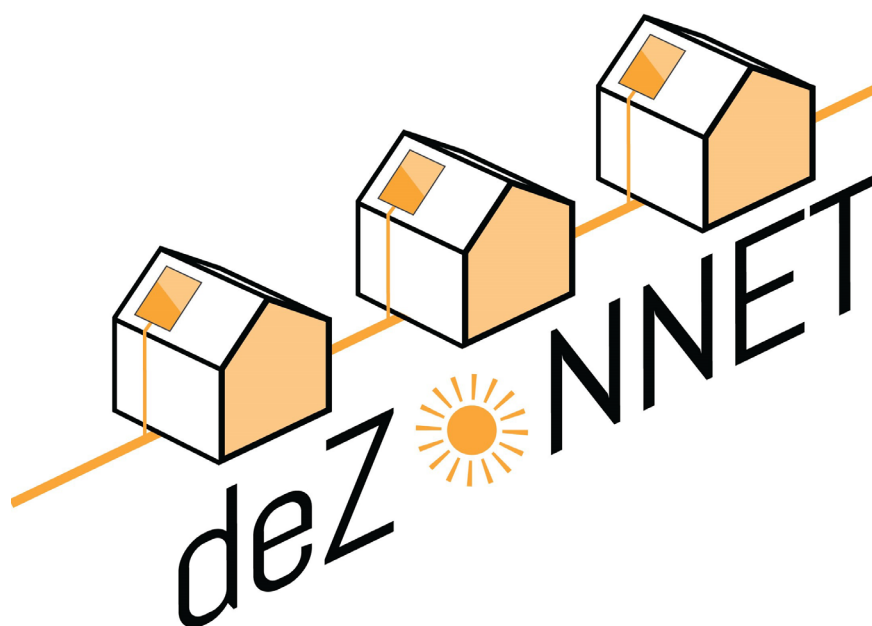


DeZONNET

Lage temperatuur feed-in ZonneWarmteNet

Eindrapport



Eindrapport TKI TEUE 018017

December 2020



deZONNET

Eindrapport

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

Kenmerk: TEUE018017. Lage temperatuur feed-in zonnewarmtenetten (deZONNET).

Datum: December 2020

Auteurs: Sabine Jansen (TU Delft, faculteit Bouwkunde), Ivo Pothof (Deltares), Jelle Loogman (Greenvis), Cees Mager (Triple Solar), Eelco Fortuijn (Stichting SpaarGas / Ramplaankwartier), Sophie Schut (Engie).

Bijdragen van: Saleh Mohammadi (TU Delft), Lefki Loverdou en Sofie Kooreman (Deltares), Frank van Maanen (Triple Solar), Hein van Zyl (Fortes), Martin Bloemendal (TU Delft).

Consortium:





Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
1.1	Project deliverables	6
2	Het concept	7
2.1	samenvatting	7
2.2	Systeemoverzicht	8
2.3	Voordelen van de deze wijkaanpak	9
2.4	Ontwikkelproces en aanpak	10
3	Stap 1: Woninginstallatie en regelingen	11
3.1	Uitgangspunten en gevolgde stappen	11
3.2	Stap 1a: Vaststellen gemiddeld warmtevraagprofiel	11
3.3	Stap 1b: Vaststellen van de mogelijke indicatoren waarop geregeld kan worden	12
3.4	Stap 1c: Simuleren van de regel strategieën en bepalen optimale regeling en aantal panelen	13
3.5	Gesimuleerde varianten en resultaten voor de gemiddelde woning	13
3.6	Van de woning naar de wijk: Energiebalans op wijkniveau	18
3.7	Richtlijnen voor bepaling van benodigd aantal panelen, regelingen en te verwachten COP	18
3.8	Resultaat: aantal gekozen PVT panelen en setpoints voor de regelingen	20
4	Stap 2: De specificaties van de regelingen	21
5	Stap 3: Wijk-Warmtenet ontwerp	23
5.1	Een vraaggestuurd warmtenet	23
5.2	Piekvermogen	24
5.3	Temperatuurniveaus	25
5.4	Beschikbare locaties voor WKO en technische ruimte in de wijk	25
5.5	Leidingontwerp	26
5.6	Leidingen ZONNET concept isoleren: ja of nee?	29
6	Kosten en marktmodellen	30
6.1	TCO model	30
6.2	Conclusie: onder welke voorwaarden is het ZONNET concept betaalbaar?	35
6.3	Vergelijking TCO DeZONNET systeem met alternatieven	36
6.4	Marktmodellen	37



7	De Pilot in the Green Village	39
8	Conclusie en vervolg.....	41
8.1	Wat is er ontwikkeld?.....	41
8.2	Is het concept haalbaar en betaalbaar?	41
8.3	Voordelen	41
8.4	Verdere ontwikkeling en aanbevelingen	42
9	Bijlagen.....	43
9.1	Eigenschappen van de onderdelen van het systeem	43
9.2	Beschrijving van de gehanteerde gemiddelde woning.....	46
9.3	Gegevens energieprestatie verschillende combinaties warmtevraag en aantal PVT panelen	47
9.4	Literatuur	47



1 Inleiding

Veel (bestaande) woonwijken hebben te weinig duurzame (rest)warmtebronnen in de omgeving, en weinig ruimte voor duurzame opwekking. Daarnaast zijn ambitieuze isolatiemaatregelen voor veel woningtypen niet praktisch of niet financieel haalbaar. Een aardgasvrije warmtevoorziening voor dit type wijken is dus niet eenvoudig. Veel alternatieve warmtevoorzieningen voor dit type wijk vragen daardoor een grote input van hoogwaardige energiebronnen, in de vorm van elektriciteit of (bio)brandstoffen. De daarvoor benodigde duurzame energieopwekking legt een grotere druk op de benodigde fysieke ruimte. Door het ontwikkelen van energieconcepten met een minimale benodigde input van hoogwaardige bronnen kan een snellere verduurzaming en CO₂ reductie worden gerealiseerd, zonder de druk op materiaalgebruik en de fysieke ruimte te veel te verhogen.

Daarom is voor dit type wijk het 'ZONNET' of 'ZonneWarmteNet' concept ontwikkeld: dit is een lokaal, zeer lage temperatuur warmtenet dat wordt gevoed door warmte van PVT panelen op individuele daken i.c.m. seizoensopslag (WKO). Door het realiseren van feed-in warmte van individuele PVT worden zeer efficiënte en duurzame lage temperatuur warmtenetten in bestaande woonwijken zonder externe warmtebronnen mogelijk. Door de hoge efficiëntie van dit systeem en de combinatie van elektriciteit en warmteopwekking is het concept bij een beperkt aantal panelen al energieneutraal voor de warmtelevering. Het idee voor dit concept is het resultaat van een onderzoek binnen het Europese 'Smart Urban Isle' project, en is eerder beschreven in een nationale en internationale publicatie (Jansen et al., 2020a en 2020b).

Voor de uitwerking van dit concept is een subsidie toegekend door de topsector Energie. Binnen dit 'deZONNET' project zijn de technische regelingen en de benodigde aflever- en regelset ontwikkeld. Voor aanvang van dit project waren bijna alle onderdelen die voor dit systeem nodig zijn beschikbaar (PVT, warmtepomp, WKO en lage temperatuur netten). Het onderzoek heeft zich gericht op het ontwikkelen van de ontbrekende schakels, te weten:

- De operationele werking van het systeem voor het bereiken van de warmtebalans
- technische specificaties voor thermisch en hydraulisch ontwerp.
- De benodigde aflever- en regelset
- Een TCO berekening en een verkenning van de mogelijke marktmodellen

In deze samenvattende rapportage wordt de uitkomst van dit ontwikkeltraject samengevat en wordt het concept inclusief de ontwerprichtlijnen en energieprestatie beschreven.

*Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.
Kenmerk: TEUE018017. Lage temperatuur feed-in zonnewarmtenetten (deZONNET).*

*Het consortium bestaat uit: TU Delft, Deltares, Greenvis, Triple solar, Fortes Energy Systems, ENGIE, De WarmteTransitieMakers, en het Ramplaankwartier/Stichting SpaarGas.
Letter of Support: Gemeente Haarlem*

1.1 Project deliverables

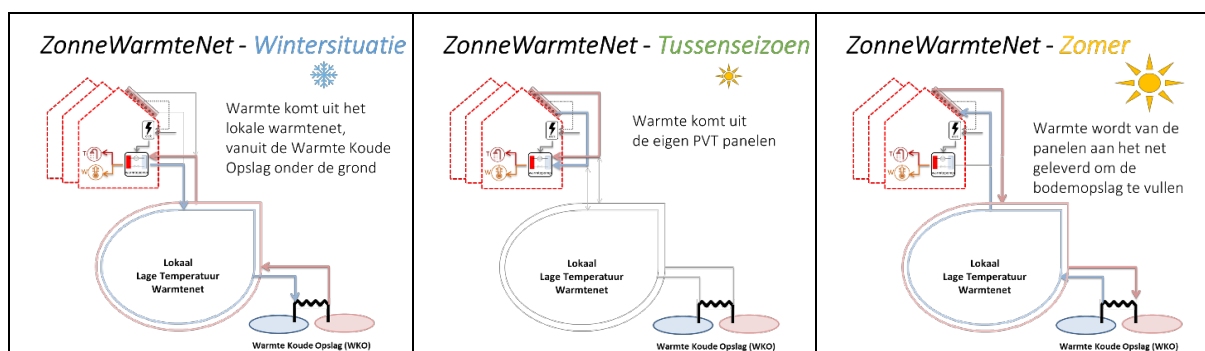
Het consortium heeft in deze studie de volgende serie documenten opgesteld, dit eindrapport is aangegeven in oranje:

- D1.1 (intern document): overzicht eigenschappen systeemcomponenten voor energiesimulaties
- D1.2 (intern document): dynamisch simulatiemodel met verschillende doorberekende varianten
- D1.3 (openbaar): rapportage met beschrijving van de diversie gesimuleerde varianten en uitwerking van de meest gunstige variant. (Dit deliverable is verwerkt in deliverable 7.2)
- D2.1 (intern): simulatiemodel inclusief basis ontwerp generieke casus
- D2.2: een ontwerphandleiding voor het technisch ontwerp van Zeer Lage-Temperatuur Warmtenetten, met aandacht voor vraag en aanbod profielen en mogelijke oplossingen voor het leveren van piekvermogen.
- D3.1: de uitgewerkte technische specificaties van alle onderdelen van het 'DeZONNET' (het decentrale feed-in zonnewarmtenet)
- D3.2: Een demonstratie van de PV-T/WP/afleverset en regeling in een of enkele woningen (WP2)
- D4.1 Algemene stakeholder analyse
- D4.2 Analyse resultaten uit vragenlijst/interviews bewonersparticipatie m.b.t. acceptatie van de nieuwe installaties en mogelijke participatiemodellen
- D5.1: Integrale en exploitatievorm-neutrale businesscase model voor een DeZONNET systeem
- D5.2: Overzicht van mogelijke marktmodellen voor de uitrol van het product, inclusief voor- en nadelen en randvoorwaarden en mogelijkheden voor buurtinitiatieven.
- D6.1 (intern Document) Uitgewerkte casus Ramplaankwartier Haarlem
- D6.2 (intern Document) Beknopte technische en financiële haalbaarheidsstudie voor Casus 2
- D7.1 Overzicht disseminatieactiviteiten
- **D7.2 Eindrapport**

2 Het concept

2.1 samenvatting

- Het ZONNET concept bestaat uit een lokaal lage-temperatuur warmtenet dat wordt gevoed door zon-PVT panelen (zonnepanelen die zowel elektriciteit als warmte opwekken) op de daken van de woningen.
- De woningen hebben individuele warmtepompen om de warmte uit het net of de PVT op te krikken tot de gewenste temperatuur om de woning te verwarmen en warm water te maken.
- Afhankelijk van de warmtevraag en het aanbod van zonnewarmte via de PVT panelen, gebruikt de warmtepomp de warmte uit de panelen of uit het ZLT warmtenet, of leveren de panelen warmte terug aan het net.
- Het overschot aan warmte in de zomer wordt opgeslagen in een ondergrondse Warmte Koude Opslag (WKO), en dat wordt in de winter weer benut. Het systeem en de temperatuur setpoints worden zo ontworpen dat de jaarlijkse warmte die uit de WKO wordt gehaald gelijk is aan de warmte die er wordt opgeslagen.
- Door het koppelen van individuele PVT aan een WKO net kan de WKO worden gegenereerd, wat nodig is in een wijk met overwegend warmtevraag. Daarnaast zorgt de PVT voor een hogere temperatuur in het warmtenet dan bij een traditioneel WKO net, waardoor de warmtepomp ook voor bestaande woningen relatief efficiënt is.
- Het concept biedt een inclusieve wijkoplossing, omdat niet alle woningen in een wijk over een geschikt dak hoeven te beschikken om toch duurzame wijkwarmte te kunnen gebruiken. Dit concept is voor (bestaande) woonwijken met vergelijkbare kenmerken (naar schatting in Nederland tussen 1-3 miljoen woningen) ook zeer kansrijk. Wel is een vorm van basisisolatie en eventueel aanpassingen aan de radiatoren noodzakelijk om de een afgifte temperatuur (in radiatoren en /of vloerverwarming) op maximaal 55°C mogelijk te maken.



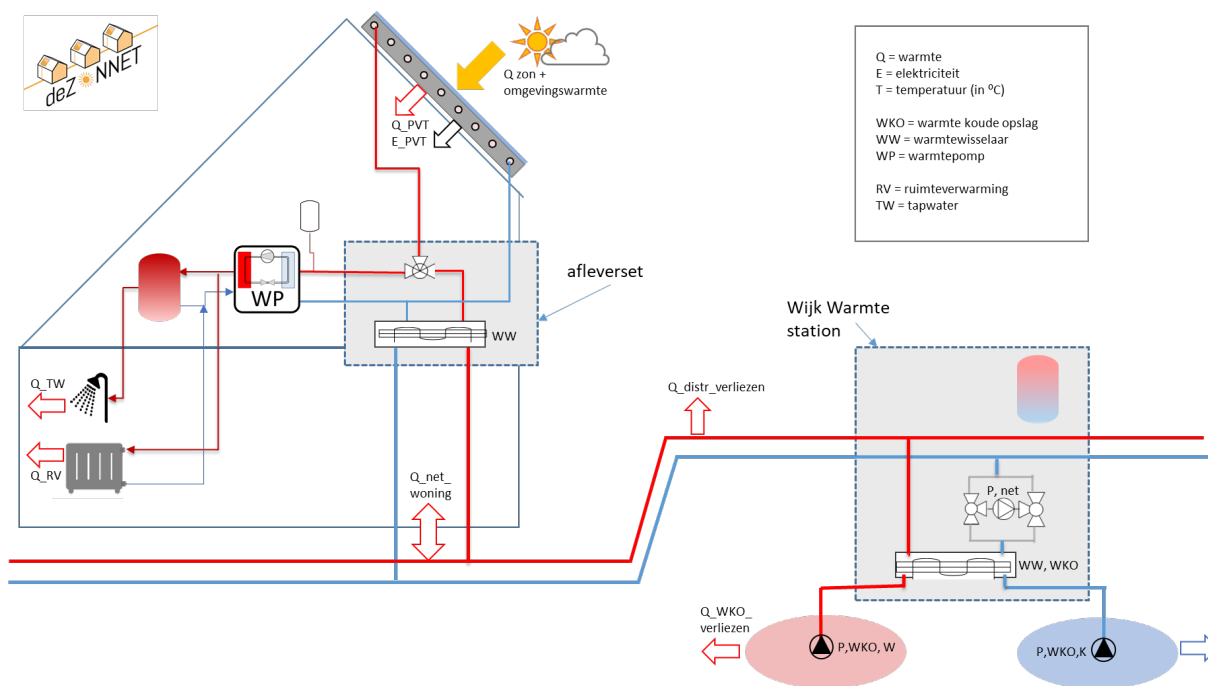
Figuur 1: Conceptuele weergave van de 3 situaties die zich bij het ZONNET systeem kunnen voordoen: 1) de warmtepomp gebruikt warmte uit het lokale (ZLT) warmtenet als bron; 2) de warmtepomp gebruikt de warmte uit de PVT als bron; 3) de PVT levert warmte via het ZLT warmtenet aan de WKO.

2.2 Systemoverzicht

Het systeem bestaat uit de volgende onderdelen:

- 1) De woninggebonden installatie, bestaande uit:
 - a. Warmtepomp en boiler/vat voor tapwater
 - b. Een aantal PVT panelen
 - c. Een afleverset. De afleverset in de woning bepaalt wanneer de warmte uit de PVT wordt benut door de warmtepomp, wanneer warmte uit het net wordt onttrokken, en wanneer warmte aan het net wordt terug geleverd.
- 2) Het wijk energiesysteem, bestaande uit:
 - a. Het netwerk van warme en koude leidingen
 - b. De WKO's (Warmte Koude Opslag)
 - c. Het wijk Warmte station, waar de warmte uit de WKO aan het net wordt overgedragen en andersom, en waar de warmtebalans in de leidingen wordt gerealiseerd.

In onderstaande figuur is het totaalschema van het systeem weergegeven.



Figuur 2: Compleet overzicht van de componenten waaruit het ZONNET systeem is opgebouwd. In de woning: PVT panelen, individuele warmtepomp, afleverset inclusief regelingen; in de wijk: ZLT warmtenet, WKO en pompstation.



2.3 Voordelen van de deze wijkaanpak

Het wijksysteem maakt het mogelijk als wijk energieneutraal te zijn. Dit heeft de volgende voordelen:

- Er zijn geen externe bronnen nodig voor de warmtelevering; alle warmte wordt lokaal opgewekt.
- Niet alle woningen zullen voldoende dakoppervlak hebben, maar als wijk kan toch voldoende warmte worden opgewekt.
- De best georiënteerde daken kunnen worden benut.
- Eventuele collectieve bronnen kunnen eveneens aan het wijk-warmtenet worden gekoppeld, waardoor de energieprestatie nog verder verbetert. Denk aan kleinschalige bronnen zoals koelinstallatie van een supermarkt, serverruimtes, asfaltcollectoren etc.
- Ten opzichte van individuele (lucht) warmtepompen is veel minder verzwarend van het elektriciteitsnet nodig, doordat de warmtepomp in het ZONNET concept ook tijdens de winterpiek met een zeer hoge COP werkt. Dit in tegenstelling tot een lucht/water warmtepomp, die de vraagpiek in de winter juist moet leveren bij de laagste buitentemperatuur, waardoor deze warmtepomp dan een heel lage COP heeft en dus een hoge elektriciteitsvraag.
- Gebouwen met koeling kunnen aan het totaalsysteem worden aangesloten, waardoor de energieprestatie van het totaal nog verder verbetert.
- Ook de aangesloten woningen kunnen met dit systeem koelen, als het afgiftesysteem daar geschikt voor is of wordt gemaakt.
- De spreiding in het werkelijke energiegebruik tussen verschillende gebruikers is heel groot, zoals onderzocht door Majcen (2016). Toch hoeft niet elke woning zelf zijn volledige warmtebalans te realiseren en kan met behulp van de andere opwekkers een hoge COP gehaald worden, ook voor de woningen met een hoog gebruik. Hoe dit mogelijk financieel kan worden gecompenseerd wordt besproken in deliverable 5.2.



2.4 Ontwikkelproces en aanpak

Een belangrijk en innovatief element van het ZONNET concept (of ZonneWarmteNet) is dat er geen centrale warmtebron is maar dat alle individuele PVT panelen bijdragen aan het collectieve systeem. Een eerste vereiste aan het systeem is dat er op jaarbasis een thermische balans wordt gerealiseerd tussen de warmte die aan het net geleverd wordt en de warmte die aan het net onttrokken wordt. Deze balans is het resultaat van een gekozen aantal PVT panelen en de regelingen en setpoints van de installatie op woningniveau: wanneer wordt de warmte van de PVT gebruikt door de warmtepomp, wanneer wordt warmte onttrokken aan het net en wanneer wordt warmte terug geleverd aan het net.

Het systeem moet dus zo worden ontworpen dat:

- 1) op jaarbasis een **thermische balans** wordt gerealiseerd tussen de warmte die aan het net geleverd wordt en de warmte die aan het net onttrokken wordt.
- 2) de balans wordt gerealiseerd bij een **haalbaar en/of optimaal aantal PVT panelen**.
De thermische balans kan met een verschillend aantal PVT behaald worden, waarbij geldt: hoe meer PVT panelen, hoe hoger de temperatuur van de warmte uit de panelen bij eenzelfde opbrengst in kWh (of GJ), en dus hoe hoger de COP van de warmtepomp. Echter: op de meeste daken is slechts een beperkt oppervlak beschikbaar. Daarnaast wordt gezocht naar een optimum tussen energieprestatie, kosten en visueel beeld van het aantal panelen. De relatie tussen aantal panelen en energieprestatie is in dit project onderzocht. Het beschikbare of wenselijk beschikbare dakoppervlak verschilt per project.
- 3) **gelijktijdig** door de ene woning **warmte** aan het net **kan worden onttrokken** en door een andere woning aan het net kan worden **geleverd**;
- 4) de piek van de warmtevraag in de winter *door* het net kan worden geleverd en de piek aan warmteaanbod *aan* het net kan worden terug geleverd;
- 5) Het mogelijk is dat bepaalde woningen meer warmte terug leveren en andere woningen minder - de terugleverpiek per woning kan dus verschillen.

Voor het ontwerpen van het concept zijn daarom de volgende stappen doorlopen:

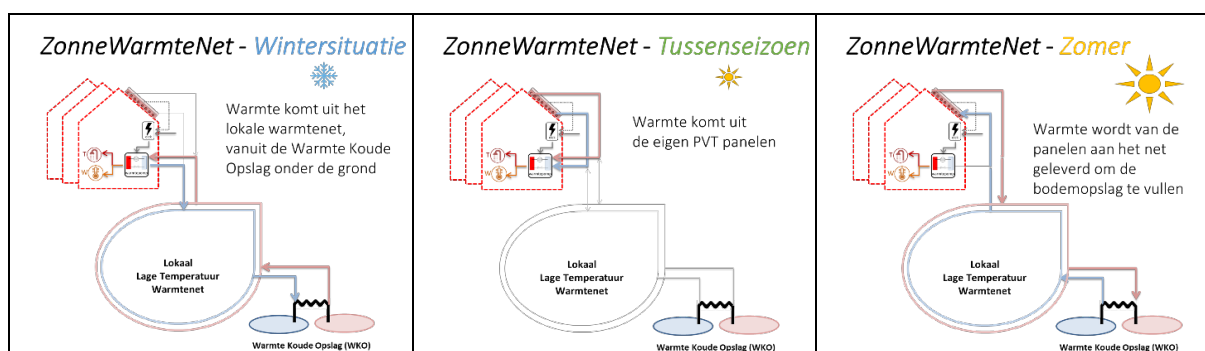
- 1) Het bepalen van de benodigde regelingen in de woninginstallatie om bij een verschillend aantal PVT panelen een thermische balans te krijgen en een maximale energieprestatie;
- 2) Het ontwerpen van de specificaties van de regelingen en van de afleverset die dit mogelijk moet maken;
- 3) Het hydraulisch ontwerp van het warmtenet in de wijk.

Voor elk van deze stappen is er een uitgebreide beschrijving gemaakt, te weten deliverables D1.2, D1.3, D3.1 en D2.2. Een samenvatting van de stappen is in Hoofdstuk 3, 4 en 5 beschreven.

3 Stap 1: Woninginstallatie en regelingen

3.1 Uitgangspunten en gevolgde stappen

In deze stap moet worden bepaald hoe een **optimale energieprestatie** van het systeem kan worden gehaald, met als **randvoorwaarde dat er op jaarbasis een thermische balans in de WKO** wordt gerealiseerd bij een **haalbaar/wenselijk aantal PVT panelen**. Omdat de warmteproductie en de warmtebenutting in en op de woning plaatsvindt, wordt ook de thermische balans van het systeem grotendeels bepaald door de woninginstallatie en de regelingen. Dit betekent dat moet worden bepaald wanneer de warmte uit de PVT wordt benut door de warmtepomp, wanneer warmte uit het net wordt onttrokken, en wanneer warmte aan het net wordt terug geleverd (de drie situaties uit Figuur 1, eveneens hier onder weergegeven).



De situaties die hier met 'tussenseizoen, winterseizoen en zomerseizoen' zijn aangeduid, zijn overigens niet volledig gelijk aan de seizoenen, omdat ze voornamelijk zullen afhangen van de buitentemperatuur en de zoninstraling. Daarnaast is het natuurlijk van belang of er überhaupt een warmtevraag is of niet.

Voor de bepaling van het aantal benodigde panelen en de bijbehorende regelingen gaat het om de **totale warmtevraag van de wijk**. Omdat niet alle woning een geschikt dak hebben, kan het aantal panelen per woning verschillen, maar **op basis van een gemiddelde woning** kan het **gemiddelde aantal panelen** per woning worden bepaald.

De volgende aanpak is gevolgd voor het bepalen van de regelstrategie:

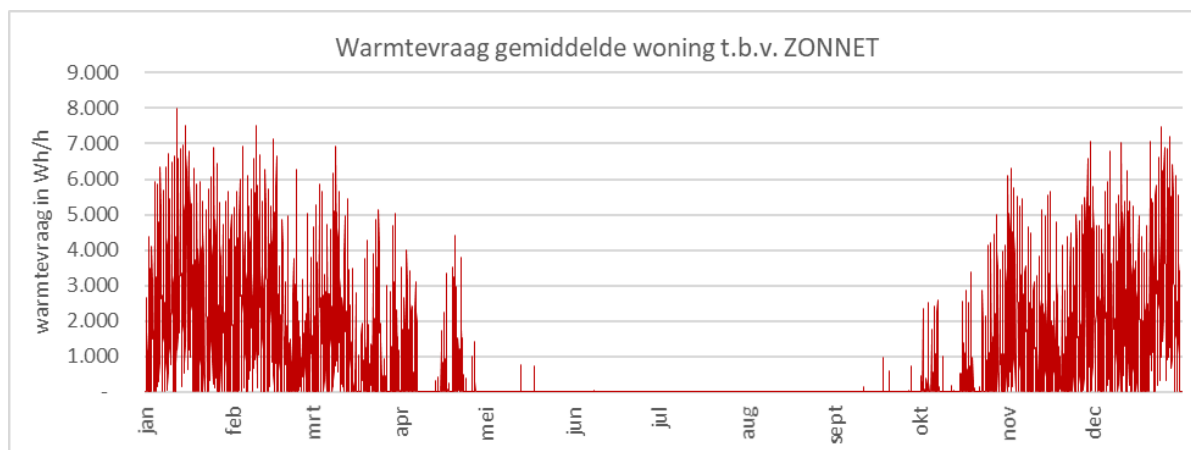
- Vaststellen van het gemiddelde warmtevraagprofiel van de wijk
- Vaststellen van de mogelijke indicatoren waarop geregeld kan worden
- Simuleren van de regel strategieën en bepalen optimale regeling en aantal panelen.

Op basis van deze aanpak is het benodigd aantal panelen en de bijbehorende regelstrategie bepaald. De stappen en resultaten zijn beschreven in de volgende paragrafen.

3.2 Stap 1a: Vaststellen gemiddeld warmtevraagprofiel

Voor het bepalen van de warmtebalans bij bepaalde regelingen van het PVT systeem is het warmtevraagprofiel van een gemiddelde woning nodig. De verwachte gemiddelde warmtevraag in een wijk na renovatie kan worden bepaald aan de hand van kentallen voor energiegebruik volgens Majcen (Majcen 2016), omgerekend naar netto warmtebehoefte. Voor dit voorbeeld is een gemiddelde woning van 95m² gekozen, meteen netto warmtevraag van 70 kWh/m² wat overeenkomt met het gemiddeld gebruik van een woning met label B. Voor de beschrijving van deze woning en de gehanteerde isolatiewaarden, zie bijlage § 9.2.

Naast de jaarlijkse netto warmtevraag moet een profiel met uurlijkse waarden worden verkregen. Voor dit project zijn de uurlijkse waarden voor deze woning bepaald met het dynamische simulatieprogramma TRNSYS. De resulterende warmtevraag is 6606 kWh/m² per jaar, en de uurlijkse waarden zijn weergegeven in Figuur 3. Uit deze figuur kan ook het maximale benodigde vermogen worden afgelezen (maximaal 7 à 8 kW).



Figuur 3: warmtevraagprofiel gemiddelde woning van 96 m², met 'label B' isolatie

Naast de warmtevraag voor ruimteverwarming is uitgegaan van een warmtevraag t.b.v. tapwater van 3.000 kWh/jaar per gemiddeld huishouden.

3.3 Stap 1b: Vaststellen van de mogelijke indicatoren waarop geregeld kan worden

Zoals beschreven, moet door de regelingen en kleppen in de afleverset bepaald worden wanneer de warmte uit de PVT direct benut wordt door de warmtepomp, wanneer de warmtepomp warmte uit het net onttrekt, en wanneer de PVT panelen warmte aan het net leveren.

- De volgende verschillende indicatoren waarop geregeld kan worden zijn besproken door de project partners:
 - Op basis van datum en tijdstip; waarbij wordt aangenomen dat een bepaalde periode PVT direct wordt benut als bron voor de warmtepomp, en een bepaalde periode warmte van het net wordt onttrokken.
 - Op basis van buitentemperatuur en bezonning
 - Op basis van uitgaande collectortemperatuur
- Door Triple Solar is aangegeven dat het mogelijk is om de uitgaande collectortemperatuur te meten. Door dit te meten wordt het effect van zowel buitentemperatuur als bezonning meegenomen, en hoeven geen extra sensoren geplaatst te worden. Daarnaast kan op deze manier flexibel worden ingespeeld op wisselend weer binnen een seizoen.
- Met het meten van de uitgaande collector temperatuur zijn er in feite twee setpoints nodig:
 - de setpoint-temperatuur waarboven de PVT output wordt benut door de warmtepomp
 - de setpoint-temperatuur waarboven warmte aan het net geleverd gaat worden
- Door deze temperaturen te variëren kan de energiestaat worden gemaximaliseerd binnen de randvoorwaarde van jaarlijkse thermische balans tussen de aan het net geleverde en aan het net onttrokken warmte.



3.4 Stap 1c: Simuleren van de regel strategieën en bepalen optimale regeling en aantal panelen.

De regelstrategieën zijn bepaald met als doel een maximale energieprestatie (ofwel: een maximale COP van de warmtepomp) te halen binnen de randvoorwaarde dat jaarlijks evenveel warmte aan het net wordt onttrokken als wordt geleverd.

- De energieprestatie is gesimuleerd met het softwarepakket Polysun.
 - Het uurlijkse warmtevraagprofiel vanuit TRNYS is hier als input gebruikt.
 - Voor de eigenschappen van de PVT panelen en de warmtepomp is uitgegaan van de PVT warmtepomppanelen van Triple Solar en de NIBE 1255 warmtepomp. Beide componenten zijn beschreven in de bijlage (§ 9.1), en zijn als component ook beschikbaar in het Polysun softwarepakket.
- Bij de simulaties zijn zowel het aantal PVT panelen als de beide setpoint temperaturen gevarieerd om de juiste setpoints voor een hoge energieprestatie te bepalen.
 - Om een zo hoog mogelijke gemiddelde seizoens COP te halen, is het belangrijk dat **in de winter een hoge brontemperatuur beschikbaar is voor de warmtepomp**, omdat de grootste warmtevraag in de winter is. Dit betekent dat het belangrijker is om in de zomer een zo hoog mogelijke temperatuur aan het net te leveren, dan om in het tussenseizoen een hoge COP te halen. Dit is namelijk een hoge COP bij een lage warmtevraag.
 - Een complicerende factor is dat de warmte die door de PVT geleverd moet worden niet de warmtevraag is, maar de warmte die aan de bronzijde (verdampers) van de warmtepomp geleverd moet worden. Deze hangt dus ook af van de COP. Omdat de COP weer afhangt van welke temperaturen bereikt kunnen worden, is het ontwerpen van de ideale setpoints een iteratief proces.

3.5 Gesimuleerde varianten en resultaten voor de gemiddelde woning

3.5.1 Korte inleiding varianten

Er zijn verschillende varianten doorgerekend, waarbij werd gevarieerd in warmtevraag en aantal panelen. Daarnaast is de COP bepaald voor drie afgiftetemperaturen: 35, 45 en 50°C. In werkelijkheid zal er gedurende het jaar een stooklijn gelden, dus deze temperaturen moeten als gewogen gemiddelde worden beschouwd.

Voor deze varianten zijn de benodigde setpoints bepaald zoals genoemd in stap 1c. Deze setpoints zijn zo gekozen dat er een jaarlijkse balans tussen aan het net geleverde en aan het net onttrokken energie ontstaat. Het betreft de volgende setpoints:

- De setpoint temperatuur (voor de uitgaande collector temperatuur) waarboven de PVT warmte wordt benut als bron voor de warmtepomp (= setpoint PVT → WP).
- De setpoint temperatuur (voor de uitgaande collector temperatuur) waarboven de PVT warmte wordt geleverd aan het wijk warmtenet. (= setpoint PVT → net)

Wanneer de setpoint temperatuur (voor de uitgaande collector temperatuur) lager is dan PVT → WP, wordt de warmte voor de warmtepomp aan het net onttrokken.

Er is een situatie doorgerekend voor een relatief goed geïsoleerde woning (met dus een lage warmtevraag voor ruimteverwarming) en een matig geïsoleerde woning (relatief hoge warmtevraag voor



ruimteverwarming). Dit is van belang omdat de COP ook afhangt van de verhouding tussen ruimteverwarming en tapwater. In Tabel 1 zijn de varianten weergegeven.

Tabel 1: gesimuleerde varianten:

Netto warmtevraag ruimteverwarming (kWh/jaar)	warmtevraag tapwater (incl. stilstandsverliezen boiler) (kWh/jaar)	Piek verwarmingsvermogen (kW)	Afgiftetemperatuur	Aantal panelen (van elk 2 m ²)	
6600	3000	ca 8		6 (12 m ²)	4 (8 m ²)
			35 °C	Variant 1	Variant 2
			45 °C	Variant 3	Variant 4
			50 °C	Variant 5	Variant 6
11000	3000	ca 10		9 (18 m ²)	7 (14 m ²)
			35 °C	Variant 7	Variant 8
			45 °C	Variant 9	Variant 10
			50 °C	Variant 11	Variant 12

3.5.2 Goed geïsoleerde woning met gemiddelde gebruik

Voor de goed geïsoleerde woning (komt ongeveer overeen met label B/C) zijn de regelingen en energieprestatie bepaald voor twee varianten:

- met 4 panelen (8 m²)
- met 6 panelen (12 m²),

De resulterende setpoints en COP zijn weergegeven in tabel 2.

Tabel 2: COP en setpoints bij de 'label B' woning, voor verschillende combinatie van aantal panelen en afgiftetemperatuur

Seizoens COP bij 'label B' woning. Totale netto warmtevraag 9.600 kWh/jaar (=35 GJ/jr)	afgiftetemperatuur	SCOP* met 4 PVT panelen	Setpoints PVT benutting		SCOP* met 6 PVT panelen	Setpoints PVT benutting	
			PVT →WP	PVT →net		PVT →WP	PVT →net
Warmtevraag 9.600 kWh/jaar (6600 ruimteverwarming + 3000 tapwater)	35 °C	6,0 (5,8)	6	16	6,7 (6,4)	10	20
	45 °C	5,6 (5,4)	6	16	6,0 (5,7)	10	20
	50 °C	5,5 (5,3)	6	16	5,8 (5,6)	10	20

* de eerste waarde is de COP voor alleen de warmtepomp; de waarde tussen haakjes is inclusief pompenergie

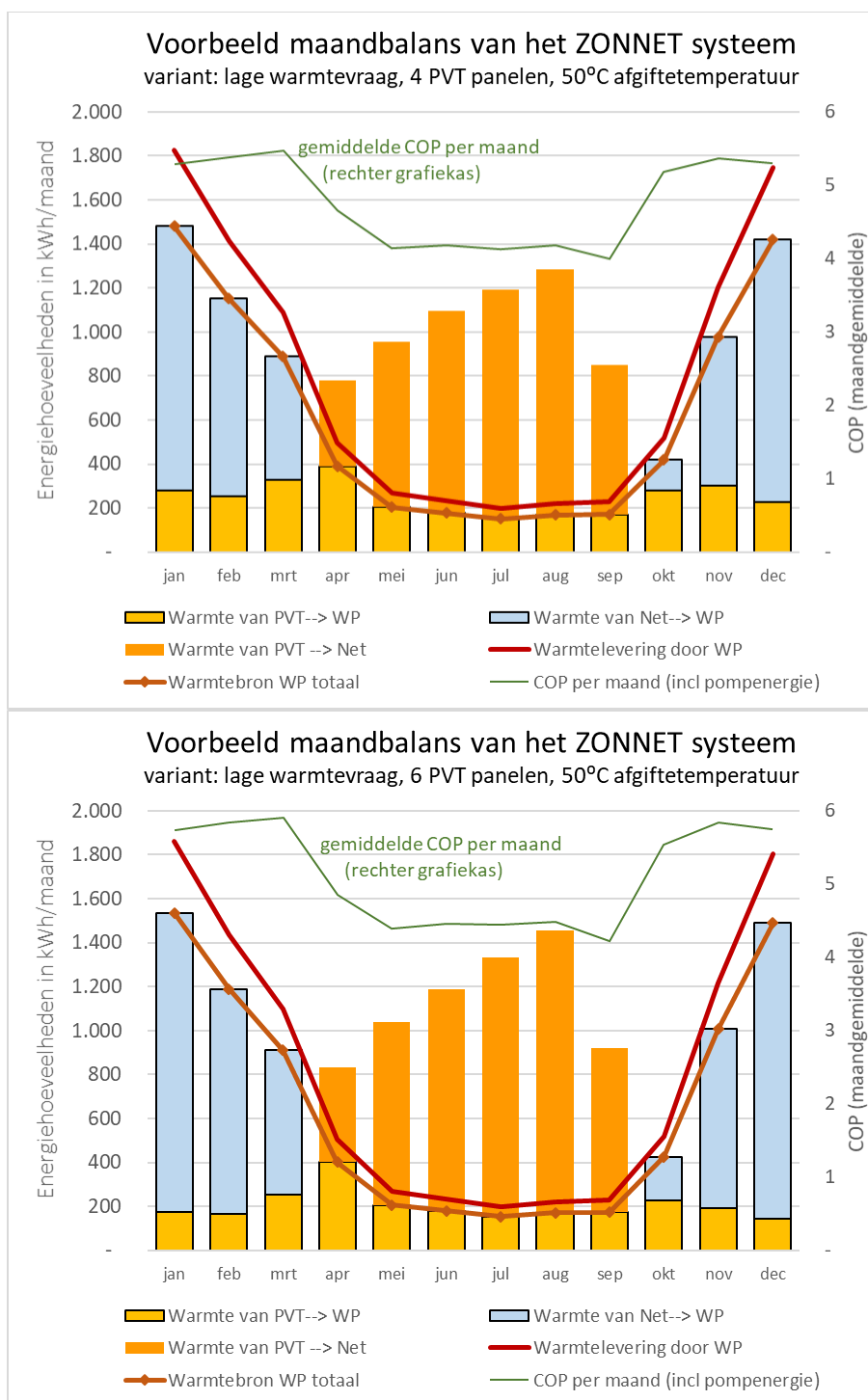
Uit de simulaties is gebleken dat voor de varianten met 4 panelen de setpoint temperatuur voor PVT benutting door de warmtepomp 6°C is, en de setpoint temperatuur voor warmtelevering aan het net bij 16°C. Voor de variant met 6 panelen is dat respectievelijk 10°C en 20°C. Door de hogere temperatuur aan het net wordt ook de geleverde temperatuur in de winter hoger, waardoor de COP waarde 0,7 hoger ligt bij een afgiftetemperatuur van 35°C en 0,3 hoger bij een afgiftetemperatuur van 50°C. De getoonde COP is de gecombineerde COP voor zowel ruimteverwarming als tapwater, en is hoger dan de COP voor een stand-alone situatie¹.

¹ Deze waarde ligt hoger dan voor de stand-alone situatie volgens de gelijkwaardigheidsverklaring van Triple solar (COP ruimteverwarming 5,5 bij een afgifte van <30°C en COP tapwater 3,6), en er zijn minder PVT panelen nodig. Daarentegen is natuurlijk wel een wijknetwerk en WKO's nodig.



3.5.3 Maandelijkse balans en maandelijkse gemiddelde COP

Twee voorbeelden (met 4 en 6 panelen) van een maandelijkse balans tussen de drie situaties (directe benutting van de PVT, onttrekking warmte uit het wijk-warmtenet, en levering van warmte aan het wijk-warmtenet), zijn getoond in onderstaande figuren, voor een woning met lage warmtevraag en een afgiftetemperatuur van 50°C.



Situatie met 4 PVT panelen | afgifte temperatuur 50°C.

Situatie met 6 PVT panelen | afgifte temperatuur 50°C.

Figuur 4: Balans tussen direct benutte warmte, aan het wijk-warmtenet onttrokken warmte en geleverde warmte.



Uit deze twee balansen kunnen de volgende inzichten worden afgelezen:

- De COP in de winter is hoger dan de COP in de zomer. Omdat hier de warmtevraag het hoogst is, leidt dit tot een hoge jaargemiddelde COP (SCOP). De hoge nettemperatuur in de winter is het resultaat van de temperatuurinstellingen van het systeem: Er is gekozen om de warmte uit de PVT bij een relatief hoge temperatuur terug te leveren aan het net, ten behoeve van de regeneratie van de WKO.
- Hoe meer panelen, hoe meer warmte bij hogere temperaturen geleverd kan worden, en dus hoe hoger de COP in zowel zomer als winter.
- Andersom: bij weinig panelen is het noodzakelijk de setpoint temperatuur voor teruglevering (wanneer de PVT warmte aan het net levert) te verlagen, omdat anders niet voldoende warmte wordt geproduceerd om het systeem jaarlijks in balans te houden.

De keuze voor aantal panelen bepaalt dus de setpoints en daarmee de COP. Daarnaast zijn kosten en beschikbaar dakoppervlak van belang voor de keuze. (zie verder paragraaf 3.8).

3.5.4 Woning met hogere warmtevraag (ander stookgedrag of minder geïsoleerde woning)

Ook voor een woning met een hogere warmtevraag zijn simulaties gedaan, om generieke uitgangspunten over het aantal panelen en setpoints te kunnen identificeren. Een hogere warmtevraag kan het gevolg zijn van ander stookgedrag (de spreiding van het werkelijke gebruik binnen een labelklasse is erg groot), of van een slechter geïsoleerde woning. Er is uitgegaan van een warmtevraag voor ruimteverwarming van 11.000 kWh/jaar en hetzelfde tapwatergebruik als bij de vorige variant (3.000 kWh/jaar). Het aandeel tapwater is in deze situatie dus kleiner dan bij de goed geïsoleerde gemiddelde woning. Dit is ook het grootste verschil tussen beide varianten en de reden waarom dit een andere seizoensCOP oplevert.

Ook voor deze variant is de zijn de setpoint temperaturen en de COP bepaald voor drie verschillende afgiftemperaturen: 35, 45 en 50°C. Bij een matig geïsoleerde woning is het mogelijk maken van een lage afgifte temperatuur natuurlijk een grotere uitdaging, en vereist dit maatregelen aan het afgiftesysteem. Dit ligt buiten de scope van het ZONNET onderzoek; er is alleen gekeken naar de COP indien deze afgifte temperatuur wordt geleverd.

Vanwege de hogere warmtevraag is uitgegaan van de volgende varianten:

- Met 7 panelen (14 m²)
- met 9 panelen (18 m²),

De resulterende setpoints en COP zijn weergegeven in tabel 2. Zoals te zien is liggen de setpoints iets lager dan bij de variant met lagere warmtevraag, wat ook resulteert in een lagere COP.

Tabel 3: COP en setpoints bij de 'label E' woning, voor verschillend combinatie van aantal panelen en afgiftemperatuur

Seizoens COP bij een woning met totale netto warmtevraag 14.000 kWh/jaar (ca 50 GJ/jr)	afgifte temperatuur	SCOP* met 7 PVT panelen	Setpoints PVT benutting		SCOP* met 9 PVT panelen	Setpoints PVT benutting (oC)	
			PVT →WP	PVT →net		PVT →WP	PVT →net
Warmtevraag 14.000 kWh/jaar (11.000 ruimteverwarming + 3.000 tapwater)	35 °C	6,0 (5,8)	7	16	6,1 (5,9)	8	18
	45 °C	5,5 (5,3)	7	16	5,8 (5,6)	8	19
	50 °C	5,2 (5,0)	7	16	5,3 (5,1)	8	18

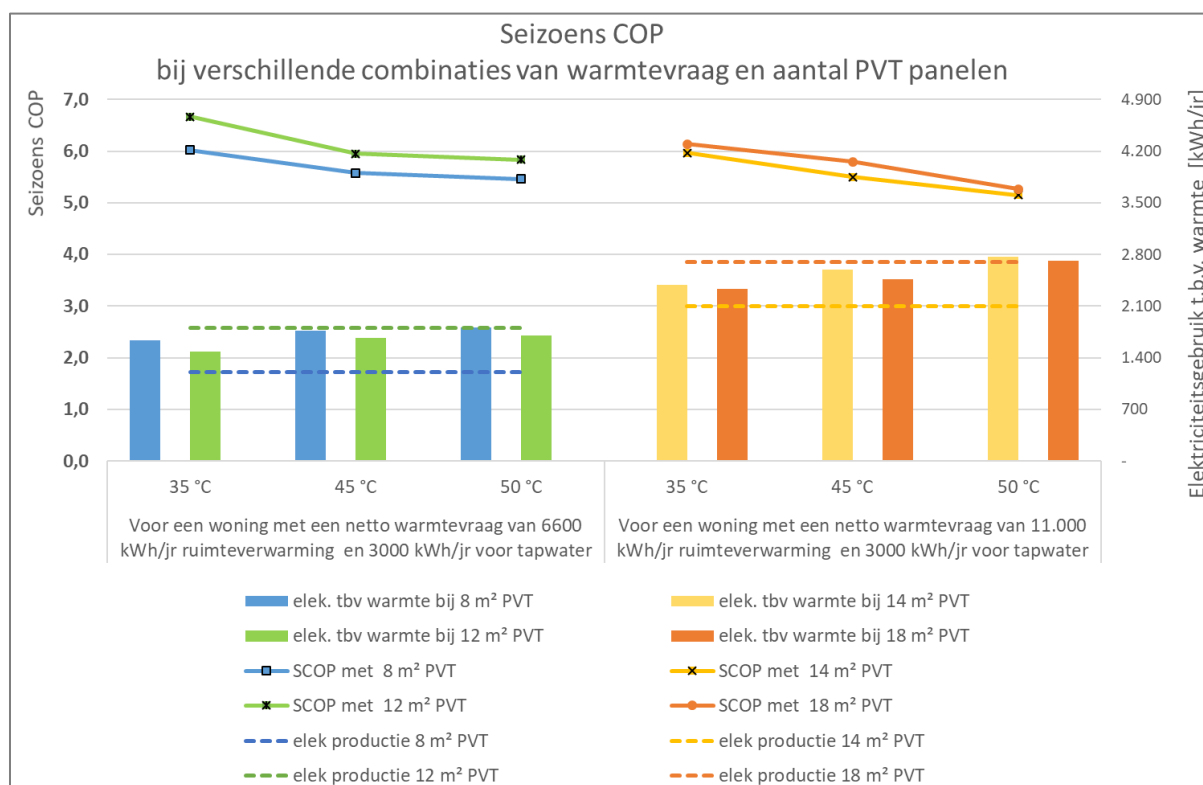
* eerste waarde is de COP voor alleen de warmtepomp; waarde tussen haakjes is inclusief pompenergie



3.5.5 Overzicht van de gesimuleerde varianten

In Figuur 5 zijn van alle gesimuleerde varianten de volgende gegevens getoond:

Voor een woning met een netto warmtevraag van:	6600 kWh/jr ruimteverwarming en 3000 kWh/jr voor tapwater	11.000 kWh/jr ruimteverwarming en 3000 kWh/jr voor tapwater
• De totale elektriciteitsbehoefte van de warmtepomp, t.b.v. ruimteverwarming en tapwater	<ul style="list-style-type: none"> elek. tbv warmte bij 8 m² PVT elek. tbv warmte bij 12 m² PVT 	<ul style="list-style-type: none"> elek. tbv warmte bij 14 m² PVT elek. tbv warmte bij 18 m² PVT
• De resulterende seizoens COP (Voor de combinatie van ruimteverwarming en tapwater)	<ul style="list-style-type: none"> SCOP met 8 m² PVT SCOP met 12 m² PVT 	<ul style="list-style-type: none"> SCOP met 14 m² PVT SCOP met 18 m² PVT
• Elektriciteitsproductie van de PVT panelen	<ul style="list-style-type: none"> elek productie 8 m² PVT elek productie 12 m² PVT 	<ul style="list-style-type: none"> elek productie 14 m² PVT elek productie 18 m² PVT



Figuur 5: Seizoens COP en elektriciteitsgebruik bij verschillende combinaties van warmtevraag, aantal m² PVT panelen en afgiftemtemperatuur, voor de gekozen gemiddelde referentiewoning.

Zoals te verwachten is in deze grafiek te zien:

- Hoe meer m² PVT panelen voor een gegeven warmtevraag, hoe hoger de COP
- Hoe lager de afgifte temperatuur, hoe hoger de COP

Daarnaast kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Bij beide varianten (lage en hoge warmtevraag) wordt energieneutraliteit voor warmte bereikt met het grotere aantal m² PVT panelen: zowel de benodigde warmte als de benodigde elektriciteit worden – op jaarbasis - in deze gevallen geleverd door de PVT panelen. Bij een lagere afgifte temperatuur is er zelfs meer elektriciteitsproductie dan elektriciteitsvraag voor verwarming.
- Met minder PVT kan ook energieneutraliteit bereikt worden, door extra PV panelen bij te plaatsen.



- De keuze zal uiteindelijk ook gebaseerd worden op het beschikbare dakoppervlak en de financiële beoordeling.
- Voor de woning met hogere warmtevraag liggen de COP's voor de situatie met 7 en 9 panelen dichterbij elkaar, mogelijk doordat de bijdrage van tapwater kleiner is dan bij de goed geïsoleerde woning met gemiddeld gebruik. In dit geval kan met 9 PVT panelen (18m²) energieneutraliteit worden gehaald bij een afgiftemtemperatuur van 50°C.
- Deze COP's zijn hoger dan COP's voor andere, meer bekende, warmtepomp configuraties. Ter vergelijking:
 - De COP voor een stand alone oplossing met PVT is volgens de gelijkwaardigheidsverklaring van Triple solar: COP ruimteverwarming 5,5 bij een afgifte van <30°C en COP tapwater 3,6;
 - De COP voor de NIBE F1255 warmtepomp² met een gesloten bron ligt rond de 5 voor ruimteverwarming op 45-55 °C, en op 2,65 voor tapwater;
 - De COP voor een Lucht/Water Warmtepomp³ voor ruimteverwarming op 45-55 °C ligt tussen de 3,5 en 4; de COP voor tapwater ligt rond de 2,2.

3.6 Van de woning naar de wijk: Energiebalans op wijkniveau

Het concept is toepasbaar om als wijk energieneutraal te kunnen zijn. De energiebalans gaat dus om de wijk gaat en niet om de woning. Dit betekent ook dat de energiebalans en de temperatuur setpoints niet per woning moeten worden bepaald, maar voor de gemiddelde woning, zoals beschreven in de vorige paragrafen. Vervolgens moeten de setpoints die gebaseerd zijn op de gemiddelde woning voor alle woningen worden toegepast om de jaarlijkse balans en maximale energieprestatie te kunnen garanderen.

Bijvoorbeeld: Als een bepaalde woning zeer weinig warmte vraagt en heel veel PVT panelen installeert, kan deze woning zijn eigen energieprestatie verhogen door de setpoint temperaturen hoger te kiezen. Hierdoor komt er echter te weinig warmte in het wijkstelsel, waardoor de balans in de wijk niet in orde is en de warmte uit de WKO tekort komt. Het optimaliseren op wijkniveau heeft voordelen voor het wijkstelsel als geheel. Er kunnen afspraken worden gemaakt over eventuele vergoeding aan mensen met een warmte- voerschot of met extra PVT panelen. Dit wordt verder besproken in deliverable 5.2.

3.7 Richtlijnen voor bepaling van benodigd aantal panelen, regelingen en te verwachten COP.

Elke wijk is anders, met een ander woningtype en andere gemiddelde warmtevraag en beschikbaar dakoppervlak. Om voor een wijk tot een optimale keuze voor aantal panelen per woning en de benodigde setpoints te komen, kunnen de stappen worden doorlopen zoals beschreven in paragraaf 3.1 t/m 3.4.

Op basis van de in dit project uitgevoerde simulaties zijn echter ook algemene kentallen ontwikkeld waarmee kan worden ingeschat hoeveel m² PVT paneel geïnstalleerd moet worden per kWh warmtevraag, en wat de benodigde regelingen en setpoints daarbij zijn. De regelingen worden altijd gebaseerd op de uitgaande collector temperatuur.

Op basis van de simulaties is bepaald **wat de directe warmte opbrengst uit de PVT is bij bepaalde setpoints** (waarbij de setpoints zijn bepaald om met een bepaald aantal PVT panelen een maximale COP te krijgen en tegelijk een thermische balans op jaarbasis te realiseren - zie §3.4). In principe leidt een **combinatie van m² PVT per kWh warmtevraag + de bijbehorende setpoints** dus tot een bepaalde COP.

² Volgens kwaliteitsverklaring <https://mijn.bcrq.nl/media/20201573GGRVWB1.pdf>

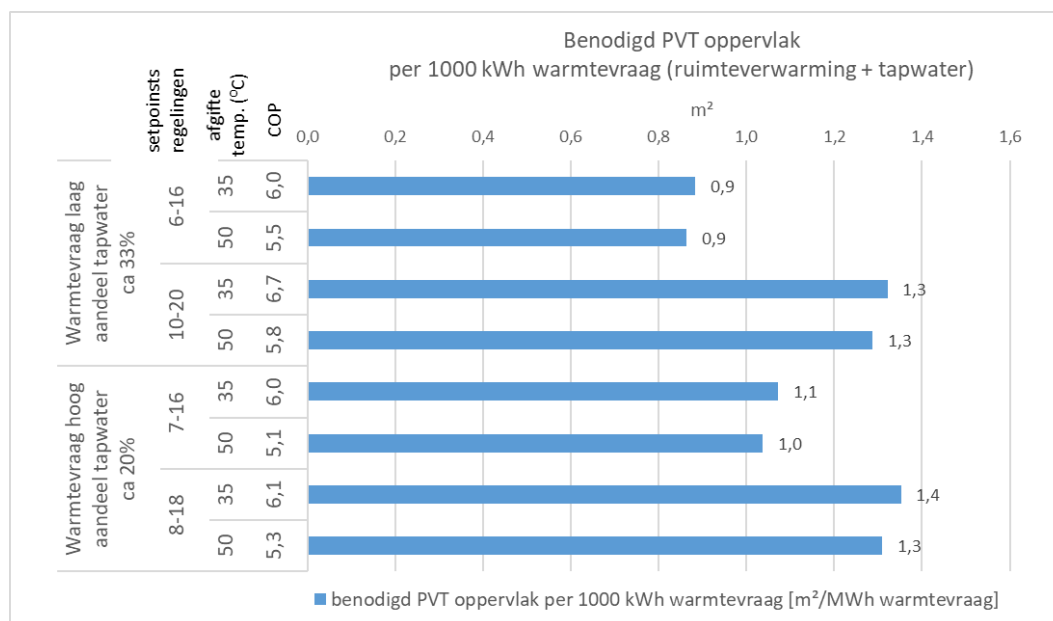
³ Volgens kwaliteitsverklaring <https://mijn.bcrq.nl/media/20181096GGRVWB.pdf>



De enige complicerende factor hierbij is in feite dat ook het **profiel van de warmtevraag er ook nog toe doet**: de COP en dus de setpoints zijn anders wanneer het maand of uur-profiel van de vraag er anders uitziet; bijvoorbeeld: als er veel meer warmtevraag in de winter is of juist meer in de zomer, en of er relatief veel of weinig tapwatervraag is. Daarom zijn de simulaties gedaan voor de al eerder beschreven twee situaties:

- Een warmtevraag met een hoog aandeel tapwater (ca 1/3^e van de totale warmtevraag is tapwater)
- Een warmtevraag met een laag aandeel tapwater (ca 1/5^e van de totale warmtevraag is tapwater)

Voor beide situaties kan worden bepaald hoeveel m² PVT nodig is, met welke setpoints, om een bepaalde COP te halen. Deze kentallen zijn weergegeven in Figuur 6.



Figuur 6: Kentallen benodigd PVT oppervlak per 1000 kWh warmtevraag, met de bijbehorende regel setpoints en resulterende COP (voor verschillende afgifte temperaturen).

3.7.1 Voorbeeld voor het gebruiken van deze richtlijnen:

Stel: Het systeem moet worden ontworpen voor een wijk waarvan de gemiddelde woning een warmtevraag heeft van 7.000 kWh/jr en een tapwatervraag van 3000 kWh (totaal 10 MWh). De tapwatervraag ligt dichtbij 1/3^e van de totale warmtevraag. De inschatting is dat deze woningen een afgiftetemperatuur van 45-55°C nodig hebben.

De ontwerpen kan nu kiezen tussen een systeem met 0,9 m² PVT/ MWh warmtevraag, dus in totaal 9 m² voor de gewenste 10 MWh, met setpoints 6-16 en een resulterende COP van 5,5, of een systeem met 1,3 m² PVT/ MWh warmtevraag, dus in totaal 13 m² voor de gewenste 10 MWh, met setpoints 10-20 en resulterende COP van 5,8. Bij een lagere afgifte temperatuur wordt het verschil tussen de lagen en hoge optie groter.

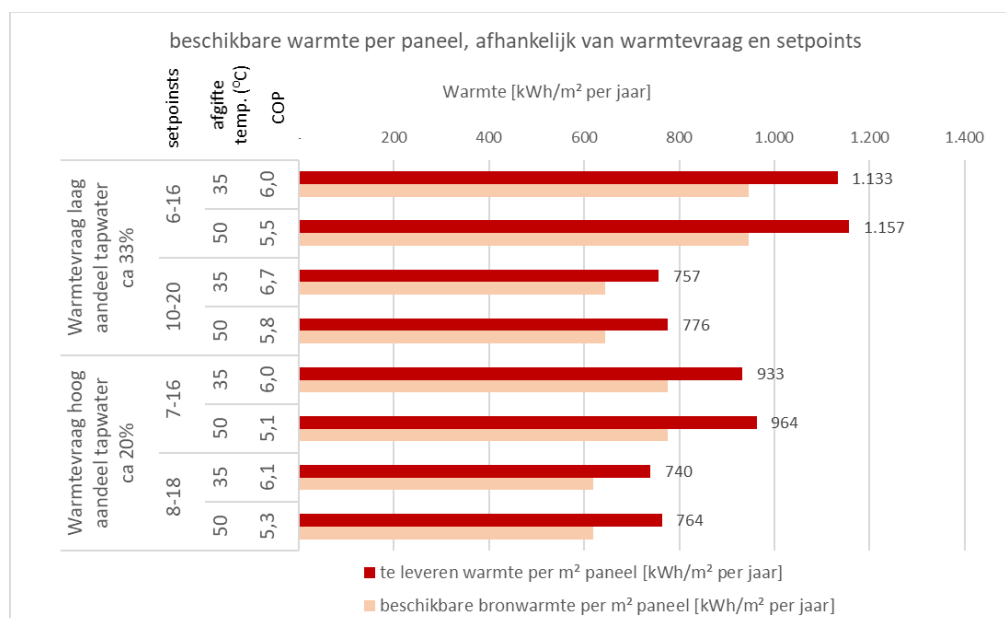
Ook uit deze grafiek is weer duidelijk: **hoe hoger temperatuur setpoints** waarop de warmte PVT wordt benut, **hoe hoger de COP**, maar ook: **hoe lager de opbrengst in kWh of GJ per jaar**. Er moeten dus meer PVT panelen geplaatst worden als je een hogere temperatuur wilt gebruiken.



3.7.2 Achtergrond en nadere toelichting

De kentallen uit Figuur 6 zijn bepaald aan de hand van de berekende warmte opbrengst van de PVT panelen in de verschillende situaties. De beschikbare warmte uit de PVT (die dus aan de bronkant van de warmtepomp geleverd wordt of aan het net, en daarna indirect aan de bronkant van de warmtepomp) is aan de hand van de COP's omgerekend naar te leveren warmte door de warmtepomp. Op basis daarvan kan per gekozen setpoint combinatie worden bepaald hoeveel PVT oppervlak nodig is om deze setpoints te kunnen realiseren bij een gegeven warmtevraag.

In onderstaande figuur (Figuur 7) zijn deze gegevens weergegeven: de beschikbare bronwarmte die door de PVT panelen per m² per jaar kan worden geleverd, en de te leveren warmte door de warmtepomp op basis van deze bronwarmte. Dit laatste getal is daarmee gelijk aan het omgekeerde van het benodigde aantal m² panelen per kWh warmtevraag (Figuur 6).



Figuur 7: beschikbare warmte per m² PVT paneel, afhankelijk van warmtevraag en setpoints

3.8 Resultaat: aantal gekozen PVT panelen en setpoints voor de regelingen

Dit hoofdstuk heeft laten zien hoe de regelingen bepaald zijn en ook voor nieuwe situaties bepaald kunnen worden, en heeft daarnaast richtlijnen gegeven voor het kiezen van aantal PVT panelen en regelingen op basis van de in dit project uitgevoerde simulaties. In het volgende hoofdstuk wordt de uitvoering van de regelingen en de eisen aan de afleverset besproken.

Zoals genoemd kan het aantal PVT panelen worden gekozen op basis van de gewenste COP en het beschikbare dakoppervlak. Een financiële beoordeling is mogelijk m.b.v. het TCO model uit deliverable 5. Uit het TCO model voor de case study blijkt dat het qua kosten niet veel uitmaakt, maar dat het grotere aantal PVT panelen zich zelf net terugverdient door de hogere COP en de opwek van eigen elektriciteit. Deze uitkomst hangt echter ook af van de input (o.a. elektriciteitsprijs e.d.). Het doel van energieneutraliteit en maximale eigen opwek wordt natuurlijk altijd beter behaald met een hogere COP. De optie met 6 panelen is dus financieel iets aantrekkelijker en vraagt daarnaast minder elektriciteit. Er wordt daarom uitgegaan van een voorkeursconfiguratie van 6 panelen per woning met een warmtevraag van ca 10.000 kWh per jaar.



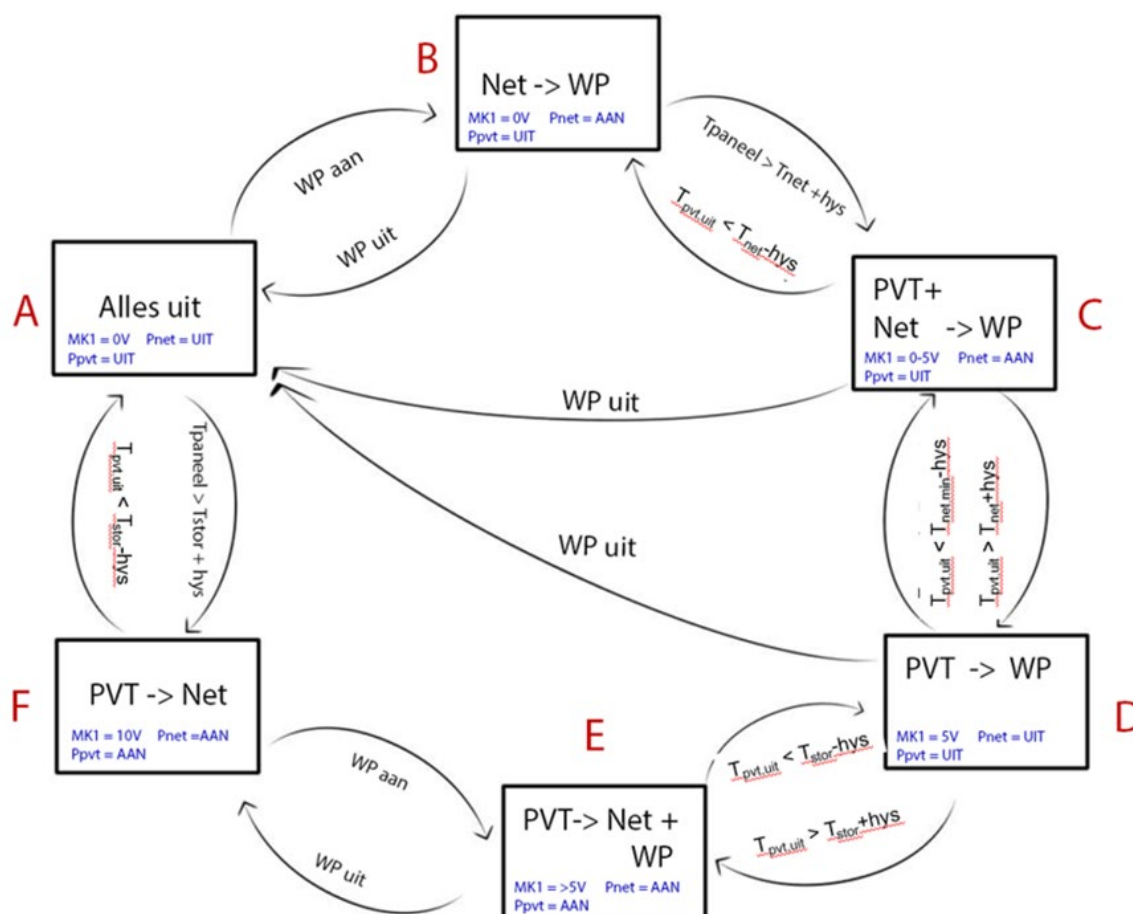
4 Stap 2: De specificaties van de regelingen

De regelingen moeten mogelijk worden gemaakt in de afleverset. Naast de drie basissituaties (PVT levert aan WP, net levert aan WP, PVT levert aan net) zijn er nog 3 extra situaties: een toestand waarbij alles uit staat, en twee mengsituaties (PVT+ net leveren aan WP, en PVT levert aan WP + net). Dit leidt tot de volgende toestanden:

Tabel 4: regeltoestanden en toelichting

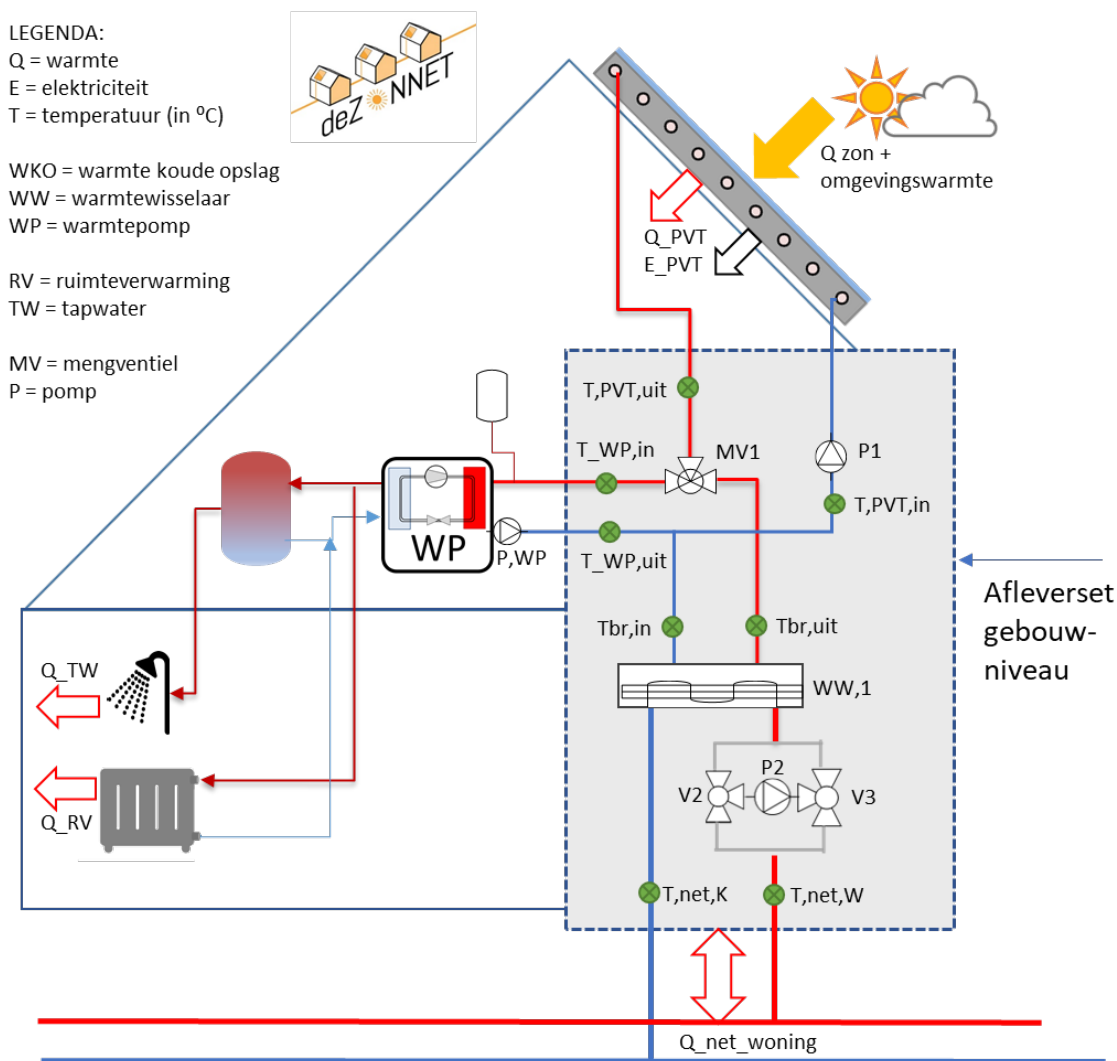
Toestand		Toelichting
A	Alles uit	
B	Net → WP	Alle bronwarmte voor de WP wordt aan het net onttrokken via de afleverset
C	PVT +net → WP	De bronwarmte voor de WP komt uit het net én de PVT
D	PVT → WP	De warmtepomp draait op alleen warmte uit de PVT
E	PVT → net + WP	PVT levert warmte aan zowel de WP als aan het net
F	PVT → net	De warmtepomp staat uit en de PVT levert warmte aan het net

De schematische weergave van de overgangen tussen regelstanden wordt weergegeven in Figuur 8.



Figuur 8: Schematische weergave van de overgangen tussen regeltoestanden

In Figuur 9 zijn de woninginstallatie en de afleverset weergegeven, met daarin de componenten die de regelingen moeten realiseren. De bijbehorende regelstanden staan in Tabel 5.



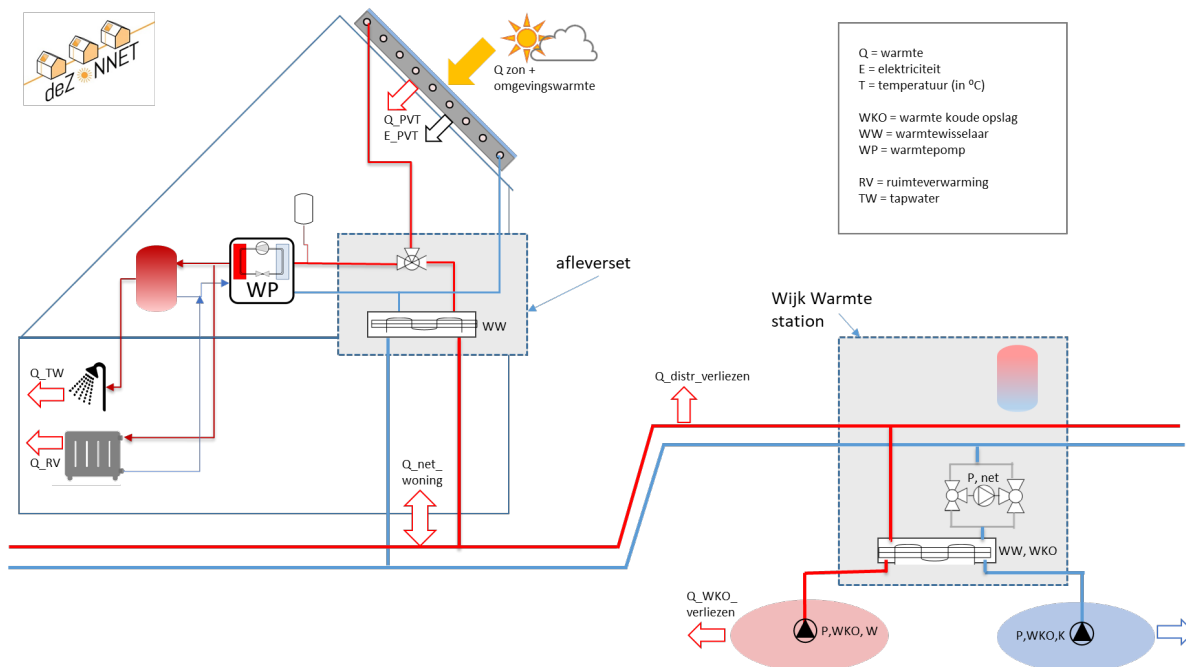
Figuur 9: schematische weergave woninginstallatie en afleverset waarin de regelingen plaatsvinden

Tabel 5: regeltoestanden en bijbehorende standen van pompen en mengkleppen

Toestand	Pomp warmtepomp (P,WP)	PVT pomp (P1)	Netpomp (P2)	Mengklep (MV1)	WW1 (TSA) (netlevering)
A	Uit	Uit	Uit	Uit	Uit
B	Aan	Uit	Aan	PV-T-zijde dicht	Warmte
C	Aan	Uit	Aan	Mengend	Warmte
D	Aan	Uit	Uit	Net-zijde dicht	Uit
E	Aan	Aan	Aan	Mengend	Koude
F	Uit	Aan	Aan	WP-zijde dicht	Koude

5 Stap 3: Wijk-Warmtenet ontwerp

Het totale ZONNET systeem is hier onder nogmaals weergegeven, in Figuur 10.



Figuur 10: schematische weergave totale zonnet Concept.

Voor het daadwerkelijk netontwerp moet het tracé en de leidingdiameters, en de locaties van WKO's en wijkwarmtestation worden bepaald. Dit gebeurt op basis van:

- 1) Een vraaggestuurd warmtenet
- 2) Piekvermogen
 - a. van de woninginstallaties, zowel voor warmtevraag als voor warmtelevering,
 - b. (gelijktijdig) piekvermogen in de wijk
- 3) Temperatuurniveaus
- 4) Beschikbare locaties voor WKO en technische ruimte in de wijk.
- 5) Het mogelijke tracé gezien de locatie

Voor de casuswijk (Ramplaankwartier) is een leidingontwerp uitgewerkt, zoals beschreven in deliverable 6.1. In deliverable 2.2 is een uitgebreide handleiding voor het maken van een leidingontwerp te vinden. In dit hoofdstuk wordt een aantal essentiële aspecten van dit ZONNET wijkontwerp kort samengevat, met de focus op de onderdelen waarin dit type net verschilt van een traditioneel warmtenet.

5.1 Een vraaggestuurd warmtenet

Een essentieel onderdeel van het systeem is dat het net geschikt moet zijn om gelijktijdig warmte op te nemen van de ene woning en warmte te leveren aan andere woningen, maar ook geschikt moet zijn om de warmtepiekvraag aan alle woningen te leveren in de winter en het warmtepiekaanbod op te vangen in de zomer.



Omdat het van de gebruiker afhangt of er een warmtevraag of warmteaanbod is, is er in feite geen aanvoer en geen retourleiding. Dit warmtenet is daarom niet geschikt voor een centrale pomp die de aanvoerleiding op druk houdt.

Het ontwerp is gebaseerd op aan vraag gestuurde levering van warmte: de pomp die de warmte aan de woning levert of afneemt bevindt zich in de afleverset van de woning, zoals te zien is in Figuur 9, pomp P2.

5.2 Piekvermogen

Het **piekvermogen van de warmtevraag van de woningen** kan worden gebaseerd op de **dynamische uurlijkse berekeningen** van de warmtevraag, zoals getoond in Figuur 3. Hierbij is het uitgangspunt dat de tapwaterbuffer wordt gevuld op het moment dat de warmtevraag van ruimteverwarming niet maximaal is; de tapwateraanvraag levert dus geen extra vermogensvraag op. Dit benodigde piekvermogen kan nog worden verlaagd door verschillende maatregelen, zoals het niet toepassen van nachtverlaging of het langer van tevoren aanzetten van de radiatoren.

Op wijkniveau zal niet iedereen tegelijk het maximale piekvermogen aan verwarming nodig hebben. Er kan worden gerekend met een **gelijktijdigheidsfactor**. Voor de gelijkzijdigheid afhankelijk van het aantal woningen (zonder piek-reducerende maatregelen) is wordt doorgaans gebruik gemaakt van de kentallen in Tabel 6, 'f' is hier de gelijkzijdigheidfactor.

n	f
1 - 5	1,00
6 - 13	0,95
14 - 25	0,90
26 - 40	0,85
41 - 60	0,80
61 - 85	0,75
86 - 115	0,70
116 - 155	0,65
156 - 205	0,60
> 205	0,55

Tabel 6: Gelijktijdigheidfactoren voor ruimteverwarming (ISSO-publicatie 39: Energiecentrale met warmte- en koudeopslag).

De piekwarmtelevering door de PVT-panelen op woningniveau wordt bepaald door het aantal benodigde panelen, de uitstroom-temperatuur en de oriëntatie van de panelen. Omdat de zon overal tegelijk schijnt geldt hier geen gelijktijdigheid. Wel kunnen we accepteren dat gedurende 1% van de tijd de geleverde PVT-temperatuur wat hoger zal zijn dan de ontwerpwaarde. Het maximale debiet kan dus gedimensioneerd worden op het maximale aanbod- vermogen van de PVT dat 99% van de tijd niet wordt overschreven. Verder hanteren we als uitgangspunt dat tijdens de PVT-pieklevering de woningen een verwaarloosbare warmtevraag hebben.

Voor de voorbeeldcasus betekent dit dat het warmtenet gedimensioneerd wordt op het piekvermogen van de in de zomer door de PVT geleverde warmte, die overeenkomt met het piekvermogen van de warmtevraag zonder gelijktijdigheid - voor de gemiddelde woning 7 kW. Mogelijkheden om deze teruglever-piek naar beneden te brengen zijn het slim sturen van de warm tapwater productie, waarbij het boiler vat wordt geladen op het moment dat de zon het hardst schijnt. Dit levert ook meteen een verlichting van het elektriciteitsnet op en de beste COP voor deze tapwaterproductie. Voor het netontwerp is echter uitgegaan van 7 kW vermogen per woning.



5.3 Temperatuurniveaus

De **temperaturen in het warmtenet** worden bepaald door de regelingen in de woninginstallatie, zoals beschreven in de voorgaande hoofdstukken, door **het gewenste temperatuurverschil** tussen warme en koude leiding, en door **de DT over de benodigde warmtewisselaars**.

- Het startpunt van het bepalen van de temperaturen in de leidingen is dus de **uitgaande collector temperatuur van de PVT** bij levering aan het net. Dit kan worden afgelezen uit de gekozen setpoints. Bij de gehanteerde gemiddelde woning (warmtevraag 9600 kWh/jaar) en 12 m² PVT is deze vastgesteld op 20°C (zie Figuur 6). Dit betekent dat voor het laden van de WKO de temperatuur uit de PVT panelen minimaal 20°C is. Bij de opties met 4 panelen wordt een lagere setpoint temperatuur gekozen van 16 °C (zie Figuur 6).
- In het systeem zijn **twee warmtewisselaars (WW)** opgenomen om het circuit in de woning hydraulisch te scheiden van het warmtenet, en om het warmtenet hydraulisch te scheiden van de koppelleidingen van de WKO (zie Figuur 10: WW, afleverset, en WW, WKO).
 - De DT over de warmtewisselaar van de afleverset is volgens opgave van de leverancier (Fortes Energy systems) 1,75K; de DT over de warmtewisselaar bij de WKO is maximaal 2 K.
 - Er wordt dus van uitgegaan dat aan dat bij een uitgaande collector temperatuur van 20°C, de WKO geladen wordt met 16°C. Wanneer in de zomer de WKO wordt ontladen, is 14°C in het net beschikbaar.
- Ten slotte moet de **gewenste DT tussen koude en warme leiding worden bepaald**. Een grote Delta T verhoogt het vermogen van het warmtenet, maar verlaagt de efficiëntie van de warmtepomp. Als optimum is gekozen voor een ontwerp DT van 7 K tussen de koude en de warme leiding.

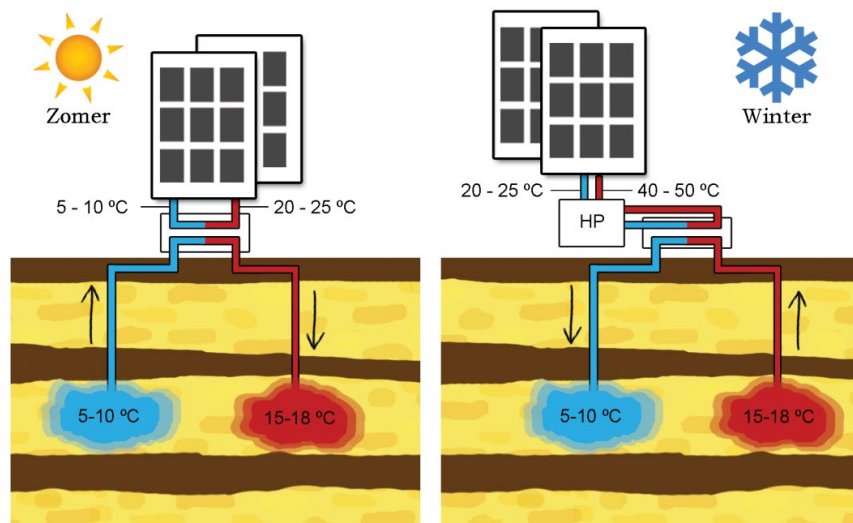
Dit betekent voor de temperatuurniveaus in het net het volgende:

	Optie 1 6 panelen	Optie 2 4 panelen
Startpunt: de uitgaande PVT collector temperatuur voor levering aan het net:	20°C	16°C
Temperatuur in de warme leiding in de zomer	18°C	14°C
Temperatuur in de koude leiding in de zomer	11°C	7°C
Temperatuur in de warme leiding in de winter	14°C	10°C
Temperatuur in de koude leiding in de winter	7°C	4°C

5.4 Beschikbare locaties voor WKO en technische ruimte in de wijk.

Een open Warmte Koude Opslag (WKO), ook wel Open Bodem Energie Systeem (OBES) of seizoensopslag genoemd, slaat warmte en koude op in grondwater (zie Figuur 11). Dit grondwater bevindt zich in watervoerende zandlagen in de bodem die ca 50 tot 250 m diep kunnen zijn. Afhankelijk van wat het distributiecircuit nodig heeft, wordt er water uit de warmte of koude bron omhoog gepompt. Via een warmtewisselaar wordt de warmte of koude afgegeven aan het distributiecircuit. Er zijn twee soorten open WKO systemen: een monobron, waarbij er één boring is en de koude en de warmte 'bel' verticaal gescheiden zijn door bijvoorbeeld kleilagen; en een doublet, waarbij de koude en de warmt bron op een andere plek geboord worden en worden verbonden met een koppelleiding.

Een eerste stap is het bepalen van de bodemgeschiktheid voor WKO en de vraag of een open WKO is toegestaan. Hiervoor kan als eerste indicatie de website www.wkool.nl worden geraadpleegd.



Figuur 11: Open WKO system (doublet) (bron: Martin Bloemendal, 'The Hidden side of Cities', 2018)

5.4.1 Benodigd vermogen en opslagvolume

Voor het ZONNET concept moet de WKO in staat zijn de maximale warmtevraag in de winter te leveren (de PVT panelen leveren dan namelijk geen warmte) en het maximale warmteaanbod in de zomer te kunnen opnemen bij een ontwerp DT tussen koude en warme bron van 7K. Op basis van het totale benodigde vermogen van de wijk en het maximale debiet van de WKO kan dus bepaald worden hoeveel WKO's nodig zijn voor in een wijk.

Het maximale debiet van een monobron is 50 m³/h en het maximale debiet van een doublet is ca 300 m³/h, hoewel ook hogere debieten voorkomen. Op basis van een DT van 7K, kan dus met een doublet een vermogen van maximaal ca 2,4 MW worden gerealiseerd (Vermogen = $m \times c_p \times \Delta T = 83 \text{ l/s (300 m}^3\text{/h)} \times 4,2 \times 7 = \text{ca } 2,4 \text{ MW}$). Daarnaast moet het benodigde opslagvolume voldoende zijn. Op basis van het benodigde opslagvolume en de geschikte zandlaag wordt de straal van de bron bepaald. Als voorzorgmaatregel wordt in een wijk (met meerdere clusters) vaak een extra doublet geplaatst, voor als er één in onderhoud moet.

5.4.2 Bronlocatie en technische ruimte

Tot slot moet er natuurlijk voldoende openbare ruimte beschikbaar zijn voor het slaan van een put en de benodigde technische ruimte voor de warmtewisselaar en eventuele buffer. De bronnen en de benodigde technische ruimte liggen bij voorkeur dichtbij de aan te sluiten woningen. De bronnen van het tegenovergestelde type (warm en koud) moeten minimaal 2x maar idealiter 3x de thermische straal afstand van elkaar staan, dezelfde type bronnen moeten 0.5-1x de thermische straal afstand tot elkaar worden geplaatst (Bloemendal, Jaxa-Rozen, & Olsthoorn, 2018). Bij voorkeur liggen bronnen met eenzelfde temperatuur in de richting van de grondwaterstroming.

5.5 Leidingontwerp

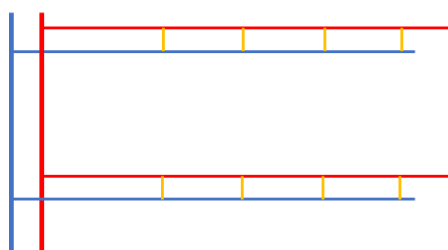
Het ZONNET systeem bestaat uit twee parallelle pijpleidingen, één met lagere temperatuur en één met hogere temperatuur. Bij het ontwerpen van het distributiecircuit dient het aantal meters pijpleiding



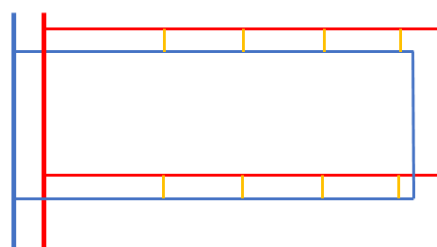
zoveel mogelijk beperkt te worden. Dit is voordelig voor de kostenefficiëntie en de energetische efficiëntie. Voor de aanleg, het onderhoud en reparatie van het leidingsysteem is toegankelijkheid van de leidingen van groot belang. Bijvoorbeeld door ze onder een stoep te leggen. In verband met lekkage is het nuttig om verschillende secties van het systeem te kunnen afsluiten. Een wijk kan daarom ook in clusters worden verdeeld, elk verbonden met minstens één WKO doublet.

- Het leidingontwerp kan een **vertakte of vermaasde netwerkstructuur** met ringen hebben vanuit de WKO installaties, zie Figuur 12. Als het leidingontwerp volledig vertakt is en er treedt een lekkage op aan het begin van een tak, dan zijn alle woningen op die tak afgesloten van het netwerk. In een vermaasde structuur kan de warmte/koude nog via de andere kant geleverd worden.

Vertakte netwerkstructuur



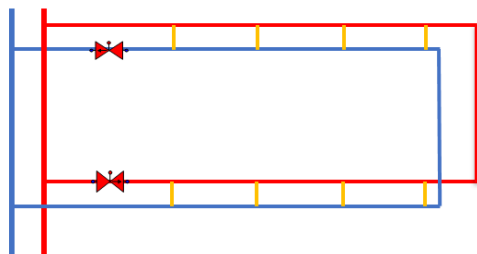
Vermaasde netwerkstructuur



Figuur 12: Twee veelvoorkomende netwerkstructuren

- Omdat in de winter het volledige vermogen vanuit de centrale WKO wordt geleverd, neemt in de pieksituatie in de winter bij zowel de vertakte netwerkstructuur als de vermaasde netwerkstructuur de **ontwerpdrukval toe naarmate de afstand tot de WKO toeneemt**. In een vermaasd netwerk kan de drukval voor de decentrale circulatiepompen (in de afleversets) gelijk gemaakt worden aan de van een vertakt netwerk door twee geschikte klepsluitingen. Hierdoor wordt de vermazing omgevormd tot een zogenaamde Tichelmann-ring, zie Figuur 13. Het voordeel van zo'n Tichelmann-ring is dat de ontwerpdrukval voor alle decentrale distributiepompen gelijk is, maar het nadeel is dat de totale transportafstand in warme en koude leiding voor alle aansluitingen even lang is als de transportafstand van de verste aansluiting in de ring. Met Tichelmann-ringen zullen de leidingdiameters groter gekozen moeten worden ten opzichte van een vermaasde netwerkstructuur.

Tichelmann ring



Figuur 13: Optimalisatie van een vermaasde netwerkstructuur, tot een Tichelmann ring

- De **specifieke configuratie** voor een wijk kan worden gemaakt aan de hand van een kaart van de wijk en een gespecialiseerd softwarepakket. Voor dit project is gespecialiseerd softwarepakket WANDA gebruikt. Het belangrijkste criterium voor een start-ontwerp is de totale leidinglengte van het systeem: hoe korter de totale leidinglengte, hoe lager de investeringskosten.
- Nadat de minimale hydraulische configuratie bepaald is, kunnen op strategische locaties lussen gecreëerd worden om de betrouwbaarheid en leveringszekerheid te verhogen, zodat bij onderhoud

of lekkage een groot deel van de wijk nog van warmte kan worden voorzien. De aanwezigheid van lussen zorgt ook voor kleinere drukvallen voor de netwerzijdige WKO-pompen en pompen in de afleversets van de woningen (P2 in Figuur 9).

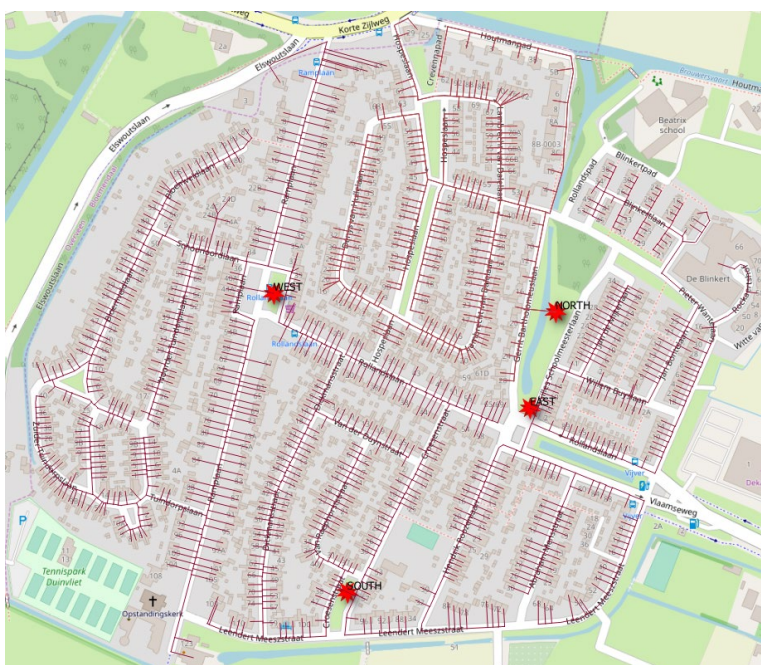
5.5.1 Leidingdiameters

De benodigde diameter van leidingen in het distributiecircuit wordt voornamelijk bepaald door het piekvermogen van het cluster en de warmtelevering van de PVT panelen. Per woningen zijn tijdseries bepaald van het warmtevermogen en debiet uit de PVT panelen, op basis van een standaard klimaatjaar, en gemiddeld aantal panelen en de relevante oriëntatie. Dit geeft een indicatie van de maximale hoeveelheid warmte die terug geleverd moet kunnen worden aan het distributienet. Het vermogen met bijbehorend debiet wordt vervolgens gebruikt in rekensoftware om de leidingdiameters te bepalen.

De minimale externe diameter van de leidingen is 25mm. Bij kleinere diameters wordt een leiding te zwak en kunnen te makkelijk scheuren ontstaan door bijvoorbeeld graafactiviteiten in de buurt.

5.5.2 Voorbeeld netontwerp voor een woonwijk met rijtjeswoningen

Voor de case study wijk is met het gespecialiseerde software programma WANDA een netontwerp gemaakt. Dit betreft een wijk met ca 1200 aansluitingen, grotendeels rijtjeswoningen met relatief diepe voortuinen (gemiddeld ca 6 m) en enkele appartementen (zie verder deliverable 6.1). Het netontwerp voor de wijk en de bijbehorende totale leidinglengtes per diameter zijn weergegeven in Figuur 14 en Tabel 7. De benodigde leidinglengtes per diameter voor deze wijk kunnen als referentie voor vergelijkbare wijken worden gebruikt. Voor woonwijken met rijtjeswoningen zonder voortuin kan per aansluiting 6 meter minder worden gerekend voor de leidingen met nominale diameter van 25 mm.



Figuur 14 Netontwerp Voorbeeldwijk

Nominale Diameter	Lengte totaal	Lengte per aansluiting
[mm]	[m]	[m]
25	16.298	13,58
40	457	0,38
50	618	0,52
63	1.039	0,87
75	681	0,57
90	823	0,69
110	1.033	0,86
125	561	0,47
140	346	0,29
160	534	0,45
180	258	0,22
200	66	0,06
225	175	0,15
250	32	0,03

Tabel 7: Benodigde minimale leidinglengte (enkelvoudig, alleen warm) per diametermaat

Het ontwerp zoals getoond in Figuur 14 betreft de minimale hydraulische configuratie. Dit ontwerp kan nog verder worden geoptimaliseerd door het creëren van verbindingen of lussen tussen losse uiteinden om de leveringszekerheid te verhogen.

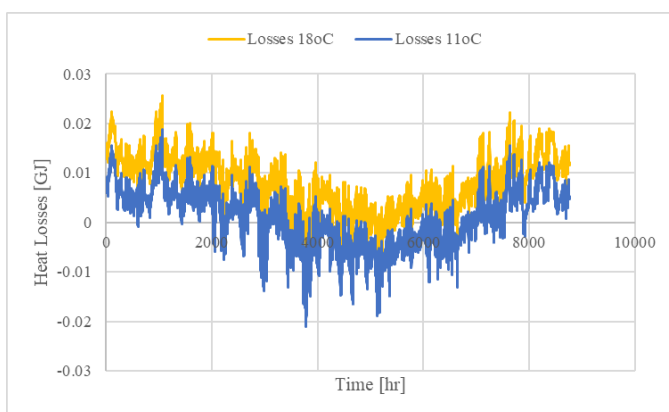


5.6 Leidingen ZONNET concept isoleren: ja of nee?

De temperaturen in het deZONNET leidingnet zijn niet ver boven de gemiddelde temperatuur in de ondergrond, dus de vraag kan opkomen of de leidingen wel of niet geïsoleerd moeten worden. Door Deltares is voor de voorbeeldwijk het warmteverlies bepaald voor de warme en de koude leidingen (respectievelijk 18°C en 11°C). **Deze berekening toont aan dat de warmte leiding in elk geval geïsoleerd moet worden:** een ongeïsoleerde leiding leidt tot een distributieverlies van bijna 13 GJ per aansluiting per jaar. Dit zou betekenen dat veel meer PVT geïnstalleerd moet worden om deze verliezen te compenseren.

5.6.1 Achtergronden berekening

Het warmteverlies is berekend voor geïsoleerde leidingen op basis van NEN 13941-A1 (2010). Voor ongeïsoleerde leidingen is dezelfde methode toegepast, maar dan uiteraard zonder de isolatielaag tussen de watervoerende leiding en de ondergrond. Als conservatieve aanname wordt de temperatuur van de warmteleidingen het hele jaar door gelijk gehouden aan de zomerse ontwerpwaarden (18/11°C). De temperatuur aan het maaiveld varieert op basis van hetzelfde klimaatjaar als voor de PVT-berekeningen is gebruikt. De warmteverliezen gedurende het klimaatjaar zijn weergegeven in Figuur 15.



Figuur 15: Warmteverliezen van geïsoleerde leidingen in een cluster van 243 woningen gedurende het klimaatjaar

De koude leidingen hebben in de zomer een negatief verlies; dit betekent dat deze leidingen wat zullen opwarmen. De warme leidingen zijn (uiteraard) bepalend voor het totale verlies. 57% van het totale verlies treedt op in de DN25 leidingen; hoofdzakelijk de huisaansluitingen.

Tabel 8: Warmteverlies warmtenetvoorbeeldwijk, cluster Oost (totaal 240 woningen)

	Warmteverlies warme leidingen	Warmteverlies koude leidingen	Totaal warmteverlies	Aantal woningen	Verlies / woning
	[GJ / jr]	[GJ / jr]	[GJ / jr]	[-]	[GJ / jr / woning]
met isolatie	206	25	231	243	0.95
zonder isolatie	2784	340	3124	243	12.9

Het totale warmteverlies van de geïsoleerde leidingen bedraagt minder dan 6% van de 15 GJ/woning die vanuit het warmtenet geleverd wordt. Als we rekening houden met de temperatuurdaling van de leidingen naar 14/7°C in de winter, dan daalt het verlies van de geïsoleerde leidingen met 30% naar 0,66 GJ/woning. Als de leidingen ongeïsoleerd aangelegd worden, dan zullen de temperaturen in de leidingen zeker niet gehandhaafd kunnen worden. Het berekende verlies (weliswaar conservatief) van 13 GJ/woning is bijna even groot als de warmtelevering vanuit het warmtenet (15 GJ/woning). Het is technisch niet haalbaar om veel meer panelen op de daken te leggen. Daarom moeten de warme leidingen in ieder geval geïsoleerd aangelegd worden.

6 Kosten en marktmodellen

6.1 TCO model

Door Greenvis is een Total Cost of Ownership (TCO) model opgezet voor het ZONNET concept, waarbij de volgende concepten worden vergeleken:

- De huidige situatie: Een slecht geïsoleerde woning (label F) met een HR ketel op aardgas
- een geïsoleerde woning (label B/C) met een HR ketel op aardgas
- een geïsoleerde woning (label B/C) aangesloten op het ZONNET concept

Het TCO model bestaat uit een inschatting van de investeringskosten, de jaarlijkse onderhoudskosten en energielasten. In de volgende paragrafen wordt nader ingegaan op de uitgangspunten en de gehanteerde investeringskosten. Vervolgens worden de varianten vergeleken onder deze basisparameters.

Omdat in werkpakket 4 (Stakeholders en participatie) als uitgangspunt is gesteld dat meedoen aan het ZONNET concept 'Haalbaar en betaalbaar' moet zijn voor de bewoners, is vervolgens onderzocht onder welke voorwaarden het concept haalbaar en betaalbaar wordt. Het uitgangspunt hierbij is dat de gemiddelde jaarlijkse kosten over 30 jaar niet meer mogen bedragen dan de huidige lasten voor energie, onderhoud en investeringen in bestaande systemen. De resulterende TCO met de voorwaarden waarmee het concept haalbaar en betaalbaar wordt, is toegelicht in paragraaf Conclusie: onder welke voorwaarden is het ZONNET concept betaalbaar?6.2.

6.1.1 Uitgangspunten en basisvariabelen TCO model

In werkpakket 4 (Stakeholders en participatie) is vastgesteld dat voor de case study de wens is om het systeem onder eigen regie te realiseren en exploiteren: *'We willen niet afhankelijk worden van een commerciële partij maar kiezen voor een eigen warmte coöperatie. Waar mogelijk in nauwe samenwerking met de gemeente.'* Om deze reden is ervoor gekozen de investeringen mee te nemen als kapitaallasten. Het rentepercentage dat is gehanteerd is vergelijkbaar aan het niveau dat particulieren betalen voor het nemen van verduurzamingsmaatregelen.

Er is gekozen voor een businesscase neutrale TCO: alle kosten van de varianten (investeringen, onderhoud en energiekosten) worden bij elkaar opgeteld en er is nog geen verdeling gemaakt tussen welke partij wat betaalt.

Voor het model zijn de volgende kernvariabelen als basis gehanteerd:

- Verwachte **inflatie**, gemiddeld / jr: 2,0%
- **Rentevoet**⁴
 - Woningmaatregelen (isolatie + installaties): 1,6%
 - Wijkmaatregelen: 1,3%
- **Afschrijvingstermijn**
 - van wijkmaatregelen en niet-bewegende woningmaatregelen: 30 jaar
 - Installaties (warmtepomp, WTW unit, omvormer, afleverset): 15 jr
 - PVT panelen: 25 jr

⁴ Rente voor een duurzaamheidslening is 1,6%. (<https://www.svn.nl/rentetarieven#duurzaamheidslening>). Verder vraagt de BNG 0,9% aan gem Haarlem, die vraagt 0,4 opslag als vergoeding voor diverse garanties zoals vollooprisico.



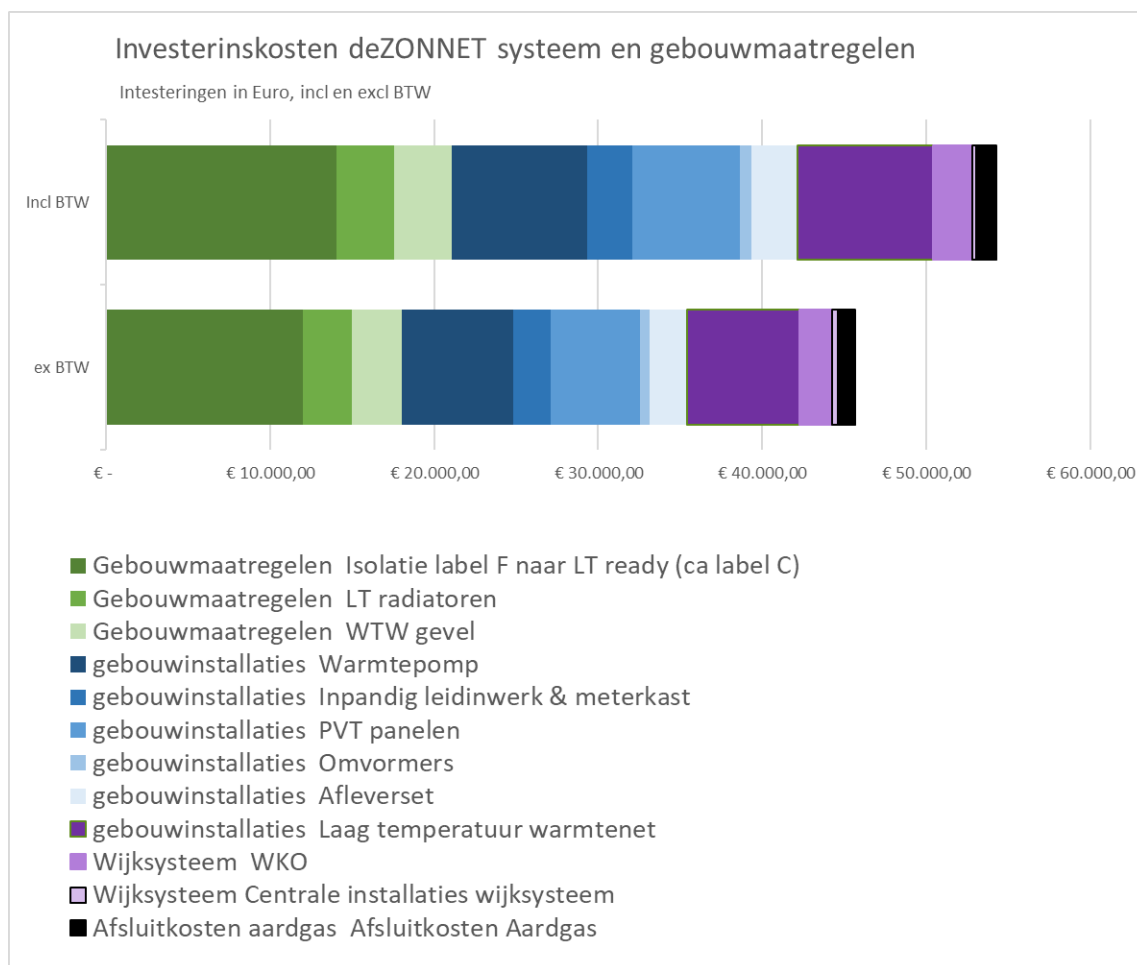
- Verwachte **prijsstijging gas**, gemiddeld / jr excl. inflatie: 2,0% (eerste 15 jaar, daarna niet meer)
- Verwachte **prijsstijging electriciteit**, gemiddeld / jr in komende 15 jr, ex. inflatie: 0%
- **Participatiegraad** na de vollooptijd: 75,0%
- **Vollooptijd** per wko doublet (vollooptijd is tijd benodigd tot bereiken participatiegraad): 4 jaar
- Voor elektriciteitsgebruik is uitgegaan van **saldereen**.
- **Onvoorziene kosten**: 5% voor woning/isolatie maatregelen en 10% voor de ZONNET investeringen.

Belangrijke kernvariabelen voor de uitkomsten van het model zijn de investeringskosten, de rentevoet (rente die voor een lening van de investering betaald moet worden), participatiegraad en verwachte prijsstijging van gas. De invloed van deze variabelen wordt verderop weergegeven.

6.1.2 Gehanteerde kosten per onderdeel

Door de consortiumpartners is op basis van het ontwerp voor de casus Rampaankwartier (zie o.a. Figuur 14) een inschatting van de kosten gemaakt. Op basis van die investeringskosten, aangevuld met kosten voor energiegebruik en onderhoud, is het TCO model gemaakt. Voor de berekening zijn verder de kernvariabelen zoals genoemd in de vorige paragraaf zijn gehanteerd.

In onderstaande figuur en de daarop volgende tabel zijn de investeringskosten per onderdeel getoond.



Figuur 16: Investeringskosten ZONNET systeem voor de case study Ramplaankwartier

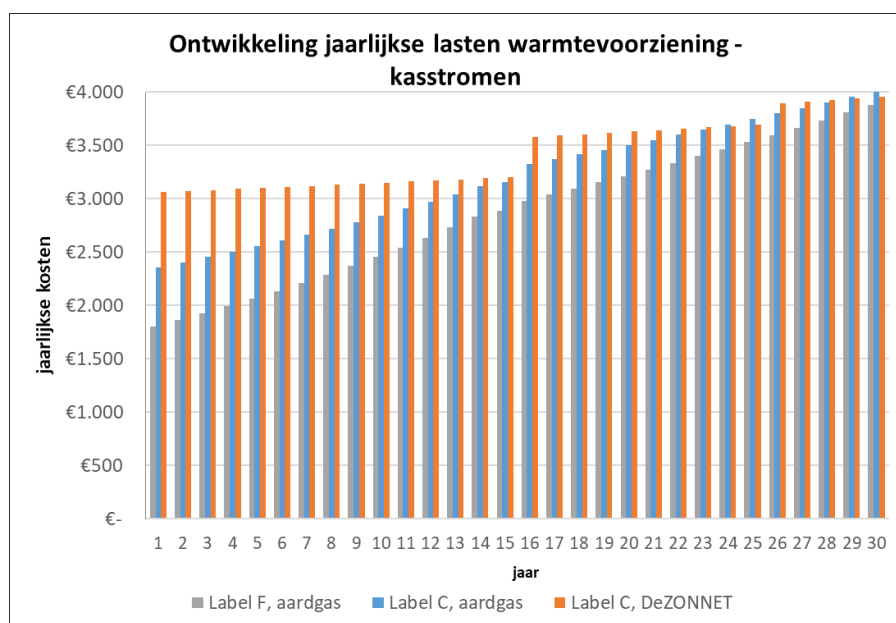
Tabel 9: Investeringskosten per gemiddelde woning, gebaseerd op het ontwerp voor de casus Ramplaankwartier

Investeringen		ex BTW	Incl BTW
Besparingsmaatregelen	label F naar LT ready (ca label C)	€ 12.000,00	€ 14.040,00
	LT radiatoren	€ 3.000,00	€ 3.510,00
	WTW gevel	€ 3.000,00	€ 3.510,00
gebouwinstallaties	Warmtepomp	€ 6.840,00	€ 8.276,40
	Inpandig leidingerk & meterkast	€ 2.280,00	€ 2.758,80
	PVT panelen	€ 5.430,00	€ 6.570,30
	Omvormers	€ 570,00	€ 689,70
	Afleverzet	€ 2.300,00	€ 2.783,00
Gebiedsmaatregelen	Laag temperatuur warmtenet	€ 6.850,00	€ 8.288,50
	WKO	€ 2.000,00	€ 2.420,00
	Centrale installaties wijksysteem	€ 350,00	€ 181,50
Afsluitkosten aardgas	Afsluitkosten Aardgas	€ 1.050,00	€ 1.270,50

Voor de TCO berekeningen is voor alle investeringen van uitgegaan dat hiervoor een annuïtaire lening wordt afgesloten tegen de rentetarieven die hierboven benoemd zijn.

6.1.3 Uitkomsten TCO model met basis invoer parameters

Het TCO model berekent de jaarlijkse kasstromen op basis van de bovengenoemde uitgangspunten. In Figuur 17 zijn deze jaarlijkse kosten weergegeven.



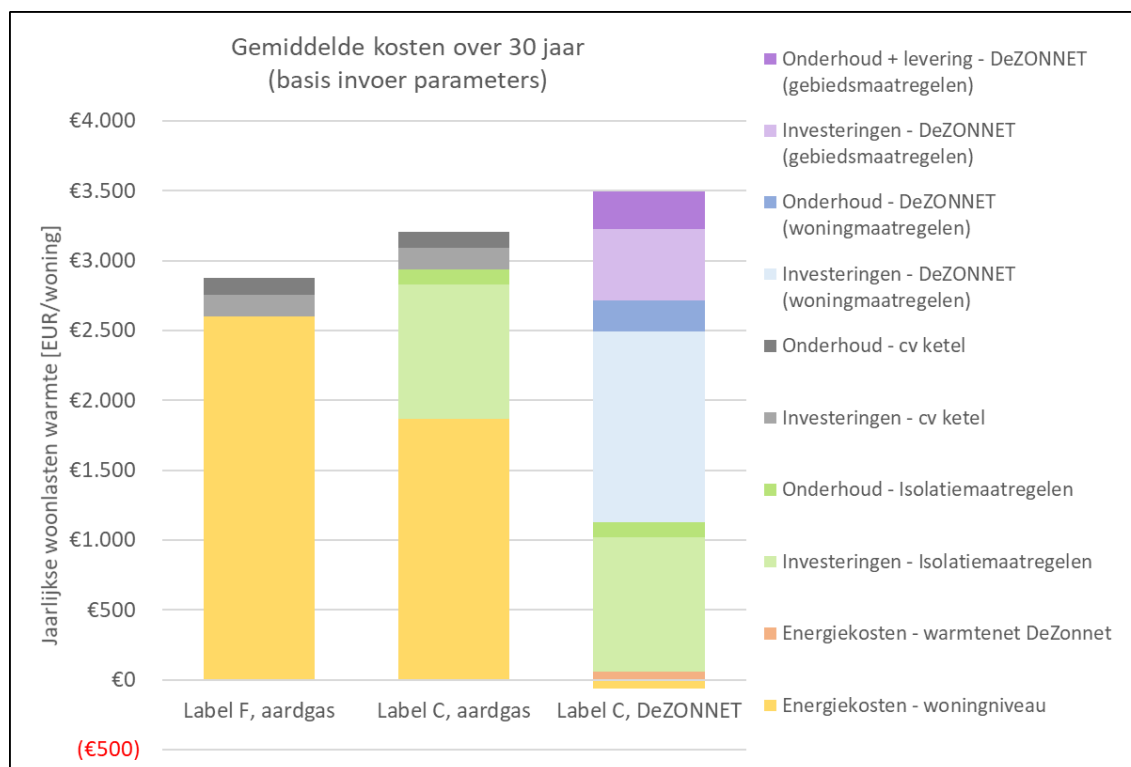
Figuur 17: jaarlijkse kasstromen van de verschillende warmte-opties, waaronder deZONNET.

Zoals te zien is, is de ZONNET oplossing de eerste jaren duurder dan de opties op aardgas. Doordat de aardgasprijzen stijgen (inflatie 2% + extra stijging van 2%) lopen de kosten van de opties o.b.v. aardgas op, terwijl de kosten van de ZONNET optie nauwelijks stijgen, aangezien deze bijna geheel uit aflossing van



een annuïtaire lening bestaan. Hierdoor worden de opties op aardgas tegen het einde van de looptijd duurder dan de ZONNET variant.

Om de betaalbaarheid te beoordelen is besloten naar de gemiddelde over 30 jaar te kijken. Deze gemiddelde kosten – op basis van de basis invoer parameters - is weergegeven in Figuur 18. Hierbij zijn de kosten opgesplitst in de verschillende onderdelen: annuïtaire aflossing van investeringen, onderhoud en energiekosten.



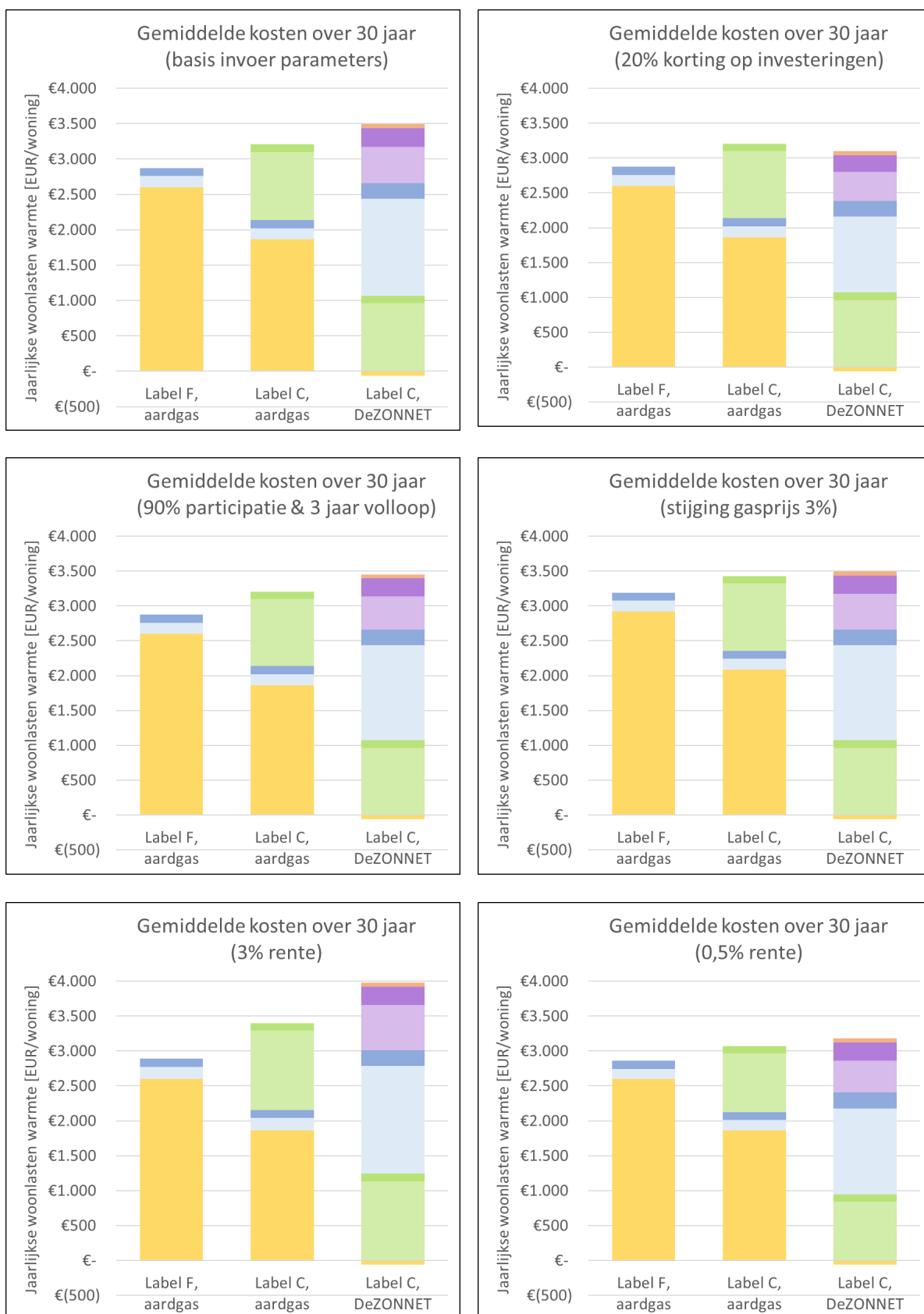
Figuur 18: gemiddelde jaarlijkse kosten van de verschillende varianten, met de basis parameters als uitgangspunt, en opgesplitst in onderdelen.

Zoals duidelijk te zien is, heeft de ZONNET variant negatieve energiekosten (er wordt elektriciteit teruggeveerd ofwel benut voor de overige – niet warmte gerelateerde - elektriciteitsgebruik). De jaarlijkse kosten bestaan grotendeels uit het (annuïtair) aflossen van de geleende investeringen, plus een klein beetje onderhoud. Daarnaast is te zien dat de ZONNET variant onder deze uitgangspunten nog ca 600 € per jaar duurder is dan de huidige situatie.

6.1.4 Aangepaste parameters

Om te zien onder welke omstandigheden het ZONNET concept wel financieel aantrekkelijk wordt, zijn de volgende invoer parameters gevarieerd:

- 20% korting op de alle investeringen
- 90% participatie in 3 jaar (ipv 75% in 4 jaar)
- Stijging gasprijs van 3% ipv 2%
- 3% rente op alle leningen
- 0,5% rente op alle leningen
- Een combinatie



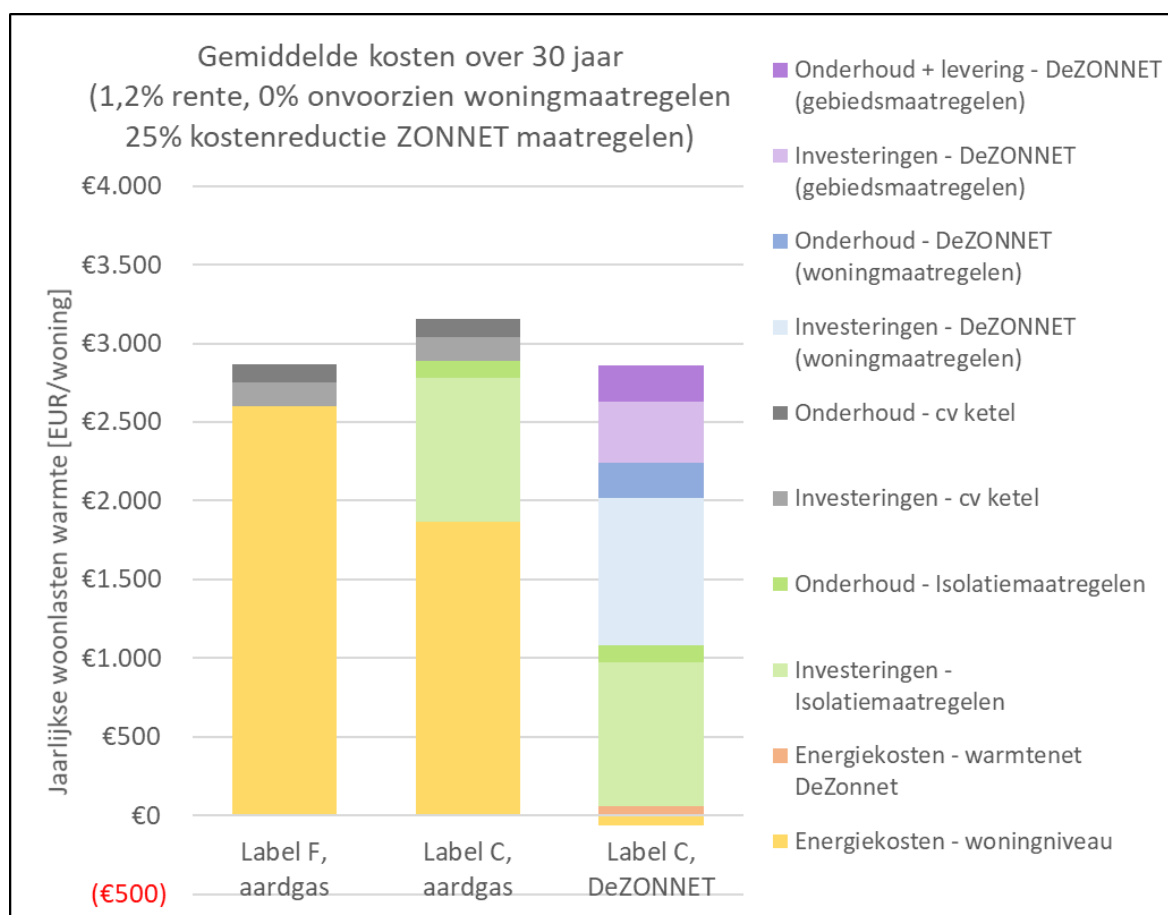
Figuur 19: gemiddelde jaarlijkse kosten afhankelijk van de gekozen invoerparameters



6.2 Conclusie: onder welke voorwaarden is het ZONNET concept betaalbaar?

De maandlasten van een DeZONNET systeem worden gedreven door de investeringen in installaties in de woning, collectieve installaties, en woningisolatie. Dit maakt dat de betaalbaarheid van het systeem in vergelijking met andere systemen gebaad is bij een zeer lage rentevoet. Daarnaast zijn de investeringskosten van grote invloed op de algehele betaalbaarheid.

Uit deze studie blijkt dat wanneer de rentevoet voor alle investeringen op een niveau is van 1,2% en de investeringen voor 25% omlaag gaan door subsidie en/of kostenreductie (waarbij wel nog steeds rekening is gehouden met de onvoorzien kosten), het geheel qua kosten vergelijkbaar is met de referentie. De resulterende gemiddelde jaarlijkse kosten zijn weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 20: gemiddelde jaarlijkse kosten op basis van verlaagde rente en investeringen, waardoor de ZONNET optie qua kosten vergelijkbaar wordt met de referentie. (NB dit betreft 25% korting op de investeringen, waarbij wel rekening is gehouden met 10% onvoorzien).

Uit de energiebalans volgt dat een DeZONNET systeem meer elektriciteit opwekt dan verbruikt. Hierdoor heeft het systeem gedurende de exploitatie een uitstoot van 0 kgCO₂ voor de warmtelevering. Aangenomen dat de terug-geleverde elektriciteit wordt benut voor de eigen overige elektriciteitsvraag, kan worden gesteld dat het systeem ook de CO₂ hiervan reduceert. Hiermee onderscheidt het DeZONNET systeem zich duidelijk ten opzichte van andere aardgasvrije alternatieven. De energieneutraliteit wordt gerealiseerd door alleen de PVT panelen op de eigen daken; er is dus geen externe bron nodig om warmte te leveren. Wel wordt uitgegaan van salderen van elektriciteit via het net. Het benodigde piekvermogen is echter gering, vanwege de hoge COP, ook (juist) in de winter.

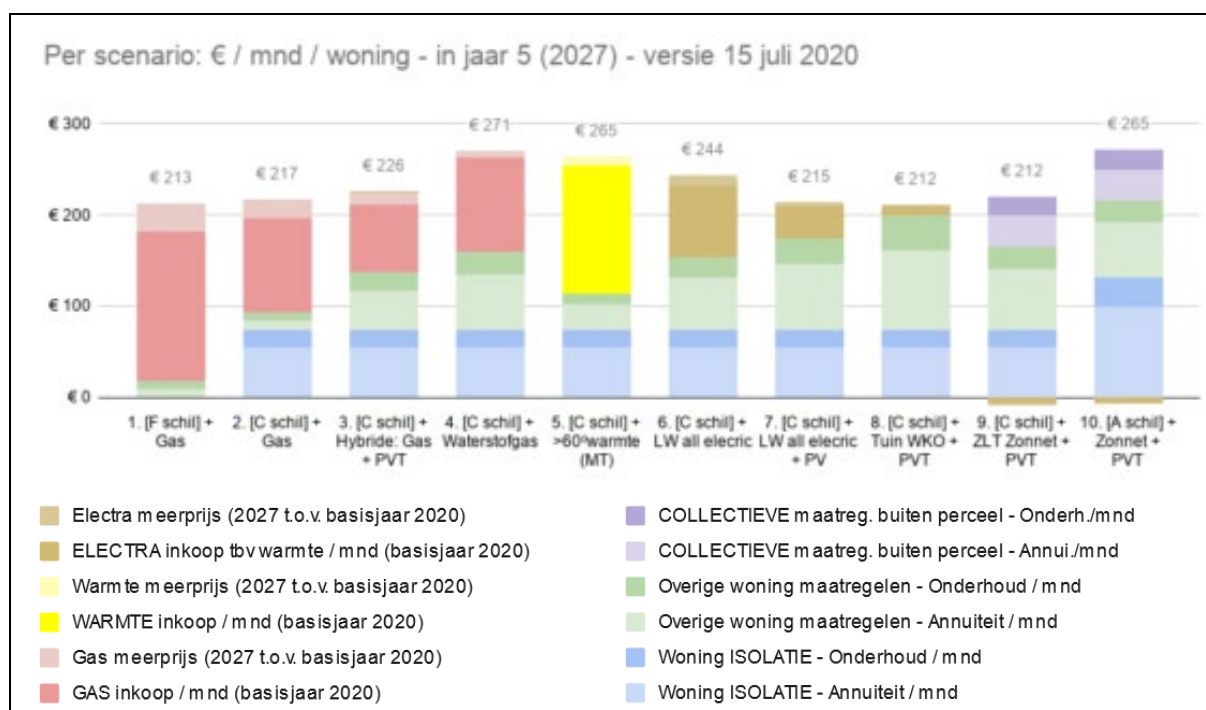


6.3 Vergelijking TCO DeZONNET systeem met alternatieven

Voor het Spaargasproject is een TCO model gemaakt waarin naast de referentie met aardgas nog andere scenario's zijn doorgerekend. Er zijn in totaal 10 scenario's met elkaar vergeleken. Scenario 9 uit de onderstaande figuur is het DeZONNET systeem (ZonneWarmteNet met 55°C basisisolatie⁵). Er is een vergelijking gemaakt op basis van de kosten en CO₂ uitstoot. Hierbij zijn aangepaste parameters voor het ZONNET concept gehanteerd waarmee het ZONNET concept qua kosten vergelijkbaar wordt met de referentie (label F en aardgas), grotendeels zoals boven beschreven. (Zie verder Deliverable 6.1.)

Uit de resultaten in Figuur 21 blijkt dat de maandlasten in jaar 5 van de exploitatie van een groot aantal alternatieven dicht bij elkaar liggen. Wat opvalt aan de kostenverdeling van het DeZONNET systeem is dat het grootste deel van de kosten direct gerelateerd is aan de isolatie en installaties in de woning.

Verder wordt duidelijk dat het systeem netto energie producerend is en er geen elektriciteit buiten het systeem hoeft te worden ingekocht. De alternatieven 9 en 10 hebben dus een negatieve CO₂ uitstoot, omdat het systeem netto meer energie opwekt dan verbruikt.



Figuur 21: Prijsopbouw per scenario voor maandelijkse kosten voor een gemiddelde woning in jaar 5 van de exploitatie. Scenario 9 is het DeZONNET systeem dat is onderzocht binnen dit TKI project (bron: [Stichting Spaargas](#)).

⁵ De isolatie opgave valt buiten dit onderzoek. Hier wordt verwezen naar een gelijktijdig lopend TKI project dat onderzoekt met welke (minimale) isolatiemaatregelen de woning met maximaal 55°C afgiftetemperatuur in radiatoren en/of vloerverwarming verwarmd kan worden.

6.4 Marktmodellen

Omdat DeZONNET met name een technisch systeemconcept is, hangt de keuze voor een marktmodel af van de lokale maatschappelijke inpassing. In deliverable 5.2 is een uitgebreidere beschrijving van de mogelijke marktmodellen te vinden. Dit hoofdstuk beat een beknopte samenvatting.

Voor wijken en buurten waar individuele keuzevrijheid belangrijk is, zal een model met verregaand individueel zeggenschap en investeringen vanuit bewoners de voorkeur hebben. In een situatie waar wordt aangestuurd op ontzorgen, is een model met een grote rol voor het warmtebedrijf logischer.

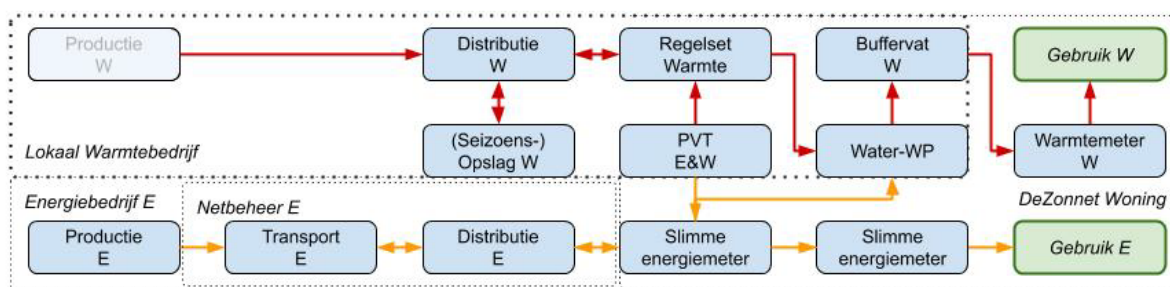
De belangrijkste harde grenzen worden aangegeven door wetgeving en technische mogelijkheden van het systeem. Het garanderen van warmtelevering, energetische balans en een toekomstbestendig economisch perspectief zijn daarin de belangrijkste aspecten.

Vanuit de gedachten van mogelijkheden voor lokaal eigenaarschap en systeemoptimalisatie is een drietal marktmodellen vergeleken die uitgaan van een lokaal (geïntegreerd) warmtebedrijf, hierna Wijk Energie Bedrijf (WEB) genoemd. De marktmodellen onderscheiden zich in het leveringspunt tot waar de verantwoordelijkheid van het warmtebedrijf ophoudt en dat van de bewoner (=woningeigenaar) begint. Het warmtebedrijf kan in eigendom zijn van de bewoners of een buurtcoöperatie maar dezelfde modellen zijn ook toepasbaar voor eigendom vanuit een publieke of commerciële partij.

Eisen en wensen van bewoners, eigenaren en andere belanghebbende moeten samen met de technische en juridische mogelijkheden leiden tot een keuze voor het meest wenselijke marktmodel voor een bepaalde wijk. Om deze reden is hierin geen keuze gemaakt voor een meest wenselijke oplossing.

In deze samenvatting is één model gepresenteerd dat het beste aansluit op de wens naar systeemoptimalisatie, zie Figuur 22. Dit is het model waarin het WEB eigenaar is van zowel het warmtenet en seizoensopslag als de PVT panelen en warmtepomp in de woning. Dit eigenaarschap vanuit het WEB maakt het mogelijk het systeem in vergaande mate te optimaliseren. De bewoner wordt hierin maximaal ontzorgd en betaalt voor de afgenomen warmte.

Dit model biedt minimale individuele keuzevrijheid voor bewoners, wat opgevangen kan worden door transparantie en zeggenschap in het lokale warmtebedrijf. Door Stichting Spaargas is hiervoor een mogelijke organisatie structuur van het WEB voor uitgewerkt. Daarnaast leidt dit model tot een aantal nieuwe vragen, zoals: wat is er juridisch nodig om de PVT panelen (in eigendom van het WEB) op de huizen van bewoners te plaatsen? En hoe wordt geborgd dat voldoende dakoppervlak voor PVT panelen beschikbaar wordt gesteld?



Figuur 22: Schematisch conceptschets voor een woning met aansluiting op een lokaal warmtenet én de mogelijkheid van teruglevering van warmte aan het net. Eigenaarschap van PVT, WP & Buffervat ligt in dit scenario bij het warmtebedrijf, waarbij de afnemer betaald voor de warmte zoals onttrokken aan het buffervat. De rode pijlen geven warmtestromen weer, de gele pijlen elektriciteit.



De financiële waardering van de warmte die afkomstig is van de PVT panelen lijkt voor alle marktmodellen een belangrijk aspect om voldoende decentrale opwek te realiseren. Er zijn verschillende mogelijkheden om de waarde van de opgewekte warmte uit het PVT paneel te waarderen, in basis zijn de twee uiterste:

- **Afrekening per geleverde GJ**

Nauwkeurig maar ook complexer. Bovendien is de geproduceerde warmte afhankelijk van de oriëntatie van de panelen en hoeveel de zon schijnt, de bewoner zelf heeft hier geen invloed op.

- **Afrekening vaste vergoeding per PVT paneel**

Een eenvoudige methode die een meer gelijke verdeling van de vergoeding onder bewoners bewerkstelligt. Deze methode zou als bijkomend voordeel kunnen hebben dat mogelijk meer bewoners bereid zijn dakoppervlak voor PVT panelen beschikbaar te stellen en niet enkel de bewoners met een gunstige dak oriëntatie.

Nader onderzoek onder bewoners zal moeten uitwijzen welke wijze van verrekening de voorkeur heeft.

7 De Pilot in the Green Village

In het project is gewerkt aan het dimensioneren van het systeem, aan de regelstrategieën en aan het ontwikkelen van de daadwerkelijk afleverset die in staat is de genoemde regelingen te realiseren. Het woninggebonden deel (warmtepomp, PVT, nieuwe afleverset met regelingen) is gedemonstreerd op de Green Village. Hiermee is aangetoond dat het systeem werkt. De metingen hiervan komen in 2021 beschikbaar.

Onderstaand zijn enkele foto's van het systeem geplaatst.





Figuur 23: Foto's proefopstelling bij The Green Village
(<https://www.youtube.com/watch?v=q36WRPq85iq>)



8 Conclusie en vervolg

Binnen dit TKI project heeft het consortium het ZONNET wijk-warmteconcept verder uitgewerkt. Onderstaand staan de belangrijkste resultaten en conclusies nog eens samengevat, en wordt kort ingegaan op de nodige of mogelijke vervolgstappen.

8.1 Wat is er ontwikkeld?

- ✓ Richtlijnen voor het dimensioneren van het systeem, de bijbehorende regelingen en de te verwachten bijbehorende SCOP (D7.2, dit deliverable)
- ✓ Een ontwerphandleiding voor het feed-in warmtenet (D2.2)
- ✓ De gewenste eigenschappen van de afleverset (D3.1)
- ✓ Een demonstratie van de opstelling inclusief de nieuwe afleverset (proefopstelling The Green Village)

8.2 Is het concept haalbaar en betaalbaar?

- Het concept is technisch haalbaar en zal naar verwachting een hogere COP halen dan een gewoon WKO systeem; daarnaast maakt het een WKO systeem mogelijk in wijken met overwegend warmtevraag.
- Technische randvoorwaarden zijn:
 - De woning is 55°C ready, oftewel: de afgiftetemperatuur in de woning is maximaal 55°C. Overigens kan afhankelijk van het type warmtepomp mogelijk ook een goede COP gehaald worden bij iets hogere temperaturen, doordat de brontemperatuur relatief hoog is. In het project LT ready (www.ltready.info) wordt onderzocht welke maatregelen nodig zijn om een woning geschikt te maken voor verwarming met een afgifte temperatuur lager dan 55°C.
 - Er is ruimte voor een warmtepomp en boiler. Hiervoor zijn ook losse boilers beschikbaar.
 - De ondergrond is geschikt voor Warmte Koude Opslag (WKO) (regeneratie wordt gedaan met de PVT panelen)
- Financiële randvoorwaarden:
 - Het is een kapitaalintensief systeem, dus een lage rente voor het lenen van de investering is essentieel.
 - Overige kosten binnen de marges van Hst 6.

8.3 Voordelen

Het wijkstelsel maakt het mogelijk als **wijk energieneutraal** te zijn. Dit heeft de volgende voordelen:

- Er zijn **geen externe bronnen nodig** voor de warmtelevering; alle warmte wordt lokaal opgewekt.
- Ook als niet alle woningen voldoende dakoppervlak hebben, kan als wijk toch voldoende warmte worden opgewekt. Hierbij kunnen de best georiënteerde daken worden benut
- Eventuele collectieve bronnen kunnen eveneens aan het wijk-warmtenet worden gekoppeld.
- Ten opzichte van individuele (lucht) warmtepompen is **veel minder of geen verzwaring van het elektriciteitsnet nodig**, doordat de warmtepomp in het ZONNET concept ook tijdens de winterpiek met een zeer hoge COP werkt en de PV opwek in de winter direct kan worden benut.
- **Koeling:** Met het systeem kan ook gekoeld worden. Ook de aangesloten woningen kunnen met dit systeem koelen, als het afgiftesysteem daar geschikt voor is of wordt gemaakt.



8.4 Verdere ontwikkeling en aanbevelingen

- Het **markmodel** moet nog verder worden uitgewerkt. Er zijn bijvoorbeeld nog verschillende eigendomssituaties denkbaar, en er moet nog worden nagedacht over het vergoeden van de teruggekeerde warmte; ofwel via een GJ prijs ofwel via een vergoeding voor het gebruik van dakoppervlak.
- Het ruimtebeslag van de woninginstallaties is groter dan de huidige moderne ketels. De mogelijkheden voor **ruimtelijke inpassing** in bestaande woningen moet nog verder worden onderzocht. Een verkenning naar mogelijke ruimtelijke inpassing en de toepassing van een hybride warmtepomp met PVT is bijvoorbeeld beschreven in de publicatie 'ZONKAPEL. De ruime dakkapel met een geïntegreerd duurzaam zonne-energiesysteem'. TKI onderzoek met referentienummer TESN118098.
- **Hybride tussenoplossing:** Niet alle woningen zullen direct voldoende geïsoleerd zijn om aangesloten te worden op het warmtenet; tegelijkertijd zal het – na planvorming - ook nog enkele jaren duren voor het warmtenet daadwerkelijk kan worden gerealiseerd. Ondertussen zijn er mogelijk al mensen die stappen willen ondernemen.
Een hybride tussenoplossing kan worden uitgewerkt, waarbij de warmtepomp en benodigde panelen in hybride opstelling met een CV ketel werkt. In de publicatie over de Zonkapel worden ook varianten met een hybride warmtepomp met PVT onderzocht. Zodra er dan voldoende geïsoleerd is en het warmtenet er ligt, kan de CV ketel worden vervangen door de afleverset en de warmtepomp worden aangesloten op het warmtenet. Waar in de hybride tussenoplossing de winterpiek dus wordt geleverd door de CV ketel, gaat in de uiteindelijke oplossing het warmtenet deze rol vervullen.

9 Bijlagen

9.1 Eigenschappen van de onderdelen van het systeem

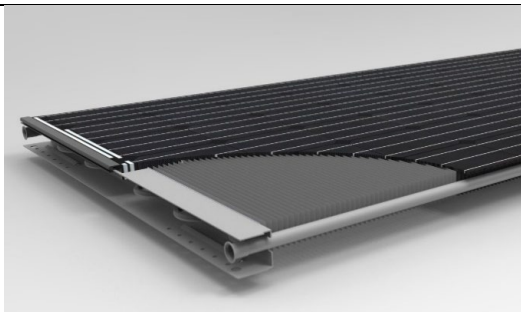
De prestatie en de optimalisatie van het systeem hangt af van de eigenschappen van de onderdelen. Voor de optimalisatie die is gedaan in dit project zijn de volgende componenten gebruikt:

- 1) PVT warmtepomppanelen van Triple Solar
- 2) Een NIBE warmtepomp type F1255 pc

9.1.1 Eigenschappen van de PVT warmtepomppanelen

Voor de PVT panelen is uitgegaan van Triple Solar PVT- warmtepomp panelen als bron voor een water-water-warmtepomp. Deze panelen zijn ontworpen om als enige bron voor deze warmtepompen te dienen. Bij dit type is er achter de PV module een collector met een warmtewisselaar, zodat ook warmte aan de buitenlucht kan worden onttrokken. Het is dus een collector en warmtewisselaar in een. Het Triple Solar®-systeem is voor warmte daardoor niet afhankelijk van de zon, omdat het warmtepomppaneel ook in staat is warmte uit de buitentemperatuur en daglicht te halen. Toch heeft het natuurlijk wel voordeel van zonlicht. Door de zon ontstaat een hogere temperatuur, waardoor de warmtepomp minder elektriciteit nodig heeft om uiteindelijk bruikbare warmte af te geven. En hoewel het systeem dus ook prima werkt op het noorden, is het wel (nog) zuiniger bij plaatsing van de panelen op het zuiden.

Naast warmte leveren de panelen ook stroom, net als conventionele PV-panelen. Wat elektriciteit betreft, geldt natuurlijk nog altijd: meer zon is meer elektriciteit.



Figuur 24: Triple solar PVT warmtepomppaneel (foto: triple solar)



Figuur 25: Triple Solar PVT warmtepomppaneel geïnstalleerd op een schuin dak (van bovenaf gefotografeerd, waardoor de convectieribben goed zichtbaar zijn) (foto: Sabine Jansen)

Verskil in gebruik t.o.v. een stand-alone situatie:

Doordat bij het ZONNET concept de warmtepomp in de winter op het warmtenet draait, hoeven de PVT panelen niet gedimensioneerd te worden om te winter piek te kunnen leveren. Dit zorgt voor een aanzienlijke vermindering van het aantal benodigde panelen. Daarnaast wordt de warmte die in de zomer wordt geproduceerd nu gebruikt om via het warmtenet de WKO's op te laden (te regenereren); in een stand alone situatie zou een groot deel van deze warmte onbenut blijven. Tot slot zal de seizoens COP van de warmtepomp hoger zijn dan in een stand-alone werking, omdat in de winter nog een hoge brontemperatuur uit de WKO beschikbaar is.

Technische specificaties:

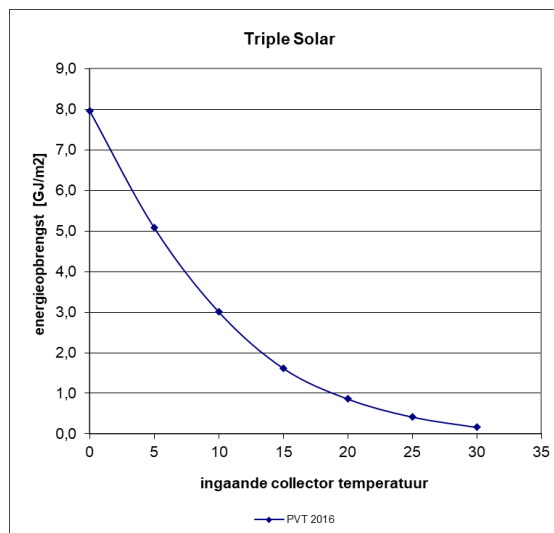
Vanwege de extra warmtewisselaar met convectieribben heeft het Triple Solar® warmtepomppaneel een zeer hoge warmteovergangscoefficiënt. Daardoor kan veel warmte uit buitenlucht worden gewonnen zolang de temperatuur van de vloeistof in het paneel lager is dan de buitentemperatuur. Zodra de

temperatuur in de collector veel hoger wordt dan de buitentemperatuur, gaat warmte verloren. De collector werkt dus optimaal rondom of lager dan de buitentemperatuur.

In onderstaande figuren zijn de eigenschappen van het Triple Solar® paneel te zien.

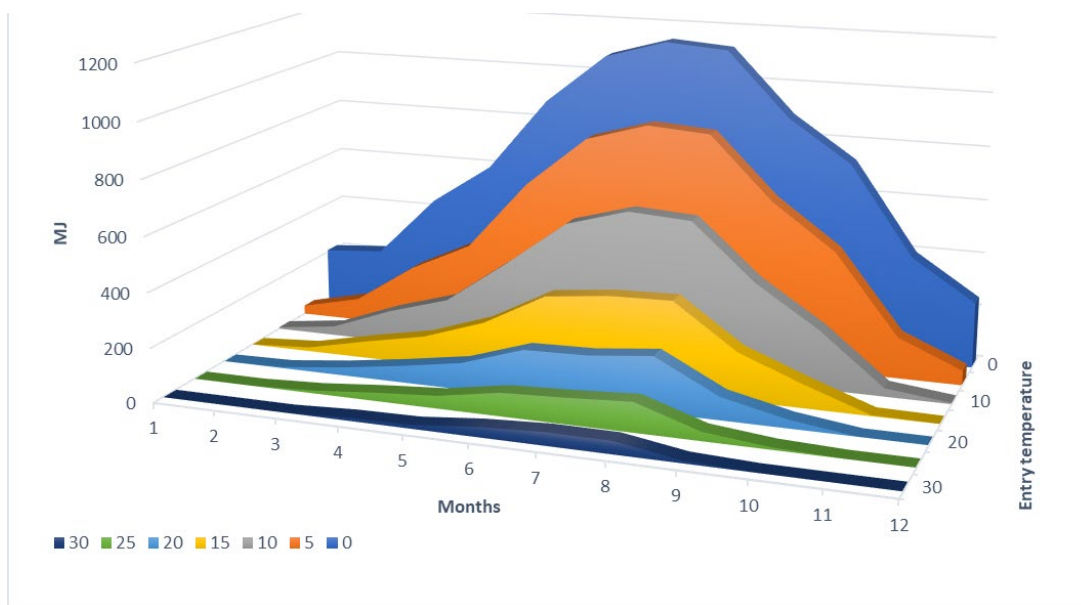
PVT warmtepomppaneel	eenheid	waarde
Peak collector efficiency*	ETA 0	- 0.468
Incidence angle modifier	IAM	- 0.953
Heat loss coefficient	C1	W/(m2K) 22.990
Temperature dependent heat loss	C2	W/(m2K2) 0
Wind speed dependent heat loss	C3	J/(m3K) 7.572
Factor for sky temperature radiative heat loss	C4	- 0.434
Effective thermal capacity	C5	J/(m2K) 26.050
Zero loss efficiency	C6	s/m 0.067
U waarde bij gemiddeld 3 m/s windsnelheid		W/(m2K) 62
Energieopbrengst bij 10 °C ingaande collector temperatuur		GJ/m2 3

*Efficiency gemeten tijdens PV productie, +/- 20% van instra



Figuur 26: technische specificaties van het Triple Solar® warmtepomppaneel en jaarlijkse warmteopbrengst bij verschillende ingaande collector temperaturen.

De maandelijkse opbrengst van het paneel, afhankelijk van de ingaande collector temperatuur, is weergegeven in onderstaande figuur:



Figuur 27: Maandelijkse warmteopbrengst bij verschillende ingaande collector temperaturen in MJ/m² jaar (Triple Solar gelijkwaardigheidsverklaring van het type paneel uit 2016).

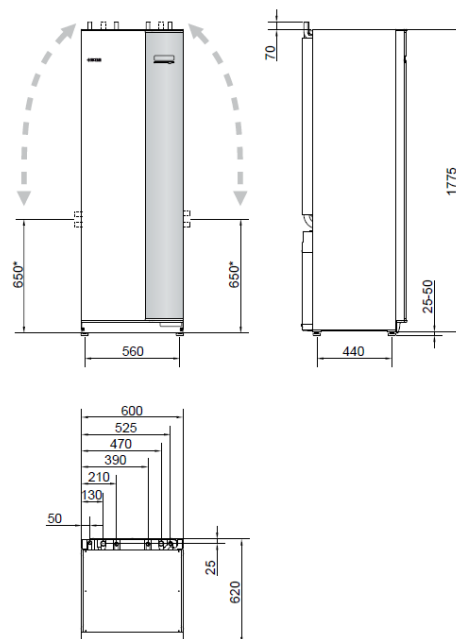
9.1.2 NIBE F1255 pc water/water warmtepomp

Voor de warmtepomp is in de berekeningen uitgegaan van de NIBE F1255 pc water/water warmtepomp. De afmetingen van deze warmtepomp zijn weergegeven in onderstaande figuren.



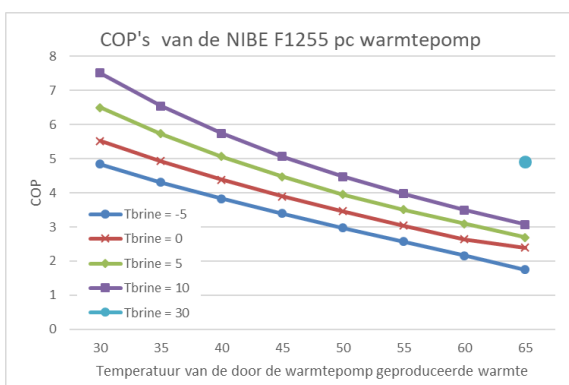
Figuur 28: Foto van de NIBE warmtepomp, met daarboven een afleverset die qua afmetingen vergelijkbaar is met de afleverset die voor het ZONNET concept wordt ontwikkeld.

Afmetingen en aansluitingen

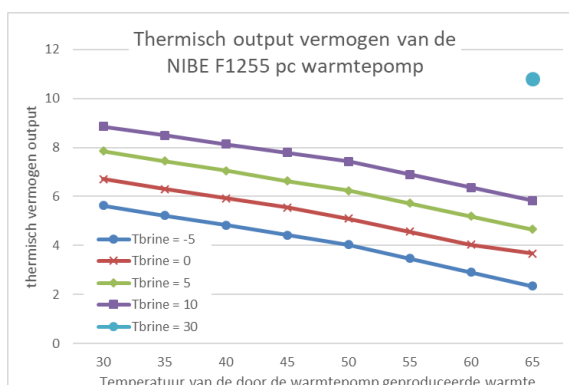


Figuur 29: afmetingen van de NIBE warmtepomp

In onderstaande grafieken zijn de COP en het thermisch vermogen van de geleverde warmte van de NIBE F1255 warmtepomp gegeven, afhankelijk van de brontemperatuur en de temperatuur van de geproduceerde warmte.



Figuur 30: COP's van de NIBE F1255 warmtepomp gegeven, afhankelijk van de brontemperatuur en de temperatuur van de geproduceerde warmte.



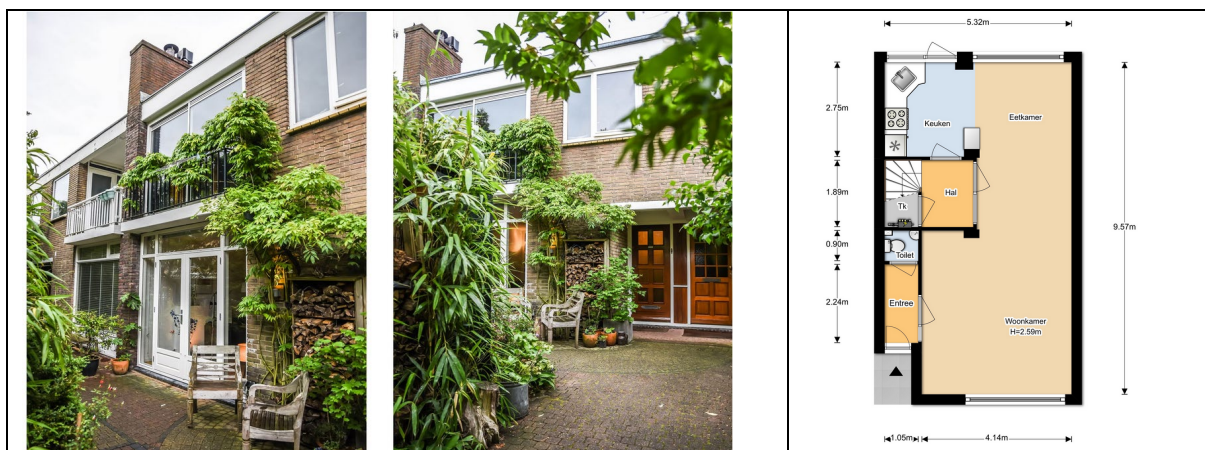
Figuur 31: thermisch vermogen van de geleverde warmte van de NIBE F1255 warmtepomp gegeven, afhankelijk van de brontemperatuur en de temperatuur van de geproduceerde warmte.



9.2 Beschrijving van de gehanteerde gemiddelde woning

Voor dit project is uitgegaan van een gemiddelde woning van ca 95 m², met een netto warmtevraag voor ruimteverwarming van 70 kWh/m² per jaar (dus exclusief tapwater). Deze warmtevraag komt ongeveer overeen met een gasverbruik van 12,5 m³/m² per jaar, volgens Majcen (2016) het gemiddelde werkelijke gasverbruik van label B woningen.

Voor het warmtevraagprofiel is een rijtjeswoning uit de wijk gesimuleerd in het programma TRNSYS, waarmee uurlijkse warmtevraag is gesimuleerd op basis van een TMY2 klimaatjaar voor Schiphol. Het betreft de volgende rijtjeswoning:

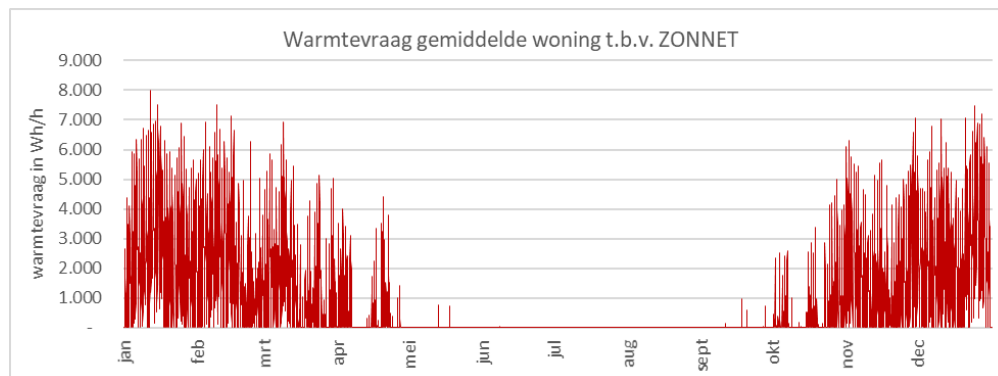


Figuur 32: achter- en vooraanzicht en plaatgrond (BG) van de gesimuleerde gemiddelde rijtjeswoning

Hierbij is uitgegaan van de volgende isolatiewaarden:

		Rc-waarde [m ² K/W]	U-waarde [W/m ² K]
gevel	geïsoleerde spouwmuur of gevelpaneel	1,5	
Vloer	Geïsoleerde vloer (bijv Tonzon)	2,9	
Dak	Geïsoleerd dak	3,5	
Ramen	Glas: HR++ glas		1,4
	Kozijnen		2,3

Dit levert het volgende jaarlijkse warmtevraag-profiel, met een totaal van 6606 kWh per jaar.



Figuur 33: warmtevraagprofiel gemiddelde woning met 'label B' isolatie



9.3 Gegevens energieprestatie verschillende combinaties warmtevraag en aantal PVT panelen

In onderstaande tabel is een overzicht gegeven van alle setpoints en COP's van de in Hst 3 beschreven varianten.

Ruimteverwarming [kWh/jr]	Warm Tapwater (kWh/jaar)	Afgifte-temperatuur	Aantal panelen	Setpoint direct gebruik van PVT (°C)	Setpoint export heat to the grid (°C)	SCOP (warmtepomp)	SCOP (warmtepomp+ pompenergie)	% direct gebruik van de PVT	Opbrengst warmte uit de PVT (collectoren totaal yield (kWh))	System Imbalance (kWh)
6.600	3.000	35 °C	6	10	20	6,66	6,39	33,6	7725	-62
			4	6	16	6,02	5,79	35,1	7569	214
		45 °C	6	10	20	5,95	5,72	33,8	7723	-9
			4	6	16	5,57	5,37	34,7	7564	147
		50 °C	6	10	20	5,84	5,61	34	7711	77
			4	6	16	5,46	5,26	34,8	7549	219
11.000	3.000	35 °C	9	8	18	6,13	5,92	34,5	11273	159
			7	7	16	5,96	5,76	34,5	10883	94
		45 °C	9	8	19	5,80	5,61	33,8	10979	-130
			7	7	16	5,50	5,32	34	10840	-3
		50 °C	9	8	18	5,27	5,11	33,5	11015	-139
			7	7	16	5,15	4,99	33,6	10887	-125

9.4 Literatuur

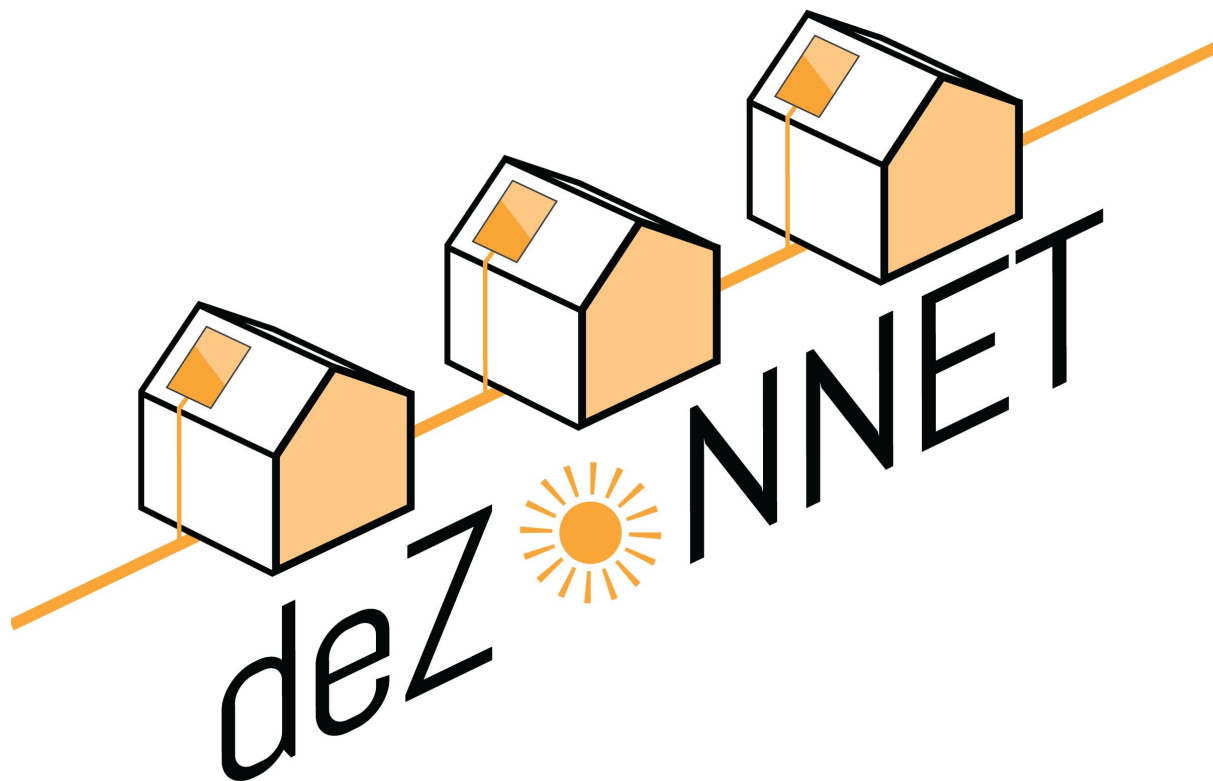
Bloemendal, M., (2018). The hidden side of cities: Methods for governance, planning and design for optimal use of subsurface space with ATES. *Proefschrift TU Delft*.

Bloemendal, M., Jaxa-Rozen, M., & Olsthoorn, T. (2018). Methods for planning of the ATES systems. *Applied Energy, vol.216*.

Jansen, S.C., Mohammadi, S., Bokel, R.M.J. (2020a). Developing a locally balanced energy system for an existing neighbourhood, using the 'Smart Urban Isle' approach. *Sustainable Cities and Society, Vol.64*.

Jansen, S.C., Mohammadi, S., Fortuijn, E. (2020b). Wijkenergieplannen: maximaal lokaal duurzaam. *Rooilijn, jaargang 53, nummer 2, pp 138-143*. <https://www.rooilijn.nl/artikelen/wijkenergieplannen-maximaal-lokaal-duurzaam/>.

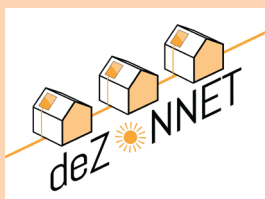
Majcen, Daša. 2016. "Predicting Energy Consumption and Savings in the Housing Stock A Performance Gap Analysis in the Netherlands." *Proefschrift TU Delft*.



Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

Kenmerk: TEUE018017. Lage temperatuur feed-in zonnearmtenetten (deZONNET).

Datum: December 2020



Eindrapport TKI project TEUE018017
Wijkenergieconcept deZONNET: Decentraal feed-in zonnewarmtenet