl/dsresource?objectid=4e54e933-49f8-440c-a2ad-0816c05c21cc&type=pdf&disposition=inline>
- [41] W. P. Jongeneel, B. A. M. Staatsen, E. E. M. M. van Kempen, and P. H. Fischer, "Gezondheidseffecten van wegverkeer : een quickscan," Bilthoven, 2008.

- [42] J.-P. Janssens, "Besparing aanpassing Dosering - deel 2," 2017.
- [43] Fraunhofer ISE, "Electricity production and spot prices in Germany in week 43 2017." [Online]. Available: <https://www.energy-charts.de/price.htm?year=2017&auction=1h&week=43>. [Accessed: 08-Mar-2018]
- [44] B. Drijver, "Thermisch rendement hoge & middelhoge temperatuur warmteopslag in de bodem," 2014.
- [45] K. G. Zuurbier, W. J. Zaadnoordijk, and P. J. Stuyfzand, "How multiple partially penetrating wells improve the freshwater recovery of coastal aquifer storage and recovery (ASR) systems: A field and modeling study," *J. Hydrol.*, vol. 509, pp. 430–441, 2014.
- [46] A. Buttler and H. Spliethoff, "Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. September 2017, pp. 2440–2454, 2018.
- [47] ACM, "Warmtetarieven," 2018. [Online]. Available: <https://www.acm.nl/nl/onderwerpen/energie/energiebedrijven/warmte/warmtetarieven/>. [Accessed: 01-Mar-2018]
- [48] T. W. Lim and B. K. Ahn, "Hyundai's FCEVs: A Pathway to New Possibilities," *ECS Trans.*, vol. 50, no. 2, pp. 3–10, 2012.
- [49] T. Kim, S. Lee, and H. Park, "The potential of PEM fuel cell for a new drinking water source," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 8, pp. 3676–3689, 2011 [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.006>
- [50] A. G. Castiglioni, M. B. Bigdeli, C. Palamini, D. Martinoia, L. Frezza, B. Matassini, D. Pizzocri, and M. Massari, "Spaceship Earth. Space-driven technologies and systems for sustainability on ground," *Acta Astronaut.*, vol. 115, pp. 195–205, 2015 [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.05.029>
- [51] K. D. Hristovski, B. Dhanasekaran, J. E. Tibaquirá, J. D. Posner, and P. K. Westerhoff, "Producing drinking water from hydrogen fuel cells," *J. Water Supply Res. Technol.*, vol. 58, no. 5, pp. 327–335, 2009.
- [52] J. E. Tibaquirá, K. D. Hristovski, P. Westerhoff, and J. D. Posner, "Recovery and quality of water produced by commercial fuel cells," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 6, pp. 4022–4028, 2011.
- [53] J. E. Tibaquirá, K. D. Hristovski, P. K. Westerhoff, and J. D. Posner, "Water quality and yield from polymer electrolyte membrane fuel cells," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 20, pp. 13022–13031, 2011.
- [54] J. S. Vrouwenfelder, S. A. Manolarakis, J. P. van der Hoek, J. A. M. van Paassen, W. G. J. van der Meer, J. M. C. van Agtmaal, H. D. M. Prummel, J. C. Kruithof, and M. C. M. van Loosdrecht, "Quantitative biofouling diagnosis in full scale nanofiltration and reverse osmosis installations," *Water Res.*, vol. 42, no. 19, pp. 4856–4868, 2008 [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2008.09.002>
- [55] Ministerie van Infrastructuur en Milieu, "Besluit kwaliteit drinkwater BES - Bijlage A," 2010. [Online]. Available: <http://wetten.overheid.nl/BWBR0028642/2010-10-10#BijlageB>. [Accessed: 13-Jan-2018]
- [56] M. Soshinskaya, W. H. J. Crijns-Graus, J. van der Meer, and J. M. Guerrero, "Application of a microgrid with renewables for a water treatment plant," *Appl. Energy*, vol. 134, pp. 20–34, 2014 [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.097>
- [57] Jinko Solar, "Datasheet Module 265-P-60 - Key features." pp. 1–2, 2015 [Online]. Available: <http://www.jinkosolar.com/ftp/EN-MKT-265P-60.pdf>
- [58] J. Twidell and T. Weir, *Renewable Energy Resources*. Abingdon/New York: Routledge, 2015.
- [59] C. Honsberg and S. Bowden, "Arbitrary Orientation and Tilt," 2017. [Online]. Available: <http://pveducation.org/pvcdrom/arbitrary-orientation-and-tilt>. [Accessed: 27-Feb-2017]
- [60] G. T. Geertsema and H. W. van den Brink, "Windkaart van Nederland op 100 m hoogte," De Bilt, 2014.
- [61] RVO, "Windviewer SDE+," 2016. [Online]. Available: http://windviewer.rvo.nl/windviewer/Index.html?viewer=wind_viewer. [Accessed: 08-Mar-2017]
- [62] Vestas, "Turbine wind class." [Online]. Available: <http://cvi.se/uploads/pdf/Master>

- Literature/Wind Turbine Technology/Turbine_wind_class.pdf
- [63] Eneco, "Windpark Nieuwegein," 2018. [Online]. Available: <https://www.eneco.nl/over-ons/projecten/windpark-nieuwegein/>. [Accessed: 01-Mar-2018]
- [64] Vestas, "V90-1.8/2.0 Mw." p. 5, 2014 [Online]. Available: http://www.vestas.com/en/products_and_services/turbines/v90-2_0_mw#!technical-specifications%5Cnhttp://www.vestas.com/en/products%7B_%7Dand%7B_%7Dservices/turbines/v90-2%7B_%7D0%7B_%7Dmw%7B%23%7D!technical-specifications
- [65] Wind Turbine Models, "General Electric GE 3.2-130," 2018. [Online]. Available: <https://www.en.wind-turbine-models.com/turbines/1290-general-electric-ge-3.2-130>. [Accessed: 01-Mar-2018]
- [66] M. Ragheb, "Wind Shear, Roughness Classes and Turbine Energy Production," *Wind Power Systems NPRE 475 course*. 2017 [Online]. Available: http://mragheb.com/NPRE_475_Wind_Power_Systems/Roughness_Classes_and_Roughness_Lengths_EU.pdf
- [67] Vestas, "Vestas V90 3.0MW Brochure." 2017 [Online]. Available: <http://nozebra.ipapercms.dk/Vestas/Communication/Productbrochure/V9030MW/V9030MWUK/>
- [68] Stergoot, "Complete set tot 8 m lengte." [Online]. Available: <http://www.stergoot.nl/product/item/37/complete-set-tot-8-meter-lengte>. [Accessed: 09-Jan-2017]
- [69] T. van Melle, M. Menkveld, J. Oude Lohuis, R. de Smidt, and W. Terlouw, "De systeemkosten van warmte voor woningen," p. 123, 2015.
- [70] C. Tigchelaar and K. Leidelmeijer, "Energiebesparing: Een samenspel van woning en bewoner - Analyse van de module Energie WoON 2012," pp. 1-152, 2013 [Online]. Available: <http://www.rijksoverheid.nl/documenten-en-publicaties/rapporten/2013/12/02/energiebesparing-een-samenspel-van-woning-en-bewoner-analyse-van-de-module-energie-woon-2012.html>
- [71] Minder gas, "Over graaddagen," 2017. [Online]. Available: https://www.mindergas.nl/degree_days_calculation/explanation. [Accessed: 14-Apr-2017]
- [72] Warmtepompinfo, "Graaddagen," 2017. [Online]. Available: <https://www.warmtepompinfo.nl/tapwaterkosten/graaddagen/>. [Accessed: 12-Apr-2017]
- [73] KWA, "Graaddagen en Koeldagen." [Online]. Available: <http://www.kwa.nl/graaddagen-en-koeldagen>. [Accessed: 14-Apr-2017]
- [74] Energy Matters, "Energieprestaties van 5 warmtetechnieken bij woningen in de praktijk," 2014 [Online]. Available: https://www.rvo.nl/sites/default/files/Definitief_Rapport_Praktijkprestaties_van_warmtetechnieken_bij_huishoudens.pdf
- [75] RVO, "Energiezuinig koelen met warmte- en koudeopslag," 2011.
- [76] Milieu Centraal, "Nieuwe cv-ketel of combiketel kopen," 2018. [Online]. Available: <https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/energiezuinig-huis/verwarmen-op-gas/nieuwe-cv-ketel-of-combiketel-kopen/>. [Accessed: 26-Feb-2018]
- [77] Stedin, "Gas Tarieven 2018." 2018 [Online]. Available: <https://www.stedin.net/tarieven/download-tarieven>
- [78] Consumentenbond, "CV ketel onderhoud prijspeiling." Consumentenbond, 2015 [Online]. Available: <https://www.consumentenbond.nl/binaries/content/assets/cbhippowebsite/tests/cv-ketel/cv-ketel-onderhoud-prijspeiling.pdf>
- [79] Milieu Centraal, "Energieprijzen," 2018. [Online]. Available: <https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/snel-besparen/grip-op-je-energierekening/energieprijzen/>. [Accessed: 26-Feb-2018]
- [80] Energieleveranciers.nl, "Calorische waarde, bovenwaarde en onderwaarde," 2018. [Online]. Available: <https://www.energieleveranciers.nl/energie/begrippen/calorische-waarde>. [Accessed: 26-Feb-2018]
- [81] L. van Thiel, "Watergebruik Thuis 2013." TNS NIPO/Vewin, 2014 [Online]. Available: http://www.kraanwater.nu/SiteCollectionDocuments/Publicaties/Watergebruik_thuis_2010.pdf
- [82] Vewin, "Synopsis Watergebruik Thuis 2013," Den Haag, 2013.

- [83] E. J. M. Blokker and C. Agudelo-Vera, "Doorontwikkeling SIMDEUM: waterverbruik over de dag, energie voor warmwater en volume, temperatuur en nutriënten in afvalwater." Nieuwegein, 2015.
- [84] M. Bloemendal, E. de Buijzer, L. Snip, I. Pieterse-Quirijns, C. Agudelo-Vera, A. van Doorn, and M. Paalman, "Innovatieve oplossingen waterketen Lelystad Airport en Lelystad Airport Businesspark," 2016 [Online]. Available: http://www.tkiwatertechnologie.nl/wp-content/uploads/2015/08/KWR-2016_033-Sustainable-Airport-Lelystad.pdf
- [85] J. H. van Lopik, N. Hartog, and W. J. Zaadnoordijk, "The use of salinity contrast for density difference compensation to improve the thermal recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage systems," *Hydrogeol. J.*, pp. 1255-1271, 2016 [Online]. Available: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10040-016-1366-2/fulltext.html>
- [86] NVOE, "Richtlijnen Ondergrondse Energieopslag, Design guidelines of Dutch branche association for geothermal energy storage," 2006.
- [87] C. D. Langevin, W. B. Shoemaker, and W. Guo, "MODFLOW-2000, the USGS modular groundwater model - Documentation of the SEAWAT-2000 version with variable density flow process and integrated MT3DMS transport process," 2003.
- [88] A. W. Harbaugh, E. R. Banta, M. C. Hill, and M. . McDonald, "The U.S. Geological survey modular ground-water model—user guide to modularization concepts and the ground-water flow process," US Geological Survey, Virginia, 2000 [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/of/2000/0092/report.pdf>
- [89] C. Zheng and P. P. Wang, *MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide*. 1999.
- [90] J. Hecht-Mendez, N. Molina-Giraldo, P. Blum, and P. Bayer, "Evaluating MT3DMS for Heat Transport Simulation of Closed Geothermal Systems," *Ground Water*, vol. 48, no. 5, pp. 741-756, 2010.
- [91] C. D. Langevin, A. M. Dausman, and M. C. Sukop, "Solute and heat transport model of the Henry and hilleke laboratory experiment," *Ground Water*, vol. 48, no. 5, pp. 757-770, 2010 [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19563419>
- [92] C. D. Langevin, "Modeling axisymmetric flow and transport," *Ground Water*, vol. 46, no. 4, pp. 579-590, 2008 [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18384599>
- [93] M. Bloemendal and N. Hartog, "After the boom; Evaluation of dutch ates-systems for energy efficiency." European Geothermal Conference 2016, Strassbourg, 2016.
- [94] R. Courant, K. Friedrichs, and H. Lewy, "On the partial difference equations of mathematical physics," *IBM J. Res. Dev.*, vol. 11, no. 2, pp. 215-234, 1967.
- [95] C. D. Langevin, D. T. Thorne, A. M. Dausman, M. C. Sukop, and W. Guo, "SEAWAT Version 4: A computer program for simulation of multi-Species Solute and heat transport," 2008.

Bijlage I

Input zon, wind, regen in Power-to-X

Voor de formules geldt eigenlijk dat je ze nauwelijks kunt sturen omdat je afhankelijk bent van het weer.

Ik heb met **oranje** aangegeven welke data je uit een KNMI database moet halen en tijdgerelateerd zijn.

In **blauw** constantes die afhangen van het type product dat je kiest en de specificaties die daarbij horen.

In **groen** de variabelen die we zelf kunnen instellen.

Rood zijn weer gekoppeld aan een andere formule

Zwart zijn altijd constant of worden berekend in een formule/zijn al berekend in een formule

a. Formules voor opwekking zon in het Power-to-X-model

Voor deze berekeningen is het van belang om per uur te kunnen bepalen wat de opbrengst van een zonnepaneel is. Hiervoor zijn zeer veel factoren van belang, van de soort panelen en de precieze opstelling tot en met de omgevingstemperatuur en de zoninstraling op de gegeven locatie.

Er bestaan verschillende methodes voor het uitrekenen van de precieze opbrengst, en voor dit model zijn eerst twee verschillende methodes vergeleken. Uiteindelijk is ervoor gekozen om de berekeningen te baseren op een paper van Waternet met eerder onderzoek naar dit terrein op basis van het HOMER energy model [56]:

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} (G_T / G_{T,STC}) [1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC})] \quad (1)$$

Met P_{PV} de power output in kW/m²,

Y_{PV} = de rated capacity van het paneel, dus de output onder standaard test condities (STC) in kW/m²

f_{PV} = vermogens-vermindering factor in %

G_T = invallende radiatie op de panelen in de huidige tijdstap, afhankelijk van de hoek waaronder de panelen staan en de reflectie van de grond/wolken, in kW/m²

$G_{T,STC}$ = de invallende radiatie onder STC kW/m² (standaard 1)

α_p = temperatuur coëfficiënt van het vermogen in %/°C

T_c = de temperatuur van het paneel in de huidige tijdstap in °C

$T_{c,STC}$ = de temperatuur van het paneel onder STC in °C (standaard 25)

De rated capacity en temperatuur coëfficiënt van deze gegevens zijn af te leiden uit specificaties van het gekozen zonnepaneel, in dit geval wordt dat de Jinko Solar 265Wp omdat dit paneel ook wordt ingezet bij de eerste 3 MW aan zon die wordt aangelegd op het WRK terrein. In tabel 1 zijn de specificaties beschreven.

De gekozen derating factor f_{PV} is 75%, waarbij dus altijd 25% van de opbrengst als verlies wordt gezien [56]. Dit verlies wordt veroorzaakt door sneeuw of viezigheid op de panelen, kabel verliezen, evt. verlies door de inverter en verliezen doordat het paneel steeds minder efficiënt wordt na verloop van tijd. Deze factor nogal streng, omdat bijvoorbeeld het verlies van een paneel over tijd min of meer linear afloopt tot 80% over 25 jaar, het zou goed zijn om met deze tijdfactor rekening te houden.

De invallende radiatie kan worden bepaald door het combineren van KNMI gegevens met de hoek waaronder het paneel is geplaatst.

De temperatuur van het paneel is belangrijk om te bepalen omdat de efficiëntie van een zonnepaneel omlaag gaat bij toenemende temperaturen, de weerstand voor het transport van elektronen in het paneel zelf wordt dan groter. De formule die Soshinskaya et al. (2014) hiervoor gebruiken is:

$$T_c = \frac{T_a + (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}) \left(\frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right) \left[1 - \frac{\eta_{mp,STC}(1 - \alpha_p T_{c,STC})}{t\alpha} \right]}{1 + (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}) \left(\frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right) \left(\frac{\alpha_p \eta_{mp,STC}}{t\alpha} \right)} \quad (2)$$

Met T_c de temperatuur van het paneel in de huidige tijdsstap in °C

T_a = de omgevingstemperatuur in °C

$T_{c,NOCT}$ = de nominale temperatuur waarop het paneel werkt (NOCT) in °C

$T_{a,NOCT}$ = de omgevingstemperatuur waarop de NOCT is gedefinieerd in °C

G_T = invallende radiatie op de panelen in de huidige tijdsstap, afhankelijk van de hoek waaronder de panelen staan en de reflectie van de grond in kW/m²

$T_{c,STC}$ = standaard temperatuur waarop panelen worden getest (standaard 25 °C)

$G_{T,NOCT}$ = de instraling waarop de NOCT is gedefinieerd in kW/m²

α_p = de temperatuur coëfficiënt van het vermogen in %/°C

$\eta_{mp,STC}$ = de efficiëntie van het paneel bij maximaal vermogen in %

$t\alpha$ = transmissie van het paneel zelf, dimensieloos (standaard 0,9)

De omgevingstemperatuur is te verkrijgen via het KNMI, net als de radiatie. De overige variabelen zijn te vinden in de specificaties van het gekozen zonnepaneel (zie Tabel 50). De efficiëntie en het vermogen in Wp zijn hierbij wel wat naar boven aangepast, omdat er tegen de tijd dat het zonnepark wordt gebouwd alweer betere panelen beschikbaar zullen zijn.

TABEL 50 SPECIFICATIES ZONNEPANEEL JINKO SOLAR [57] EN INFORMATIE VAN WATERNET

Eigenschappen zonnepaneel in model	
Cell type	Poly-kristallijn
Dimensies (LxBxH)	1650 x 992 x 40 mm
Oppervlakte van 1 module (A_{pv})	1,63 m ²
Maximaal vermogen (P_{max})	270Wp
Open circuit voltage (U_{oc})	38,6V
Short circuit stroomsterkte (I_{sc})	9,03A
Capaciteit paneel onder STC (Y_{pv})	270 Wp

Module efficiëntie ($n_{mp,STC}$ of n_R)	17%
Levensduur	25 jaar
Nominale cel temperatuur	45 ± 2 °C
Temperatuur coëfficiënt van het vermogen ($T_{c,NOCT}$)	-0,41%/°C
Afname van vermogen	97,5% met afname tot 80% na 25 jaar (linear)
STC Radiatie ($G_{T,STC}$)	1.000 W/m ²
STC Temperatuur ($T_{c,STC}$)	25 °C
NOCT radiatie ($G_{T,NOCT}$)	800 W/m ²
NOCT omgevingstemperatuur ($T_{a,NOCT}$)	20 °C

Aanpassing formules

De derating factor in het Homer Energy model is vrij algemeen, en daarom aangepast door het combineren van meerdere verliesfactoren. Voor het langzaam afnemende vermogen van de panelen wordt de richtlijn van Jinko Solar (zie Tabel 50) aangehouden. Voor de afname van efficiëntie bij hogere temperatuur wordt al gecorrigeerd in de formules zelf. Dan zijn er nog verliezen door bekabeling en tijdelijke bedekking (sneeuw/vuil) van de panelen en verliezen bij de omvormer. Schaduw speelt op het gekozen terrein nauwelijks een rol en is dus relatief laag gehouden. AC kabels zijn niet voorzien en spelen dus ook geen rol in het verlies. Uiteindelijk wordt dan gekozen voor een verlies van 10%, voor een Oost-West opstelling, en 12% bij de zuid-opstelling omdat er een wat groter risico is op schaduw. waarbij dan nog moet worden meegenomen dat de efficiëntie van het paneel nooit 100% is maar 97,5% (zie Tabel 50).

In de formules wordt de instraling op het paneel gedefinieerd als G of G_T , maar zonder dit verder te specificeren. Omdat de zonnestralen niet loodrecht op de panelen vallen maar onder een hoek, en de panelen zelf ook weer onder een hoek staan is het wel belangrijk de irradiatie data van het KNMI aan te passen. Daarnaast is het ook van belang om onderscheid te maken tussen directe straling op het paneel (G_{Beam}) en diffuse straling die van andere kanten komt ($G_{Diffuse}$). Tenslotte kan er ook reflectie optreden via de grond of via wolken kan namelijk ook bijdragen aan de totale irradiatie ($G_{Reflected}$). Dit betekent dat

$$G_{Total,horizontaal} = G_{Beam} + G_{Diffuse} + G_{Reflected}$$

Het KNMI maakt geen onderscheid tussen deze verschillende vormen van straling, waardoor de door hen gemeten 'globale irradiatie' in J/cm² als de totale irradiatie op een horizontaal oppervlak wordt genomen. Dit zou later nog kunnen worden aangepast met andere data van bijvoorbeeld PVGIS, om het model nog nauwkeuriger te maken.

De KNMI data worden eerst omgezet in kW/m² ($\frac{J}{cm^2} \cdot \frac{10.000}{m^2} \cdot \frac{1}{3.600.000} \frac{J}{kW}$). Daarna moet de radiatie worden

aangepast aan de oriëntatie en de hoek waaronder het paneel staat. De formules zijn gebaseerd op Twidell & Weir (2015)[58] en ook terug te vinden op de website van pveducation [59].

$$G_{T,module} = \frac{G_{Total,horizontaal} [\cos(\alpha) \sin(\beta) \cos(\Psi - \Theta) + \sin(\alpha) \cos(\beta)]}{\sin(\alpha)} \quad (5)$$

Met $G_{T,module}$ de irradiatie op het paneel in kW/m²

$G_{Total,horizontaal}$ = globale irradiatie als som van de directe instraling, diffuse instraling en de reflectie van land/wolken

α = de stand van de zon (elevation) in graden

β	= de hoek van het paneel in graden
Ψ	= de oriëntatie (azimuth) van het paneel in graden (op het Noordelijk halfrond; zuid = 180°, west = 270° en oost = 90°)
θ	= de azimuth van de zon (oriëntatie van de zon op een bepaald moment)

De hoek van het paneel kan worden gevarieerd, net als de oriëntatie van het paneel. De azimuth van de zon kan worden verkregen van specifieke jaren [22]. Dit geldt ook voor de stand van de zon, maar deze kan ook zelf worden bepaald met de volgende formules:

$$\alpha = 90 - \phi + \delta \quad (6)$$

En

$$\delta = 23,45^\circ \sin \left[\frac{360}{365} (284 + d) \right] \quad (7)$$

Waarbij ϕ de breedtegraad is van de locatie (hier 52,01), en δ de declinatie hoek van de zon met d de dag van het jaar.

De formule voor $G_{T,module}$ (5) wordt dus gebruikt voor de bepaling van G_T uit formule (1). De formule wordt hiermee:

$$P_{total} = A_{PV} N_{PV} Y_{PV} f_{PV} (G_{T,module} / G_{T,STC}) [1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC})] \quad (8)$$

Waarbij A_{PV} is de oppervlakte van 1 paneel, en N_{PV} het aantal panelen, deze parameters zijn toegevoegd zodat de totale opbrengst van het systeem kan worden uitgerekend. P_{total} geeft dus de totale opbrengst in kWh van het systeem weer (in een specifiek uur). Als input voor deze formule worden formules (2), (5), (6) en (7) gebruikt.

Verschillende opstellingen

Bij een Oost-West opstelling van de panelen is het van belang verschillende formules te gebruiken voor de verschillend georiënteerde panelen. Bij een opstelling op het zuiden is de hoek van het paneel vaak ook hoger (rond de 36°) dan voor oost-west opstellingen (5-10°) om de meest optimale hoeveelheid irradiatie op te vangen. Bij een Oost-West opstelling liggen de panelen hierdoor platter zodat er van zoveel mogelijk kanten licht op het paneel valt. In dit geval geven de panelen geen schaduw op elkaar en staan ze in dakopstelling tegen elkaar, waardoor er meer panelen passen op hetzelfde vlak dan bij een Zuid-opstelling. Dit betekent wel dat voor een opbrengstberekening het systeem moet worden gesplitst in twee delen en voor elk deel apart de opbrengst wordt uitgerekend en vervolgens opgeteld. Bij een zuid-opstelling zullen de panelen verder uit elkaar worden geplaatst en meer ruimte in nemen. Het rendement is op deze manier hoger, maar de totale opbrengst kan lager uitvallen.

Van Waternet (Gijs van der Meer, 03-10-2017) weten we dat er momenteel wordt gerekend met een 15 graden hellingshoek voor beide opstellingen. Voor Zuid wordt hiervoor gekozen omdat er dan meer panelen passen, en voor Oost-West kiest men een hogere hoek in verband met vuil wat minder makkelijk van het paneel afglijdt. Een opstelling op Zuid zou neerkomen op 30% minder panelen dan een Oost-West opstelling.

Voorbeeldberekening

Ter voorbeeld is dit doorgerekend voor een 8,7 MWp oost-west opstelling (15° helling), en ook voor een zuidopstelling van 6,2 MWp (15° helling), waarbij is aangenomen dat hier dan 30% minder ruimte is omdat de afstand tussen de panelen groter is. De totale opbrengst van het O-W systeem is 7,6 GWh in 2016, terwijl het systeem op het zuiden 6,17 GWh zou opleveren in dat jaar. Uit de resultaten blijkt ook dat de Zuid opstelling vooral in de zomer meer oplevert, terwijl het Oost-West gerichte systeem constanter is in de levering van stroom. Momenteel staat de Oost-West opstelling ingesteld in het model.

TABEL 51 MODEL INPUT PARAMETERS BIJ VERSCHILLENDE ZON-OPSTELLINGEN

	Oost-West	Zuid
Piek capaciteit (MWp)	8.7	6.2
Aantal panelen (N_{pv})	32148	16415
Hoek van de panelen (β)	15	15
f_{pv} - derating factor aan het begin	0.8775	0.858

b. Formules en input data voor opwekking van wind in het Power-to-X-model

Om te berekenen hoeveel windenergie er kan worden opgewekt op het terrein moet het aantal windturbines en de soort windturbines bekend zijn. Voor het berekenen van de opgewekte windenergie zijn zeer veel formules bekend waarmee de (verdeling van de) windsnelheid kan worden bepaald, zoals de Weibull distributie.

Binnen dit onderzoek doen we een simpele analyse waarbij we meteorologische data gebruiken in combinatie met gegevens van een specifieke windturbine. Het soort windturbine wordt bepaald door Waternet, de meteorologische data worden opnieuw gebruikt van het KNMI (meetstation De Bilt). Deze gegevens zijn gemeten met een anemometer op 10 meter hoogte en zullen dus moeten worden aangepast naar de hoogte waarop de bladen van de turbine ronddraaien (zgn 'hub height'). Dit kan worden gedaan met de volgende formule:

$$u_{hub} = \frac{\ln(h_{hub}/z_0)}{\ln(h_{meter}/z_0)} \cdot u_{meter} \quad (9)$$

Waarbij u_{hub} de windsnelheid op het aanhechtingspunt van de turbine is in m/s

h_{hub} = De afstand van het turbine platform tot de rotor van de turbine in m

z_0 = de ruwheid van het oppervlak in m

h_{meter} = de hoogte van de windsnelheidsmeter (10m bij het KNMI)

u_{meter} = de windsnelheid zoals gemeten door de windsnelheidsmeter (m/s)

De juiste windturbine kiezen heeft vooral te maken met of de gekozen windturbine past bij de windklasse, oftewel de gemiddelde windsnelheid op het terrein. De windsnelheid van meetstation De Bilt wordt momenteel gebruikt, met een gemiddelde windsnelheid op 85 m van 5,5 m/s. Aan de andere kant geeft de windkaart van het KNMI veel hogere gegevens voor de windsnelheid op 100 m hoogte, tussen de 6,5-7,5 m/s voor deze locatie, maar de kaart was weinig nauwkeurig [60]. De WindViewer van RVO [61] geeft op de locatie van het WRK terrein 6,69 m/s voor de windsnelheid op 90 m hoogte. De huidige gebruikte waarden in het model zijn dus enigszins conservatief. Echter, de gemiddelde windsnelheid valt daarmee sowieso eerder in klasse III (7,5 m/s), dan in klasse I of II (8,5 of 10,5 m/s gemiddelde windsnelheid) [62].

Momenteel staan er bij het klooster Vestas V90-2MW turbines, die daar goed functioneren, met een opbrengst van 5 miljoen kWh/jaar/molen (2.500 uur bedrijfstijd [63]). De 2 MW turbine is dan ook geschikt voor klasse III (7,5 m/s), al is dit nog steeds vrij hoog vergeleken met de gemiddelde windsnelheid die is gemeten [64]. Echter Waternet heeft aangegeven op dit terrein het liefste 3MW turbines in te willen zetten. Er bestaat ook een Vestas V90-3MW

turbine, maar deze is eigenlijk geschikt voor hogere windklassen windklassen I en II [62]. Ter illustratie wordt deze hier toch ook meegenomen.

Daarnaast is via de website wind turbine models gezocht naar een geschikte 3MW turbine in windklasse III, de General Electric (GE) 3,2-130 is daarvan een mooi voorbeeld [65].

Specificaties van de genoemde windturbines staan in Tabel 52.

Daarnaast is de ruwheid van het terrein belangrijk om te bepalen. Dit getal geeft aan op welke hoogte de windsnelheid nul m/s benaderd, en zegt daarmee iets over het terrein en de obstakels. Aangezien nu data van het meetstation De Bilt worden gebruikt, waar veel gebouwen en bomen in de buurt staan, zal de ruwheidsfactor tussen de 0.2 (landbouw met huizen, struiken, planten) en 0.4 (dorpen, kleine steden, landbouwgronden met hoge heggen, bossen en zeer ruw en oneven terrein) [66]. Er is in dit geval gekozen ruwheidsfactor van 0.3m.

Als de windsnelheid op de juiste hoogte is berekend dan kan de volgende algemene formule worden toegepast voor het behaalde vermogen van de turbine:

$$P_{max} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot u_{hub}^3 \quad (10)$$

Met P_{max} het maximale vermogen in kW dat er in de lucht zit bij deze windsnelheid.

ρ = de dichtheid van de lucht, ongeveer 1,225 kg/m³

A = het totale oppervlak dat de turbinebladen beslaan als ze ronddraaien, dus $\pi \cdot r^2$ met r de straal van de rotor

TABEL 52 VOORBEELD SPECIFICATIES WINDTURBINE [64], [67], [65]

	Vestas V90-2MW windturbine	Vestas V90-3MW windturbine	GE 3.2 windturbine
Rotor diameter (d)	90 m	90 m	130 m
Rotor straal (r)	45 m	45 m	65 m
A	6.362 m ²	6.362 m ²	13.273 m ²
Hub height (h_{hub})	105m	105m	85m
Cut in speed	4 m/s	4 m/s	2 m/s
Cut off speed	25 m/s	25 m/s	25 m/s
Rated wind speed	15 m/s	15 m/s	12 m/s
Rated power (P_{rated})	2.000 kW	3.000 kW	3.200kW
Surface roughness (z_0)	0.3m	0.3m	0.3m
rho	1,225 kg/m ³	1,225 kg/m ³	1,225 kg/m ³

In werkelijkheid wordt niet alle energie uit de wind gehaald, het theoretisch maximum hiervoor is overigens 59%. Om het werkelijke vermogen van de turbine te bepalen kan daarom het best worden berekend aan de hand van de 'power curve' die de producent levert bij de turbine. Hier staat in bij welke windsnelheid de turbine aan gaat (cut in speed), wat de snelheid is waarbij de turbine het maximale vermogen haalt (rated power) en bij welke windsnelheid de turbine voor de veiligheid wordt uitgeschakeld (cut-off speed). Voor het gebied er tussen geldt een soort exponentiële curve, zie figuur 1 voor een voorbeeld.

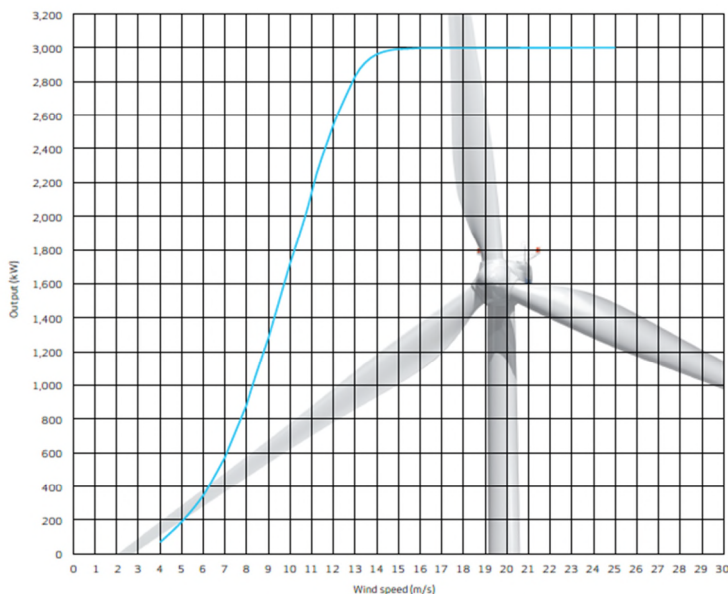


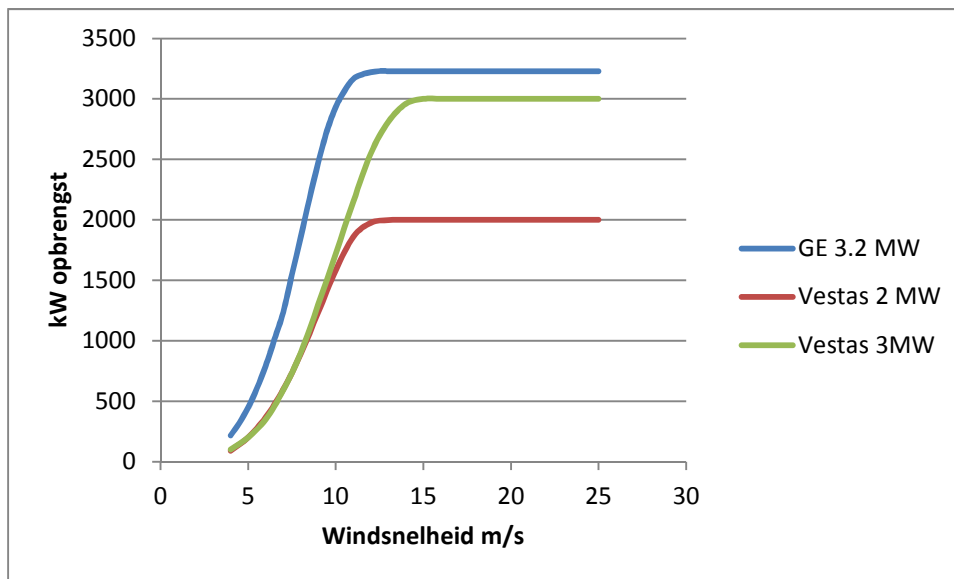
FIGURE 1 DE POWER CURVE VAN DE VESTAS V90 3 MW WINDTURBINE [67]

In dit geval kan voor het stuk tussen 4 en 15 m/s of 2 en 12 m/s een curve worden opgesteld met behulp van excel (polynomial curve, $R^2 > 0.999$) met de windsnelheid als variabele. Vervolgens kan uit de winddata van het KNMI in combinatie met de power curve het geleverde vermogen van de turbine in elke tijdstap worden bepaald. Ten slotte kan de capaciteits factor worden uitgerekend, waarbij het totaal opgewekte vermogen wordt gedeeld door het vermogen als de molen altijd op rated power had gewerkt.

$$c_F = \frac{E_{\text{annual,turbine}}}{P_{\text{rated}} \cdot 8760 \text{h/y}} \quad (11)$$

Met c_F de capacity factor (dimensieloos), $E_{\text{annual,turbine}}$ de totale hoeveelheid energie die wordt opgewekt door de windturbine in kWh of MWh en P_{rated} de rated power van de turbine in kW/MW. Het aantal vollast uren wordt ook veel gebruikt, en is de capacity factor die weer vermenigvuldigd wordt met het aantal uren in een jaar.

Door de powercurve van de turbines in Figuur 53 te vergelijken, wordt meteen duidelijk dat de GE 3.2-130 turbine een betere 3MW turbine is van de Vestas 3MW, en waarschijnlijk ook een grotere opbrengst gaat hebben dan de al geïnstalleerde Vestas 2MW turbines. In het gebied met lage windsnelheden kan de GE 3.2-130 ook al meer energie opwekken dan de 2MW turbine. In het model zijn dan ook de specificaties en power curve van deze GE turbine gebruikt.



FIGUUR 53 POWER CURVE VERGELIJKING TUSSEN 3 SOORTEN WINDTURBINES

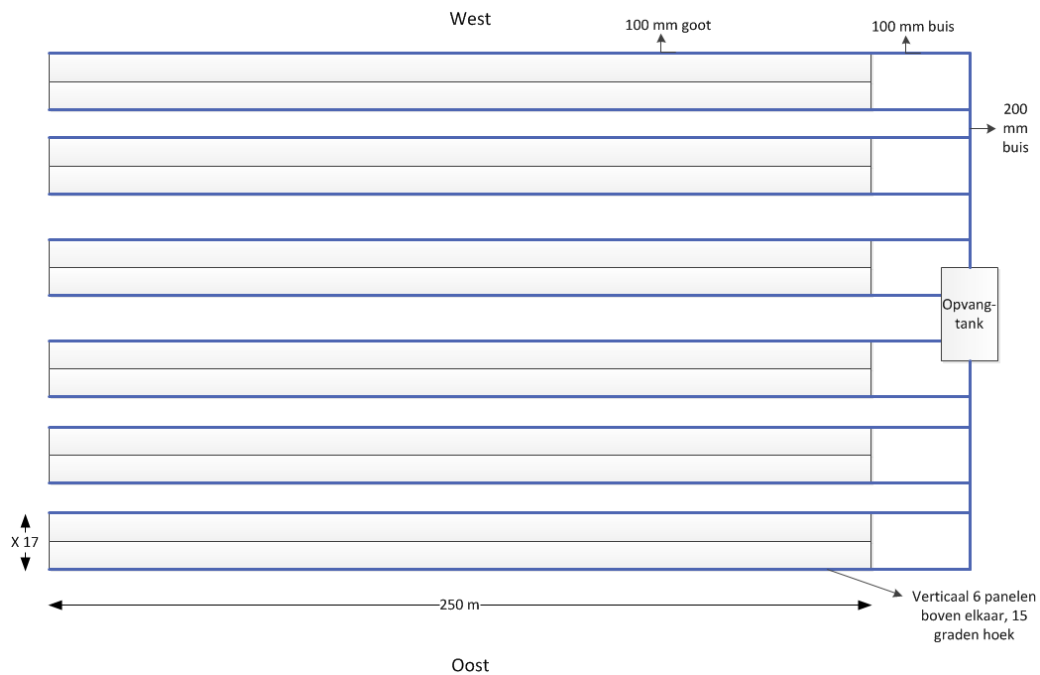
c. Regenwateropvangsysteem

Regenwater wordt opgevangen op de zonnepanelen. Het precieze systeem hiervoor moet nog worden ontworpen, maar in het model wordt nu bepaald hoeveel water er kan worden opgevangen op de panelen. Er wordt hierbij geen rekening gehouden met naar welke richting de panelen staan opgesteld, alleen de hoek is hierbij belangrijk. Verder worden KNMI data gebruikt voor de regenval in de Bilt, deze data zijn in 0,1 mm regen per uur, en bij minder dan 0,05 mm is de waarde -1. Volgens het KNMI staat een waarde van 1 mm gelijk aan 1 L/m². De data van het KNMI worden dus gedeeld door 10 en alle -1 waarden worden omgezet naar een 0. Vervolgens wordt het aantal panelen en de hoek van de panelen meegenomen om de totale hoeveelheid opgevangen water te berekenen. In formulevorm ziet dit er zo uit:

$$V_{rain} = \frac{v_{rain} A_{pv} N_{pv} \cos(\beta)}{1000}$$

Met V_{rain} de opgevangen hoeveelheid regen in m³/uur, v_{rain} de neerslag in L/m²/uur, A_{solar} de oppervlakte van een zonnepaneel in m², N_{solar} het aantal opgestelde zonnepanelen en β de hoek waaronder het paneel is opgesteld. De factor 1000 is nodig om van L/uur naar m³/uur neerslag om te rekenen.

Voor het wateropvangsysteem moeten er opvanggoten worden bevestigd onder de panelen. Er is nog geen definitief ontwerp voor het zonnepark, dus er is voor nu uitgegaan van een voorlopig ontwerp van Waternet (emailcontact Gijs van der Meer, 22-11-2017). In dit ontwerp staan de panelen Oost-West opgesteld, in rijen van 250 meter. Binnen een rij staan de panelen als een dakje tegen elkaar aan, Oost aan de ene kant en West aan de andere kant. In totaal worden er zes panelen boven elkaar geplaatst, aan zowel de Oost- als de Westkant van een rij. Op deze manier worden 17 rijen gevormd in het landschap. Onder iedere rij kan een (dak)goot worden gemonteerd, waarin verschillende afvoerpunten zitten naar een 100mm buis. Deze buis komt uit aan de noordkant van het veld, waar deze loost op een 200mm buis. Aan de noordkant van het veld, in het midden, kan dan de opvangtank en eerste filter worden geïnstalleerd. Eén 200 mm buis heeft een maximale piek van 50m³ per uur te verwerken.



FIGUUR 54 CONCEPT REGENWATEROPVANGSYSTEEM

De kosten voor het wateropvangsysteem zijn gebaseerd op dakgootpakketten van Stergoot, gemaakt van staal met een polyester coating. In het uiteindelijke ontwerp zullen de kosten nog preciezer worden berekend, en door de relatieve schaalgrootte waarschijnlijk lager uitvallen omdat een behoorlijke gootlengte nodig is. In het huidige model echter zijn de kosten berekend met 33,9€/m gebaseerd op een dakgoot set tot 8 m lengte [68]. De kosten voor het totale opvangsysteem zijn dan ca. 300.000€. Omdat hiermee nog niet het gehele systeem compleet is (afvoerbuis 200mm, extra gootuitlopen) en het systeem ook moet worden aangelegd wordt in het model een prijs van 350.000€.

Bijlage II

Warmtesysteem Power-to-X

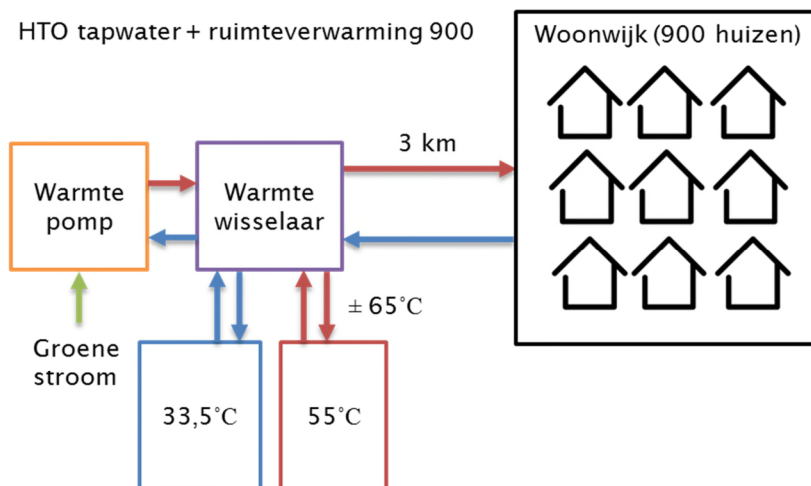
*Ik heb met **oranje** aangegeven welke data uit een KNMI database komen en tijdgerelateerd zijn.*

*In **groen** de variabelen die we zelf kunnen instellen (tot op zekere hoogte).*

***Rood** zijn weer gekoppeld aan een andere formule*

Zwart zijn constant of worden in de formule uitgerekend

In dit document worden de formules en berekeningen zoals uitgevoerd in het warmtesysteem van Power-to-X uitgebreid beschreven. Op sommige punten zullen de berekeningen uit het model worden geïllustreerd met behulp van het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit'. Het gaat dan om een woonwijk van 900 woningen, die zowel warm tapwater als ruimteverwarming geleverd krijgen op minimaal 50°C. De warmtepomp staat ingesteld op 65 °C, en het water in de medium bron is dan ca. 33.5 °C. Het warmtenet is hierbij drie kilometer lang, en gaat vanaf de laatste woning weer terug door de 'koude' leiding. Elke woning is via een kleine leiding verbonden met het warmtenet.



FIGUUR 55 BESCHRIJVING SCENARIO 'WIJK, ZON, WARMTE PRIORITEIT' WARMTESYSTEEM

a. Warmtevraagpatroon

De warmte die wordt geproduceerd met een overschot aan elektriciteit in de zomer kan worden opgeslagen in een aquifer en in de winter worden gebruikt om huizen te verwarmen. Daarvoor is het wel van belang een idee te hebben van de warmtevraag van de woningen. Voor één huis is dit patroon erg afhankelijk van de samenstelling van het huishouden (aantal mensen, leeftijd) en gedragsfactoren. Ook de oriëntatie van het huis ten opzichte van de zon,

de mate van ventilatie en exacte grootte van ramen en dergelijke zijn dan van belang. Op de grotere schaal van een woonwijk worden deze effecten al meer uitgevlakt, maar is nog wel van belang om een idee te hebben van de mate van isolatie en gemiddelde temperatuur in huis. Met deze gegevens en de graaddagen methode kan dan globaal worden uitgerekend wat de warmtevraag per uur van een woonwijk zou kunnen zijn. Er is onderscheid gemaakt tussen de warmtevraag voor verwarming die seizoensgebonden is, en de warmtevraag voor warm tapwater die een vrij vast dagelijks terugkerend patroon heeft. Indien een woonwijk zou worden aangesloten op het hoge temperatuur warmte netwerk zal voor de verwarming van de woning niet meer nodig zijn dan de warmte geleverd door het Hoge Temperatuur Opslag HTO systeem. Voor warm tapwater moet de temperatuur hoger zijn dan 50-60 °C in verband met legionellapreventie, daarom zal voor dit tapwater per huis nog een klein verwarmingselement nodig zijn die de watertemperatuur (altijd of af en toe) boven de 60 °C brengt. Omdat er verschillende patronen gelden voor ruimteverwarming en warm tapwater worden deze onderdelen hier apart behandeld.

Warmtevraag ruimteverwarming

Het HTO systeem en bijbehorend warmtenetwerk wordt toegepast in nieuwbouwwijken omdat het aanleggen van een systeem met vloerverwarming en warmtepompen in bestaande huizen te kostbaar is. Daarom wordt uitgegaan van huizen met energielabel “Hoog” zoals geformuleerd in Ecofys rapport de Kosten van Verwarmen in Woningen [69]. Deze woningen bestaan nu nog niet tot nauwelijks, maar zullen na 2020 sowieso gebouwd gaan worden om aan de richtlijnen voor woningisolatie te voldoen.

De gewenste temperatuur in huis blijkt ook af te hangen van de isolatiewaarde en de nachtverlaging. Het ECN W00N model heeft aangetoond dat de gemiddelde temperatuur instelling hoger is in een goed geïsoleerd huis en dat nachtverlaging hier minder voor komt [70]. In het Ecofys rapport is dit vertaald naar een constante temperatuur van 21 °C voor woningen met isolatieniveau “Hoog”.

Omdat de bottom-up benadering met de warmte per huis te complex en mogelijk onnauwkeurig wordt omdat er dan teveel aannames moeten worden gedaan met betrekking tot het ontwerp, de oriëntatie en het soort gebouw bij elk huis, is ervoor gekozen met de graaddagen methode te werken. Echter, deze methode wordt wel aangepast naar ‘graaduren’, omdat het model wel per uur de warmtevraag moet kunnen berekenen.

Bij de graaddagen methode wordt het verschil in temperatuur tussen een bepaalde basis temperatuur en de buitenlucht genomen, normaal gesproken gemiddeld over de dag. De waarde die hieruit komt, wordt het aantal graaddagen genoemd. De basistemperatuur wordt standaard op 18 °C gezet waarbij een binnentemperatuur van 20 °C wordt aangehouden. Het verschil in temperatuur (van 2 °C) wordt veroorzaakt door interne warmteproductie van mensen en apparaten. Als het buiten gemiddeld 10 graden is gedurende de dag, betekent dit dat er voor deze dag 8 graaddagen gelden.

Het rapport van Ecofys houdt echter 21 °C aan als binnentemperatuur bij een hoog isolatieniveau, waardoor de basistemperatuur in dit geval 19 °C moet zijn en het aantal graaddagen dan 9 wordt. Toch is er voor gekozen de basistemperatuur op 18 °C te laten staan, aangezien er in een goed geïsoleerde woning minder warmteverlies is en hierdoor de verwachting is dat de basistemperatuur niet hoger zou moeten zijn dan in een minder goed geïsoleerd huis.

Omdat het model waarden per uur moet kunnen gegeven worden geen graaddagen maar graaduren uitgerekend. Hierbij geldt dus dat in een bepaald uur het verschil tussen de

basistemperatuur (18 °C) en de buitentemperatuur (KNMI data De Bilt), wordt gedeeld door 24 om op een 'graaduur' uit te komen

$$HDH_i \text{ (}^\circ\text{C hour)} = \frac{T_{base} - T_{air}^i}{24 \text{ h/day}} \quad \text{als} \quad T_{air} < T_{base}$$

Met

HDH_i = aantal graaduren in een bepaald uur

T_{base} = basistemperatuur in huis, ingesteld op 18 °C

T_{air} = omgevings/buiten temperatuur in °C/u (KNMI data De Bilt)

Ten slotte wordt met gewogen graaddagen gewerkt, wat betekent dat voor de warmtevraag een extra factor wordt gebruikt in verband met de zoninstraling in bepaalde periodes. Voor november tot en met februari is deze 1.1. In maart en oktober 1.0 en in de rest van het jaar 0.8 [71], [72].

KWA bedrijfsadviseurs stelt bestanden beschikbaar van graaddagen die ook gebaseerd zijn op de Bilt [73]. Omdat hier met gemiddelde dagwaardes in plaats van uurwaardes wordt gewerkt, wijken deze enigszins af van de waardes die met bovenstaande methode worden uitgerekend. Voor 2016 betekent dit bijvoorbeeld dat volgens KWA er 2833 graaddagen waren. De graaduren methode leidt tot een totaal van 2.897 graaddagen (circa 2% meer). In dit onderzoek wordt verder met graaduren gerekend.

Om met een graaduren dan wel graaddagen methode te kunnen werken, is het van belang de globale warmtevraag van een goed geïsoleerde (nieuwbouw) woning te kennen. Deze is rond de 20 GJ per jaar, waarbij 11 GJ wordt toegeschreven aan ruimteverwarming, en de overige 9 GJ gebruikt wordt voor de verwarming van tapwater (Persoonlijke communicatie, Frank Schipper, 3 april 2017). In dit geval ging het om een hoekhuis met 2,7 personen. Omdat in het model gerekend wordt met een gemiddeld huishouden van 2,2 personen is het tapwaterverbruik hierop aangepast, waarbij 3,3 GJ per persoon wordt toegepast. De totale warmtevraag voor ruimteverwarming kan dus worden berekend door het aantal huizen te vermenigvuldigen met 11 GJ.

In de wijk Rijnhuizen worden naast nieuwbouwwoningen ook kantoorgebouwen getransformeerd naar woningen. Indien de renovatie zo wordt uitgevoerd dat de woningen een energielabel A krijgen, kan ook aan deze woningen warmte worden geleverd op 50°C (gesprekken met Dirk-Jan Simons, Erik de Jong en Jeanette Levels van LPB Sight, 9-11-2017). Bij gerenoveerde kantoren worden de woningen meestal appartementen, in de berekeningen van LPB sight voor Rijnhuizen is uitgegaan van een appartement van 81-100m² in een middelste bouwlaag. Afhankelijk van het huidige energielabel van het gebouw, en de genomen maatregelen wordt vervolgens een warmtevraag in GJ/jaar bepaald. Gemiddeld is deze dan met stadsverwarming 27 GJ/jaar [15]. Bij 2.2 personen per huishouden betekent dit dus 19,7 GJ aan ruimteverwarming, en 7,3 GJ aan tapwater.

In het basisscenario is aangenomen dat 450 woningen nieuwbouw zijn, en 450 renovatie. Op deze manier kan dan de totale warmtevraag per jaar worden bepaald. De warmte per uur kan vervolgens worden bepaald door de fractie van de totale warmte in een jaar per graaduur te berekenen. Door deze factor te vermenigvuldigen met het aantal graaduren in een bepaald uur kan de warmtevraag op dat moment worden bepaald.

Warmtevraag:

$$f_{demand,spaceheat} = \frac{E_{spaceheat,total} (kWh)}{\sum_{i=1}^{8760} HDH_i}$$

$$Q_{spaceheat} [n] (kWh/h) = HDH_i \cdot f_{demand,heat}$$

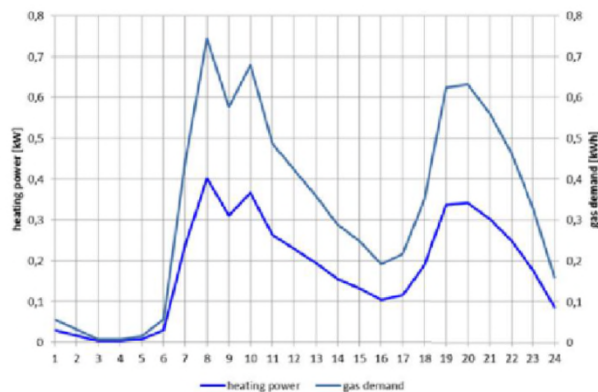
$f_{demand,spaceheat}$ = fractie van de warmtevraag per graaduur (in kWh/h)

$E_{spaceheat,total}$ = totale warmtevraag van de woonwijk per jaar in kWh

$Q_{spaceheat} [n]$ = warmtevraag van de woonwijk in een bepaald uur, in kWh/h

Warm tapwatervraag

Warm tapwater heeft een dagelijks terugkerend patroon, dat in principe wel verschilt doordeweeks of in het weekend, en ook tussen landelijk en stedelijk gebied. In dit eerste onderzoek wordt geen onderscheid gemaakt tussen week en weekend, maar wordt gebruik gemaakt van een algemeen patroon voor het gebruik van warm tapwater zoals opgenomen door Ecofys in een rapport [69]. Een andere optie zou zijn om SIMDEUM te gebruiken voor gedetailleerde warm tapwater vraag patronen. Echter, dit kan pas in een later stadium als duidelijker is wat voor mensen er in de huizen zullen wonen.



Figuur 56 Warm tapwater gebruik, gemiddeld over een dag zoals gebruikt door Ecofys [69]. Data afkomstig uit een rapport van Energy Matters voor RVO [74]

De woningen hebben allemaal een buffervat van ca. 200 liter in de woning staan. Dit betekent dat het vraagpatroon niet exact gevolgd hoeft te worden. Om het debiet door het net zo constant mogelijk te houden is er daarom voor gekozen om de warm tapwatervraag gelijk te trekken over de tijd. Op die manier wordt het buffervat met een constante snelheid gevuld en is er zowel 's nachts als overdag voldoende tijd om de buffervaten vol te laten lopen voor de pieken in de ochtend en de avond. Er is aangenomen dat de woningen 7,3 GJ aan warmte nodig hebben voor hun warm tapwater verbruik bij een gemiddeld huishouden van 2.2 personen (Persoonlijke communicatie, Frank Schipper, 9-10-2017). In kWh wordt dit dan $\frac{9GJ/jaar \cdot 1000 \text{ kWh/MWh}}{3.6 \text{ GJ/MWh} \cdot 365 \text{ dagen/jaar}} = 5,55 \text{ kWh/huis/dag}$. Per uur wordt een bepaald percentage hiervan gebruikt, nu dus 4,16% oftewel 0,231 kWh/huis/uur.

Dit getal kan vervolgens worden toegepast door te vermenigvuldigen met het aantal huizen in de woonwijk waar naar wordt gekeken. Ook kan er natuurlijk een ander jaarlijks verbruik worden ingesteld, waardoor de waarden veranderen. Omdat een helemaal constant patroon

waarschijnlijk niet geheel realistisch is, wordt op het warm tapwaterverbruik een ruis met gezet met een 10% afwijking naar beneden of naar boven. Hierdoor zit er toch nog wat variatie in het tapwaterpatroon.

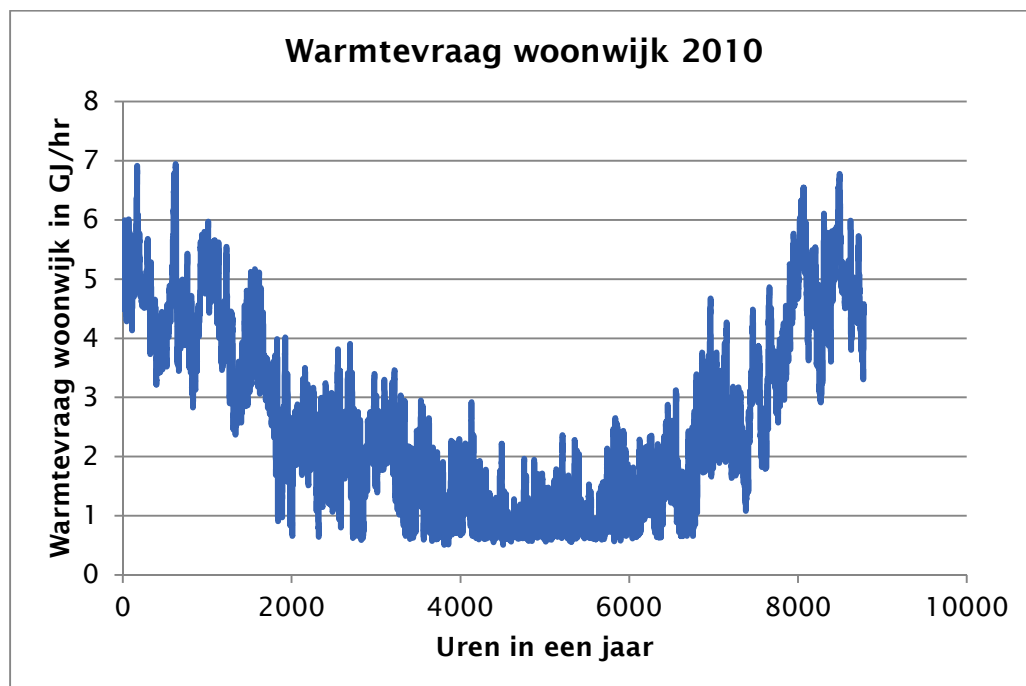
Mocht er voor worden gekozen om het tapwaterpatroon wel afhankelijk te maken van de vraag, dan kan dit altijd nog, omdat het model toestaat dat elk uur een verschillende waarde voor de warmtapwatervraag wordt gekozen.

Voor de input parameters in het model kunnen bijv. de volgende waarden gelden

Tabel 53 Instellingen model tbv warmtevraagpatroon

Parameter	900 woningen - ruimteverwarming + tapwater
T_{base} (°C)	18
N_{house}	450 nieuw, 450 renovatie
$Q_{spaceheat}$ (GJ/jaar)	11 /19,7
$Q_{tapwater}$ (GJ/jaar)	7,3
$T_{HP,cond}$ (°C)	65

Voor een woonwijk met 900 huizen zijn de berekeningen gemaakt over het jaar 2010.



FIGUUR 57 WARMTEVRAAG IN GJ VOOR EEN WOONWIJK MET 900 WONINGEN IN 2010

b. Warmtedistributie en verlies in warmtenetten

Op het moment dat er een warmtevraag is, wordt er water uit de warme bron opgepompt, en de warmte wordt middels een warmtewisselaar overgedragen aan het water in het warmtenet en naar de woningen gepompt. In de woningen bevindt zich een -geïsoleerd - opslagvat voor warm water, en een verwarmingselement dat er voor kan zorgen dat eens per week de temperatuur van het water boven de 60 °C wordt gebracht ivm legionellapreventie. Daarnaast is het vooral belangrijk te weten op welke temperatuur het water bij de woningen aan komt, en dus is het belangrijk om het verlies in het warmtenet te berekenen. Dit verlies is bepaald met behulp van slides van de cursus 'Ontwerp open en duurzame warmtenetten' van Deltares (juni 2017) en de NEN-EN 13941+A1 norm voor ontwerp en installatie van voorgoed geïsoleerde buissystemen voor stadsverwarming. In deze normen wordt het warmteverlies van drie termen bepaald: warmteverlies door de buiswand, door de ondergrond en door interactie met de naastgelegen leiding. De lengte van de leiding wordt opgedeeld in stukjes van 10 meter, waarover steeds het verlies en de temperatuur aan het eind van dit buisfragment wordt bepaald. De temperatuur die aankomt bij de woning komt dan overeen met de temperatuur in het laatst uitgerekende fragment, en voor het warmteverlies in de leiding wordt de som van alle verliezen in alle fragmenten genomen.

Per fragment wordt het verlies als volgt bepaald:

$$Q_{\text{loss}} = L_{\text{fragment}}(U_1 - U_2)(T_{\text{DHN,in}} - T_g) + L_{\text{fragment}}U_2(T_{\text{DHN,in}} - T_{\text{DHN,retour}})$$

Met Q_{loss} in W, L_{fragment} in meters, nu in stapjes van 10 m. $T_{\text{DHN,in}}$ is de temperatuur in de warmte leiding, deze stellen we zelf in, T_g is de achtergrond temperatuur (ca 11 °C) en $T_{\text{DHN,retour}}$ is de temperatuur in de koude (terugkomende) leiding, die ook wordt ingesteld. U_1 en U_2 zijn warmteoverdrachtstermen in W/m K die worden bepaald uit drie verschillende warmteweerstanden:

$$U_1 = \frac{R_g + R_{\text{iso}}}{(R_g + R_{\text{iso}})^2 - R_m^2} \quad U_2 = \frac{R_m}{(R_g + R_{\text{iso}})^2 - R_m^2}$$

Met R_{iso} de warmteweerstand door isolatie in m K/W, dit is de belangrijkste warmteweerstandsterm.

R_g is de warmteweerstand door de ondergrond, en R_m de warmteweerstand door interactie met de naastgelegen leiding. De isolatieterm voor warmteweerstand wordt als volgt bepaald:

$$R_{\text{iso}} = \frac{1}{\pi D_2 h} \quad \text{met } h = \frac{2\lambda_{\text{iso}}}{D_2 \ln \frac{D_2}{D_1}} \quad \text{en} \quad D_2 = D_1 + 2d_{\text{iso}}$$

Waarin D_2 de buiten diameter van de leiding + isolatie, en D_1 de binnendiameter van de isolatie (=gelijk aan buitendiameter van de buis in m), λ_{iso} de warmtegeleidingscoëfficiënt van de isolatie (0,033 W/m²/K voor PUR schuim) en d_{iso} de dikte van de isolatielaag.

De andere twee warmteweerstanden kunnen met deze formules worden uitgerekend:

$$R_g = \frac{1}{2\pi\lambda_g} \left[\ln \left(\frac{4H}{D_2} \right) \right]$$

$$R_m = \frac{1}{4\pi\lambda_g} \ln \left(1 + \left(\frac{2H}{E} \right)^2 \right)$$

$$\text{met } H = H' + \frac{\lambda_g}{h_{gs}}$$

Met λ_g de warmtegeleidingscoëfficiënt van de ondergrond (2,3 W/m/K) en h_{gs} de warmteoverdrachtscoëfficiënt op het maaiveld (14,5 W/m/K). E is de afstand tussen het middelpunt van de leidingen (in m), en H' de diepte ligging van het midden van de leiding (in m).

Om het temperatuurverlies over een stukje leiding te berekenen wordt eerst bepaald welk volume de buis heeft en wat de stroming in m³/s door de buis is.

$$V_{\text{tube}} = \frac{1}{4} \pi D_1^2 L_{\text{fragment}}$$

Met V_{tube} het volume van het buissegment in m³.

De flow door het warmtenet kan in elke tijdsstap worden berekend afhankelijk van de warmtevraag. Momenteel wordt gerekend met de gemiddelde flow over het jaar, ivm de rekentijd van het model.

$$V_{\text{total}} = \frac{(Q_{\text{tapwater}} + Q_{\text{spaceheat}}) \cdot N_{\text{house}} \cdot 10^6 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{GJ}}\right)}{c_w \cdot (T_{\text{DHN,in}} - T_{\text{DHN,retour}})}$$

Met f_{year} in m³, Q_{tapwater} en $Q_{\text{spaceheat}}$ de warmtevraag voor tapwater en verwarming in GJ (zie tabel 2), N_{house} het aantal huizen (zie ook tabel 2), c_w de warmtecapaciteit van water (4,18*10³ kJ/m³/K), $T_{\text{DHN,in}}$ de temperatuur het warmtenet in in °C en $T_{\text{DHN,retour}}$ de temperatuur die terugkomt van de woningen in °C.

En vervolgens is de gemiddelde flow in m³/s:

$$f_{\text{average}} = \frac{f_{\text{year}}}{365 \cdot 24 \cdot 3600}$$

Dan is τ

$$\tau = \frac{V_{\text{tube}}}{f_{\text{average}}}$$

Door τ in seconde te vermenigvuldigen met Q_{loss} in W kan het warmteverlies in het segment in joules worden bepaald.

$$E_{\text{loss}} = Q_{\text{loss}} \cdot \tau$$

Tenslotte kunnen dan de energie aan het begin van het segment, aan het eind van het segment en de temperatuur aan het eind van het segment worden bepaald.

$$E_{\text{in}} = V_{\text{tube}} \rho_{\text{water}} c_w (T_{\text{in}} + 293)$$

Met E_{in} de energie in de stroom in joule (J) aan het begin van het segment. T_{in} is in eerste instantie gelijk aan $T_{\text{DHN,in}}$, maar wordt in elke volgende tijdstap vervangen door de T_{out} van de vorige tijdstap. Vervolgens kan de energie aan het eind van het segment worden bepaald (ook in joule):

$$E_{\text{out}} = E_{\text{in}} - E_{\text{loss}}$$

Tenslotte wordt de temperatuur aan het eind van het segment uitgerekend:

$$T_{out} = \frac{E_{out}}{V_{tube} \rho_{water} c_w} - 293$$

Deze T_{out} wordt dus weer gebruikt als input voor de volgende iteratie. Dit gaat zo door totdat het eind van het warmtenet is bereikt ($L_{heat network}$). De laatste T_{out} temperatuur wordt dan gebruikt om het warmteverlies in het net te bepalen.

Nieuwe parameters als input voor model (scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit') staan in Tabel 54.

TABEL 54 INPUT PARAMETERS MODEL VOOR BEREKENING VAN WARMTEVERLIES IN HET HOOFDNET

Parameter	900 woningen – ruimteverwarming + tapwater
$L_{fragment}$ (m)	10
$T_{DHN,in}$ (°C) ^a	53,5
$T_{DHN,retour}$ (°C)	35
D_1 (m)	0,1
d_{iso} (m)	0,05
ρ_{water} (kg/m ³)	1.000
$L_{heat network}$ (m)	3.000

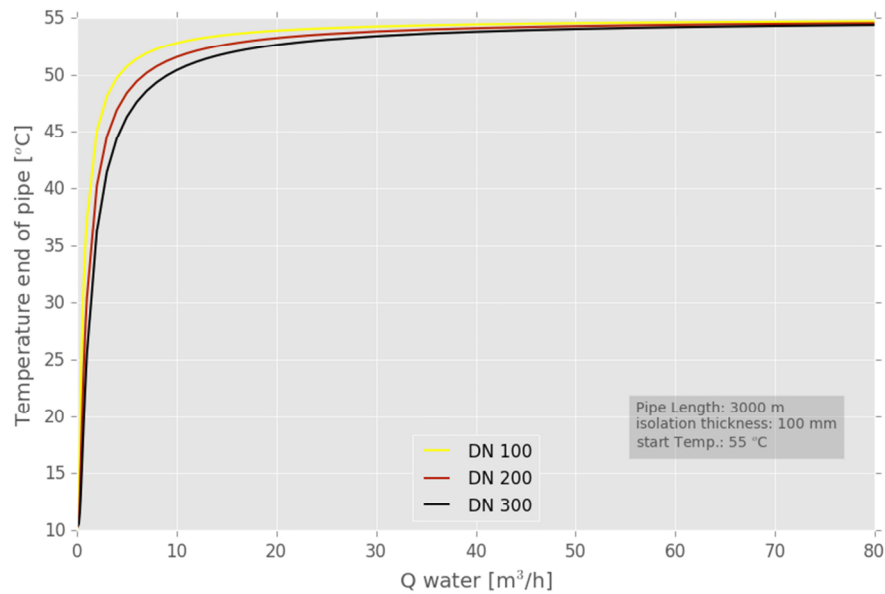
^a Deze temperatuur volgt uit formules die later worden behandeld, maar zijn hier ter illustratie al gegeven.

Om ook het warmteverlies in het distributienet te bepalen wordt aangenomen dat er vanaf het hoofdnnet nog een 5 m lange buis tot in het huis loopt, met een diameter van 25 mm. Door deze buis gaat 1/900ste van de totale flow in het net. Op deze manier kan worden bepaald wat de temperatuur is die in de woning aankomt. Dit temperatuurverschil wordt ook meegenomen voor het berekenen van het totale warmteverlies in kWh of GJ in het net.

TABEL 55 INPUT PARAMETERS MODEL VOOR BEREKENING WARMTEVERLIES IN DISTRIBUTIENET

Parameter	Scenario wijk, zon, warmte prioriteit
$L_{network to home}$ (m)	5
D_1 (m)	0,025
d_{iso} (m)	0,0125

Met de gegeven formules en input parameters is $T_{out,end}$ berekent voor het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit', en aan het eind van het warmtenet is de temperatuur dan 52,6°C. In de woning gaat hier ook nog 1,5 graad vanaf in de warmtewisselaar. Dat betekent dat de temperatuur in de woning 51,1°C is. Echter, het is belangrijk op te merken dat de berekeningen nu gedaan zijn met een gemiddelde flow (30m³/uur), terwijl in werkelijkheid de flow behoorlijk kan wisselen. Vanaf een flow van 10-15m³ per uur in het net is er veel minder warmteverlies, terwijl het tussen de 0 en 10-15 m³ juist een exponentieel verband is tussen de flow en de mate van warmteverlies. Dit komt ca. 10% van het jaar voor, in de zomermaanden, en dan zal het verlies dus groter zijn. In de volgende versie van het model zal dit daarom nog verder worden geoptimaliseerd.



FIGUUR 58 ILLUSTRATIE WERKING WARMTEVERLIESFUNCTIE POWER-TO-X-MODEL. DE VERSCHILLENDE DN WAARDEN STAAN VOOR VERSCHILLENDE LEIDINGDIAMETERS (DN100 HEEFT EEN 10CM BINNENDIAMETER)

c. Warmteopslag systeem (HTO)

Variabelen, omschrijving, (constante waarde) en [eenheid]

Q_{DHN}	= warmtevraag uit het net [kWh]
Q_{HP}	= warmteproductie door de warmtepomp [kWh]
$Q_{from\ grid}$	= warmte die uit het net moet komen [kWh]
$Q_{spaceheat}$	= warmtevraag voor ruimteverwarming [kWh]
$Q_{tapwater}$	= warmtevraag voor tapwater [kWh]
$P_{resheat}$	= duurzame energie beschikbaar voor warmtepomp [kWh]
COP_{hp}	= rendement van een warmtepomp, uitgedrukt als getal (bijv. COP van 4 = 400%)
T_{aq}	= temperatuur van de bron [°C]
$T_{HE,d,in}$	= ingangstemperatuur vraagkant van de warmtewisselaar [°C]
$T_{HE,d,out}$	= uitgangstemperatuur vraagkant van de warmtewisselaar [°C]
$T_{HE,aq,in}$	= ingangstemperatuur warmtewisselaar verbonden met de bron [°C]
$T_{HE,aq,out}$	= uitgangstemperatuur warmtewisselaar verbonden met de bron [°C]
$T_{HE,loss}$	= verlies over de warmtewisselaar [°C]
$T_{DHN,retour}$	= retourtemperatuur uit het warmtenet (20) [°C]
$T_{HP,cond}$	= temperatuur aan de condensor (uitgang) zijde van de warmtepomp [°C]
T_{evap}	= temperatuur aan de verdampingszijde (ingang) van de warmtepomp [°C]
$T_{aq,amb}$	= omgevingstemperatuur van de bodem (10) [°C]
c_w	= warmtecapaciteit van water ($4,18 \cdot 10^3$) [kJ/m ³ /K]
V_{aq}	= volume in de bron [m ³]
$f_{Q,pv,aq}$	= stroom van warmte in de bron [m ³]
f_{HD}	= stroom van warmte uit de bron [m ³]
n_{aq}	= thermisch opslagrendement van het water in de bron [-]
Q_{aq}	= thermische energie opgeslagen in de bron [GJ]

Mogelijke situaties

Dit model bevat twee bronnen, een warme bron (w) en een medium bron (m), met beide een hoeveelheid energie (Q_{aq}) temperatuur (T_{aq}) en volume (V_{aq}).

Uit de bronnen wordt onttrokken of juist geladen, afhankelijk van de situatie. Er kan sprake zijn van een warmtevraag (Q_{DHN}), of er kan juist energie over zijn uit de zonnepanelen die opgeslagen moet worden (Q_{HP}). Daarnaast kan er zowel een warmtevraag aanwezig zijn als warmtelevering door de zonnepanelen via de warmtepomp (heat pump, HP). In het model zal dus onderscheid gemaakt moeten worden tussen vier verschillende bedrijfssituaties, namelijk:

$$1. \text{ HTO rust} \quad \begin{cases} Q_{DHN} = 0 \\ Q_{HP} = 0 \end{cases}$$

In dit geval is er geen warmtevraag, maar ook geen elektriciteitsoverschot. Het systeem staat dan in rust en er gebeurt niets. Dit kan bijvoorbeeld 's nachts voorkomen.

$$2. \text{ HTO laden + leveren uit HP} \quad Q_{HP} > Q_{DHN}$$

Als er meer stroom wordt geleverd aan het systeem dan nodig is om aan de warmtevraag te voldoen, of indien er geen warmtevraag is, dan wordt de overige warmte opgeslagen. Deze stroom heeft een aparte naam ($Q_{pv,aq}$) en leidt er dus toe dat water uit de medium bron wordt onttrokken, verwarmt met warmte uit de warmtepomp en weer in de warme bron geïnfiltrerd. Dit zal vooral overdag in de zomer gebeuren.

$$3. \text{ HTO ontladen} \quad \begin{cases} Q_{HP} < Q_{DHN} \\ Q_{DHN} - Q_{HP} > Q_{aq,w} \end{cases}$$

Als er niet genoeg warmte direct vanuit de warmtepomp beschikbaar is om aan de warmtevraag te voldoen, dan wordt de warmte bron aangesproken. De warme bron wordt in dit geval ontladen en de warmte wordt via de warmtewisselaar overgedragen aan het warmtenet. De afgekoelde stroom wordt geïnfiltrerd in de medium bron. In de winter zal dit een veel voorkomende situatie zijn.

$$4. \text{ HTO ontladen + leveren uit HP} \quad \begin{cases} Q_{HP} < Q_{DHN} \\ Q_{DHN} - Q_{HP} < Q_{aq,w} \end{cases}$$

Het kan namelijk voorkomen dat er niet genoeg warmte meer in de bron zit om aan de (volledige) warmtevraag te voldoen. In dat geval wordt eerst berekend hoeveel warmte nog uit de bron kan worden gehaald. De resterende warmtevraag wordt vervolgens direct via de warmtepomp opgewekt met extra stroom uit het net ($Q_{from\ grid}$).

Warmtevraag uit warmtenetwerk

Het model werkt vraag gestuurd, een warmtevraag is het uitgangspunt en deze moet worden vervuld. De warmtevraag wordt bepaald met behulp van warmtevraag patronen voor warm tapwater en ruimteverwarming. De warmtevraag bestaat uit het optellen van deze twee profielen.

$$Q_{DHN}[n] = Q_{spaceheat}[n] + Q_{tapwater}[n] + Q_{loss,DHN,total}$$

$$f_{DHN}[n] = \frac{Q_{DHN}[n] \cdot 3600}{c_w(T_{DHN,in} - T_{DHN,retour})}$$

Met Q in kWh/hr en fd in m³/hr. Vervolgens wordt met deze f_{DHN} het warmteverlies in het net bepaald mbv de formules zoals beschreven onder Warmtedistributie en verlies in warmtenet.

$$Q_{\text{loss,DHN,total}} = \frac{f_{DHN} \rho_{\text{water}} c_w}{3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}} (T_{DHN,in} - T_{\text{house}})$$

Dit verlies wordt opgeteld bij de warmtevraag uit het net Q_{DHN} (zie onder Warmteopslag systeem) om te compenseren voor het warmteverlies in het warmtenet.

$$Q_{DHN,with\ loss} [n] = Q_{\text{spaceheat}} [n] + Q_{\text{tapwater}} [n] + Q_{\text{loss,DHN,total}}$$

Warmtepomp

Ook kan er bij een overschot aan stroom warmte worden geleverd aan de warmtepomp, hiervoor gelden de volgende formules:

$$Q_{HP} [n] = Q_{\text{res,heat}} [n] \cdot \text{COP}_{HP}$$

$$f_{Q,pv,aq} [n] = \frac{Q_{HP} [n] \cdot 3600}{c_w (T_{\text{cond (out)}} - T_{\text{evap (in)}}) dt}$$

Voor de analyse zijn COP waarden gebruikt zoals verkregen via Anne Spoor (Aveco de Bondt, 25-10-2017) met hulp van De Kleijn Energy Consultants & Engineers. In functieform komt dit neer op:

$$\text{COP}_{HP} = 7,5 - 0,07 (T_{\text{cond (out)}} - T_{\text{evap (in)}})$$

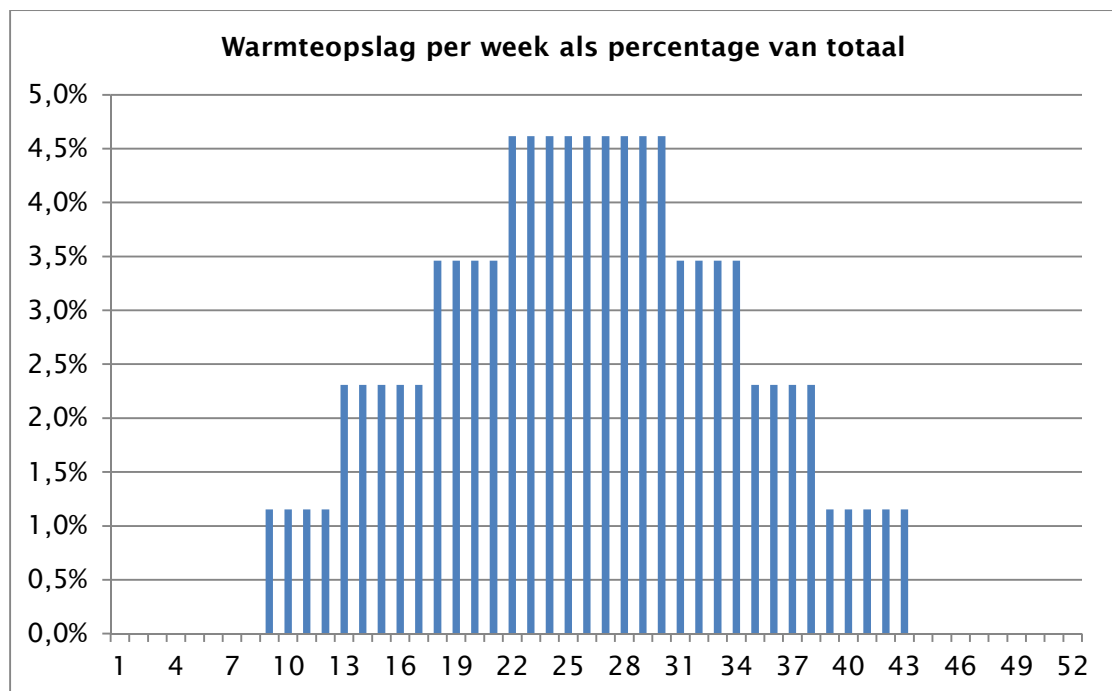
Met $T_{\text{cond (out)}}$ de temperatuur aan de condensor kant van de warmtepomp, dus de hoogte van de temperatuur die door de warmtepomp gecreëerd wordt, deze wordt van te voren ingesteld. $T_{\text{evap (in)}}$ is de temperatuur die de warmtepomp in komt. Hiervoor wordt de temperatuur van het water in het Lekkanaal gebruikt. Samen vormen deze twee waarden dus het temperatuurverschil over de warmtepomp en daarmee wordt de COP bepaald.

Tabel 56 COP van de warmtepomp in de verschillende seizoenen

Datum	Temperatuur in °C (data van Lekkanaal uit 2016)	COP - naar 40 °C	COP - naar 65 °C
Januari	8,3	5,3	3,5
Februari	7,0	5,2	3,4
Maart	8,7	5,2	3,4
April	12,6	5,3	3,6
Mei	15,5	5,6	3,8
Juni	18,5	5,8	4,0
Juli	22	6,0	4,2
Augustus	20,6	6,2	4,5
September	22,1	6,1	4,4
Oktober	15,5	6,2	4,5
November	10,5	5,8	4,0
December	5,5	5,4	3,7

De elektriciteit die vanuit de hernieuwbare energie beschikbaar is voor warmte productie met de warmtepomp volgt uit het beslissingsmechanisme dat in Power-to-X-Integratiefile staat beschreven. Naast dat er een maximum is, omdat de warmtepomp een maximale capaciteit heeft, kan het ook gebeuren dat de bron al genoeg geladen is en er dus geen warmte meer bij hoeft. In dat geval zal de elektriciteit worden gebruikt in de elektrolyser voor waterstofproductie, of wordt de elektriciteit terug geleverd aan het net.

Dit wordt gedaan door een maximum op te stellen voor het laden van de bron in een bepaald percentage van de totale warmtevraag, zoals in de grafiek (Figuur 59) weergegeven. Vanwege het warmteverlies is er daarnaast voor elk scenario nog een bepaalde infiltratie/onttrekkingsratio ingesteld, die wordt vermenigvuldigd met dit percentage. Voor het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit' is dit 1,25.

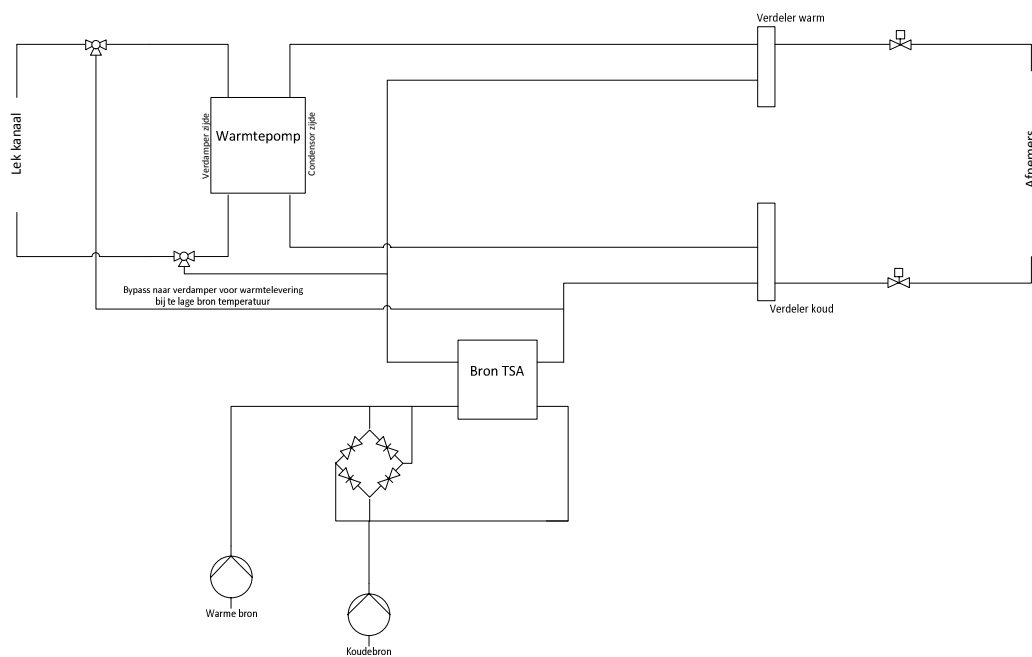


FIGUUR 59 WARMTEOPSLAG PER WEEK ALS PERCENTAGE VAN TOTAAL

Warmtewisselaar

De koppeling tussen de verschillende stromen vindt plaats in de warmtewisselaar. Hier vindt de warmteuitwisseling plaats die er toe leidt dat een volumestroom water wordt opgewarmd of juist afgekoeld, afhankelijk van de verschillende situaties. In het model is één van die stromen altijd afkomstig uit de bronnen. Aan de andere kant kan een stroom lopen die naar het warmtenet gaat, indien er warmte wordt geleverd uit de bronnen. De andere optie is het vullen van de bronnen, en op dat moment staat de stroom uit de warmtepomp via de warmtewisselaar in contact met de bronnen (zie Figuur 60). Als er direct warmte wordt geleverd uit de warmtepomp naar het warmtenetwerk gaat dit via een verdeler, hiervoor is dus geen warmtewisselaar nodig. Op dergelijke momenten (meest waarschijnlijk aan het einde van de winter) is het water in het Lekkanaal koud en moet de elektriciteit uit het net komen. Om de warmtepomp zo min mogelijk energie te laten gebruiken en de opgeslagen warmte zo goed mogelijk te benutten wordt in deze situatie daarom het water uit de warme bron aan de verdamperzijde van de warmtepomp aangeboden. Aan de condensorzijde wordt dan het water uit het warmtenet wat is afgekoeld tot 30/35°C aangevoerd, en opgewarmd tot

65°C. In plaats van uitwisseling tussen de warme bron en het warmtenet middels een warmtewisselaar zit in dit geval dus de warmtepomp er tussen, waardoor met een heel hoog rendement extra warmte kan worden geproduceerd. De COP van de warmtepomp is in dergelijke situaties dan bijvoorbeeld 6,9 en 6,5 bij het produceren van respectievelijk 40 en 65°C, als de temperatuur van het onttrokken grondwater 5° kouder is dan de drempelwaarde $T_{\text{threshold}}$ (T_t). Deze optie is momenteel nog niet in het model meegenomen, het komt momenteel ook niet voor dat de temperatuur in de bron onder de drempelwaarde komt omdat deze nog statisch is.



FIGUUR 60 HYDROLOGISCHE SYSTEEMSCHETS

In de warmtewisselaar wordt dus bepaald hoeveel warmte uit de bron wordt onttrokken (Q_{HD}) of toegevoegd ($Q_{\text{pv,aq}}$).

Hiervoor gelden de volgende formules

Situatie 1: Systeem in rust, geen warmte-uitwisseling

$$Q_{\text{HD}} [\text{n}] = 0$$

$$Q_{\text{pv,aq}} [\text{n}] = 0$$

Situatie 2: HTO laden + leveren uit HP

$$Q_{\text{HD}} [\text{n}] = 0$$

$$Q_{pv,aq} [n] = Q_{HP} [n] - Q_{DHN} [n]$$

Situatie 3: HTO ontladen

$$Q_{HD} [n] = Q_{DHN} [n] - Q_{HP} [n]$$

$$Q_{pv,aq} [n] = 0$$

Situatie 4: HTO ontladen + leveren uit warmtepomp

$$Q_{HD} [n] = Q_{DHN} [n] - Q_{aq,w} [n]$$

$$Q_{pv,aq} [n] = 0$$

De temperatuurveranderingen in de warmtewisselaar worden als volgt bepaald:

Situatie 1: Systeem in rust, geen warmte-uitwisseling ($Q_{pv,aq} = 0$ & $Q_{HD} = 0$)

Er gebeurt niets met de warmtewisselaar.

Situatie 2: HTO laden + leveren uit HP ($Q_{pv,aq} > 0$)

$$T_{HE,d,in} [n] = T_{HP,cond}$$

$$T_{HE,d,out} [n] = T_{HE,aq,in} + T_{HE,loss}$$

$$T_{HE,aq,in} [n] = T_{aq,m}$$

$$T_{HE,aq,out} [n] = T_{HE,d,in} - T_{HE,loss} = T_{aq,w,in}$$

Situatie 3: HTO ontladen & Situatie 4: HTO ontladen + leveren uit warmtepomp ($Q_{HD} > 0$)

$$T_{HE,d,in} [n] = T_{DHN,retour}$$

$$T_{HE,d,out} [n] = T_{HE,aq,in} - T_{HE,loss}$$

$$T_{HE,aq,in} [n] = T_{aq,w}$$

$$T_{HE,aq,out} [n] = T_{HE,d,in} + T_{HE,loss} = T_{aq,m,in}$$

De flows die horen bij deze warmtestromen zijn als volgt gedefinieerd:

$$f_{Q,pv,aq}[n] = \frac{Q_{pv,aq}[n] \cdot 3600}{c_w(T_{HE,d,in} - T_{HE,d,out})}$$

$$f_{HD}[n] = \frac{Q_{HD}[n] \cdot 3600}{c_w(T_{HE,d,out} - T_{HE,d,int})}$$

Hierbij moet vermeldt worden dat er wordt omgerekend van kWh (waarin de Q gegeven is) naar kJ door te vermenigvuldigen met 3600 (kJ/kWh). Op deze manier kan voor alle energiestromen met kWh worden gerekend maar zijn de volumes van de bronnen wel in m³.

Warme bron

Via de warmtewisselaar worden de aquifers met lauw (ca 25-35 °C) en warm (45 of 65 °C) aangesproken. Daardoor verandert het volume, de temperatuur en de totale warmte inhoud van de aquifers.

Volume

Situatie 1: Systeem in rust, geen aanspraak van de bronnen

$$V_{aq,w}[n + 1] = V_{aq,w}[n]$$

Situatie 2: HTO laden + leveren uit warmtepomp

$$V_{aq,w}[n + 1] = V_{aq,w}[n] + f_{Q,pv,aq}[n]$$

Situatie 3: HTO ontladen & Situatie 4: HTO ontladen + leveren uit warmtepomp

$$V_{aq,w}[n + 1] = V_{aq,w}[n] - f_{HD}[n]$$

Temperatuur

De temperatuur in de warme bron moet ook voor elke tijdstap beschikbaar zijn. Belangrijk daarbij is dat de verliezen die optreden in de bodem worden meegenomen die afhangen van de hoeveelheid opgeslagen water en de achtergrondtemperatuur. Echter, bij hoge temperatuur bronnen zijn hier nog geen goede beschrijvingen voor beschikbaar. Als alternatief is nu op basis van modellering op hoge temperatuur van verschillende infiltratie temperaturen de onttrekkingstemperatuur bepaald, die hiermee onafhankelijk wordt gemaakt van de tijd. Voor de warme bron zal in het model dus gelden:

$$T_{aq,w,in} = T_{HP,cond} - T_{HE,loss}$$

$$T_{aq,w} = T_{aq,w,in} - 0,285(T_{aq,w,in} - 30)$$

Uiteindelijk is de beste optie om het model te koppelen aan de Modflow modellen van Martin Bloemendal. Dit is nog wel geprobeerd in het huidige project, maar de koppeling is nog niet helemaal geslaagd. Dat is dan een idee voor het vervolg project

Warmte in bron

$$Q_{aq,w}[n+1] = c_w \cdot V_{aq,w}[n] \cdot (T_{aq,w} - T_{ref,w}) + dQ_{aq,w}[n]$$

Met voor $dQ_{aq,w}$ als volgt berekent in verschillende situaties:

Situatie 1: Systeem in rust, geen aanspraak van de bronnen

$$dQ_{aq,w}[n] = 0$$

Situatie 2: HTO laden + leveren uit warmtepomp

$$dQ_{aq,w}[n] = c_w \cdot f_{Q,pv,aq} \cdot (T_{aq,w,in}[n] - T_{ref})$$

Situatie 3: HTO ontladen & Situatie 4: HTO ontladen + leveren uit warmtepomp

$$dQ_{aq,w}[n] = -c_w \cdot f_{HD} \cdot (T_{aq,w} - T_{ref})$$

Medium bron

De medium bron wordt gebruikt als opslag voor het water wat terugkomt via het warmtenet, en wordt ontladen op het moment dat er stroom over is en met het water uit de medium bron warm water kan worden gemaakt. Hieronder staat een uitwerking van de verschillende bedrijfssituaties.

Volume

Situatie 1: Systeem in rust, geen aanspraak van de bronnen

$$V_{aq,m}[n+1] = V_{aq,m}[n]$$

Situatie 2: HTO laden + leveren uit warmtepomp

$$V_{aq,m}[n+1] = V_{aq,m}[n] - f_{Q,pv,aq}[n]$$

Situatie 3: HTO ontladen & Situatie 4: HTO ontladen + leveren uit warmtepomp

$$V_{aq,m}[n+1] = V_{aq,m}[n] + f_{HD}[n]$$

Temperatuur

Situatie 1: Systeem in rust, geen aanspraak van de bronnen

$$T_{aq,m}[n+1] = T_{aq,m}[n] - n_{aq,m}$$

Situatie 2: HTO laden + leveren uit warmtepomp

$$T_{aq,m}[n+1] = \frac{V_{aq,m}[n] \cdot T_{aq,m}[n] - f_{Q,pv,aq}[n] \cdot T_{aq,m,in} - n_{aq,m}}{V_{aq,m}[n] - f_{Q,pv,aq}[n]}$$

Situatie 3: HTO ontladen & Situatie 4: HTO ontladen + leveren uit warmtepomp

$$T_{aq,m}[n+1] = \frac{V_{aq,m}[n] \cdot T_{aq,m}[n] - f_{HD}[n] \cdot T_{aq,m,in} - n_{aq,m}}{V_{aq,m}[n] - f_{HD}[n]}$$

$$n_{aq,m} = \alpha \cdot (T_{aq,m}[n] - T_{aq,amb})$$

Met alpha $\alpha = 0,2$

Warmte in bron

$$Q_{aq,m}[n+1] = c_w \cdot V_{aq,m}[n] \cdot (T_{aq,m}[n] - T_{ref}) + dQ_{aq,m}[n]$$

Met voor $dQ_{aq,m}$ als volgt berekent in verschillende situaties:

Situatie 1: Systeem in rust, geen aanspraak van de bronnen

$$dQ_{aq,m} = 0$$

Situatie 2: HTO laden + leveren uit warmtepomp

$$dQ_{aq,m} = -c_w \cdot f_{Q,pv,aq}[n] \cdot (T_{aq,m,in}[n] - T_{ref})$$

Situatie 3: HTO ontladen & Situatie 4: HTO ontladen + leveren uit warmtepomp

$$dQ_{aq,m} = c_m \cdot f_{HD}[n] \cdot (T_{aq,m}[n] - T_{ref})$$

De referentie temperatuur T_{ref} is de achtergrondtemperatuur van de bodem, en is ingesteld op 10 °C.

d. Kostenfuncties Warmtesysteem

Variabelen, omschrijving, (constante waarde) en [eenheid]

C_{well}	= kosten voor boring en behuizing van de put [€]
L_b	= boorlengte [m]
$c_{borehole}$	= kostenfactor voor boring [€/m]
$C_{well casing}$	= kosten voor put behuizing [€]
d_{well}	= boorputdiameter [m]
$C_{terrain,piping}$	= kosten voor terreinleidingen [€]
$L_{terrain,piping}$	= lengte terreinleidingen [m]
$c_{terrain,piping}$	= kostenfactor voor terreinleidingen [€/m]
$C_{pump/inverter/valves}$	= totale kosten voor het pomp/klep/omvormer systeem [€]
$C_{pump,q}$	= kosten voor een pomp, afhankelijk van het debiet [€/m ³ /hr]
$C_{inverter,q}$	= kosten frequentieomvormer, afhankelijk van het debiet [€/m ³ /hr]
$C_{valves,q}$	= kosten injectieklepen, afhankelijk van het debiet [€/m ³ /hr]
$N_{doublet}$	= aantal doubletten
q	= debiet van het water [m ³ /hr]
$C_{heat exchanger}$	= kosten van de warmtewisselaar [€]
$P_{max,demand}$	= maximale vermogen wat geleverd door de warmtewisselaar over een jaar [kW]
$C_{technical room}$	= kosten voor de aanleg van de technische ruimte [€]

De kosten voor de aquifers en bijbehorende investeringen (warmtewisselaar, technische ruimte) zijn gebaseerd op een door KWR opgebouwde database van bronkosten op basis van verschillende offertes voor bodemenergiesystemen.

Boring en behuizing

De kosten voor de boring en behuizing van de put hangen af van de diepte van de put (de boorlengte) en de boringsdiameter. Daarnaast zijn er altijd twee putten nodig, één voor de warme en één voor de koude bron.

$$C_{well} = (L_b \cdot c_{borehole} + C_{well casing}) \cdot 2$$

De kosten voor boring ($c_{borehole}$) en behuizing ($C_{well casing}$) hangen af van de boringsdiameter d_{well} in m op een stapsgewijze manier zoals aangegeven in tabel 6.

Tabel 57 kostenfunctie boring en behuizing aquifers

d_{well} [m]	$c_{borehole}$ [€/m]	$C_{well casing}$ [€]
0,4 - 0,6	€400	€3.000
0,6- 0,8	€550	€5.250
0,8 -1,0	€750	€7.500
1,0 -1,2	€900	€11.250
>	€1.250	€15.000

In dit onderzoek wordt de boringsdiameter in alle onderzochte scenario's geschat op 0,6-0,7 m, waardoor de kosten in de tweede rij van de tabel gebruikt zullen worden.

Leidingwerk

$$C_{\text{terrain,piping}} = L_{\text{terrain,piping}} \cdot c_{\text{terrain,piping}}$$

De kosten van de terreinleidingen ($c_{\text{terrain,piping}}$) zijn is 100 €/m.

Pompen, frequentieomvormer en injectiekleppen

De kosten voor pompen, de frequentieomvormer en injectiekleppen hangen alle af van het debiet en het aantal doubletten op de volgende manier:

$$C_{\text{pumps}} = C_{\text{pump,q}} \cdot 2 \cdot N_{\text{doublet}}$$

$$C_{\text{inverter}} = C_{\text{inverter,q}} \cdot 2 \cdot N_{\text{doublet}}$$

$$C_{\text{valves}} = C_{\text{valves,q}} \cdot 2 \cdot N_{\text{doublet}}$$

$$N_{\text{doublet}} = \frac{f_{\text{max,hp}}}{f_{\text{max,soil}}}$$

Waarbij alle kosten afhankelijk zijn van het debiet/de flow f volgens tabel 7. De kosten zijn per bron, en elk doublet heeft twee bronnen, vandaar de factor twee. Het aantal doubletten wordt bepaald door de maximale flow die de bodem aan kan.

Tabel 58 Kostenfuncties pompen, frequentieomvormer en injectiekleppen aquifers

f [m ³ /hr]	$C_{\text{pump,q}}$ [€]	$C_{\text{inverter,q}}$ [€]	$C_{\text{valves,q}}$ [€]
0 - 50	€7.500	€4.000	€4.000
50 - 100	€10.000	€5.000	€5.000
100 - 150	€15.000	€6.000	€6.000
150 - 200	€25.000	€7.000	€7.000
200 - 250	€35.000	€8.000	€8.000
250 - 300	€50.000	€9.000	€9.000

Warmtewisselaar

De grootte van de warmtewisselaar is afhankelijk van het vermogen wat er doorheen moet stromen. Dit vermogen wordt bepaald in het model, en het maximale vermogen wat wordt berekent bepaald de kosten voor de warmtewisselaar volgens de volgende formule:

$$C_{\text{heat exchanger}} = 1500 \cdot \sqrt{P_{\text{max,demand}}}$$

De levensduur van de warmtewisselaar is 30 jaar [75].

Technische ruimte

De kosten voor de technische ruimte worden bepaald als factor van de investering voor de apparaten die hierin komen te staan, zoals de pompen en omvormers en injectiekleppen. De kosten worden als volgt berekend:

$$C_{\text{technical room}} = \frac{1}{3} \cdot (C_{\text{pump}} + C_{\text{inverter}} + C_{\text{valves}})$$

Vergunning, voorontwerp, effectenstudie

Het maken van een eerste ontwerp en doen van een studie naar effecten die het systeem kan hebben in de ondergrond, evenals gesprekken voeren over een vergunning worden ook meegenomen in de kosten van het systeem. Hierbij geldt ook dat een percentage van de totale investering wordt genomen, met een minimum van €5.000, zie verder tabel 8.

$$C_{\text{first design}} = \% \cdot C_{\text{construction}} = \% \cdot \sum C_{\text{well}} + C_{\text{terrain,piping}} + C_{\text{pump}} + C_{\text{inverter}} + C_{\text{valves}} + C_{\text{heat exchanger}} + C_{\text{technical room}}$$

Tabel 59 Kostenfuncties vergunning, voorontwerp, effectenstudie

$C_{\text{construction}}$ [€]	% of subtotal investment
< 50.000	€5.000
50.000-100.000	10%
100.000- 500.000	7.5%
> 500.000	5%

Definitief Ontwerp, Bestek

Het maken van een meer definitief ontwerp en bestek (gedetailleerde omschrijving waarop aannemers hun aanbieding kunnen baseren) is de laatste kostenpost binnen het warmtesysteem. Opnieuw is dit gedefinieerd als een percentage van de totale investering, met een minimum van €7.500.

$$C_{\text{final design}} = \% \cdot C_{\text{construction}} = \% \cdot \sum C_{\text{well}} + C_{\text{terrain,piping}} + C_{\text{pump}} + C_{\text{inverter}} + C_{\text{valves}} + C_{\text{heat exchanger}} + C_{\text{technical room}}$$

Hierbij gelden de percentages in tabel 9.

Tabel 60 Kostenfuncties definitief ontwerp, bestek

$C_{\text{construction}}$ [€]	% of subtotal investment
< 75.000	€7.500
75.000-100.000	10%
100.000- 500.000	7.5%
> 500.000	5%

Onderhoudskosten aquifers

De jaarlijkse onderhoudskosten aan het systeem worden berekend aan de hand van de totale investeringskosten, met een minimum van €7.500, zie verder tabel 10.

$$C_{OM} = \% \cdot C_{construction} = \% \cdot \sum C_{well} + C_{terrain,piping} + C_{pump} + C_{inverter} + C_{valves} + C_{heat\ exchanger} + C_{technical\ room}$$

Tabel 61 Kostenfunctie onderhoudskosten aquifers

$C_{construction}$ [€]	% of subtotal investment
< 375.000	€7.500
375.000-500.000	2%
> 500.000	1.5%

Kosten grote warmtepomp

De kosten voor een grote warmtepomp zijn als volgt te berekenen, op basis van informatie van Frank Schipper (Aveco de Bondt, 28-08-2017) en RVO.

$$C_{heat\ pump} = 1400 \cdot P_{max,heat\ pump}$$

Waarbij $P_{max,heat\ pump}$ het maximale vermogen van de warmtepomp (in kW) is. De OM kosten zijn 1% van de investering voor de warmtepomp [28], en de levensduur is 20 jaar [29].

Kosten warmtenet

De kosten van het warmtenet hangen af van de diameter van de buis en de lengte van het netwerk. De diameter van de buis is weer afhankelijk van het vermogen wat door de buis heen stroomt en van de verblijftijd in de leiding. De diameter van de buis wordt momenteel ingesteld als parameter, verder worden getallen voor het buitengebied van in de stad gebruikt [29].

$$C_{heat\ network} = (214 + 1725 \cdot d_{pipe}) \cdot L_{heat\ network}$$

De diameter van de pijp in mm bepaald in dit geval de kosten van het netwerk per meter en wordt dan vermenigvuldigt met de lengte van het netwerk in meters.

De levensduur van het warmtenet is 50 jaar [30] en de OM kosten van het hoofdwarmtenet zijn 1% [29].

De huidige input parameters voor de verschillende scenario's in het model zijn gegeven in tabel 11.

Tabel 62 Input parameters model voor kostenberekening

Parameter	900 woningen - ruimteverwarming + tapwater
L_b (m)	65
$L_{heat\ network}$ (m)	3.000
d_{pipe} (mm)	100
$L_{terrain,piping}$	100
$f_{max,soil}$	75
$P_{max,heat\ pump}$ (kW electricity)	2.500

e. Uitkomsten model

Hieronder staan de uitkomsten van het model het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit', opgesplitst in de verschillende onderdelen van het warmtesysteem.

Parameter	900 woningen - ruimteverwarming + tapwater
CAPEX aquifers	1,5 M€
OPEX aquifers	21.000 €/y
CAPEX heatpump	3,5 M€
OPEX heatpump	35.000 €/y
CAPEX district heating network	2,3 M€
OPEX district heating network	23.000 €/y

f. Referentie - woning met gasaansluiting

De jaarlijkse kosten voor een woning met een gasaansluiting zijn berekend voor een nieuwbouw woning en een gerenoveerde woning met de kosten zoals beschreven in Tabel 63. Voor een nieuwbouwwoning geldt dat de kosten voor een gasaansluiting worden meegenomen, bij renovatie gaat het alleen om een nieuwe cv-ketel. Alle prijzen zijn zonder btw.

TABEL 63 KOSTEN WONING MET GASAANSLUITING

	Kosten (ex. btw)	Levensduur	Opmerking/bron
CV-ketel	1.659€	15j	Gemiddelde prijs milieucentraal [76]
Nieuwe gasaansluiting	1.277€	40j	Stedin tarief G4/G6, <10 m ³ gas/uur [77]
Onderhoud cv ketel	81,4€/jr		Gemiddelde uit peiling consumentenbond [78]
Vastrecht	146€/jr		Gemiddeld vastrecht, milieucentraal [79]
Gasprijs	0,52€/m ³		Gasprijs zonder btw, gemiddeld, milieucentraal [79]
Verbrandingswaarde	31,65 GJ/m ³		Onderwaarde (LHV) voor de verbranding van aardgas [80]

Bijlage III

Waterstofsysteem Power-to-X

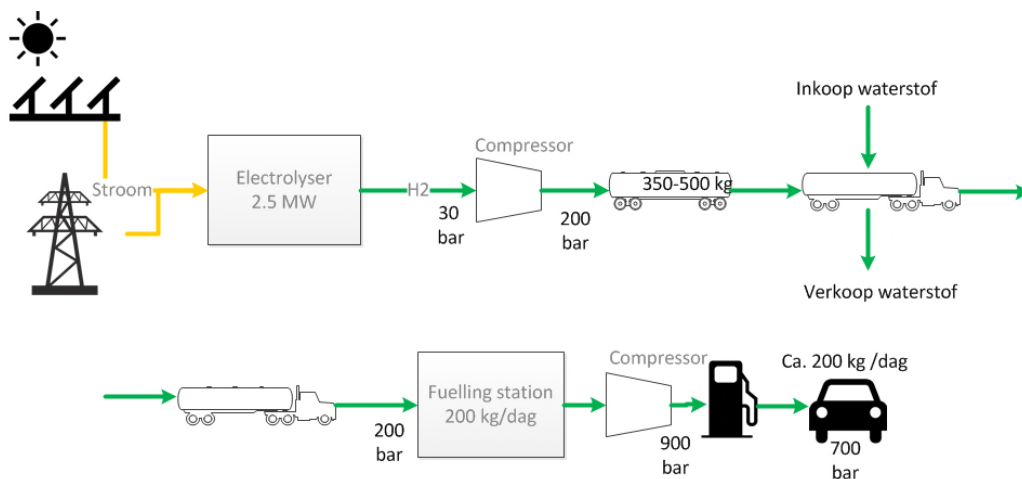
a. Waterstofvraagpatroon

Het model bevat een waterstof vraagpatroon per uur, met verschillen tussen week en weekenddagen. Dit vraagpatroon is nu gebaseerd op een tankstation van 200 kg/dag op weekdagen, en 126 kg/dag op een weekenddag. Er wordt getankt tussen 5 uur 's ochtends en 9 uur 's avonds, maar niet constant. De grootste piek in de vraag zit tussen 3 en 6 uur 's avonds. Deze data zijn confidentieel, daarom wordt niet het volledige vraagpatroon van de eerste vijf jaar van het tankpatroon hier weergegeven. In het model wordt momenteel alleen jaar 5 van het tankpatroon gebruikt, dat is het jaar waarin het tankstation zijn volledige capaciteit heeft bereikt. Voor hoeveel auto's staat die 200 kg/dag dan? De inschatting is dat in het begin voornamelijk auto's die veel kilometers maken, zoals bedrijfsauto's en taxibedrijven, gebruik zullen maken van het tankstation. Op die manier kunnen ongeveer 250 auto's worden bedient. Als de vergelijking wordt getrokken met een gemiddelde Nederlandse auto die 13.000 kilometer per jaar rijdt [10], dan zouden ca. 500-600 auto's gebruik kunnen maken van het tankstation.

b. Waterstofsysteem

Het waterstofsysteem bestaat op het terrein zelf uit een elektrolyser, inclusief een purification-unit. Daarnaast staat er een medium compressor (van 30 bar naar 200 bar) en opslagtanks (tube trailers) met een inhoud van 350-500 kg. Wanneer de tanks vol zijn kunnen ze worden vervoerd naar het tankstation, of verkocht. Voor vervoer naar het tankstation zijn trailertractors nodig, en op het tankstation zelf wordt het 'direct-fuelling' principe toegepast waarbij direct uit de tubetrailer via een hoge druk compressor (van 200 naar 900 bar) een voertuig kan worden getankt (zie Figuur 61).

Er zijn twee mogelijke systeemconfiguraties. Bij de eerste mogelijkheid zijn de zonneweide en het tankstation direct aan elkaar gekoppeld en is het dus nodig om altijd voldoende waterstof te leveren voor het tankstation, in dit geval wordt er stroom uit het net gehaald op momenten dat de waterstofopslag in de tank te laag is. De andere optie is om alleen waterstof uit zonnestroom te produceren, en om (groene) waterstof in te kopen op momenten dat er niet genoeg geproduceerd wordt door de zonnepark, bijvoorbeeld in de winter. Daarnaast is het ook mogelijk om een overschot aan waterstof in de zomermaanden te verkopen. Er zullen hierover goede afspraken moeten worden gemaakt met bedrijven als Air Liquide, dit zal gebeuren in een volgende fase van het project.



FIGUUR 61 WATERSTOFSTYSTEEM

Modeltechnisch is het waterstofsysteem vrij eenvoudig. Een regelmechanisme bepaald hoeveel stroom beschikbaar is voor waterstofproductie (dit wordt in *Integratiefile – Power-to-X* beschreven), afhankelijk van de prioritering van het systeem en de grootte van de warmtepomp en de elektrolyser. Vervolgens wordt er uitgerekend hoeveel waterstof er kan worden geproduceerd mbv deze formule:

$$f_{H_2,pv}[n] = \frac{E_{H_2,pv}[n]}{E_{electrolyzer} + E_{purification} + E_{compressor,medium}}$$

Met $f_{H_2,pv}$ het aantal kilogrammen geproduceerde waterstof in dit uur, $E_{H_2,pv}$ de hoeveelheid aan elektriciteit dat in dit uur naar de elektrolyser gaat (in kWh), $E_{electrolyzer}$ de energiebehoefte van de elektrolyser (in kWh/kg H_2), $E_{purification}$ de energiebehoefte voor het zuiveren van de waterstof (in kWh/kg H_2) en $E_{compressor}$ de energie die nodig is voor het verhogen van de druk van de waterstof van 30 naar 200 bar (in kWh/kg H_2).

Als er stroom beschikbaar is, moet de geproduceerde waterstof ook direct kunnen worden opgeslagen. Dit is de reden dat niet alleen de elektrolyser, maar ook de zuivering van het gas en de compressie onderdeel zijn van de vergelijking.

In het geval van systeemconfiguratie 1, zijn de productie en de vraag aan elkaar gekoppeld via de opslagtank. Er geldt dan een minimumniveau voor opslag van waterstof, ook kan er een maximum worden ingesteld, mocht er maar één tank gevuld kunnen worden bijvoorbeeld.

Voor vervoer naar het tankstation zelf wordt momenteel alleen rekening gehouden met de kosten, niet met het energieverbruik. Het energiegebruik op het tankstation zelf is nog wel relevant, en bestaat uit energiekosten voor de hoge druk compressor en het koelen van de waterstof tijdens het tanken. Deze energiebehoefte wordt in het model meegenomen bij het onderdeel tanken.

In onderstaande tabel worden de inputparameters voor het model samengevat.

TABEL 64 INPUTPARAMETERS WATERSTOFSYTEEM

Parameter	Eenheid	Cijfer	Bron
$E_{electrolyzer}$	kWh/kg H2	53,4	[26]
$E_{purification}$	kWh/kg H2	1,3	[26]
$E_{compressor,medium}$	kWh/kg H2	1,5	[26]
$E_{compressor,high}$	kWh/kg H2	1,8	[26]
$E_{cooling}$	kWh/kg H2	0,2	[26]
Hydrogen purity	%	99,999%	
Nm_{H_2}	Nm ³ /kg	11,1	-
$Nm_{H_2-H_2O}$	Nm ³ /L	1,24	-
$P_{max,elektrolyzer}$	kW	2.500	Instelling
$V_{min,tank}$ (alleen optie 1)	kg	100	Instelling
$V_{max,tank}$ (alleen optie 1)	kg	500	Instelling

C. Kostenfuncties waterstofsysteem

Voor de kostenfuncties in het waterstofsysteem zijn nu verschillende gegevens in het model ingevoerd (zie Tabel 65). Er zijn kostenfuncties gebruikt zoals gegeven door Oldenbroek, Verhoef, & van Wijk (2017). Daarnaast zijn er confidentiële kosten verkregen van PitPoint, die alleen gelden voor een tankstation met een capaciteit van 200 kg/dag en dus niet direct schaalbaar zijn. Kosten voor de elektrolyser komen ook van PitPoint, net als kosten voor vervoer van waterstof. Hieronder worden de huidige kosten en kostenfuncties weergegeven zoals momenteel gebruikt in het model. Alle kostenfuncties zijn lineair, en om die reden worden ze niet uitgeschreven, maar in tabelvorm weergegeven.

TABEL 65 ECONOMISCHE GEGEVENS WATERSTOFSYSTEEM

Component	Investeringskosten	OM kosten	Levensduur (jaar)	Bron
PEM Elektrolyser	1.100 €/kW	2%/jaar	20	Offerte Hydrogenics 2,5 MW elektrolyser (december 2017) levensduur [26]
Medium compressor (bij zonnepark)	8.170 €/kg H ₂ /hr	4%/jaar	10	[26]
Tankstation totaal	1.300.000 €	70.000 €/jaar (4%/jaar)	15	Via PitPoint
Vervoer naar tankstation	- (we kopen zelf geen tube trailer)	18.000€ + 0,35 €/kg H ₂ vervoerd	-	Via PitPoint

Bijlage IV

Watersysteem Power-to-X

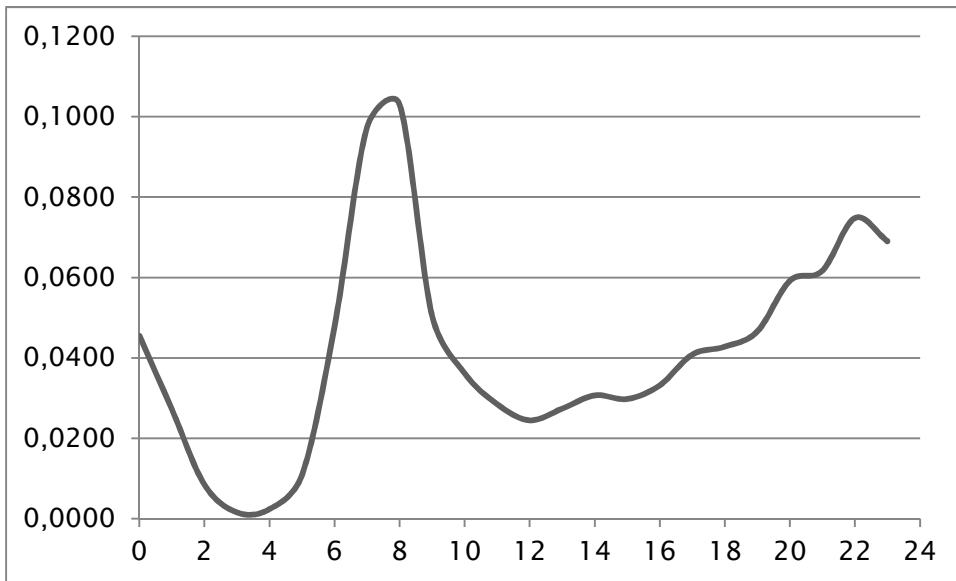
a. Vraagpatroon demiwater

Er is natuurlijk een vraag naar demiwater voor de productie van waterstof. Echter, dit is ca. 1.000 m³ op een totaal van ruim 30.000m³ geproduceerd demiwater per jaar door het systeem. Om die reden is de verkoop van demiwater aan huishoudens meegenomen. Het demiwaterpatroon bestaat uit de watervraag voor huishoudens voor de wc, wasmachine en vaatwasser. De hoeveelheid water die persoon per dag gebruikt wordt voor verschillende doeleinden is onderzocht door van Thiel (2014) [81] voor VEWIN in 2013 [82] en is weergegeven in Tabel 66. Voor het model is uitgegaan van 2,2 personen per huishouden.

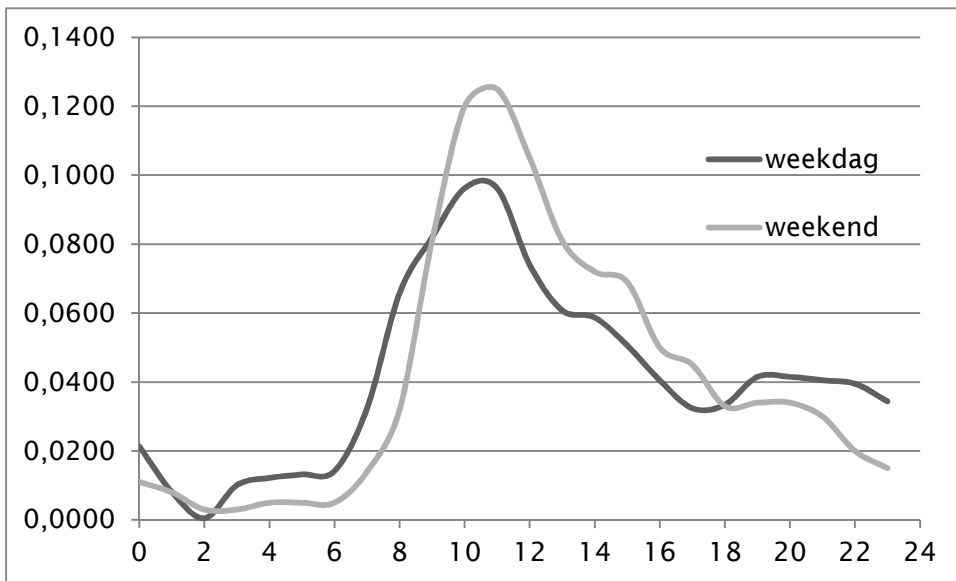
TABEL 66 WATERVRAAG PER PERSOON PER APPLICATIE

Applicatie	Watervraag (liter per persoon per dag)
Wasmachine	14,3
Vaatwasser	2,0
Wc	33,8

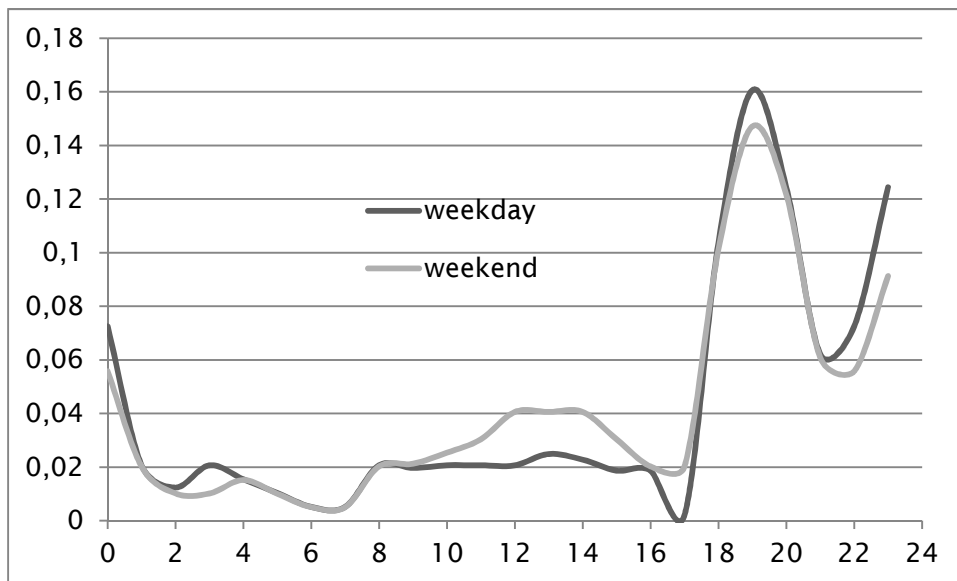
Het wc patroon komt van SimDeum waar een simulatie gemaakt is voor 900 huishoudens met 2,3 inwoners per huishouden (dit is de standaard die door SimDeum gebruikt wordt). Hier komt een patroon uit per uur met een duidelijke ochtend en avond piek. De m³/h die door SimDeum worden geleverd zijn omgezet in een fractie per uur, waarbij de som van de uren op 1 uitkomt (zie Figuur 62). Hierbij is geen verschil gemaakt tussen weekdays en het weekend. Door deze fracties te vermenigvuldigen met het aantal liters dat wordt berekend op basis van het aantal huishoudens, kan de watervraag voor de wc per dag berekend worden. Eenzelfde patroon is ontwikkeld voor de wasmachine en de vaatwasser, waarbij er wel een verschil is gemaakt tussen een weekday en het weekend (zie Figuur 63). Dit patroon komt ook van SimDeum [83].



FIGUUR 62 PATROON VOOR WATERGEBRUIK VOOR WC



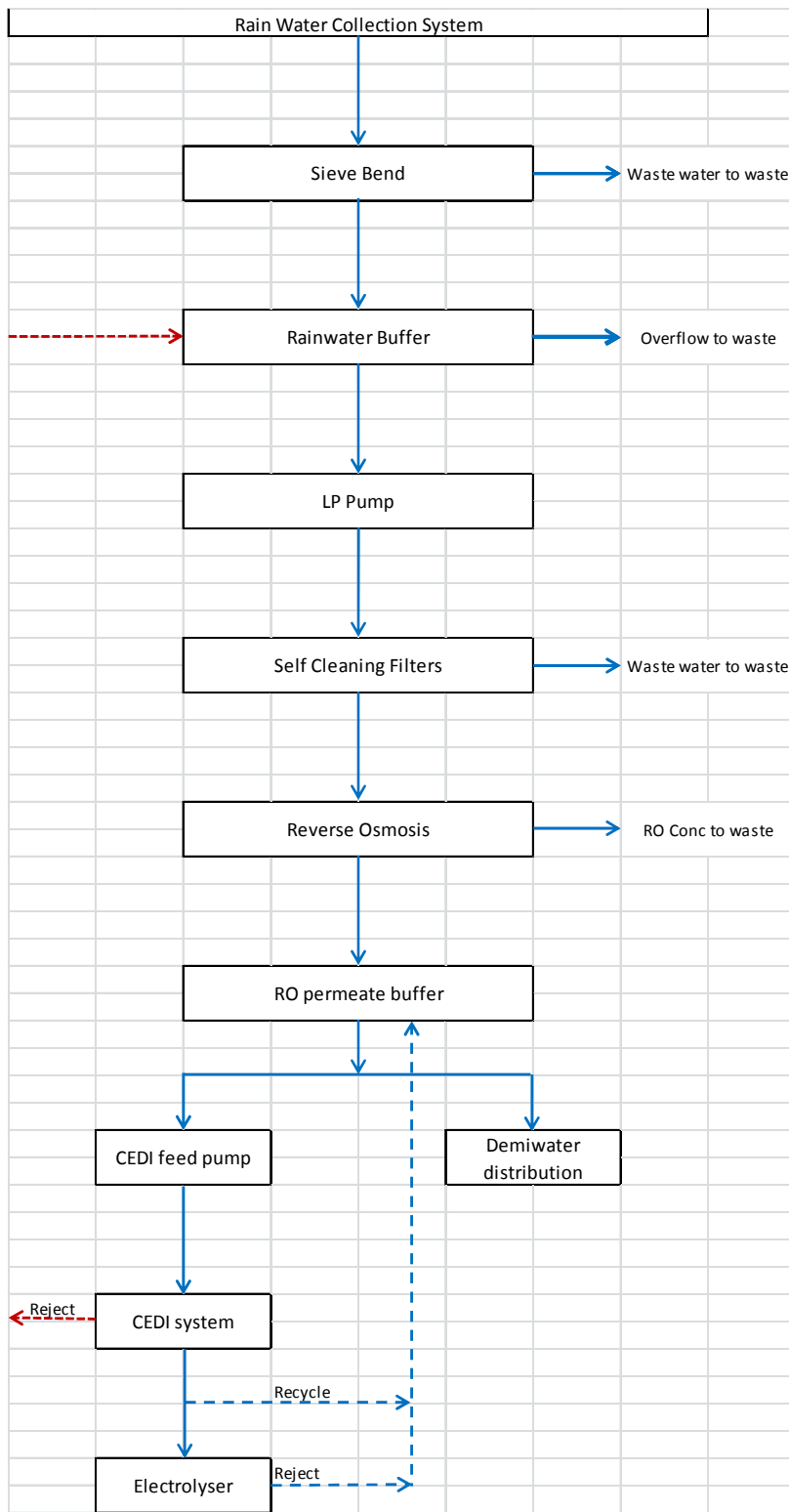
FIGUUR 63 PATROON VOOR WATERGEBRUIK VOOR WASMACHINES DOORDEWEEKS (DONKER GRIJS) EN IN HET WEEKEND (LICHTGRIJS)



FIGUUR 64 PATROON VOOR WATERGEBRUIK VOOR VAATWASSER DOORDEWEEKS (DONKER GRIJS) EN IN HET WEEKEND (LICHT GRIJS).

b. Het watersysteem

Het watersysteem van Power-to-X bestaat uit de opvang van regenwater, waarna het regenwater wordt behandeld tot een goede kwaliteit zodat het in de electrolyzer kan worden gebruikt. Een overzicht van de verschillende stappen in de waterbehandeling is weergegeven in Figuur 65.



FIGUUR 65 OVERZICHT VAN HET WATERSYSTEEM VAN POWER-TO-X

Het hoofdstuk Zon, Wind en Regen in Power-to-X beschrijft al de hoe de berekening wordt gemaakt van de opvang van het regenwater door gebruik te maken van de KNMI data en de zonnepanelen. Het opgevangen regenwater passeert een zeef waarna het in een regenwaterbuffer terecht komt. Vooralnog wordt er uitgegaan dat al het opgevangen en

gezeefde regenwater in de grond kan worden opgeslagen. Hierdoor is er geen belemmering in ruimte. Als er een vraag is naar demiwater, dan wordt het water opgepompt en door de self cleaning filters en de RO verder gezuiverd. Na de RO zal het water in een buffer tank worden opgeslagen en zal een deel gebruikt worden voor demiwater distributie en het andere deel verder worden behandeld in een CEDI systeem zodat het gebruikt kan worden door de electrolyzer. Data zijn verkregen via Hans Huiting en Emile Cornelissen (KWR, 21-02-2017).

Waterbehandelingssysteem – efficiëntie van de systemen

De zeef, SCF, RO en CEDI hebben een recovery waar rekening mee gehouden moet worden, omdat de waterstroom wordt verkleind door een afvalwaterstroom. Deze recoveries zijn vermeld in onderstaande tabel. Door de recovery te vermenigvuldigen met de ingaande stroom, kan de uitgaande stroom berekend worden.

TABEL 67 OVERZICHT VAN RECOVERIES VAN WATERSYSTEEM.

y_sieve	98	%	Recovery van zeef
y_SCF	98	%	Recovery van self cleaning filters
y_RO	90	%	Recovery van Reverse Osmosis
y_CEDI	95	%	Recovery van CEDI systeem

De grootte van de RO buffertank is ingesteld op 150 m³. De stroom naar de CEDI kan afhangen van het tankpatroon, maar ook van het aanbod van zonne-energie om te gebruiken voor de electrolyzer.

Het watersysteem verbruikt voornamelijk elektriciteit voor pompen. De verschillen in druk bij de pompen en de efficiëntie bepalen het elektriciteitsverbruik afhankelijk van de stroom die verpompt moet worden.

$$P = \frac{Q * \Delta p}{3600 * \eta}$$

<i>P</i>	Power in kWh
<i>Q</i>	Stroom in m ³ /h
Δp	verschil in druk in kPa
η	efficiëntie van pomp in %

c. Formules en input data voor waterbehandeling en kosten

Op de zonnepanelen van het Power-to-X-systeem wordt regenwater opgevangen met behulp van opvanggootjes. Deze gootjes verzamelen het regenwater en brengen het onder in een bovengrondse tank, of onder de grond. Het opslagmechanisme kan zelf worden ingesteld en hangt af van het feit of er alleen water wordt opgevangen voor waterstofproductie, of meer omdat er een vraag is naar demiwater in bijvoorbeeld huishoudens. Als er geen bron genoemd staat zijn de kosten verkregen via Hans Huiting (26-09-2017).

Wateropslag

Voor de opslag van water zijn twee opties denkbaar, afhankelijk van de vraag naar demiwater. Als deze vraag groot is, dan wordt ervoor gekozen om een ondergrondse waterberging aan te leggen.

Wanneer er alleen water wordt opgevangen voor het produceren van waterstof, zal er een bovengrondse tank komen te staan.

De kosten voor een ondergrondse waterberging zijn

$$C_{\text{underground storage}} = 70.000 + 25 L_{\text{pipe,water}}$$

Met $C_{\text{underground storage}}$ de kosten voor ondergrondse opslag in €, en $L_{\text{pipe,water}}$ de lengte van de pijp waar het water mee de ondergrond in gaat (in m) [84].

De operationele kosten worden ingeschat op 0,33% per jaar, en de levensduur op 50 jaar.

Indien het water in een tank wordt opgeslagen gebeurt dit in een PE (polyethyleen) tank, met de volgende kostenfunctie:

$$C_{\text{tank storage}} = \frac{V_{\text{water}}}{250} \cdot (2.500 + 500V_{\text{water}})$$

Waarin $C_{\text{tank storage}}$ de kosten voor opslag in € zijn, en V het maximale opslagvolume van de tank. De term $\frac{V_{\text{water}}}{250}$ wordt altijd naar boven afgerond, dus bij 0,1 is er één tank nodig, bij 1,1 worden het twee tanks. De operationele kosten worden ingeschat op 0,33% per jaar, en de levensduur op 30 jaar.

Self cleaning filters

Nadat het water is opgevangen wordt er een self-cleaning filter toegepast die ervoor zorgt dat het water al enigszins wordt voorgezuiverd. Deze filters kunnen maximaal 100 m³ per uur aan, daarna is er nog een extra filter nodig.

$$C_{\text{self cleaning filter}} = \frac{V_{\text{rain,max}}}{100} \cdot (2.000 + 100V_{\text{rain,max}})$$

Waarin $C_{\text{self cleaning filter}}$ de kosten voor de filter in € zijn, en $V_{\text{rain,max}}$ de maximale hoeveelheid water die er valt in een uur. De term $\frac{V_{\text{rain,max}}}{100}$ wordt altijd naar boven afgerond, dus bij 0,1 is er één filter nodig, bij 1,1 worden het twee filters. De levensduur van de self-cleaning filter wordt ingeschat op 15 jaar, en de onderhoudskosten op 2,5% per jaar.

Pompen (lage druk)

Om het water in en uit de opslag te krijgen zijn pompen nodig, en ook tussen de RO installatie en een volgende opslagtank zal een pomp nodig zijn. De kosten van een pomp

hangen af van het hoogteverschil waarover de pomp moet werken (in bar), en de flow door de pomp.

$$C_{pump,water} = \frac{\text{€}}{150} \cdot A + B \cdot V_{water,pump}$$

$C_{pump,water}$ zijn de kosten voor de pomp in €, $V_{water,pump}$ de flow door de pomp in m³/uur. En A en B zijn afhankelijk van het hoogteverschil (ΔH) in bar op de volgende manier:

TABEL 68 KOSTENFUNCTIE POMPEN

$\Delta H(\text{bar})$	A	B
0 - 1,5	€1.000	60 €/m ³
1,5 - 3,0	€1.200	80 €/m ³
3,0 - 5,0	€1.350	100 €/m ³
5,0 - 10	€2.000	190 €/m ³

De levensduur van de pompen wordt ingeschat op 15 jaar, en de onderhoudskosten op 2,5% per jaar.

Omgekeerde osmose

De omgekeerde osmose installatie (RO) zorgt ervoor dat het water van bijna al het zout wordt ontdaan, zodat er water van demiwaterkwaliteit wordt geproduceerd. De kosten en efficiëntie van een RO installatie hangen grotendeels af van het membraan wat wordt gebruikt. Voor deze berekeningen is een membraan gekozen die 20 L/m²/uur kan produceren (Hans Huiting, 09-10-2017). De installatie kan tot 120 m³/uur aan water zuiveren, en daarbij hoort de volgende kostenfunctie:

$$C_{RO} = \frac{V_{RO}}{120} \cdot 15.000 + 8.000 \cdot V_{RO}$$

Met C_{RO} de kosten in € voor de RO installatie, V_{RO} de uitgaande stroom uit de RO installatie in m³/uur. Hierin zitten ook de kosten voor het membraan verwerkt, en de vervanging van het membraan tijdens de levensduur. De levensduur van de installatie is 15 jaar, en het membraan wordt iedere 5 jaar vervangen. De term $\frac{V_{RO}}{120}$ wordt net als bij de andere formules altijd naar boven afgerond. De jaarlijkse onderhoudskosten (OM) worden ingeschat op 2,5% van de investeringskosten.

Elektrodeionisatie

Een elektrodeionisatie (EDI) installatie zuivert het water nog verder op, zodat de kwaliteit hoog genoeg is om er waterstof mee te produceren. Slechts een klein deel van het opgevangen regenwater dat de RO gepasseerd is komt dus in de EDI terecht, deze installatie hoeft dus minder groot te zijn. De functie is gebaseerd op informatie van de Pure Water Group (26-09-2017).

$$C_{EDI} = \frac{V_{EDI}}{18} \cdot 30.000 + 1.000 \cdot V_{EDI}$$

De kosten C_{EDI} worden gegeven in €, V_{EDI} is de ingaande stroom in de elektrodeionisatie installatie in m³/uur. De term $\frac{V_{EDI}}{18}$ wordt weer naar boven afgerond. De levensduur van het EDI systeem is 7,5 jaar, OM kosten per jaar staan op 2,5% van de investeringskosten.

Waterdistributienetwerk

Bij de aanleg van het demiwater distributienetwerk is er uit gegaan van een groene weide situatie waarbij het netwerk tegelijkertijd met het waterdistributienetwerk wordt gelegd. De investeringskosten bestaan uit het leggen van de leiding en het aansluiten van de huizen.

Voor de aanleg van een distributieleiding is aangenomen dat het €0.50 per mm per meter kost. Dit betekent dat bij de gemiddelde diameter van 100 mm, dit €50,- per meter is. Er wordt uitgegaan van 11 m lengte leiding per huishouden voor de aansluiting. Daarnaast kost een aansluiting bij een woning €700,- (interne informatie KWR, 24-08-2017).

Doordat het tweede netwerk tegelijkertijd wordt gelegd, worden de kosten verlaagd omdat de manuren lager zijn (geen verdubbeling van graafwerk). Hierdoor zullen de kosten van het tweede netwerk geen verdubbeling zijn, maar ongeveer 20% extra van de kosten van een netwerk.

De onderhoudskosten zijn geschat op 1% van de investeringskosten van het distributienetwerk en de levensduur van de leidingen is 30 jaar.

Totale kosten

Om de totale kosten van het installeren van het hele systeem mee te nemen wordt gewerkt met een cost factor. Deze kostfactor is 1.35, en dit betekent dat alle kosten bij elkaar worden opgeteld en vervolgens met deze factor worden vermenigvuldigd.

$$C_{water,total} = 1,35 \cdot (C_{self\ cleaning\ filter} + C_{underground\ storage} + C_{tank\ storage} + C_{pump,water} + C_{RO} + C_{EDI})$$

Bijlage V

Keuzes warmte in scenario ‘Wijk, zon, warmte prioriteit’

a. Scenario's

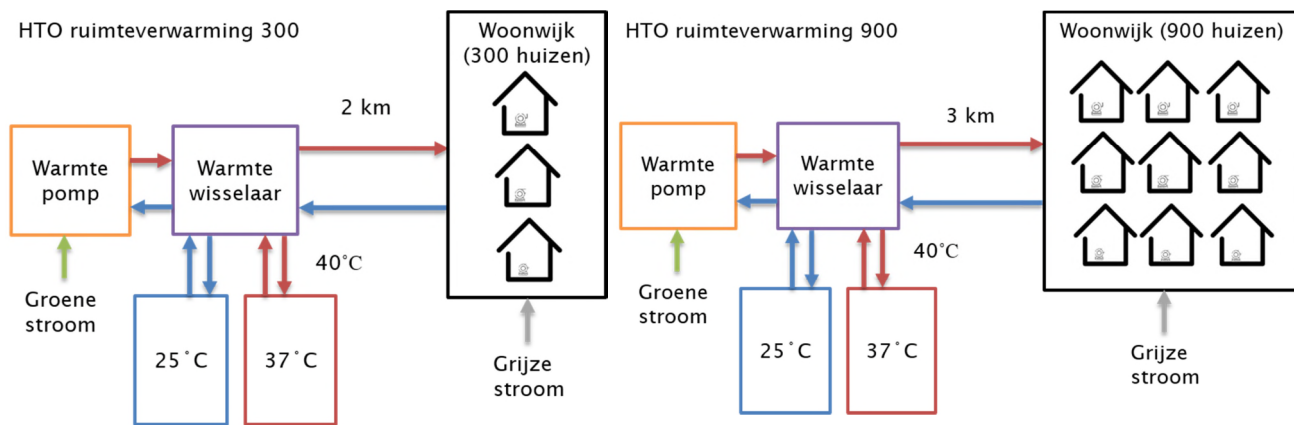
Voor het analyseren van het warmtesysteem worden verschillende scenario's gebruikt. Door naar verschillende temperaturen te kijken krijgen we een beter idee van het warmteverlies in de bodem en het rendement van de warmteopslag. Daarnaast proberen we verschillende systeemgroottes uit, om te zien wanneer het systeem rendabel wordt. De verschillende scenario's zijn in Figuur 66 en Figuur 67 weergegeven. Alle vier de figuren laten een collectief HTO systeem zien, die met twee bronnen huizen voorziet van warm water. Voor Figuur 66 gaat dit alleen om ruimteverwarming, en wordt water van rond de 35 °C in de woningen afgeleverd. De warmtepomp wordt in dit geval ingesteld op het produceren van water op 40 °C. Met verlies wordt dit water rond de 38 °C onttrokken, de koude bron van het systeem is ca. 25 °C. Er gaat een warmtenet naar de woningen, en in elke woning bevindt zich een kleine (booster-)warmtepomp die zorgt voor de productie van warm tapwater. In Figuur 67 gaat het om de levering van water aan woningen van 50-55 °C voor zowel warm tapwater en ruimteverwarming. Elk huis heeft een dompelaarsysteem waarmee een tank met warm tapwater regelmatig boven de 60 °C wordt gebracht ter preventie van legionella.

Voor de 4 scenario's van warmtelevering die worden overwogen zijn de eisen aan en de werking van het HTO systeem geëvalueerd. De scenario's vereisen verschillende opslag volumes, pompdebieten en temperaturen (T_{in} =opslag temperatuur, T_t =minimale temperatuur);

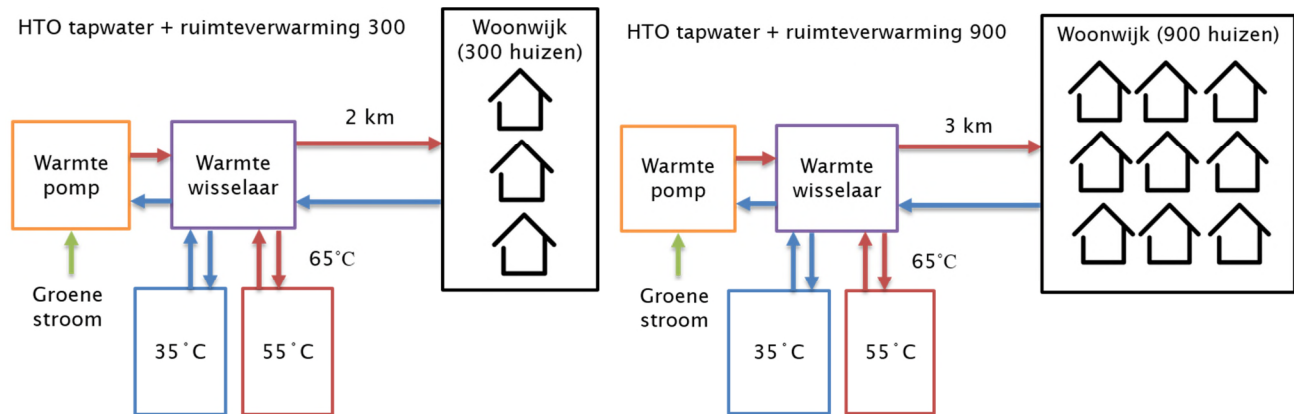
- 300 woningen alleen ruimte verwarming → $V = 100.000 \text{ m}^3$, $T_{in} = 40^\circ\text{C}$, $T_t=37^\circ\text{C}^\#$
- 900 woningen alleen ruimte verwarming → $V = 300.000\text{m}^3$, $T_{in} = 40^\circ\text{C}$, $T_t=37^\circ\text{C}^\#$
- 300 woningen ruimte verwarming en tapwater → $V = 50.000 \text{ m}^3$, $T_{in} = 65^\circ\text{C}$, $T_t=55^\circ\text{C}^\#\#$
- 900 woningen ruimte verwarming en tapwater → $V = 150.000 \text{ m}^3$, $T_{in} = 65^\circ\text{C}$, $T_t=55^\circ\text{C}^\#\#$

[#] Bij 40°C is het verlies in het warmtenetwerk ca 2°C, bij een cut-off-temperatuur van 35°C moet de bron dus minimaal 37°C leveren.

^{\#\#} Bij 65°C is het verlies in het warmtenetwerk ca 5°C, bij een cut-off-temperatuur van 50°C moet de bron dus minimaal 55°C leveren.



FIGUUR 66 SCENARIO'S VOOR 300 (LINKS) EN 900 (RECHTS) WONINGEN VOOR RUIMTEVERWARMING, MET 40°C INFILTRATIE TEMPERATUUR.



FIGUUR 67 SCENARIO'S VOOR 300 (LINKS) EN 900 (RECHTS) WONINGEN VOOR RUIMTEVERWARMING EN WARM TAPWATER, MET 65°C INFILTRATIE TEMPERATUUR.

Deze temperaturen zijn bepaald door analyses met een geohydrologisch model waarmee HTO systemen kunnen worden gemodelleerd.

b. Simulatie en optimalisatie

Grondwater simulatie programma MODFLOW wordt gebruikt om de grondwater en transport vergelijkingen op te lossen. Een gedetailleerde beschrijving van het toegepaste model is weergegeven in Bijlage Ve.

De dichtheid van grondwater is afhankelijk van de temperatuur. Omdat het geïnfiltreerde water warmer is dan de omgeving heeft het een lagere dichtheid en gaat het opdrijven. Dit kan op 2 manieren worden tegen gegaan; 1) de dichtheidsverandering te compenseren door zout toe te voegen [85] of 2) het water onderin de aquifer te infiltreren en bovenin te onttrekken met een zogenaamde Multi Partially Penetrating Well (MPPW) [45]. Omdat WVP1 zoet grondwater bevat, is het toevoegen van zout beleidsmatig niet toegestaan, waardoor de MPPW overblijft als techniek om de verliezen te beperken.

Hiertoe is het filter van de bron opgedeeld in 4 secties met temperatuur monitoringspunten ter plaatse van en tussen de filters. Het warme water wordt in de diepere filters geïnfiltreerd, en afhankelijk van een temperatuur setpoint op de temperatuur monitoringspunten verschuift de onttrekking met het opdrijvende warme water naar de bovenste filter delen.

Voor het beoordelen van de werking van de HTO wordt onderscheid gemaakt tussen hoeveel warmte er op de gewenste temperatuur uitkomt en hoeveel er totaal uitkomt, beide ten opzichte van hoeveel er is ingestopt. Tevens wordt bijgehouden wat de temperatuur in WVP 2 wordt en in de deklaag, ter indicatie van de temperatuureffecten, die ook moeten worden onderzocht.

c. Resultaten

Uit de eerste simulaties van het gecombineerd P2X model is voor één jaar met een tijdstap van één uur gerekend met de warmte vraag van de 4 verschillende scenario's voor de woningen (zie Bijlage Va) en hoeveel elektriciteit er naar de warmtepomp gaat voor warmte productie in de zomer. Deze randvoorwaarden zijn 5 jaar achtereen op het model toegepast met verschillende manieren om de HTO te bedienen. De resultaten zijn opgenomen in onderstaande tabel en figuren. Hieruit blijkt dat de onttrekkingstemperatuur duidelijk lager is bij toepassing van het systeem op kleinere schaal. Er treedt dan meer verlies op in de bodem. Ook valt op dat de gemiddelde onttrekkingstemperatuur in alle gevallen niet hoog genoeg is om aan de woningen te kunnen leveren. Als de temperatuur in de bron onder de grenswaarde van 55°C komt, dan wordt het water niet meer gebruikt om direct via de warmtewisselaar met het warmtenet uit te wisselen, maar gaat dit via de warmtepomp. Dit is ook beschreven in bijlage Bijlage IIc. Hiervoor is natuurlijk ook energie nodig, maar de COP van de warmtepomp is in dit geval heel hoog (6-7). Dit energiegebruik moet zeker niet worden onderschat, en zou in het geval van 65C-900W bijvoorbeeld op 300MWh aan extra energiegebruik kunnen uitkomen. Echter, de onzekerheid hiervan is op dit moment nog te groot om goede inschattingen te kunnen maken. Het precieze energiegebruik en de kosten hiervan zijn daarom momenteel nog niet in het model meegenomen, dit zal worden gedaan als het bodemmodel en het Power-to-X-model aan elkaar worden gekoppeld.

TABEL 69 RESULTATEN SIMULATIES NA 5 JAAR SIMULATIE.

	R=1.1 40C-300W	R=1.25 40C-900W	R=1.1 65C-300W	R=1.25 65C-900W
Gemiddelde onttrekkingstemperatuur	31,7	34,3	47,4	50,23
Infiltratie vs onttrekkingsratio	0,797	0,86	0,73	0,773

Er is ook getest wat een verschillende onttrekking en infiltratie punt doen met de gemiddelde onttrekkingstemperatuur. Hieruit bleek dat er niet tot nauwelijks effect is wanneer op een ander punt wordt onttrokken dan geïnfiltreerd. Dit betekent dat in deze bodem beperkt dichtheidsstroming optreedt, en dat een Multi Partially Penetrating Well (MPPW) systeem waarschijnlijk geen voordeel op zou leveren. Dit komt omdat de energieopslag in een relatief dunne aquifer wordt toegepast.

TABEL 70 RESULTATEN MET VERSCHILLENDE UITVOERINGEN VAN HET MPPW SYSTEEM

	R=1 65C-900W	R=1, no densflow 65C-900W	MPPW R=1 65C-900W	R=1.2 65C-900W
Gemiddelde onttrekkingstemperatuur	46,9	47,2	46,9	49,2
Infiltratie vs onttrekkingsratio	0,72	0,73	0,72	0,76

d. Watervoerende pakket en uur debiet

Voorkeur voor toepassing van de HTO is in het eerste watervoerende pakket (WVP 1), overleg over toepasbaarheid/vergunbaarheid met provincie en Waternet loopt. Vooralsnog wordt in voorliggende verkenning uitgegaan van het eerste watervoerende pakket (WVP 1). WVP1 is ca 55 m en bestaat uit zand met een doorlatendheid van ca 35 m/dag en is onderbroken door klei en veen lagen. Op basis van gedetailleerde boorbeschrijvingen op de locatie is de zandlaag tussen 25 en 45 m als meest geschikt aangemerkt en als zodanig in de simulaties gebruikt. Deze dikte is er zeker beschikbaar (worst case), waarschijnlijk is ter plaatse wel een dikkere laag aanwezig. 20m is een relatief dunne laag, het is voor de efficiëntie beter om een iets dikkere laag te hebben. Bij het maken van de boring moet daar rekening mee worden gehouden, als een dikkere aaneengesloten laag aanwezig is moet die gehele dikte worden toegepast

Op basis van de ontwerpnormen die gelden voor bodemenergiebronnen[86] is vastgesteld dat een bron op de projectlocatie in WVP1 maximaal 75 m³/uur kan onttrekken/infiltreren. De volumes grondwater die per dag moeten worden verpompt zijn afgeleid van de energiehoeveelheden en vastgestelde temperatuurverschillen, zie Tabel 71. Het maximale debiet dat nodig is om warmte uit de warmtepomp op te slaan verschilt bij scenario en wordt vooral bepaald door de warmte productie in de zomer; het maximale vermogen dat de warmte pomp produceert moet direct in de bronnen kunnen worden geïnfilteerd. In Tabel 71 is voor de verschillende scenario's inzichtelijk gemaakt wat de benodigde debieten zijn. Dit betekent dat er in het geval van warmte productie op 65°C ca. 2-3 bronnen nodig zijn, en voor warmteproductie op 40°C ca. 8-10.

TABEL 71 DEBIETEN GRONDWATER PER UUR VOOR DE VERSCHILLENDE SCENARIO'S

opslag T	# woningen	Warmte [MW]		Grondwater [m3/u]	
		productie	afname	infiltreren	onttrekken
40C	300	16	0.65	1,339	66
	900		1.91	1,328	193
65C	300	11	0.64	277	20
	900		1.84	269	57

Het opslag volume, dat voor elk scenario relatief klein is, verdelen over 8-10 bronnen is praktisch niet te doen, dat zorgt voor een ongunstige verdeling van de warmte in de bodem met grote verliezen tot gevolg. De inpasbaarheid van zoveel bronnen in het terrein is ook lastig en dat maakt het ook erg kostbaar. 2-3 bronnen zodanig positioneren dat ze 1 ondergrondse warmte buffer vormen is wel mogelijk, met beperkte additionele verliezen als gevolg van het verdelen van het kleine opslag volume over meerdere bronnen. Daarbij is het dan wel van belang dat het opslag volume zo groot mogelijk wordt.

Daarnaast is met de gegeven formules en input parameters $T_{out,end}$ berekend voor verschillende scenario's, zie Tabel 72. De genoemde temperaturen zijn de temperaturen bij de warmtewisselaar in de woning, na de warmtewisselaar is er nog wat warmte verloren gegaan, dit is nogmaals 1,5 graad (zie $T_{inbuffer}$). Dat betekent dat de gewenste minimale temperatuur van 50 °C in het scenario van 300 woningen voor tapwater en ruimteverwarming waarschijnlijk niet kan worden gehaald.

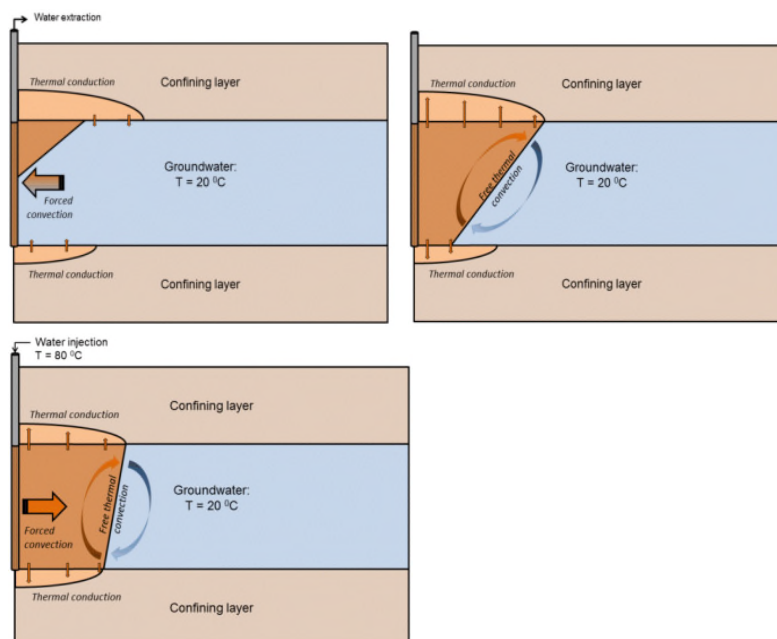
TABEL 72 RESULTATEN MODEL WARMTEVERLIES

Parameter	300 woningen – ruimteverwarming	900 woningen – ruimteverwarming	300 woningen – ruimteverwarming + tapwater	900 woningen – ruimteverwarming + tapwater
$T_{DHN,in}$ (°C)	35,5	35,5	53,5	53,5
T_{house} (°C)	35,1	35,3	51,4	52,6
$T_{in\ buffer}$ (°C)	33,6	33,7	49,9	51,1

Uit deze analyses blijkt dat een systeem met 300 woningen op hoge temperatuur leidt tot hoge warmteverliezen, zowel in de bodem als tijdens transport, waardoor het systeem technisch onhaalbaar wordt. Met 900 woningen is het opslagvolume nog steeds beperkt, maar zijn de verliezen klein genoeg om water op de juiste temperatuur in huis aan te leveren (zie Tabel 72, 5^e kolom). Het systeem op 40 °C uitvoeren in plaats van op 65 °C leidt tot een systeem met 8-10 bronnen in plaats van 2-3, financieel en praktisch gezien een ongunstige oplossing. Het meest (zowel technisch als economisch) haalbaar lijkt een scenario met warmteopslag op 65 °C en 900 woningen, deze situatie wordt in het vervolg van deze verkenning dan ook nader beschouwd.

e. HTO model opzet

Verliezen door vrije convectie van grondwaterstroming door dichtheidsverschillen tussen geïnfiltrerd en lokaal aanwezig grondwater treden gelijktijdig op met verliezen door conductie, diffusie en dispersie (Figuur 68).



FIGUUR 68 PRINCIPE VAN VRIJ EN GEFORCEERDE CONVECTIE STROMING IN GRONDWATER MET VERSCHILLEN IN DICHTHEID

Met SEAWAT [87] kunnen MODFLOW [88] en MT3DMS [89] dynamisch worden gekoppeld zodat de optredende processen van grondwaterstroming en stof en warmte transport [90], [91] simultaan worden meegenomen in de berekeningen. Dit is nodig om het effect van de dichtheidsstroming ook inzichtelijk te maken. Dichtheid en viscositeit hangen beide van de

temperatuur en concentratie af en moeten daarom voor iedere tijdstap worden bepaald inclusief de feedback op de grondwaterstroming. In dit onderzoek worden de basis processen inzichtelijk gemaakt hoe de warmte zich verspreidt en mixt, en hoe dat bijdraagt aan de warmte verliezen. Daarom wordt er een basismodel toegepast waarin geen andere versturende factoren zoals achtergrondstroming of naburige bodemenergiesystemen. Doordat er ook een verticale component in de grondwaterstroming wordt verwacht is er een hoge verticale discretisatie nodig. Een axiaal symmetrisch model is ontwikkeld omdat dat een geschikte aanpak is om dit soort simulaties efficiënt (zonder veel rekentijd) en nauwkeurig uit te voeren [85], [92]. Lopik et al. (2016) [85] heeft een gekalibreerd axiaal symmetrisch model gemaakt op basis van monitoring data van een HTO systeem. Omdat in dit geval gelijke eisen worden gesteld aan de nauwkeurigheid en processen die moeten worden meegenomen volgt dit model de model opzet van Lopik et al.

- De discretisatie in horizontale richting is gebaseerd op een toenemende cel grootte naar mate de afstand van de bron groter wordt. Door de radiale stroming rondom een bron neemt stroomsnelheid af met de afstand tot de bron. Om dat bodemenergie bronnen ca 0,5-1 m diameter hebben [92], [93] is de cel grootte t.p.v. de bron 0,5 m en neemt die stapsgewijs toe naar 500m aan de rand van het model. Met een tijdstap van 5 dagen wordt niet voldaan aan de courant conditie [94] in de directe nabijheid van de bron, maar wel vanaf enkele meters en verder, daar waar de processen waar we in geïnteresseerd zijn optreden.
- Model lagen. Om de verticale stroming voldoende nauwkeurig te kunnen berekenen is voor de lagen ook een hoge resolutie nodig; 0,5 m dik. De eigenschappen van de lagen volgt de bodemopbouw ter plaatse van WRK terrein.
- Er is geen grondwater aanvulling en aan de modelrand is er een constante stijghoogte, temperatuur en zoutconcentratie. De gesimuleerde bronnen bestaan uit meerdere lagen, de stroming in de lagen is in verhouding met de doorlatendheid van de verschillende modellagen. Randvoorwaarde maaiveld: Temperatuur op de rand van het model aan maaiveld volgt de buiten temperatuur volgens een sinusfunctie waarbij het minimum 5 graden in winter, en het maximum 20 graden in zomer is.
- Model grootte en simulatietijd. Om te voorkomen dat de modelrand de resultaten beïnvloedt zijn er enkele test run gedaan, waaruit bleek dat de resultaten niet meer significant veranderden bij een model grid groter dan 1500. De simulatie tijd is 5 jaar, wat relatief kort is t.a.v. levensduur van een gebouw/HTO systeem. Maar het is lang genoeg om een eerste indruk te krijgen van de de processen die optreden en te verwachten effecten en efficiëntie.
- Parameterwaarden. De parameterwaarden die worden toegekend in het model volgen literatuurwaarden uit Lopik et al. (2016) [85] en zijn gecorrigeerd voor axial symmetrische stroming volgens Langevin (2008) [92] en opgenomen in Tabel 73. De viscositeit en dichtheidsafhankelijkheid van temperatuur en zoutconcentratie volgt Langevin et al. (2008) [95]. De onttrekkingstemperatuur wordt voor elke bron berekend door SEAWAT.
- Solvers; MODFLOW gebruikt the Preconditioned Conjugate Gradient 2 package. MT3D gebruikt de standard eindige differentie methode met "upstream" of "central-in-space" weging in de advection package.

TABEL 73 SEAWAT SIMULATIE PARAMETERS

Parameter	Waarde	Package
Water warmte capaciteit	4,18 kJ/kg/°C	RCT
Solid warmte capaciteit*	710 kJ/kg °C	RCT
Water dichtheid	1.000 kg/m ³	RCT
Zand dichtheid*	2.640kg/m ³	RCT
Water thermische geleidbaarheid	0,58 W/m/°C	RCT
Solid thermische geleidbaarheid	3 W/m/°C	RCT
Thermische distributie coefficient*	1,7 · 10 ⁻⁴ m ³ /kg	RCT
Thermische retardatie*	2,21	RCT
Porositeit	0,3	BTN
Specifieke berging aquifer	6 · 10 ⁻⁴ /m	LPF
Longitudinale dispersie	0,5 m	DSP
Transversael dispersie	0,05 m	DSP
Verticale dispersie	0,005 m	DSP
Effectieve moleculaire diffusie warmte*	0,157 m ² /day	DSP
Effectieve moleculaire diffusie zout	8,6 · 10 ⁻⁶ m ² /day	DSP

* kwarts, # Berekend volgens [95], + Berekend volgens [90]

Terugwinefficiency

De thermische efficiëntie (η_{th}) van de bron is gedefinieerd als de ratio tussen onttrokken en geïnfiltreerde hoeveelheid energie: ($E_{in/out}$) per bron:

$$\eta_{th} = \frac{E_{uit}}{E_{in}} = \frac{\int \Delta T Q_{uit} dt}{\int \Delta T Q_{in} dt} = \frac{\Delta \bar{T}_{uit} V_{uit}}{\Delta \bar{T}_{in} V_{in}} \quad (1)$$

De efficiëntie hangt af van de infiltratie en onttrekkingstemperaturen ($\Delta T_{in/out}$) in combinatie met opgeslagen en teruggewonnen volume grondwater ($V_{in/out}$). Waarbij Q het brondebiet is [m³/u] gedurende tijdstap t en $\Delta \bar{T}$ het gewogen gemiddelde temperatuur verschil over de opslag cyclus. De infiltratie temperaturen zijn constant en als het opgeslagen volume ook volledig wordt onttrokken dan bepaald de onttrekkingstemperatuur dus de efficiëntie.

Bijlage VI

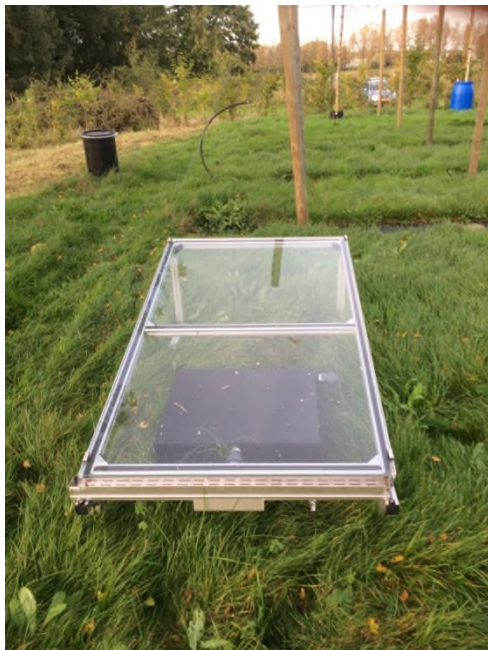
Waterkwaliteitsonderzoek

Naast technische en economische berekeningen aan het Power-to-X-concept, is ook experimenteel onderzoek gedaan naar de kwaliteit van opgevangen regenwater. Het regenwateropvangsysteem op de zonnepanelen is op kleine schaal getest, om te onderzoeken of het ontworpen zuiveringssysteem afdoende gaat zijn. Ook het water uit de uitlaat van een waterstofauto is onder de loep genomen, om te zien in hoeverre de kwaliteit echt overeenkomt met demiwater.

Methoden

a. Regenwateropvang

Om te kunnen inschatten welke voorzuivering van het regenwater nodig is voordat dit de omgekeerde osmose installatie in gaat, zijn proeven gedaan met opgevangen regenwater op een glasplaat van 1 m x 1.6 m (zie Figuur 69 en Figuur 70). Een zonnepaneel heeft ook die afmetingen en een vergelijkbare glaslaag aan de bovenkant. De gekozen opstellingshoek voor de glasplaat is 8°, de ideale hoek voor een oost-west opstelling, zoals Waternet voornemens is voor het zonnepark. De zonnepanelen komen in een open veld te staan, met gras en hoge bomen aan twee kanten. Om deze situatie zo goed mogelijk na te bootsen is de testopstelling neergezet in het gras in de buurt van bomen, zodat vervuiling van flora en fauna wordt meegenomen. Onderaan de glasplaat zit een draingoot, die via een afvoer is verbonden met een opvangtank van 50L. De tank is ook voorzien van een overstort en een monsterkraan zodat het water uit de tank kan worden afgetapt.



FIGUUR 69 TESTOPSTELLING VOOR OPVANG REGENWATER, VOORAANZICHT



FIGUUR 70 TESTOPSTELLING VOOR OPVANG REGENWATER, ZIJAAANZICHT

Voor het vaststellen van de benodigde voorzuivering voorafgaand aan RO zijn twee condities van belang:

- De vervuiling van het opgevangen regenwater na een periode van droogte, en dus na ophoping van vuil op het paneel.
- De vervuiling van het opgevangen regenwater nadat het enige tijd in de tank heeft gezeten. In dit geval gaat het voornamelijk om de microbiologische kwaliteit van het water, omdat er nagroei in een tank zou kunnen plaatsvinden.

Om de vervuiling te kunnen meten en te kunnen koppelen aan eventuele aanpassingen in de zuivering voor het watersysteem is ervoor gekozen om de volgende parameters te analyseren:

Chemisch lab

- Gesuspendeerde stoffen
- TOC
- Totaal Fosfaat (totaal en P)
- Nitraat (N en NO_3^-)

Microbiologisch lab

- ATP (+ standaard deviatie)
- Koloniegetal (bij 22°C)

Technisch lab

- Geleidbaarheid

- pH

Om de hoeveelheid regenwater te bepalen tijdens de test, is gebruik gemaakt van een weerstation wat op hetzelfde veld als het zonnepaneel staat opgesteld, in verband met een ander project.

Om de vervuiling na een periode van droogte vast te stellen zijn op 20 oktober watermonsters genomen. Er was op dat moment negen dagen geen regen gevallen, en rond 17 oktober was de lucht vervuild geweest met Saharazand, wat resulteerde in veel extra stof op het glazen paneel. De tank was op dit moment leeg. Na de regenval in de nacht en ochtend is al het water (ca. 6L) water uit de opvangtank gehaald en geanalyseerd op bovenstaande parameters. Om 15.00 is nog een monster genomen om te kunnen vergelijken met de eerste afstroom van regenwater. Helaas regende het op dat moment niet hard genoeg om voldoende water voor alle analyses te verzamelen, er kon slechts ongeveer een halve liter uit de tank worden gehaald. Er is om die reden alleen een monster genomen voor microbiologie, aangezien daar de noodzaak bestond om de twee samples op dezelfde dag te nemen. De chemische analyses volgden die maandag daarop, toen zich inmiddels meer regenwater in de tank had verzameld. Op basis van regendata zou er toen 21.6L kunnen zijn gevallen op het paneel. Er is op dat moment weer 5L water uit de tank gehaald.

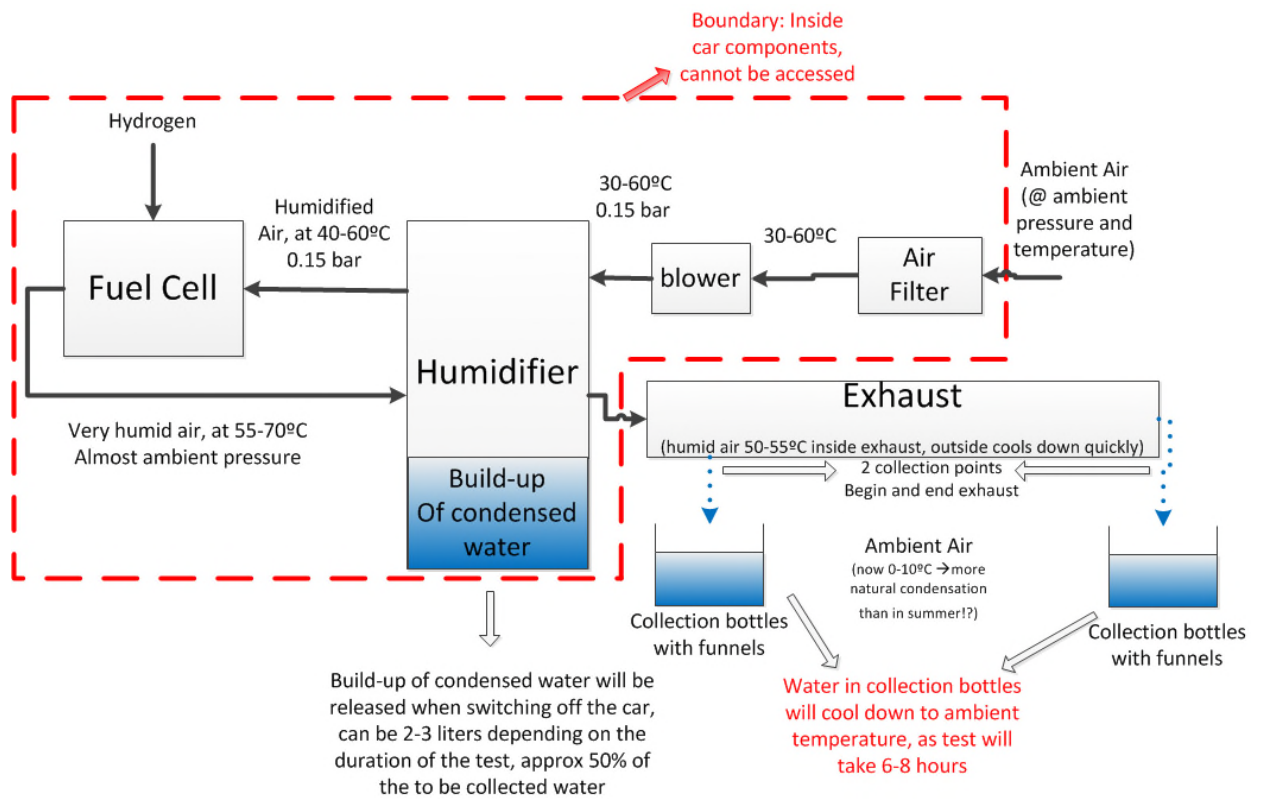
De bemonstering voor bepaling van de mogelijke nagroei vond een maand later plaats, op 22 november. Het water had een maand in de tank gestaan, waarbij er ook nieuwe toevoer van regenwater had plaatsgevonden. In totaal is er tussen 23 oktober en 22 november bijna 85L water gevallen. De inhoud van de tank is 50L, dus er is in totaal ook 50L uit de bovenkant van de tank gestroomd. Nu is er opnieuw ruim 5L uit de tank gehaald, en geanalyseerd op zowel chemische als microbiologische parameters.

b. Waterkwaliteit uitlaat waterstofauto

De waterkwaliteit van het water uit de uitlaat van de waterstofauto in Delft (Hyundai ix35 Fuel Cell) is getest en vergeleken met een blanco en met literatuurdata

De kwaliteit is gemeten van water uit de uitlaat van de Hyundai ix35 Fuel Cell terwijl deze stil stond en elektriciteit leverde. Het water is op twee plekken opgevangen, daar waar het water condenseert uit de uitlaat .

Het water is opgevangen middels glazen trechters en opvang flessen van KWR. Als de auto wordt uitgezet blaast de auto nog extra water uit wat zich ophoopt in de bevochtiger in de auto, zie figuur 1. Ook dit water is opgevangen middels een grote trechter en naar KWR vervoerd.



FIGUUR 71 SCHEMATISCH OVERZICHT VAN DE OPVANG VAN WATER UIT DE HYUNDAI IX35 FUEL CELL



FIGUUR 72 DE HYUNDAI IX35 FUEL CELL OP DE TU DELFT. LINKS: DE EMMER EN WITTE JERRYCAN GEVEN AAN WAAR HET WATER WORDT OPGEVANGEN. RECHTS: EXTRA WATER WAT VRIJKOMT UIT DE AUTO NA UITSCHAKELLEN.

Naast het water uit de uitlaat van de brandstofcelauto is er ook een blanco meting gedaan. Deze blanco bestond uit demiwater in eenzelfde plastic jerrycan als waar het water uit de auto in is vervoerd. Dit demiwater heeft even lang in de fles gestaan als het water uit de brandstofcelauto. Bij KWR zijn metingen uitgevoerd voor het bepalen van pH, geleidbaarheid, TOC, anionen (chloride, fluoride en sulfaat) en kationen (met ICP-MS).

Resultaten experimenteel onderzoek

c. Waterkwaliteit waterstofauto

Over het algemeen is vast te stellen dat het water uit de auto niet veel afwijkt van de blanco (demiwater uit een jerrycan). In het water uit de auto werd een iets hogere geleidbaarheid gevonden dan in de blanco en daarnaast ook een hogere TOC en fluoride concentratie. De hogere fluorideconcentratie wordt waarschijnlijk veroorzaakt door dat er stoffen loskomen van het membraan van de brandstofcel, dit is meestal Nafion, een polymeer gebaseerd op tetrafluorethyleen. Wat de mineralen betreft gaf het water uit de uitlaat hogere concentraties dan de blanco voor natrium, aluminium, kalium, ijzer, mangaan, kobalt, molybdeen, antimoon, thallium, lood en bismuth, wat opnieuw kan worden veroorzaakt door (voornamelijk) katalysatoren in de brandstofcel. Hoewel deze concentraties verhoogd waren, zijn de stijgingen zelden hoger dan een factor 10. Alleen in het geval van molybdeen was de toename minstens een factor 64. In Tabel 74 staat een samenvatting van de resultaten, waarin alleen de verhoogde waarden ten opzichte van de blanco zijn weergegeven.

Beschrijving gevonden literatuur

De gevonden literatuur is vrij gedateerd in verhouding tot de snelheid van de ontwikkelingen op het gebied van waterstof en brandstofcellen. Omdat er geen recentere data konden worden verkregen wordt hier toch gebruik gemaakt van de gevonden literatuur. Daarvoor is het ook van belang de resultaten met de juiste soort PEM brandstofcel te vergelijken. Over de PEMFC in de Hyundai ix35 is weinig bekend behalve dat de gebruikte bipolar platen van metaal zijn [48]. Het type metaal en het precieze membraan wat gebruikt is zijn onbekend, hoewel Nafion membranen het meest gebruikt worden in PEM fuel cells bij deze temperatuur.

Alle gevonden literatuur komt van dezelfde groep auteurs bij Arizona State University. Voor zover bekend zijn zij de enige die hebben gerapporteerd over de waterkwaliteit van water uit brandstofcellen. Anderen richten zich vooral op de hoeveelheid water die kan worden geproduceerd [49] of stellen slechts dat het mogelijk is om (drink)water te produceren met behulp van PEM fuel cells [50].

In de literatuur zijn alleen brandstofcellen in labopstelling gebruikt, terwijl in het nu bekeken systeem het water uit de auto zelf wordt gemeten, waardoor ook de bevochtiger en luchtfilter onderdeel zijn van het systeem (zie Figuur 71). Het eerste paper van de Arizona State University beschrijft een vergelijking tussen verschillende brandstofcellen waarbij het water in zowel de in en uitlaat van de brandstofcel is gemeten. Het ging om zes verschillende brandstofcellen in een labopstelling op verschillende locaties [51]. Van deze zes is er één met een te hoge temperatuur bedreven en zijn er twee met grafiet in de bipolar plates, dus deze zijn niet meegenomen in de vergelijking. Van één PEM zijn geen gegevens over materiaalgebruik bekend (Delaware, gepatenteerd). De andere twee bevatten aluminium (Hawaii) of goud-gecoat metaal (Connecticut). Deze cellen zullen dus in de vergelijking worden meegenomen omdat deze overeen zouden kunnen komen met de brandstofcel in de Hyundai ix-35.

Vervolgens is door dezelfde onderzoekers een test uitgevoerd met een 1 kW-PEMFC (I-1000, ReliOn®) systeem dat 6 maanden gedraaid heeft in een labopstelling [52]. Gedurende die tijd zijn 23 samples genomen. Over de bipolar plates werd vermeld dat deze zijn gecoat met nikkel en op sommige plekken waarschijnlijk koper. Ook deze resultaten kunnen dus worden meegenomen in de vergelijking.

In een ander paper van dezelfde auteurs worden opnieuw PEM brandstofcellen getest (met Nafion membranen), het bipolar plates van grafiet, opnieuw in labopstelling [53](Tibaquirá,

Hristovski, Westerhoff, & Posner, 2011a). Maar daarnaast hebben ze in één PEM de platen vervangen door stainless steel gecoat met goud en nikkel om de impact hiervan op de waterkwaliteit te testen (Nafion-212 self humidified, BCS Fuel Cells, Bryan, TX). Ook deze testresultaten kunnen dus worden vergeleken met de resultaten van de Hyundai ix-35.

Vergelijking met literatuur

Over het algemeen geldt dat de waarden die in dit onderzoek zijn gemeten lager of vergelijkbaar zijn met de waarden in de al bestaande literatuur hierover. De geleidbaarheid, TOC gehalte en pH liggen allemaal in een vergelijkbare range, hoewel [52] het meest afwijkt.

Chloride en fluoride liggen ook in dezelfde orde van grootte. Sulfaat zou op verschillende manieren gemeten kunnen zijn, de verschillen zijn daar wel behoorlijk groot. Het valt op dat er beduidend minder natrium, aluminium en kalium in het water uit de Hyundai ix35 zit dan in de gevonden waarden in de literatuur [52], [53].

TABEL 74 VERGELIJING WATER UIT WATERSTOFAUTO DELFT MET BLANCO EN LITERATUURWAARDEN

	Eenheid	Blanco	Hyundai ix35 Metallic	Hristovski - Delaware	Hristovski - Hawaii N212-	Hristovski - Connecticut	Tibaquirá [53]2011 a 1-1000,	Tibaquirá [52]2011 b N-212 S
Geleidbaarheid	µS/cm	1,5	6,1	4,6	16,6	2,5	3,7-11,6 (5,8 +/- 1,8)	1,6-23,1
TOC	mg C/L	<0,2	3,2	6,7	4,3	0,4	0,5-2,0	0,2-0,8
Totaal opgeloste vaste stoffen	mg/L	0,9	1,1	-	-	-	-	-
pH		5,8	5,6	5,6	4,6	5,4	6,9-7,7	7,5-8
Chloride	mg/L	<3	<3	3,83	4,6	4,6	<0,05	0,195
Fluoride	mg/L	<0,05	0,12	0,05 7	0,038	0,304	0,3	0,092
Sulfaat	mg SO4/L	<2	<2	8,06	7,10	7,06	<0,05	0,245
Natrium	µg/L	<10	49	-	-	-	400	548
Aluminium	µg/L	<1,0	10	-	-	-	200	9,4
Kalium	µg/L	<10	11	-	-	-	100	223
Mangaan	µg/L	<0,05	0,53	4,15	3,79	0,88	3	<1
Ijzer	µg/L	<10	13	-	-	-	10	<1
Kobalt	µg/L	<0,01	0,07	-	-	-	-	-
Nikkel	µg/L	<0,10	3,4	10,7	8,56	0,19	900	124
Molybdeen	µg/L	<0,05	3,2	-	-	-	-	-
Antimoon	µg/L	0,12	0,22	-	-	-	<1	<1

d. Waterkwaliteit van afstromend water zonnepaneel

Tabel 75 bevat de resultaten van de analyses zoals beschreven in 0 met de eerste meting van het eerste afstromende water na negen dagen droogte, de tweede meting een aantal uur (microbiologie) respectievelijk 2 dagen (chemisch) later en de derde meting nadat het water vier weken in de opvangtank heeft gestaan.

TABEL 75 RESULTATEN ANALYSES AFSTROMEND WATER ZONNEPANEEL

Parameter	Eenheid	20-10-2017	20-10-2017	23-10-2017	22-11-2017
		1. Begin	1. Eind	1. Eind	na 4 weken
pH (@ 20°C)	-	6,68		7,34	7,31
Geleidbaarheid (@ 20°C)	µS/cm	57,7		16,2	47,5
TOC	mg C/l	4,5		1,5	1,5
Nitraat-N	mg N/l	0,548		0,254	0,493
Nitraat-NO3	mg NO ₃ /l	2,42		1,12	2,18
Gesuspendeerde stoffen	mg/l	15		< 1,0	< 1,0
Fosfaat-totaal-P	mg P/l	0,15		0,06	0,04
Fosfaat-totaal	mg PO ₄ /l	0,47		0,18	0,13
ATP	pg/ml	2,2E+03 ± 54	2,2E+03 ± 85		360 ± 19
Koloniegetal bij 22 °C	cfu/ml	8,4E+04	5,0E+04		2,2E+05

Wat opvalt is dat het eerste afstromende water duidelijk meer vervuiling bevat dan water wat later is afgestroomd of lange tijd in de tank heeft gestaan.

Het opgevangen water heeft een neutrale pH, wat opmerkelijk is. De verwachting was dat het water een pH waarde van circa 6 zou hebben (zure regen). De geleidbaarheid van het water is, zoals verwacht, laag.

Het zwevende stof gehalte van het eerste afstromende regenwater is hoog. Dit water kan niet zonder voorzuivering aan een RO gevoed worden. Als voorbehandelingsstap moet gedacht worden aan een filtratiestap (bijvoorbeeld zakfilter of kaarsenfilter). Momenteel is in het systeem een kaarsenfilter opgenomen (zie Bijlage IVb). Optioneel kan een first flush worden toegepast, waarbij het eerste afstromende water na een langere stilstand wordt afgevoerd.

Het ATP gehalte van het opgevangen regenwater is vrij laag, waardoor problemen door biofouling van de RO niet te verwachten zijn [54].

Alleen het koloniegetal neemt toe bij een lang verblijf van het water in de opvangtank. Dit geeft aan dat er mogelijkheden bestaan voor bacteriën om in de tank te groeien, wat uiteindelijk tot aangroei in de tank zou kunnen leiden en toename van de TOC.

Discussie resultaten experimenteel

In dit onderzoek is naast het werken aan het model ook experimenteel onderzoek gedaan. Daarbij is de kwaliteit van het water uit de uitlaat van een waterstofauto vergeleken met demiwater en met waarden uit de literatuur. Het water uit de uitlaat bevatte verhoogde concentraties van TOC, en een aantal metalen die vooral als katalysator worden gebruikt in de brandstofcel. Behalve voor molybdeen waren de concentraties niet meer dan een factor 10 hoger dan in demiwater, en de geleidbaarheid was slechts 6,5 µS/cm. De kwaliteit van het water uit de brandstofcel is dus redelijk vergelijkbaar met die van demiwater. Hierdoor is het misschien mogelijk om met een beperkte zuivering daadwerkelijk demiwater te maken. Door de toevoeging van bepaalde zouten zou zelfs drinkwater mogelijk zijn aangezien geen van de gemeten parameters te hoog was volgens het drinkwaterbesluit [55]. Voor molybdeen is echter geen waarde opgenomen, net als voor TOC. Er zal dus nog meer onderzoek nodig zijn

voor er meer bekend kan worden over mogelijke toepassingen van het water uit de uitlaat van een brandstofcel.

Tot nu toe is dit de enige meting van een waterstofauto zelf, de beschikbare literatuur is beperkt en gedateerd, en bespreekt bovendien alleen brandstofcellen in labopstelling. Van de auto is nu alleen water opgevangen tijdens stilstand met draaiende motor. Voor een meer volledig beeld zouden op meer momenten (tijdens rijden, na een paar dagen stilstaan, etc), metingen moeten worden verricht.

Naast de waterkwaliteit van een waterstofauto is ook de waterkwaliteit van regenwater op een zonnepaneel getest. Het doel hierbij is voornamelijk het beoordelen van het ontworpen zuiveringssysteem voor regenwater (zie Bijlage IV). Uit de metingen blijkt dat het water een lage vervuilingsgraad heeft. Na een periode van droogte kwamen in de first flush wel vrij veel gesuspendeerde stoffen mee die een probleem kunnen zijn voor de RO. Omdat na deze first flush de gesuspendeerde stoffen laag zijn, kan volstaan worden met een beperkte voorfiltratie (die reeds is voorzien). Een installatie ontwerpen waarbij de gehele first flush kan worden weggespoeld uit het systeem zou gezien het ontwerp en de verblijfstijdspreiding van het water in het opvangsysteem zeer groot worden, of een grote investering vergen in de automatisering van kleppen in het zonnepark. Deze investeringen lijken gezien de waterkwaliteit echter niet nodig. Meer investeringen in het watersysteem lijken ook niet wenselijk, aangezien dit de productieprijs alleen zal verhogen terwijl voor demiwater nu al geen rendabele business case bestaat.

Voor TOC, NO₃ en fosfor zijn de gemeten waarden niet hoog, maar het water bevat wel voldoende macronutriënten voor mogelijke nagroei in de tank. Dit wordt ook bevestigd door de gemeten koloniegetallen. Door de doorstroming in de tank kan het ATP-gehalte echter wel afnemen. Het gemeten ATP-gehalte is op zich geen gevaar voor snelle biofouling van de RO installatie. Er zou wel voor kunnen worden gekozen om aan de voorzuivering nog een zakfilter toe te voegen met beperkte kosten, zodat er minder verontreinigingen in de tank terecht komen die een bron voor nagroei kunnen vormen.

Er is alleen gemeten in de herfst en winter, en niet in de zomer en lente. In de herfst is er een grote kans op meer gesuspendeerde stoffen door vallende bladeren, maar de temperaturen in de tank zijn lager dan in de lente en zomer. Voor een volledig beeld zou het daarom goed zijn om ook in deze seizoenen metingen te doen, om te kunnen zien of de kansen op nagroei in de tank dan misschien toenemen.

Conclusies experimenteel

Het water uit de uitlaat van een waterstofauto is getest en vergeleken met demiwater en literatuur waarden, en de waterkwaliteit van opgevangen regenwater is gemeten. Hieruit kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De kwaliteit van water uit een draaiende maar stilstaande waterstofauto bevat verhoogde waarden voor TOC en kobalt, nikkel, mangaan, molybdeen en antimoon ten opzichte van demiwater. Dit zijn voornamelijk stoffen die in de brandstofcel als katalysator worden gebruikt. De concentraties zijn echter over het algemeen lager dan in literatuur wordt gevonden en de pH wijkt niet erg af.
- Met de gemeten kwaliteit van het afstromend regenwater van een zonnepaneel in de herfst en winter lijkt het nu ontworpen regenwaterzuiveringssysteem afdoende te zijn.

Aanbevelingen experimenteel onderzoek

Op basis van het experimenteel onderzoek naar de waterkwaliteit van het afstromend regenwater van een zonnepaneel en de waterkwaliteit uit de uitlaat van een waterstofauto kunnen twee aanbevelingen worden geformuleerd.

- Om een beter beeld te krijgen van de waterkwaliteit uit de uitlaat van de waterstofauto is meer onderzoek onder andere condities (tijdens rijden) vereist. Dit onderzoek zou moeten uitwijzen of de kwaliteit wisselt, en hoe het water verder zou kunnen worden gezuiverd.
- Wat betreft de waterkwaliteit van het afstromend water van een zonnepaneel is het aan te bevelen om in de lente en zomer ook metingen te doen omdat bij hogere temperatuur er een groter risico is op nagroei in de tank.

Bijlage VII

Model beperkingen en aanbevelingen

Beperkingen model

Het huidige Power-to-X-model kan de energieverdeling van de opgewekte en/of ingekochte energie per uur simuleren over meerdere jaren, en daarbij ook een eerste inzicht geven in de kosten van deelsystemen, terugverdientijd en productieprijzen van warmte, waterstof en demiwater. Een model is echter nooit een perfecte weergave van de werkelijkheid, en ook dit model heeft zijn beperkingen.

- Er bestaat (nog) geen koppeling met het bodem model met grondwaterstromingen. Dit is wel van belang om de temperatuur in de warme bron goed te kunnen inschatten. Momenteel staat deze temperatuur ingesteld op een constante temperatuur (zie Bijlage II), maar dit is in werkelijkheid niet het geval. Simulaties van de bronnen met dit bodemmodel hebben al laten zien dat het nodig zal zijn om in de winter het water uit de warme bron nog verder op te warmen met de warmtepomp om het met de juiste temperatuur te leveren in huis. Dit extra energiegebruik van de warmtepomp is nu nog niet in het model meegenomen.
- Er is nog geen optimalisatie mechanisme in het model ingebouwd. Alle optimalisatie die plaatsvindt, gebeurt door handmatig verschillende waarden in te stellen, bijvoorbeeld voor de grootte van de warmtepomp of elektrolyser. Het zou dus kunnen dat de bepaalde waarden nu suboptimaal staan ingesteld. Daarnaast zou met een automatische optimalisatie ook meerdere parameters tegelijkertijd kunnen worden getest om tot een beter resultaat te komen.
- Het warmteverlies in het net is berekend met de gemiddelde flow in het warmtenet, en niet per tijdsstap. De flow in het net kan variëren, en bij lagere flows treden grotere warmteverliezen op (zie Bijlage IIb). Het is dus van belang om iedere tijdsstap het warmteverlies te bepalen. Op dit moment is het niet meegenomen vanwege de lange berekentijd die het vereist, dit onderdeel moet dus eerst intelligenter worden geprogrammeerd.
- De hoeveelheid warmte die op een bepaald moment in de warme bron moet zitten, wordt nu als input aan het model gegeven middels een excel bestand met daarin een patroon met waardes voor het vullen van de warme bron per week (zie Bijlage IIc). Daardoor staat de warmtepomp aan het begin van een zonnige week veel aan, maar zodra er genoeg warmte is opgeslagen voor die week, wordt de warmtepomp uitgezet. Dit patroon zou verder geoptimaliseerd moeten worden, of liever nog geïntegreerd in het model, zodat het model zelf kan bepalen wanneer het beste warmte kan worden geproduceerd om de warme bron te vullen in plaats van gebonden te zijn aan een bepaalde waarde per week.
- Op dit moment wordt er in het model geen rekening gehouden met elektriciteitsverliezen door transport. De hoeveelheid opgewekte elektriciteit wordt volledig gebruikt voor het systeem, terwijl in werkelijkheid verliezen optreden. Er is wel rekening gehouden met verliezen door omschakeling van DC naar AC en andersom (5%), maar deze waardes zijn ook inschattingen.
- Het stroomgebruik voor het RO systeem en voor de pompen in het warmtenetwerk zitten niet geïntegreerd in het model. De kosten hiervoor worden nu achteraf bepaald,

ervan uitgaande dat deze niet zijn afgestemd op de opwekking van de zonnestroom is hier nu een grijze stroomprijs voor genomen. Het gaat om kleine hoeveelheden, samen minder dan 0.6% van de totale opgewekte stroom, maar het zou nauwkeuriger zijn om dit energieverbruik wel in het regelsysteem van het model op te nemen.

- De kosten van het interne elektriciteitsnet tussen de warmtepomp, elektrolyser, RO en het elektriciteitsnet zijn vrij ruw ingeschat, omdat er geen betrouwbare informatie over beschikbaar was. Dit zal verder uitgezocht moeten worden in het vervolgproject.

Aanbevelingen voor het model

Het belangrijkste resultaat van het Power-to-X project is het dynamische systeemmodel. Een model als dit is eigenlijk nooit af, en in het vervolgproject zullen nog veel verbeteringen worden doorgevoerd. Sommige verbeteringen zijn al genoemd in dit rapport, anderen zijn genoemd in projectbijeenkomsten of stuurgroepvergaderingen. Hierbij een puntsgewijs overzicht van deze verbeterpunten en nieuwe toevoegingen. Belangrijk om hierbij op te merken is dat de toekomstige ontwikkelingen van het model voornamelijk bedoeld zullen zijn om het verdere systeemontwerp te ondersteunen, of om andere scenario's beter te kunnen doorrekenen.

Warmtesysteem verbeteringen

- Toevoegen flow warme bron via warmtepomp. In de winter zal het nodig zijn om het water in de warme bron nog verder op te warmen, deze functionaliteit kan aan het model worden toegevoegd.
- Koppeling bodemmodel. Nadat de stap hierboven is gezet, kan een koppeling worden gemaakt met het bodemmodel met grondwaterstromingen. Dit model is nu ook al gebruikt om het warmteverlies in de bronnen te bepalen, maar met een directe koppeling tussen beide modellen worden de uitkomsten gedetailleerder en betrouwbaarder en hoeft er niet steeds informatie heen en weer gestuurd te worden.
- Koppeling warmteverliesfunctie per tijdsstap in plaats van het gemiddelde. In het model zit een functie voor het berekenen van het warmteverlies in het warmtenet, maar deze rekent met gemiddelde flows in het warmtenet. In plaats daarvan willen we deze functie elke tijdsstap aan zetten zodat de berekening van het warmteverlies in het net nog nauwkeuriger wordt.
- Warmteoverschot uit elektrolyser gebruiken voor warmtetoevoer warmtepomp. De restwarmte uit de elektrolyser zou kunnen worden gebruikt om het water aan de verdamperszijde van de warmtepomp wat te verhogen. Hiermee zou het koelsysteem voor de elektrolyser ook kunnen worden beperkt, maar er moet wel goed worden onderzocht of het praktisch uitvoerbaar is. De warmtepomp en elektrolyser staan namelijk niet altijd gelijk aan.

Elektriciteit verbeteringen

- Meer informatie krijgen over DC stroom, en de kosten en mogelijkheden met betrekking tot het Power-to-X-systeem.
- De efficiëntie van omzettingen in een DC-step up systeem (van een hoger naar een lager voltage of andersom) moet nog worden toegevoegd.
- Het gebruik van elektriciteit door de pompen in het warmtenet en het RO systeem moeten nog worden toegevoegd aan het regelmechanisme, het gaat om ongeveer 0.6% van de totale opgewekte stroom in het scenario 'Wijk, zon, warmte prioriteit'. Omdat dit gebruik niet is af te stemmen op de zoninstraling zal hiervoor ook vaak stroom uit het net nodig zijn, dit moet ook worden meegenomen.

Economisch verbeteringen

- Toevoegen andere kostenberekeningen. Momenteel worden totale kosten uitgerekend en verdisconteerd en daarmee cost-of-energy berekeningen gemaakt, evenals de simpele en verdisconteerde terugverdientijd. Deze economische berekeningen kunnen nog worden uitgebreid met de internal rate of return (IRR) en de Total Cost of Ownership berekeningen.
- Investerings voor zonnepanelen toevoegen aan het systeem. De investering voor de zonnepanelen valt in de huidige opzet buiten de systeemgrenzen omdat deze door Waternet wordt gedaan. Bij het doorrekenen van andere scenario's kan het echter van belang zijn om juist wel de investering mee te nemen en niet te rekenen met een inkoopprijs voor elektriciteit.
- Prijzen elektriciteit uit het net betrouwbaarder maken, ondanks dat de prijzen gebaseerd zijn op de APX, moet beter worden onderzocht welke kosten er precies bij moeten worden gerekend voor transport en belastingen. Het lijkt nu namelijk gunstiger om de voorkeur aan waterstofproductie te geven en elektriciteit uit het net in te kopen.
- Onderhoudskosten van lumpsum percentage van de investeringen aanpassen naar kosten die afhangen van bijv. de bedrijfsvoering van de apparaten. Veel aan en uit betekent waarschijnlijk meer onderhoud.

Extra functionaliteiten toevoegen

- Redundantie vs bedrijfszekerheid (rustige bedrijfsvoering, aantal schakelingen)
 - Elektrolyzer constanter aan zetten, net als de warmtepomp
 - Batterij toevoegen aan systeem om deze rustige bedrijfsvoering te bewerkstelligen; apparaten kunnen dan kleiner, en gaan waarschijnlijk langer mee;
- Er kunnen back-up systemen worden toegevoegd, om het systeem robuuster te maken bij incidenten en om toch te kunnen leveren wanneer onderhoud plaatsvindt. Daarnaast is het sowieso van belang om modulair te werken als het gaat om grote installaties. De warmtepomp kan bijvoorbeeld bestaan uit 6-10 kleinere warmtepompen, zodat het mogelijk is om er één of twee buiten bedrijf te nemen. Hetzelfde geldt voor de elektrolyser.
- Optimaliseren van het model. In het huidige model staan de instellingen (zoals de grootte van bijv. een elektrolyser) vast, net als het regelmechanisme. Het zou interessant kunnen zijn om een uitkomst te kiezen die geoptimaliseerd kan worden (de terugverdientijd, of vermeden CO₂ uitstoot), en het model zelf een aantal parameters te laten variëren.
- Van simulatie naar voorspellen. Momenteel is het model alleen in staat om te simuleren op basis van historische data. Wanneer het systeem echter gerealiseerd wordt, is het ook belangrijk om aan de hand van weersvoorspellingen en de verwachte prijzen op de elektriciteitsmarkt het systeem optimaal in te stellen.
- Toevoegen van extra opslagmogelijkheden aan het model. Er kan dan worden gezocht naar een optimale batterij capaciteit. Ook een vliegwiel kan een interessante toevoeging zijn aan het systeem, aangezien deze in staat is te helpen bij het stabiliseren van de frequentie op het net. Op deze manier zouden extra inkomsten gegenereerd kunnen worden.
- Directe koppeling maken voor levering van stroom aan huishoudens. In het huidige project zijn zowel de woonwijk als het zonnepark verbonden met het elektriciteitsnet. In de meeste gevallen zal dit de voor de hand liggende optie zijn, maar het kan wel interessant zijn om te zien in hoeverre ook aan de elektriciteitsvraag van de woonwijk kan worden voldaan.

- De schaalfactor van 0.9 kan beter per systeem worden gespecificeerd. Er is nu bij het opschalen van het systeem voor de elektrolyser, warmtepomp en tankstation een algemene schaalfactor van 0.9 gebruikt omdat informatie over leercurves niet beschikbaar was. Desondanks zou het beter zijn om per systeemonderdeel een schaalfactor te bepalen, dit maakt de berekeningen nauwkeuriger.

Validatie en dissiminatie

- Validatie van het model. Het model zou nog meer gevalideerd kunnen worden door te proberen om een vergelijkbaar systeem te construeren in een programma als Energy Plan, waardoor een extra check kan plaatsvinden.
- Een executable maken. Het model is nu geschreven in python, waardoor het lastig te gebruiken is zonder kennis van programmeren. Daarom kan een executable worden gemaakt waarbij een gebruiker met behulp van een user interface het model in kan stellen zonder in de code zelf aanpassingen te hoeven doen.

Andere mogelijke scenario's

- De bedoeling is om het concept Power-to-X op meerdere plaatsen toe te passen. Er kan een start worden gemaakt door met data van gemeentes en partijen die nu al interesse hebben getoond deze andere casussen door te rekenen.
- KNMI klimaatscenario's toepassen op het model. Er zijn klimaatscenario's beschikbaar die inzicht kunnen geven in de veranderende weersomstandigheden door klimaatverandering. Deze data zijn echter alleen per dag beschikbaar, terwijl de tijdfrequentie van het model per uur is. Er zou dus gekeken moeten worden hoe de data van de KNMI klimaatscenario's in uurdata kunnen worden omgezet.
- Tapwater en ruimteverwarming op 40 °C in plaats van 50 °C. Voor nieuwbouwwoningen zou dit ook een goede optie kunnen zijn, en bij Waternet wordt hier momenteel ook onderzoek aan gedaan.
- Ander systeemconfiguraties onderzoeken, zoals het installeren van de warmtepomp bij de woningen en daar de warmtepomp neerzetten en de warmteopslag realiseren. Daarbij moet goed worden uitgezocht of en hoe de stroom van de zonnepanelen naar de warmtepomp kan worden gebracht.
- Nu wordt alleen gerekend met het systeem wanneer het al draait op volledige schaal, er moet ook gekeken en gerekend worden aan de opstartfase van het project. Daarbij moet een cashflowmodel worden ontwikkeld.

Bijlage VIII

Parameters ‘Wijk, zon, warmte prioriteit’

In deze bijlage staan alle parameters die worden gebruikt tijdens het berekenen van het scenario ‘Wijk, zon, warmte prioriteit’.

```
startDate      = "20100101"    # Start date of the simulation in format "YYYYMMDD"

endDate        = "20150101"    # End date of the simulation in format "YYYYMMDD"

priority       = 1             # Priority of sustainable electricity, generating heat (1) or H2
(2)

con_ModFlow    = 0             # Connection with ModFlow for temperature aquifer off
(0) or on (1)

##### The water system of Power-to-X #####

# Rainwater collection

#name_rain     = 'KNMldata_year.xlsx' # Name of Excelfile with rainwaterdata

name_rain      = 'KNMIData.xlsx' # Name of Excelfile with rainwaterdata

sheet_rain     = 'Sheet1'      # Sheet of Excelfile with the data

factor_rain    = 1.0           # to multiply rain with when you don't want to use all the
rain

# Rainwater sieve

y_sieve        = (100.0 - 2.0) # [%] recovery from sieve

# Rainwater buffer

V0_rain        = 150.0         # [m3] volume of tank at t = 0

p_buffer_pump  = 3.0           # [bar] heigth difference of pump to and from rain
water buffer
```

Self cleaning filters

y_scf = (100.0 - 2.0) # [%] recovery from filters
p_scf_feed = 200.0 # [kPa] min feed pressure of scf
deltap_scf = 50.0 # [kPa] max pressure drop
n_lp_pump = 60.0 # [%] overall efficiency of low pressure pump
deltap_lp = 250.0 # [kPa] required head

Reverse Osmosis

y_RO = 90.0 # [%] recovery of RO
n_ro = 80.0 # [%] overall efficiency of pump of RO
p_ro_feed = 700.0 # [kPa] required feed pressure

Reverse Osmosis buffer

V0_RO = 150.0 # [m3] volume of tank at t = 0
p_tank_ro = 1.5 # [bar] height difference of pump to RO
V_pump_max = 150.0 # [m³/hr] max capacity of one pump

CEDI system

y_cedi = 95.0 # [%] recovery of CEDI system
n_cedi = 60.0 # [%] overall efficiency of pump of CEDI
deltap_cedi = 300.0 # [kPa] required head for pumping
f_cedi = 24 # [-] factor for buffervolume, to multiply with max.
demiwater use of electrolyzer

Demi water demand

```
# Number water demand from VEWIN, Watergebruik Thuis 2013
http://www.vewin.nl/SiteCollectionDocuments/Publicaties/Watergebruik_Thuis_2013.pdf

name_demiwater      = 'Demiwater_demand.xlsx'

sheet_demiwater_dish = 'dish'

sheet_demiwater_wash = 'wash'

sheet_demiwater_wc   = 'wc'

dishwasher          = 2.0          # [lpppd] average water demand of dishwasher

washingmachine      = 14.3         # [lpppd] average water demand of washing machine

wc                  = 33.8         # [lpppd] average water demand of wc

phousehold          = 2.2         # [p/household] average amount of people per
household

demiwater_factor    = 1.0         # [-] when 1.0 - use demiwater, when 0.0 no demiwater

##### The hydrogen system of Power-to-X #####

NmH2_H2O            = 1.24        # [m3 H2 / L H2O]

purity              = 99.999      # [%] purity of water in electrolyser

# Electrolyser

NmH2                = 11.1        # [Nm3/kg] conversion of kg H2 to Nm3 H2

E_electrolyzer      = 53.4        # [kWh/kg H2] energy for electrolysis from paper
Oldenbroek et al. (2017)

E_purification       = 1.3        # [kWh/kg H2] energy for purification from paper
Oldenbroek

# First compression + storage in tube trailer

E_comp_medium       = 1.5        # [kWh/kg H2] energy for compression to medium
pressure for storage in tube trailer
```

Hydrogen fuelling station

E_comp_high = 1.8 # [kWh/kg H2] energy for compression from tube trailer to hydrogen fuelling station (700 bar)

E_cooling_HSF = 0.2 # [kWh/kg H2] energy required for cooling the gas during fuelling at hydrogen fuelling station

Tankbeurten

max_E_Electrolyser = 2500.0 # [kW] max capacity of electrolyser

max_V_H2tank = 500.0 # [kg H2] maximum volume of H2 storage tank

min_V_H2tank = 90.0 # [kg H2] minimum volume of H2 storage tank

VO_H2tank = 0.0 # [kg H2] initial volume of H2 storage tank

name_tankpattern = 'Tank_pattern.xlsx'# Excelfile with tankpattern

sheet_tankpattern = 'Sheet1' # Sheet of Excelfile with tankpattern

Tankpattern_factor = 1.0 # to multiply the tankpattern with (for multiple tankstations/extra hydrogen demand)

The electricity system of Power-to-X

Solar panels

T_cNOCT = 45.0 # [Celsius] nominal cell temperature

T_aNOCT = 20.0 # [Celsius] surrounding temperature of defined NOCT

G_tNOCT = 800.0 / 1000 # [kW/m2] radiation of defined NOCT

n_mp_STC = 17.0 # [%] efficiency panel at maximum power

alfa_p = -0.41 # [%/Celsius] temperature coefficient of power

T_cSTC = 25.0 # [Celsius] STC temperature

talfa = 0.9 # [-] transmission of panel

Y_pv = 0.17 # [kW/m2] rated capacity of panel

f_pv_start	= 0.975	# [%] derating factor
f_pv_year	= 0.81	# 81% yearly derating over 25 years linear
f_losses	= 0.9	# [-] losses due to cables, temperatures, dust etc.
G_tSTC	= 1.0	# [kW/m2] STC radiation
N_solar_s	= 0.0	# [-] Amount of solar panels south
A_panel_s	= 1.63	# [m2] surface of single solar panel south
N_solar_e	= 16074.0	# [-] Amount of solar panels east or west
N_solar_w	= 16074.0	# [-] Amount of solar panels east or west
A_panel_ew	= 1.63	# [m2] surface of single solar panel east-west
latitude	= 52.01	# [-] latitude of the solarpanels
beta_s	= 15.0	# [degrees] slope panel with south orientation
beta_ew	= 15.0	# [degrees] slope panel with east-west orientation
psi_e	= 90.0	# [degrees] orientation of panels, east
psi_w	= 270.0	# [degrees] orientation of panels, west
psi_s	= 180.0	# [degrees] orientation of panels, south
name_azimuth	= 'SunEarthTools_AnnualSunPath_2010-2016.xls'	
# Windturbines		
h_meter	= 10.0	# [m] height of windspeedmeter
h_hub	= 105.0	# [m] distance turbine platform to rotor turbine
z_0	= 0.4	# [m] surface roughness in m
cut_on_speed	= 4.0	# [m/s] windspeed at which turbine is turned on
cut_off_speed	= 25.0	# [m/s] windspeed at which turbine is turned off

P_wind_max = 2000.0 # [kW] maximum power of wind turbine

N_wind = 0.0 # [-] amount of windturbines used

DC/DC splitter

n_DCDC = 95.0 # [%] efficiency of DCDC splitter

AC/DC converter

eff_ACDC = 95.0 # [%] efficiency of converter from AC to DC

eff_DCAC = 95.0 # [%] efficiency of converter from DC to AC

Geothermal

T_HP_cond = 65.0 # [degrees] temperature at the condenser of the Heat Pump (max temp from heat pump)

T_HE_loss = 1.5 # [degrees] temperature loss over the heat exchanger

T_DHN_retour = 35.0 # [degrees] temperature of the retour stream that comes back from building/houses

T_DHN_in = 53.5 # [degrees] appr. temperature in district heating network

hp_max = 2500.0 # [kW] max capacity of heatpump

c_w = 4.18E3 # [kJ/m3/K] specific heat capacity of water

T_aq_m_ini = 35.0 # [degrees C] initial value of the medium aquifer

T_aq_w_ini = 58.0 # [degrees C] initial value for the warm aquifer

VO_W_aq = 200000.0 # [m3] initial volume of water stored in the warm aquifer

VO_M_aq = 200000.0 # [m3] initial volume of water stored in the medium aquifer

alpha_m = 0.2 # [-] the thermal storage efficiency at low-medium temperatures

T_aq_amb = 10.0 # [degrees C] ambient ground water temperature

```

L_borehole      = 65.0      # [m] length of the borehole of the aquifers

d_well          = 0.7      # [m] diameter of the borehole for the aquifers

L_terrainpipe   = 100.0     # [m] lengt of pipes between heat pump, aquifers and
heat exchanger(s)

max_debiet_aq   = 75       # [m3/hr] maximum flow in 1 bron

factor_heat_sun = 1.25     # [-] factor to multiply the heat demand with, so there
is more heat stored than used and heat loss decreases

factor_heat_grid = 1.0     # [-] factor to multiply the heat demand with, so there is
more heat stored than used and heat loss decreases

E_pumps_DHN     = 0.0072   # [kWh elec/kWh heat] energy needed for pumps in
heat grid

name_surf_water = 'Temperatuur_Lekkanaal_20162.xlsx'

sheet_sw        = 'Sheet1'

### Tapwater ###

E_tapwater      = 9.0/2.7   # [GJ] heat demand for tapwater each year per person
(Frank Schipper, Aveco de Bondt for 2.7 persons 9GJ, adapted to an average household)

E_spaceheating_new = 11.0   # [GJ] heat demand for space heating each year for a
new house (Frank Schipper, Aveco de Bondt based on NOM home 100m^2 on a corner)

E_spaceheating_reno = 19.7  # [GJ] heat demand for space heating each year for a
renovated house- based on information LPB Sight (2015) for a 81-100 m^2 apartment

T_base          = 18.0     # [Celsius] base temperature inside house

#N_house        = 900.0    # [-] Number of houses that need to be heated

N_house_new     = 450.0    # [-] Number of houses that need to be heated

N_house_reno    = 450.0    # [-] Number of renovated houses that need to be
heated

A_roof          = 40.0     # [m^2] square meters of roof surface per home

beta_roof       = 45.0

```

```
name_tapwater_pattern = 'Tapwater_pattern.xlsx'

sheet_tw_pattern      = 'Sheet1'

name_heatdandaquifer = 'Heat_demand_aquifer.xlsx'

sheet_heatdandaq     = 'Sheet1'

### Heatloss in main district heating network ###

L_dhn      = 3000.0      # [m] length of district heating network

d_pipe     = 100.0      # [mm] pipe diameter of district heating network

L_seg      = 10.0       # [m] segment length

t_iso      = 0.075     # [m] thickness of isulation layer

flag_plot  = False     # plot figures from heatloss_function

### Heatloss from main district heating network to house ###

L_tohouse  = 5.0       # [m] length of pipe from main DHN to home

d_pipe_house = 25.0    # [mm] pipe diameter for the pipe between main
network and house

L_seg_house = 0.1      # [m] segment length

t_iso_house = 0.0125   # [m] thickness of isulation layer

### Distribution network demiwater ###

d_pipe_water = 100.0   # [mm] assumed average diameter of distribution
network

l_pipe_dist  = L_dhn   # [m] length of distribution pipe

l_connect_pipe = 11.0  # [m] length of pipes from distribution to connection
```

Bijlage IX

Parameters ‘Wijk, zon, waterstof prioriteit’

```
startDate      = "20100101"      # Start date of the simulation in format "YYYYMMDD"

endDate        = "20150101"      # End date of the simulation in format "YYYYMMDD"

priority       = 2                # Priority of sustainable electricity, generating heat (1) or H2
(2)

con_ModFlow    = 0                # Connection with ModFlow for temperature aquifer off
(0) or on (1)

##### The water system of Power-to-X #####

# Rainwater collection

#name_rain     = 'KNMIData_year.xlsx' # Name of Excelfile with rainwaterdata

name_rain      = 'KNMIData.xlsx' # Name of Excelfile with rainwaterdata

sheet_rain     = 'Sheet1'        # Sheet of Excelfile with the data

factor_rain    = 1.0             # to multiply rain with when you don't want to use all the
rain

# Rainwater sieve

y_sieve        = (100.0 - 2.0)    # [%] recovery from sieve

# Rainwater buffer

VO_rain        = 150.0            # [m3] volume of tank at t = 0

p_buffer_pump  = 3.0              # [bar] heighth difference of pump to and from rain
water buffer

# Self cleaning filters
```

y_scf = (100.0 - 2.0) # [%] recovery from filters
p_scf_feed = 200.0 # [kPa] min feed pressure of scf
deltap_scf = 50.0 # [kPa] max pressure drop
n_lp_pump = 60.0 # [%] overall efficiency of low pressure pump
deltap_lp = 250.0 # [kPa] required head

Reverse Osmosis

y_RO = 90.0 # [%] recovery of RO
n_ro = 80.0 # [%] overall efficiency of pump of RO
p_ro_feed = 700.0 # [kPa] required feed pressure

Reverse Osmosis buffer

VO_RO = 150.0 # [m3] volume of tank at t = 0
p_tank_ro = 1.5 # [bar] height difference of pump to RO
V_pump_max = 150.0 # [m³/hr] max capacity of one pump

CEDI system

y_cedi = 95.0 # [%] recovery of CEDI system
n_cedi = 60.0 # [%] overall efficiency of pump of CEDI
deltap_cedi = 300.0 # [kPa] required head for pumping
f_cedi = 24 # [-] factor for buffervolume, to multiply with max.
demiwater use of electrolyzer

Demi water demand

Number water demand from VEWIN, Watergebruik Thuis 2013
http://www.vewin.nl/SiteCollectionDocuments/Publicaties/Watergebruik_Thuis_2013.pdf

```
name_demiwater      = 'Demiwater_demand.xlsx'

sheet_demiwater_dish = 'dish'

sheet_demiwater_wash = 'wash'

sheet_demiwater_wc   = 'wc'

dishwasher          = 2.0          # [lpppd] average water demand of dishwasher

washingmachine      = 14.3         # [lpppd] average water demand of washing machine

wc                  = 33.8         # [lpppd] average water demand of wc

phousehold          = 2.2         # [p/household] average amount of people per
household

demiwater_factor    = 1.0         # [-] when 1.0 - use demiwater, when 0.0 no demiwater
```

```
##### The hydrogen system of Power-to-X #####
```

```
NmH2_H2O           = 1.24        # [m3 H2 / L H2O]

purity              = 99.999     # [%] purity of water in electrolyser
```

```
# Electrolyser
```

```
NmH2                = 11.1       # [Nm3/kg] conversion of kg H2 to Nm3 H2

E_electrolyzer      = 53.4       # [kWh/kg H2] energy for electrolysis from paper
Oldenbroek et al. (2017)

E_purification      = 1.3        # [kWh/kg H2] energy for purification from paper
Oldenbroek
```

```
# First compression + storage in tube trailer
```

```
E_comp_medium       = 1.5        # [kWh/kg H2] energy for compression to medium
pressure for storage in tube trailer
```

```
# Hydrogen fuelling station
```

```
E_comp_high         = 1.8        # [kWh/kg H2] energy for compression from tube trailer
to hydrogen fuelling station (700 bar)
```

E_cooling_HSF = 0.2 # [kWh/kg H2] energy required for cooling the gas during fuelling at hydrogen fuelling station

Tankbeurten

max_E_Electrolyser = 2500.0 # [kW] max capacity of electrolyser

max_V_H2tank = 500.0 # [kg H2] maximum volume of H2 storage tank

min_V_H2tank = 90.0 # [kg H2] minimum volume of H2 storage tank

V0_H2tank = 0.0 # [kg H2] initial volume of H2 storage tank

name_tankpattern = 'Tank_pattern.xlsx' # Excelfile with tankpattern

sheet_tankpattern = 'Sheet1' # Sheet of Excelfile with tankpattern

Tankpattern_factor = 1.0 # to multiply the tankpattern with (for multiple tankstations/extra hydrogen demand)

The electricity system of Power-to-X

Solar panels

T_cNOCT = 45.0 # [Celsius] nominal cell temperature

T_aNOCT = 20.0 # [Celsius] surrounding temperature of defined NOCT

G_tNOCT = 800.0 / 1000 # [kW/m2] radiation of defined NOCT

n_mp_STC = 17.0 # [%] efficiency pnel at maximum power

alfa_p = -0.41 # [%/Celsius] temperature coefficient of power

T_cSTC = 25.0 # [Celsius] STC temperature

talfa = 0.9 # [-] transmission of panel

Y_pv = 0.17 # [kW/m2] rated capacity of panel

f_pv_start = 0.975 # [%] derating factor

f_pv_year = 0.81 # 81% yearly derating over 25 years linear

f_losses	= 0.9	# [-] losses due to cables, temperatures, dust etc.
G_tSTC	= 1.0	# [kW/m ²] STC radiation
N_solar_s	= 0.0	# [-] Amount of solar panels south
A_panel_s	= 1.63	# [m ²] surface of single solar panel south
N_solar_e	= 16074.0	# [-] Amount of solar panels east or west
N_solar_w	= 16074.0	# [-] Amount of solar panels east or west
A_panel_ew	= 1.63	# [m ²] surface of single solar panel east-west
latitude	= 52.01	# [-] latitude of the solarpanels
beta_s	= 15.0	# [degrees] slope panel with south orientation
beta_ew	= 15.0	# [degrees] slope panel with east-west orientation
psi_e	= 90.0	# [degrees] orientation of panels, east
psi_w	= 270.0	# [degrees] orientation of panels, west
psi_s	= 180.0	# [degrees] orientation of panels, south
name_azimuth	= 'SunEarthTools_AnnualSunPath_2010-2016.xls'	
# Windturbines		
h_meter	= 10.0	# [m] height of windspeedmeter
h_hub	= 105.0	# [m] distance turbine platform to rotor turbine
z_0	= 0.1	# [m] surface roughness in m
cut_on_speed	= 4.0	# [m/s] windspeed at which turbine is turned on
cut_off_speed	= 25.0	# [m/s] windspeed at which turbine is turned off
P_wind_max	= 2000.0	# [kW] maximum power of wind turbine
N_wind	= 0.0	# [-] amount of windturbines used

DC/DC splitter

n_DCDC = 95.0 # [%] efficiency of DCDC splitter

AC/DC converter

eff_ACDC = 95.0 # [%] efficiency of converter from AC to DC

eff_DCAC = 95.0 # [%] efficiency of converter from DC to AC

Geothermal

T_HP_cond = 65.0 # [degrees] temperature at the condenser of the Heat Pump (max temp from heat pump)

T_HE_loss = 1.5 # [degrees] temperature loss over the heat exchanger

T_DHN_retour = 35.0 # [degrees] temperature of the retour stream that comes back from building/houses

T_DHN_in = 53.5 # [degrees] appr. temperature in district heating network

hp_max = 2500.0 # [kW] max capacity of heatpump

c_w = 4.18E3 # [kJ/m³/K] specific heat capacity of water

T_aq_m_ini = 35.0 # [degrees C] initial value of the medium aquifer

T_aq_w_ini = 58.0 # [degrees C] initial value for the warm aquifer

VO_W_aq = 200000.0 # [m³] initial volume of water stored in the warm aquifer

VO_M_aq = 200000.0 # [m³] initial volume of water stored in the medium aquifer

alpha_m = 0.2 # [-] the thermal storage efficiency at low-medium temperatures

T_aq_amb = 10.0 # [degrees C] ambient ground water temperature

L_borehole = 65.0 # [m] length of the borehole of the aquifers

d_well = 0.7 # [m] diameter of the borehole for the aquifers

L_terrainpipe = 100.0 # [m] lengt of pipes between heat pump, aquifers and heat exchanger(s)

max_debiet_aq = 75 # [m3/hr] maximum flow in 1 bron

factor_heat_sun = 1.35 # [-] factor to multiply the heat demand with, so there is more heat stored than used and heat loss decreases

factor_heat_grid = 1.0 # [-] factor to multiply the heat demand with, so there is more heat stored than used and heat loss decreases

E_pumps_DHN = 0.0072 # [kWh elec/kWh heat] NOG TE GEBRUIKEN energy needed for pumps in heat grid

name_surf_water = 'Temperatuur_Lekkanaal_20162.xlsx'

sheet_sw = 'Sheet1'

Tapwater

E_tapwater = 9/2.7 # [GJ] heat demand for tapwater each year per person (Frank Schipper, Aveco de Bondt for 2.7 persons 9GJ, adapted to an average household)

E_spaceheating_new = 11.0 # [GJ] heat demand for space heating each year for a new house (Frank Schipper, Aveco de Bondt based on NOM home 100m² on a corner)

E_spaceheating_reno = 19.7 # [GJ] heat demand for space heating each year for a renovated house- based on information LPB Sight (2015) for a 81-100 m² apartment

T_base = 18.0 # [Celsius] base temperature inside house

#N_house = 900.0 # [-] Number of houses that need to be heated

N_house_new = 450.0 # [-] Number of houses that need to be heated

N_house_reno = 450.0 # [-] Number of renovated houses that need to be heated

A_roof = 40.0 # [m²] square meters of roof surface per home

name_tapwater_pattern = 'Tapwater_pattern.xlsx'

sheet_tw_pattern = 'Sheet1'

name_heatdandaquifer = 'Heat_demand_aquifer.xlsx'

```
sheet_heatdandaq = 'Sheet1'
```

```
### Heatloss in main district heating network ###
```

```
L_dhn      = 3000.0      # [m] length of district heating network  
d_pipe     = 100.0      # [mm] pipe diameter of district heating network  
L_seg      = 10.0       # [m] segment length  
t_iso      = 0.075      # [m] thickness of insulation layer
```

```
flag_plot  = False     # plot figures from heatloss_function
```

```
### Heatloss from main district heating network to house ###
```

```
L_tohouse  = 5.0       # [m] length of pipe from main DHN to home  
d_pipe_house = 25.0    # [mm] pipe diameter for the pipe between main  
network and house  
L_seg_house = 0.1      # [m] segment length  
t_iso_house = 0.0125   # [m] thickness of insulation layer
```

```
### Distribution network demiwater ###
```

```
d_pipe_water = 100.0   # [mm] assumed average diameter of distribution  
network  
l_pipe_dist  = L_dhn   # [m] length of distribution pipe  
l_connect_pipe = 11.0  # [m] length of pipes from distribution to connection
```

Bijlage X

Parameters ‘Wijk, zon én wind’

```
startDate      = "20100101"    # Start date of the simulation in format "YYYYMMDD"

endDate        = "20150101"    # End date of the simulation in format "YYYYMMDD"

priority       = 1              # Priority of sustainable electricity, generating heat (1) or H2
(2)

con_ModFlow    = 0              # Connection with ModFlow for temperature aquifer off
(0) or on (1)

##### The water system of Power-to-X #####

# Rainwater collection

#name_rain     = 'KNMIData_year.xlsx' # Name of Excelfile with rainwaterdata

name_rain      = 'KNMIData.xlsx'    # Name of Excelfile with rainwaterdata

sheet_rain     = 'Sheet1'          # Sheet of Excelfile with the data

factor_rain    = 1.0              # to multiply rain with when you don't want to use all the
rain

# Rainwater sieve

y_sieve       = (100.0 - 2.0)     # [%] recovery from sieve

# Rainwater buffer

VO_rain        = 150.0            # [m3] volume of tank at t = 0

p_buffer_pump  = 3.0              # [bar] heighth difference of pump to and from rain
water buffer

# Self cleaning filters
```

```
y_scf          = (100.0 - 2.0)  # [%] recovery from filters

p_scf_feed     = 200.0         # [kPa] min feed pressure of scf

deltap_scf     = 50.0         # [kPa] max pressure drop

n_lp_pump      = 60.0         # [%] overall efficiency of low pressure pump

deltap_lp      = 250.0        # [kPa] required head

# Reverse Osmosis

y_RO           = 90.0         # [%] recovery of RO

n_ro           = 80.0         # [%] overall efficiency of pump of RO

p_ro_feed      = 700.0        # [kPa] required feed pressure

# Reverse Osmosis buffer

VO_RO          = 150.0        # [m3] volume of tank at t = 0

p_tank_ro      = 1.5         # [bar] height difference of pump to RO

V_pump_max     = 150.0        # [m^3/hr] max capacity of one pump

# CEDI system

y_cedi         = 95.0         # [%] recovery of CEDI system

n_cedi         = 60.0         # [%] overall efficiency of pump of CEDI

deltap_cedi    = 300.0        # [kPa] required head for pumping

f_cedi         = 24           # [-] factor for buffervolume, to multiply with max.
demiwater use of electrolyzer

# Demi water demand

# Number water demand from VEWIN, Watergebruik Thuis 2013
http://www.vewin.nl/SiteCollectionDocuments/Publicaties/Watergebruik\_Thuis\_2013.pdf
```

```
name_demiwater      = 'Demiwater_demand.xlsx'

sheet_demiwater_dish = 'dish'

sheet_demiwater_wash = 'wash'

sheet_demiwater_wc   = 'wc'

dishwasher          = 2.0          # [l/pppd] average water demand of dishwasher

washingmachine      = 14.3         # [l/pppd] average water demand of washing machine

wc                  = 33.8         # [l/pppd] average water demand of wc

household           = 2.2          # [p/household] average amount of people per
household

demiwater_factor    = 1.0          # [-] when 1.0 - use demiwater, when 0.0 no demiwater
```

```
##### The hydrogen system of Power-to-X #####
```

```
NmH2_H2O           = 1.24         # [m3 H2 / L H2O]

purity              = 99.999       # [%] purity of water in electrolyser
```

```
# Electrolyser
```

```
NmH2                = 11.1         # [Nm3/kg] conversion of kg H2 to Nm3 H2

E_electrolyzer      = 53.4         # [kWh/kg H2] energy for electrolysis from paper
Oldenbroek et al. (2017)

E_purification       = 1.3         # [kWh/kg H2] energy for purification from paper
Oldenbroek
```

```
# First compression + storage in tube trailer
```

```
E_comp_medium       = 1.5         # [kWh/kg H2] energy for compression to medium
pressure for storage in tube trailer
```

```
# Hydrogen fuelling station
```

```
E_comp_high         = 1.8         # [kWh/kg H2] energy for compression from tube trailer
to hydrogen fuelling station (700 bar)
```

E_cooling_HSF = 0.2 # [kWh/kg H2] energy required for cooling the gas during fuelling at hydrogen fuelling station

Tankbeurten

max_E_Electrolyser = 10000.0 # [kW] max capacity of electrolyser

max_V_H2tank = 500.0 # [kg H2] maximum volume of H2 storage tank

min_V_H2tank = 90.0 # [kg H2] minimum volume of H2 storage tank

V0_H2tank = 0.0 # [kg H2] initial volume of H2 storage tank

name_tankpattern = 'Tank_pattern.xlsx' # Excelfile with tankpattern

sheet_tankpattern = 'Sheet1' # Sheet of Excelfile with tankpattern

Tankpattern_factor = 7.0 # to multiply the tankpattern with (for multiple tankstations/extra hydrogen demand)

The electricity system of Power-to-X

Solar panels

T_cNOCT = 45.0 # [Celsius] nominal cell temperature

T_aNOCT = 20.0 # [Celsius] surrounding temperature of defined NOCT

G_tNOCT = 800.0 / 1000 # [kW/m2] radiation of defined NOCT

n_mp_STC = 17.0 # [%] efficiency panel at maximum power

alfa_p = -0.41 # [%/Celsius] temperature coefficient of power

T_cSTC = 25.0 # [Celsius] STC temperature

talfa = 0.9 # [-] transmission of panel

Y_pv = 0.17 # [kW/m2] rated capacity of panel

f_pv_start = 0.975 # [%] derating factor

f_pv_year = 0.81 # 81% yearly derating over 25 years linear

f_losses	= 0.9	# [-] losses due to cables, temperatures, dust etc.
G_tSTC	= 1.0	# [kW/m ²] STC radiation
N_solar_s	= 0.0	# [-] Amount of solar panels south
A_panel_s	= 1.63	# [m ²] surface of single solar panel south
N_solar_e	= 16074.0	# [-] Amount of solar panels east or west
N_solar_w	= 16074.0	# [-] Amount of solar panels east or west
A_panel_ew	= 1.63	# [m ²] surface of single solar panel east-west
latitude	= 52.01	# [-] latitude of the solarpanels
beta_s	= 15.0	# [degrees] slope panel with south orientation
beta_ew	= 15.0	# [degrees] slope panel with east-west orientation
psi_e	= 90.0	# [degrees] orientation of panels, east
psi_w	= 270.0	# [degrees] orientation of panels, west
psi_s	= 180.0	# [degrees] orientation of panels, south
name_azimuth	= 'SunEarthTools_AnnualSunPath_2010-2016.xls'	
# Windturbines		
h_meter	= 10.0	# [m] height of windspeedmeter
h_hub	= 85.0	# [m] distance turbine platform to rotor turbine
z_O	= 0.3	# [m] surface roughness in m
cut_on_speed	= 2.0	# [m/s] windspeed at which turbine is turned on
cut_off_speed	= 25.0	# [m/s] windspeed at which turbine is turned off
P_wind_max	= 3200.0	# [kW] maximum power of wind turbine
N_wind	= 5.0	# [-] amount of windturbines used

DC/DC splitter

n_DCDC = 95.0 # [%] efficiency of DCDC splitter

AC/DC converter

eff_ACDC = 95.0 # [%] efficiency of converter from AC to DC

eff_DCAC = 95.0 # [%] efficiency of converter from DC to AC

Geothermal

T_HP_cond = 65.0 # [degrees] temperature at the condenser of the Heat Pump (max temp from heat pump)

T_HE_loss = 1.5 # [degrees] temperature loss over the heat exchanger

T_DHN_retour = 35.0 # [degrees] temperature of the retour stream that comes back from building/houses

T_DHN_in = 53.5 # [degrees] appr. temperature in district heating network

hp_max = 2500.0 # [kW] max capacity of heatpump

c_w = 4.18E3 # [kJ/m³/K] specific heat capacity of water

T_aq_m_ini = 35.0 # [degrees C] initial value of the medium aquifer

T_aq_w_ini = 58.0 # [degrees C] initial value for the warm aquifer

VO_W_aq = 200000.0 # [m³] initial volume of water stored in the warm aquifer

VO_M_aq = 200000.0 # [m³] initial volume of water stored in the medium aquifer

alpha_m = 0.2 # [-] the thermal storage efficiency at low-medium temperatures

T_aq_amb = 10.0 # [degrees C] ambient ground water temperature

L_borehole = 65.0 # [m] length of the borehole of the aquifers

d_well = 0.7 # [m] diameter of the borehole for the aquifers

```
L_terrainpipe      = 100.0      # [m] lengt of pipes between heat pump, aquifers and
heat exchanger(s)

max_debiet_aq      = 75        # [m3/hr] maximum flow in 1 bron

factor_heat_sun    = 1.25      # [-] factor to multiply the heat demand with, so there
is more heat stored than used and heat loss decreases

factor_heat_grid   = 1.0       # [-] factor to multiply the heat demand with, so there is
more heat stored than used and heat loss decreases

E_pumps_DHN       = 0.0072    # [kWh elec/kWh heat] NOG TE GEBRUIKEN energy
needed for pumps in heat grid

name_surf_water    = 'Temperatuur_Lekkanaal_20162.xlsx'

sheet_sw          = 'Sheet1'

### Tapwater ###

E_tapwater        = 9.0/2.7    # [GJ] heat demand for tapwater each year per person
(Frank Schipper, Aveco de Bondt for 2.7 persons 9GJ, adapted to an average household)

E_spaceheating_new = 11.0      # [GJ] heat demand for space heating each year for a
new house (Frank Schipper, Aveco de Bondt based on NOM home 100m^2 on a corner)

E_spaceheating_reno = 19.7     # [GJ] heat demand for space heating each year for a
renovated house- based on information LPB Sight (2015) for a 81-100 m^2 apartment

T_base           = 18.0       # [Celsius] base temperature inside house

#N_house         = 900.0      # [-] Number of houses that need to be heated

N_house_new      = 450.0      # [-] Number of houses that need to be heated

N_house_reno     = 450.0      # [-] Number of renovated houses that need to be
heated

A_roof           = 40.0       # [m^2] square meters of roof surface per home

beta_roof        = 45.0

name_tapwater_pattern = 'Tapwater_pattern.xlsx'

sheet_tw_pattern  = 'Sheet1'
```

```
name_heatdandaquifer = 'Heat_demand_aquifer.xlsx'
```

```
sheet_heatdandaq = 'Sheet1'
```

```
### Heatloss in main district heating network ###
```

```
L_dhn = 3000.0 # [m] length of district heating network
```

```
d_pipe = 100.0 # [mm] pipe diameter of district heating network
```

```
L_seg = 10.0 # [m] segment length
```

```
t_iso = 0.075 # [m] thickness of isulation layer
```

```
flag_plot = False # plot figures from heatloss_function
```

```
### Heatloss from main district heating network to house ###
```

```
L_tohouse = 5.0 # [m] length of pipe from main DHN to home
```

```
d_pipe_house = 25.0 # [mm] pipe diameter for the pipe between main  
network and house
```

```
L_seg_house = 0.1 # [m] segment length
```

```
t_iso_house = 0.0125 # [m] thickness of isulation layer
```

```
### Distribution network demiwater ###
```

```
d_pipe_water = 100.0 # [mm] assumed average diameter of distribution  
network
```

```
L_pipe_dist = L_dhn # [m] length of distribution pipe
```

```
L_connect_pipe = 11.0 # [m] length of pipes from distribution to connection
```

Bijlage XI

Parameters 'Stadsdeel'

```
startDate      = "20100101"    # Start date of the simulation in format "YYYYMMDD"

endDate        = "20150101"    # End date of the simulation in format "YYYYMMDD"

priority       = 1             # Priority of sustainable electricity, generating heat (1) or H2
(2)

con_ModFlow    = 0             # Connection with ModFlow for temperature aquifer off
(0) or on (1)

##### The water system of Power-to-X #####

# Rainwater collection

#name_rain      = 'KNMIData_year.xlsx' # Name of Excelfile with rainwaterdata

name_rain       = 'KNMIData.xlsx' # Name of Excelfile with rainwaterdata

sheet_rain      = 'Sheet1'      # Sheet of Excelfile with the data

factor_rain     = 1.0           # to multiply rain with when you don't want to use all the
rain

# Rainwater sieve

y_sieve        = (100.0 - 2.0) # [%] recovery from sieve

# Rainwater buffer

VO_rain        = 150.0          # [m3] volume of tank at t = 0

p_buffer_pump   = 3.0           # [bar] heighth difference of pump to and from rain
water buffer

# Self cleaning filters
```

y_scf = (100.0 - 2.0) # [%] recovery from filters
p_scf_feed = 200.0 # [kPa] min feed pressure of scf
deltap_scf = 50.0 # [kPa] max pressure drop
n_lp_pump = 60.0 # [%] overall efficiency of low pressure pump
deltap_lp = 250.0 # [kPa] required head

Reverse Osmosis

y_RO = 90.0 # [%] recovery of RO
n_ro = 80.0 # [%] overall efficiency of pump of RO
p_ro_feed = 700.0 # [kPa] required feed pressure

Reverse Osmosis buffer

V0_RO = 150.0 # [m3] volume of tank at t = 0
p_tank_ro = 1.5 # [bar] height difference of pump to RO
V_pump_max = 150.0 # [m³/hr] max capacity of one pump

CEDI system

y_cedi = 95.0 # [%] recovery of CEDI system
n_cedi = 60.0 # [%] overall efficiency of pump of CEDI
deltap_cedi = 300.0 # [kPa] required head for pumping
f_cedi = 24 # [-] factor for buffervolume, to multiply with max.
demiwater use of electrolyzer

Demi water demand

Number water demand from VEWIN, Watergebruik Thuis 2013
http://www.vewin.nl/SiteCollectionDocuments/Publicaties/Watergebruik_Thuis_2013.pdf

```
name_demiwater      = 'Demiwater_demand.xlsx'

sheet_demiwater_dish = 'dish'

sheet_demiwater_wash = 'wash'

sheet_demiwater_wc   = 'wc'

dishwasher          = 2.0          # [lpppd] average water demand of dishwasher

washingmachine      = 14.3         # [lpppd] average water demand of washing machine

wc                  = 33.8         # [lpppd] average water demand of wc

phousehold          = 2.2          # [p/household] average amount of people per
household

demiwater_factor    = 1.0          # [-] when 1.0 - use demiwater, when 0.0 no demiwater
```

```
##### The hydrogen system of Power-to-X #####
```

```
NmH2_H2O           = 1.24         # [m3 H2 / L H2O]

purity              = 99.999       # [%] purity of water in electrolyser
```

```
# Electrolyser
```

```
NmH2                = 11.1         # [Nm3/kg] conversion of kg H2 to Nm3 H2

E_electrolyzer       = 53.4         # [kWh/kg H2] energy for electrolysis from paper
Oldenbroek et al. (2017)

E_purification       = 1.3         # [kWh/kg H2] energy for purification from paper
Oldenbroek
```

```
# First compression + storage in tube trailer
```

```
E_comp_medium        = 1.5         # [kWh/kg H2] energy for compression to medium
pressure for storage in tube trailer
```

```
# Hydrogen fuelling station
```

```
E_comp_high          = 1.8         # [kWh/kg H2] energy for compression from tube trailer
to hydrogen fuelling station (700 bar)
```

E_cooling_HSF = 0.2 # [kWh/kg H2] energy required for cooling the gas during fuelling at hydrogen fuelling station

Tankbeurten

max_E_Electrolyser = 8000.0 # [kW] max capacity of electrolyser

max_V_H2tank = 500.0 # [kg H2] maximum volume of H2 storage tank

min_V_H2tank = 90.0 # [kg H2] minimum volume of H2 storage tank

V0_H2tank = 0.0 # [kg H2] initial volume of H2 storage tank

name_tankpattern = 'Tank_pattern.xlsx' # Excelfile with tankpattern

sheet_tankpattern = 'Sheet1' # Sheet of Excelfile with tankpattern

Tankpattern_factor = 8.0 # to multiply the tankpattern with (for multiple tankstations/extra hydrogen demand)

The electricity system of Power-to-X

Solar panels

T_cNOCT = 45.0 # [Celsius] nominal cell temperature

T_aNOCT = 20.0 # [Celsius] surrounding temperature of defined NOCT

G_tNOCT = 800.0 / 1000 # [kW/m2] radiation of defined NOCT

n_mp_STC = 17.0 # [%] efficiency panel at maximum power

alfa_p = -0.41 # [%/Celsius] temperature coefficient of power

T_cSTC = 25.0 # [Celsius] STC temperature

talfa = 0.9 # [-] transmission of panel

Y_pv = 0.17 # [kW/m2] rated capacity of panel

f_pv_start = 0.975 # [%] derating factor

f_pv_year = 0.81 # 81% yearly derating over 25 years linear

f_losses = 0.9 # [-] losses due to cables, temperatures, dust etc.

G_tSTC = 1.0 # [kW/m2] STC radiation

N_solar_s = 85000.0 # [-] Amount of solar panels south

A_panel_s = 1.63 # [m2] surface of single solar panel south

N_solar_e = 70000.0 # [-] Amount of solar panels east or west

N_solar_w = 70000.0 # [-] Amount of solar panels east or west

A_panel_ew = 1.63 # [m2] surface of single solar panel east-west

latitude = 52.01 # [-] latitude of the solarpanels

beta_s = 40.0 # [degrees] slope panel with south orientation

beta_ew = 15.0 # [degrees] slope panel with east-west orientation

psi_e = 90.0 # [degrees] orientation of panels, east

psi_w = 270.0 # [degrees] orientation of panels, west

psi_s = 180.0 # [degrees] orientation of panels, south

name_azimuth = 'SunEarthTools_AnnualSunPath_2010-2016.xls'

Windturbines

h_meter = 10.0 # [m] height of windspeedmeter

h_hub = 85.0 # [m] distance turbine platform to rotor turbine

z_O = 0.3 # [m] surface roughness in m

cut_on_speed = 2.0 # [m/s] windspeed at which turbine is turned on

cut_off_speed = 25.0 # [m/s] windspeed at which turbine is turned off

P_wind_max = 3200.0 # [kW] maximum power of wind turbine

N_wind = 10.0 # [-] amount of windturbines used

DC/DC splitter

n_DCDC = 95.0 # [%] efficiency of DCDC splitter

AC/DC converter

eff_ACDC = 95.0 # [%] efficiency of converter from AC to DC

eff_DCAC = 95.0 # [%] efficiency of converter from DC to AC

Geothermal

T_HP_cond = 65.0 # [degrees] temperature at the condenser of the Heat Pump (max temp from heat pump)

T_HE_loss = 1.5 # [degrees] temperature loss over the heat exchanger

T_DHN_retour = 35.0 # [degrees] temperature of the retour stream that comes back from building/houses

T_DHN_in = 53.5 # [degrees] appr. temperature in district heating network

hp_max = 20000.0 # [kW] max capacity of heatpump

c_w = 4.18E3 # [kJ/m³/K] specific heat capacity of water

T_aq_m_ini = 35.0 # [degrees C] initial value of the medium aquifer

T_aq_w_ini = 58.0 # [degrees C] initial value for the warm aquifer

VO_W_aq = 1500000.0 # [m³] initial volume of water stored in the warm aquifer

VO_M_aq = 1500000.0 # [m³] initial volume of water stored in the medium aquifer

alpha_m = 0.2 # [-] the thermal storage efficiency at low-medium temperatures

T_aq_amb = 10.0 # [degrees C] ambient ground water temperature

L_borehole = 65.0 # [m] length of the borehole of the aquifers

d_well = 0.7 # [m] diameter of the borehole for the aquifers

L_terrainpipe = 100.0 # [m] lengt of pipes between heat pump, aquifers and heat exchanger(s)

max_debiet_aq = 75 # [m3/hr] maximum flow in 1 bron

factor_heat_sun = 1.23 # [-] factor to multiply the heat demand with, so there is more heat stored than used and heat loss decreases

factor_heat_grid = 1.0 # [-] factor to multiply the heat demand with, so there is more heat stored than used and heat loss decreases

E_pumps_DHN = 0.0072 # [kWh elec/kWh heat] NOG TE GEBRUIKEN energy needed for pumps in heat grid

name_surf_water = 'Temperatuur_Lekkanaal_20162.xlsx'

sheet_sw = 'Sheet1'

Tapwater

E_tapwater = 9.0/2.7 # [GJ] heat demand for tapwater each year per person (Frank Schipper, Aveco de Bondt for 2.7 persons 9GJ, adapted to an average household)

E_spaceheating_new = 11.0 # [GJ] heat demand for space heating each year for a new house (Frank Schipper, Aveco de Bondt based on NOM home 100m² on a corner)

E_spaceheating_reno = 19.7 # [GJ] heat demand for space heating each year for a renovated house- based on information LPB Sight (2015) for a 81-100 m² apartment

T_base = 18.0 # [Celsius] base temperature inside house

#N_house = 900.0 # [-] Number of houses that need to be heated

N_house_new = 2500.0 # [-] Number of houses that need to be heated

N_house_reno = 7500.0 # [-] Number of renovated houses that need to be heated

A_roof = 40.0 # [m²] square meters of roof surface per home

beta_roof = 45.0

name_tapwater_pattern = 'Tapwater_pattern.xlsx'

sheet_tw_pattern = 'Sheet1'

```
name_heatdandaquifer = 'Heat_demand_aquifer.xlsx'
```

```
sheet_heatdandaq = 'Sheet1'
```

```
### Heatloss in main district heating network ###
```

```
L_dhn = 15000.0 # [m] length of district heating network
```

```
d_pipe = 300.0 # [mm] pipe diameter of district heating network
```

```
L_seg = 10.0 # [m] segment length
```

```
t_iso = 0.130 # [m] thickness of insulation layer
```

```
flag_plot = False # plot figures from heatloss_function
```

```
### Heatloss from main district heating network to house ###
```

```
L_tohouse = 5.0 # [m] length of pipe from main DHN to home
```

```
d_pipe_house = 25.0 # [mm] pipe diameter for the pipe between main  
network and house
```

```
L_seg_house = 0.1 # [m] segment length
```

```
t_iso_house = 0.0125 # [m] thickness of insulation layer
```

```
### Distribution network demiwater ###
```

```
d_pipe_water = 100.0 # [mm] assumed average diameter of distribution  
network
```

```
L_pipe_dist = L_dhn # [m] length of distribution pipe
```

```
L_connect_pipe = 11.0 # [m] length of pipes from distribution to connection
```