

Zonnewarmte in warmtenetten

Inclusief cases met aquathermie

door

Luuk Beurskens

27 januari 2023



Luuk Beurskens
27 januari 2023

Kwaliteitsborger(s)
Anton de Fockert (Deltares), Koen Smekens (TNO)

Dit project is uitgevoerd als onderdeel van het Innovatieplan WarmingUP. Dit is mede mogelijk gemaakt door subsidie van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) in het kader van de subsidieregeling Meerjarige Missiegedreven Innovatie Programma's (MMIP), bij RVO bekend onder projectnummer TEUE819001. WarmingUP geeft invulling aan MMIP-4 – Duurzame warmte en koude in gebouwde omgeving en levert daarmee een bijdrage aan Missie B – Een CO₂-vrije gebouwde omgeving in 2050.

Projectnummer
060.43191

Keywords
Zonnewarmte, zonthermie, aquathermie,
warmtenet, systeemintegratie, kosten

Jaar van publicatie
2023

Meer informatie
Luuk Beurskens
T 06 50009626
E luuk.beurskens@tno.nl

Januari 2023 ©

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

Samenvatting

Zonnewarmte kan een significante bijdrage leveren aan de energietransitie, met een indicatief potentieel van 60 tot 80 PJ/jaar tegen 2050. Hiervan zou indicatief 10 tot 20 PJ/jaar uit integratie van zonnewarmte in bestaande en nieuwe warmtenetten gerealiseerd kunnen worden.

Voor diverse vraagsectoren wordt de techniek zonnewarmte toegelicht: utiliteitsbouw, tuinbouw en veeteelt, voedingsmiddelenindustrie, industriële processen en warmtenetten. Het gaat daarbij om de volgende collectortypes: vlakkeplaatcollectoren, vacuümbuiscollectoren, de combinatie van collectoren met fotovoltaïsche panelen (PVT), Daglichtkas, gevelpanelen en zonvolgende concentrerende collectoren.

De focus in het rapport ligt op zonnewarmte in warmtenetten, waarvoor opbrengsten en kostenkanten van grootschalige systemen (boven 1 MW thermisch) gepresenteerd worden. De integratie van zonnewarmte als centrale bron in een warmtenet vraagt om een regeling met verschillende bedrijfsmodi. Zonnewarmte kan ook als decentrale bron ingepast worden in warmtenetten, bijvoorbeeld wanneer de collectoren op een utiliteitsgebouw staan.

De mogelijke synergie tussen zonnewarmte en aquathermie wordt toegelicht en er wordt op basis van indicatieve berekeningen op basis van twee cases aangetoond dat integratie van zonnewarmte een verlagend effect van 2% tot 7% kan hebben op de kosten van warmte uit een systeem van aquathermie met warmtepomp. Of de praktijk deze kostendaling ook laat zien is ongewis: gezien de bandbreedte van waargenomen kosten kan de situatie ook anders uitpakken. Door zonnewarmte met aquathermie te koppelen, kan de warmte die bij aquathermie uit waterlichamen gewonnen wordt verder op CO₂-vrije wijze worden opgewaardeerd (en eventueel ondergronds opgeslagen), waardoor de warmtepomp minder energie hoeft toe te voegen. Ook kan zonnewarmte direct warmte leveren, parallel aan of zelfs buiten de warmtepomp om. In dit rapport wordt aangetoond dat de besparing op de benodigde elektriciteit voor de warmtepomp groter kan zijn dan de extra kosten van het systeem voor zonnewarmte, waarbij echter wel de complexiteit van het systeem toeneemt.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
1.1	Doelstelling	5
1.2	Aanpak	5
1.3	Afbakening	6
1.4	Leeswijzer	6
2	Configuraties voor zonnewarmte	7
2.1	Zonnewarmte in de utiliteitsbouw	8
2.2	Zonnewarmte in de tuinbouw en veeteelt	8
2.3	Zonnewarmte in de voedingsmiddelenindustrie	9
2.4	Zonnewarmte in industriële processen	9
2.5	Zonnewarmte voor warmtenetten	9
3	Zonnewarmte in warmtenetten	11
3.1	Zonnewarmte in warmtenetten in het buitenland	11
3.2	Zonnewarmte in warmtenetten in Nederland	11
3.3	Opbrengst van zonnewarmte in warmtenetten	12
3.4	Kosten van zonnewarmte in warmtenetten	15
3.4.1	Vlakkeplaatcollectoren met een vermogen groter dan 1 MWth	15
3.4.2	Concentrerende collectoren met een vermogen groter dan 1 MWth	17
3.5	Netinpassing van zonnewarmte	18
3.5.1	Grootschalige zonnewarmte als centrale bron	18
3.5.2	Grootschalige zonnewarmte als decentrale bron	19
4	Combinatie van zonnewarmte en aquathermie	20
4.1	Systeemschets aquathermie met zonnewarmte	20
4.2	Bedrijfsmodi zonnecollectoren	20
4.3	Aquathermie scenario 4 met zonnewarmte	21
4.4	Aquathermie scenario 6 met zonnewarmte	22
4.5	Samenvatting aquathermie met zonnewarmte	23
5	Conclusie en aanbevelingen	25
	Bijlage A Kosten van grootschalige zonnewarmtesystemen	26

1 Inleiding

De uitdagingen in de energietransitie zijn groot: de inzet van hernieuwbare technieken groeit weliswaar gestaag, maar de overbrugging naar een duurzame energievoorziening vraagt ook om tijd voor het doorvoeren van systeemveranderingen.

Eenzijds is er de elektriciteitsopwekking, waarvoor windenergie, zon-pv en waterkracht (wereldwijd) een grote bijdrage kunnen leveren. Anderzijds is er de invulling van de warmtevraag. Dat betreft de verwarming van gebouwen (woningen en utiliteit) en industriële warmte. Om deze vraag op een efficiënte manier in te vullen is energiebesparing essentieel: isolatie van gebouwen om in de winter warmte binnen te houden en in de zomer de warmte buiten te houden. Ook seizoensopslag van warmte in warmte- en koudeopslag (WKO) kan voor woningen en utiliteit een belangrijke bouwsteen zijn. Bij de industriële warmtevraag is naast besparing ook procesoptimalisatie een aandachtspunt.

Voorbeelden van hernieuwbare technieken voor de invulling van de warmtevraag zijn: geothermie, omgevingsenergie, biomassa en zonnewarmte. Omgevingsenergie wordt onttrokken aan de lucht, aan oppervlaktewater (aquathermie) of aan de bodem, waarbij het temperatuurniveau opgewaardeerd wordt door middel van warmtepompen. Verwarming door verbranding of vergassing van biomassa en het biogene deel van afval is ook een mogelijkheid. Op systeemniveau speelt behalve de seizoensopslag ook een discussie over de schaalgrootte van energiesystemen. Wordt er gekozen voor centrale opwekking met warmtedistributie via grote warmtenetten, of voor decentrale oplossingen, waarbij deze ook weer als integraal systeem ontworpen kunnen zijn, bijvoorbeeld met kleine warmtenetten.

Dit rapport geeft een overzicht van de mogelijkheden van zonnewarmte in grootschalige collectieve configuraties, deels gekoppeld aan grote warmtenetten maar ook in systemen zoals gebouwverwarming in de utiliteitsector. Daarbij is er tevens aandacht voor de combinatie van zonnewarmte met aquathermie.

1.1 Doelstelling

Het doel van dit deelrapport van WarmingUP is het presenteren van de rol die grootschalige zonnewarmte op het gebied van warmtenetten kan spelen in de energietransitie. Daartoe worden kosten en opbrengsten van zonnewarmte gerapporteerd. Onderdeel van de doelstelling is tevens om te toetsen of de combinatie van zonnewarmte en aquathermie synergie oplevert, zoals een hogere kostenefficiëntie.

1.2 Aanpak

Kentallen voor zonnewarmte worden gerapporteerd op basis van literatuurbronnen en berekeningen. Daarbij wordt geprobeerd de gegevens op een toegankelijke manier te presenteren. De integratie van zonnewarmte met aquathermie wordt geanalyseerd op basis van een bestaand model uit het WarmingUp project.

1.3 Afbakening

De systemen voor zonnewarmte die in dit rapport beschreven worden zijn doorgaans grootschalig (>1MWth) en collectief (aangesloten op een warmtenet of een utiliteitsgebouw). De kleine individuele systemen voor zonnewarmte, zoals zonneboilers voor huishoudens, vallen buiten deze analyse¹.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de systemen voor zonnewarmte in grootschalige toepassingen. Hoofdstuk 3 geeft meer detail over warmteopbrengst en kosten van grootschalige zonnewarmte, en over de concepten voor integratie in warmtenetten. Hoofdstuk 4 presenteert voor twee cases wat het effect is van het toevoegen van zonnewarmte op een systeem van aquathermie, warmtepomp en warmtenet. Conclusies en aanbevelingen volgen tenslotte in hoofdstuk 5.

¹ Zie voor een recent rapport over zonneboilers: *De Businesscase voor Zonnewarmte*, Corry de Keizer, Luuk Beurskens, TNO 2022 R11908 (oktober 2022), <http://resolver.tudelft.nl/uuid:211a39fb-33d6-4c69-b628-3b8536a3992e>

2 Configuraties voor zonnewarmte

Er zijn diverse grootschalige varianten die gebruik maken van zonnewarmte voor warmte-opwekking, die in dit hoofdstuk kort voorgesteld worden. Deze kunnen in diverse sectoren met een warmtevraag toegepast worden, en op die manier worden ze hier ook geïntroduceerd:

- 1 Utiliteitsbouw
- 2 Tuinbouw en veeteelt
- 3 Voedingsmiddelenindustrie
- 4 Industriële processen
- 5 Warmtenetten

Een indicatie van het Nederlandse potentieel voor toepassing van zonnewarmte wordt gegeven in onderstaande tabel, op basis van een rapport uit 2020². In de varianten 'met opslag' is de aanname dat gewonnen zonnewarmte uit de zomer ingezet kan worden in de herfst en winter, waarmee in een grotere warmteproductie voorzien kan worden (een groter aandeel zonnewarmte in de jaarlijkse energievraag ofwel een hogere zonne fractie, dus een indicatief potentieel van 80 PJ in plaats van 60 PJ, zie Tabel 2.1). In het betreffende rapport staat ook de bijdrage van bestaande en nieuwe warmtenetten weergegeven. De potentiële bijdrage daarvan in 2050 wordt indicatief benoemd als een bandbreedte van 10 PJ (van de totale 60 PJ zonder seizoensopslag: 0,4 PJ zonnewarmte in bestaande warmtenetten en 9,5 PJ zonnewarmte in nieuwe warmtenetten) tot 20 PJ (van de totale 80 PJ met opslag: 0,9 PJ zonnewarmte in bestaande warmtenetten en 18,8 PJ zonnewarmte in nieuwe warmtenetten).

Tabel 2.1: Indicatie van het Nederlandse potentieel voor zonnewarmte in diverse vraagsectoren. Bron: zie voetnoot 2.

		Potentieel 2050 [PJ]	
		Zonder opslag	Met opslag
Woningen	Ruimteverwarmingsvraag	25	43
	Warmwatervraag	10	11
	Subtotaal woningen	35	54
	<i>Aandeel zonnewarmte woningen</i>	<i>17%</i>	<i>26%</i>
Utiliteit	Zwembaden, verzorgingstehuizen en hotels	10	10
Agrarisch	Land- en tuinbouw, veeteelt	3	3
Industrie		12	12
Totaal	Alle sectoren (afgerond)	60	80
	<i>Aandeel zonnewarmte totale warmtevraag</i>	<i>8%</i>	<i>10%</i>

In de Klimaat- en energieverkenning 2022 van PBL³ wordt voor warmtenetten een prognose gemaakt van het aandeel hernieuwbare bronnen. Voor het jaar 2030 is dat, onder de aanname van vastgesteld en voorgenomen beleid, in totaal 20 PJ warmteproductie uit hernieuwbare bronnen (waarvan ruwweg 20% warmteverliezen in het net afgetrokken moet worden om de levering aan eindverbruikers te vinden). Bijdragen zijn 2 PJ uit het biogene deel van afvalverbrandingsinstallaties, 8 PJ uit warmteproductie uit biomassa, 4 PJ aan geothermie en 2 PJ warmteproductie uit aquathermie en 0,7 PJ warmtelevering uit warmte- en koudeopslag (WKO). Daarbij komt 3 PJ warmtelevering met elektrische boilers, waarvoor in 2030 een hoog percentage

² Aanzet tot Routekaart Zonnewarmte, Luuk Beurskens, Corry de Keizer, TNO 2020 R10975, <http://publications.tno.nl/publication/34636794/CRnx2g/TNO-2020-R10975.pdf>

³ Klimaat- en energieverkenning 2022, PBL, 2022, <https://www.pbl.nl/publicaties/klimaat-en-energieverkenning-2022>

hernieuwbare elektriciteit geldt. De levering van restwarmte uit de industrie aan warmtenetten is daarbovenop in KEV 2022 nog als 5 PJ becijferd, maar zonnewarmte ontbreekt in de prognose omdat de verwachte bijdrage niet significant is.

Voor de toepassing van zonnewarmte in de verschillende vraagsectoren kunnen aparte technieken gebruikt worden. Dit wordt in onderstaande paragrafen verder toegelicht.

2.1 Zonnewarmte in de utiliteitsbouw

In bepaalde utiliteitsgebouwen zoals hotels, sportaccommodaties, verzorgingshuizen en ziekenhuizen is er jaarrond een grote vraag aan sanitair warm water (SWW). Deze kan deels door zonnewarmte ingevuld worden, waarbij het collectoroppervlak en de capaciteit van het opslagvat het aandeel in de jaarlijkse vraag bepalen. Er kan doorgaans tot maximaal 50% van de SWW-vraag ingevuld worden, bij voldoende collectoroppervlak. Een hoger aandeel is weliswaar technisch mogelijk maar economisch niet rendabel, en zonne fracties lager dan 50% kunnen ook voorkomen. Indien het gebouw is uitgerust met een warmtepomp en warmte-koudeopslag (WKO) kan zonnewarmte op deze manier ook bijdragen aan ruimteverwarming en/of regeneratie van WKO (regeneratie van de WKO is nodig indien de WKO uit balans is, doorgaans omdat er méér warmtevraag dan koudevraag is).

Mogelijke techniekvarianten voor de utiliteitsbouw gebaseerd op zonnewarmte zijn:

- Vlakkeplaatcollectoren of vacuümbuiscollectoren voor sanitair warm water (SWW) en/of ruimteverwarming (RV). Dit betreft afgedekte collectoren, die een relatief hoge werktemperatuur (temperatuur van het uittrekkend warmtevoerende medium) kunnen bereiken (hoger dan 60°C).
- PV-Thermisch (PVT) voor SWW en/of RV. Een combinatie van zonnewarmte en zon-pv, waarbij de zonnewarmtecollector achter het pv-paneel aangebracht is, en qua warmteoverdracht geschaard kan worden onder de onafgedekte collectoren (internationaal aangeduid als wind and infrared sensitive collectors, WISC). De onafgedekte collectoren onttrekken deels warmte aan de buitenlucht en deels oogsten ze zonnewarmte. Jaargemiddeld wordt er méér warmte uit de buitenlucht onttrokken dan dat er zonnewarmte geoogst wordt, en het temperatuurniveau is beduidend lager dan dat van de afgedekte collectoren. Op warme dagen met veel zon kan warmte op rond 30°C geproduceerd worden. Dit temperatuurniveau past goed bij WKO, waar de maximaal toegestane temperatuur voor ondergrondse opslag 25°C bedraagt.
- Gevelpanelen, ofwel als afgedekte collector ofwel als onafgedekte collector.⁴
- Combinaties van technieken, zoals aquathermie met zonnecollectoren, ofwel afgedekt ofwel onafgedekt. De collectoren zijn daarbij in de buurt van de warmtepomp en het warmtenet geplaatst.

2.2 Zonnewarmte in de tuinbouw en veeteelt

In de tuinbouw kan zonnewarmte ook een rol spelen, met name wanneer er sprake is van een (bestaande) WKO. Qua veeteelt is het vooral in de intensieve bio-industrie waar zonnewarmte een rol kan spelen. De mogelijke techniekvarianten voor de landbouw zijn grotendeels identiek aan die voor de utiliteitsbouw:

⁴ Gevelpanelen met geïntegreerde thermische zonnecollectoren, S.J.F. Erich, S.L. van Leeuwen, TNO 2017 R10624, <https://projecten.topsectorenergie.nl/storage/app/uploads/public/5a3/a94/08a/5a3a9408abd1d715516633.pdf>

- Vlakkeplaatcollectoren of vacuümbuiscollectoren
- PVT
- Combinaties van technieken, zoals aquathermie met collectoren
- Daglichtkas

De daglichtkas is een speciaal concept voor de glastuinbouw met zonlichtconcentrerende lenzen in het kasdek en onafgedekte zonvolgende collectorbuizen eronder⁵, bedoeld voor de combinatie met een warmtepomp en WKO.

2.3 Zonnewarmte in de voedingsmiddelenindustrie

In de voedingsmiddelenindustrie is er ook een relatief grote vraag naar warm proceswater, onder andere voor processen maar ook voor reinigingsactiviteiten. In deze sector gaat het om relatief hoge temperaturen, waarvoor twee techniekvarianten beschikbaar zijn:

- Vlakkeplaatcollectoren of vacuümbuiscollectoren
- Zonvolgende concentrerende collectoren (trogcollectoren, fresnel lenzen, paraboolcollectoren)

Zonvolgende concentrerende collectoren focussen het directe zonlicht sterk waardoor temperaturen van enkele honderden graden Celsius bereikt kunnen worden.

2.4 Zonnewarmte in industriële processen

Bij industriële processen is het gevraagde temperatuurniveau hoger dan in de voedingsmiddelenindustrie, met deze technieken als optie:

- Vlakkeplaatcollectoren (eventueel hoog-efficiënt) of vacuümbuiscollectoren
- Concentrerende collectoren (trogcollectoren, fresnel lenzen, paraboolcollectoren)

2.5 Zonnewarmte voor warmtenetten

Warmtenetten worden altijd op een bepaalde aanvoer- en retourtemperatuur ontworpen, en daarmee liggen ook de eventuele combinaties met technieken voor zonnewarmte vast. Een overzicht is te zien in Tabel 2.2. In het volgende hoofdstuk wordt zonnewarmte in warmtenetten verder uitgewerkt.

⁵ Conceptadvies SDE++ CO2-reducerende opties daglichtkas, Luuk Beurskens, Sander Lensink, PBL 2019, <https://www.pbl.nl/publicaties/conceptadvies-sde-co2-reducerende-opties-daglichtkas>

Tabel 2.2: *Verschillende typen warmtenetten en bijbehorende temperatuurniveaus, met daarbij de mogelijke opties voor zonnecollectoren.*

Benaming	Aanvoer-temperatuur	Type collector
Hogetemperatuur warmtenet	>80°C	Hoog-efficiënte vlakkeplaatcollectoren, vacuüm-buiscollectoren en zonvolgende concentrerende collectoren
Middentemperatuur warmtenet	>65°C	Vlakkeplaatcollectoren, vacuumbuiscollectoren
Lagetemperatuur warmtenet	>30°C	Vlakkeplaatcollectoren
Zeer lage temperatuur warmtenet	<30°C	Vlakkeplaatcollectoren, onafgedekte collectoren (WISC), PVT

3 Zonnewarmte in warmtenetten

Wat Europa betreft is er in Denemarken, Duitsland en Oostenrijk relatief veel aandacht voor zonnewarmte in warmtenetten. Hieronder volgt informatie over de projecten in het buitenland, over de situatie in Nederland, over netinpassing van zonnewarmte en tenslotte over de kosten en opbrengst van zonnewarmte in warmtenetten.

3.1 Zonnewarmte in warmtenetten in het buitenland

In Denemarken zijn er circa 50 warmtenetten waarin zonnewarmte geïntegreerd is. Dat zonnewarmte daar zo groot toegepast wordt heeft onder andere te maken met deze factoren:

- Warmtenetten in Denemarken zijn wijd verbreid
- Hoge maatschappelijk acceptatie voor zonnewarmte
- De Deense warmtenetten zijn veelal in handen van energiecoöperaties, waarbij de financiële rendementseisen minder hoog zijn en er bovendien tegen aantrekkelijke voorwaarden geld geleend kan worden voor investeringen
- De warmtenetten bevinden zich vaak in rurale gebieden, waar grondprijzen niet erg hoog zijn zodat de kosten voor de voor zonnewarmte benodigde grond oppervlakte minder zijn.
- De Deense warmtenetten worden doorgaans op middentemperatuur bedreven (zie tabel 2.2) waardoor zonnewarmte beter inpasbaar is (zie daarvoor ook paragraaf 3.5)

In Denemarken zijn de warmtenetten vooral uitgerust met vlakkeplaatcollectoren (soms hoog-efficiënt), vacuümbuiscollectoren en een enkele keer met concentrerende collectoren (troglcollectoren en fresnellenzen). Onafgedekte collectoren en PVT komen niet of nauwelijks voor. Er is een openbaar webplatform dat live doorgeeft wat de warmteopbrengst is van de Deense zonnewarmteprojecten, en daar is ook meer informatie over de installaties te vinden⁶.

In Duitsland zijn er meerdere projecten en initiatieven, en daar is in veel steden een warmtenet voorhanden, maar ook wordt er vaker direct aan gebouwen geleverd.

In Oostenrijk is er een lange geschiedenis met zonnewarmte, waardoor de installaties wijdverbreid zijn en vele sectoren de techniek toepassen.

Een overzicht van warmtenetprojecten internationaal is te vinden via de website van het Solar Heating and Cooling Technology Collaboration Programme van International Energy Agency (IEA-SHC)⁷.

3.2 Zonnewarmte in warmtenetten in Nederland

In Nederland is er één bestaand project voor zonnewarmte dat invoedt op een warmtenet: Zoneiland Almere (2010). Het collectoroppervlakte bedraagt 7000 m² en de maximaal in een jaar gerealiseerde warmteopbrengst bedraagt 2695 MWh (2020), waarmee de specifieke zonnewarmteopbrengst van de afgedekte collectoren 385 kWh/m²/jaar bedraagt. De installatie is

⁶ Solar Heat Data, monitoringsplatform van Deense zonnewarmtenetten: <http://www.solarheatdata.eu>

⁷ IEA-SHC Task 55, Towards the Integration of Large SHC Systems into DHC Networks, <https://task55.iea-shc.org>

zonder warmteopslag gekoppeld aan een warmtenet en geeft, voor de 2350 aangesloten woningen, een zon-aandeel van 10% van de warmtevraag⁸.

Van een tweede project is de bouw inmiddels (november 2022) gestart bij Warmtestad in Groningen^{9,10}. Het park heeft een oppervlakte van 12 hectare en zal duurzame warmte leveren aan het Groningse warmtenet. De zonnewarmte is, mede door de warmte-koudeopslag (WKO) voldoende voor 25 procent van alle warmte die de ruim 10.000 aangesloten huishoudens en bedrijven uit Noordwest Groningen verbruiken. Er worden meer dan 24.000 vacuümbuiscollectoren gebruikt die warm water tot zo'n 85 graden Celsius kunnen leveren. Naar verwachting zal het park in 2023 in gebruik worden genomen.

Er zijn ook grote projecten in Nederland die niet invoeden op een warmtenet, maar direct, al dan niet via een klein distributienet, warmte leveren aan gebouwen, tuinbouw en industrie.

Onder de SDE++ regeling kan zonnewarmte in warmtenetten in aanmerking komen voor een productiesubsidie¹¹.

3.3 Opbrengst van zonnewarmte in warmtenetten

In deze paragraaf worden de aannames en de resulterende opbrengstgegevens toegelicht. De opbrengst- en kostencijfers gelden voor zonnewarmte van 1 MWth (1429 m² apertuuroppervlakte) tot 100 MWth (142857 m²). Apertuuroppervlakte is de oppervlakte, waardoor zonstraling de collector binnendringt.

Modelbenadering

Voor het bepalen van de warmteopbrengst uit zonnewarmte wordt een rekenmodel gebruikt dat op basis van een vermogenskromme voor een bestaande collector uurwaardes genereert, die afhangen van de zoninstraling, de omgevingstemperatuur, collectorparameters en de mediumtemperatuur. Dit wordt gedaan voor meerdere werktemperatuurniveaus.

Gebruikte collector

Voor de bepaling van de opbrengst is een afgedekte vlakkeplaatcollector gebruikt. De kenmerken van de gebruikte collector zijn:

- Merk: GREENoneTEC Solarindustrie GmbH
- Type: GK 3133
- Apertuuroppervlakte: 12,35 m²
- Bruto oppervlakte: 13,17 m²

Het Solar Keymark certificaat definieert de collectorparameters van deze collector en is in te zien via solarkeymark.nl. Het referentienummer voor de collector is 011-7S2565F.

Ontwerp van de veldinstallatie

Voor de analyse is de aanname gedaan dat de installatie een totaal apertuuroppervlakte heeft van één hectare (10.000 m²). Dat betekent in totaal 810 van bovenstaande collectoren. Vanwege de noodzakelijke afstand tussen de collectoren (in verband met beschaduwing) is het benodigde

⁸ Bron: <https://www.vattenfall.nl/duurzame-energie/zonne-energie/zonnestrallen-uit-je-douche>

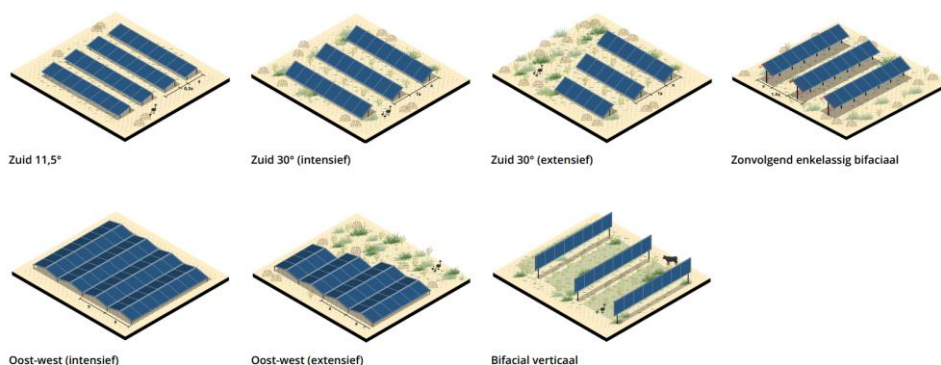
⁹ Bron: <https://warmtestad.nl/zonthermiepark>

¹⁰ Bron: <https://economie.groningen.nl/nieuws/bouw-grootste-zonnewarmtepark-van-nederland-gestart-in-groningen>

¹¹ Eindadvies basisbedragen SDE++ 2022, Sander Lensink, Koen Schoots (maart 2022), <https://www.pbl.nl/publicaties/eindadvies-basisbedragen-sde-2022>

grondoppervlak groter dan de apertuuroppervlakte. Op basis van een TKI-UE rapport¹² wordt een aanname gedaan voor het grondbeslag. In voornoemde rapportage wordt voor zon-PV in landschap een aantal systeemtypologieën beschreven, zie figuur 1, die ook voor zonnepanelen gelden. In de bijlage van het rapport wordt beschreven wat het paneeloppervlak per km² is, en uitgaande van de variant 'zuid 30° intensief' is dat ongeveer 50%. Uitgaande van een typologie die voor zonnepanelen identiek is aan die voor zon-PV betekent dat voor een zonnepanelenveld met een apertuuroppervlakte van 1 ha zodoende 2 ha grondoppervlakte nodig is. Deze parameter is relevant bij het bepalen van de kosten voor grondhuur.

OVERZICHT SYSTEEMTYPOLIEËN ZON IN LANDSCHAP



Figuur 1: Systeemtypologieën voor zon-PV in landschap (bron: zie voetnoot 12).

Klimaatgegevens en locatie

Voor de doorrekening van het zonnepanelenveld is als locatie het centraal gelegen De Bilt gekozen (coördinaten 52.1 en 5.183) en de waarde voor de azimuth bedraagt 0°, en voor een hellingshoek van 45 graden op het zuiden. Als klimaatgegevens zijn de Meteoronorm data (bron: Meteoronorm.com) gebruikt, met voor deze locatie een jaarlijkse globale instraling in het collectorvlak van 1135 kWh/m².

Verliezen in het gedeelte zonnepanelen

De aangeleverde gegevens zijn voor twee soorten verliezen handmatig gecorrigeerd:

- Verliezen wegens spiegeling: wanneer de invalshoek van de zoninstraling klein is treedt er meer weerkaatsing op dan bij loodrechte instraling. Dit is in de huidige dataset gecorrigeerd door de warmteopbrengst voor elk uur met 3% te verminderen (schatting).
- Hydraulische verliezen in het systeem voor zonnepanelen. Deze hangen sterk samen met het ontwerp van het systeem, de te overbruggen afstanden en de dimensionering van de leidingen. Dit is in de huidige dataset gecorrigeerd door de warmteopbrengst voor elk uur met 2% te verminderen (schatting).

Samen zorgen beide verliezen voor een vermindering van 5% van de warmteopbrengst.

Opbrengst van een zonnepanelenveld

Bij de bepaling van de uurwaarden van het geleverde thermische vermogen zijn er twee effecten te zien:

- Het vermogen en de energieopbrengst zijn afhankelijk van de vraagtemperatuur van het systeem: hoe lager de waarde van T_{mean} (T_m) hoe hoger het vermogen, en daarmee hoe hoger de energieopbrengst.

¹² TKI Urban Energy, Generation.Energy, *Ruimtelijk Potentieel van zonnestroom in Nederland*, maart 2021, <https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/Urban%20energy/publicaties/Ruimtelijk%20potentieel%20van%20zonnestroom%20in%20Nederland.pdf>

- Afhankelijk van de maand zijn bepaalde temperatuurniveaus eenvoudigweg niet haalbaar. Dit wordt bepaald door de combinatie van de zoninstraling en de waarde van T_m . Zo kan er bijvoorbeeld op 1 januari tot maximaal 40°C warmte geleverd worden, maar niet hoger.

Voor toepassing binnen de WarmingUP Design Toolkit¹³ is de tijd- en temperatuurafhankelijkheid van de opbrengst een relevant gegeven: het model en/of de gebruiker kan zo kiezen wat een gewenst temperatuurniveau is. Daarbij is het de vraag of het temperatuurniveau voor elke dag opnieuw gekozen kan worden, of dat het voor een heel jaar vastgelegd moet worden.

Voor het zonneveld wordt in **Tabel 3.1** de berekende jaaropbrengst [kWh/m²], de maximale waarde van het berekende nominale vermogen [W/m²] en de afgeleide berekende jaaropbrengst uitgedrukt ten opzichte van de maximale waarde van het berekende nominale vermogen [kWh/kW/jaar] (ook wel vollasturen [uren/jaar]) weergegeven.

Tabel 3.1: Gesimuleerde specifieke jaaropbrengst, thermisch vermogen en afgeleide jaaropbrengst van een zonnepaneelveld.

	Q [W/m ²] bij $T_m = 20^\circ\text{C}$	Q [W/m ²] bij $T_m = 25^\circ\text{C}$	Q [W/m ²] bij $T_m = 30^\circ\text{C}$	Q [W/m ²] bij $T_m = 35^\circ\text{C}$	Q [W/m ²] bij $T_m = 40^\circ\text{C}$	Q [W/m ²] bij $T_m = 45^\circ\text{C}$	Q [W/m ²] bij $T_m = 50^\circ\text{C}$	Q [W/m ²] bij $T_m = 55^\circ\text{C}$	Q [W/m ²] bij $T_m = 60^\circ\text{C}$	Q [W/m ²] bij $T_m = 65^\circ\text{C}$	Q [W/m ²] bij $T_m = 70^\circ\text{C}$	Q [W/m ²] bij $T_m = 75^\circ\text{C}$	Q [W/m ²] bij $T_m = 80^\circ\text{C}$
Jaaropbrengst [kWh/m ²]	825	785	745	705	666	627	589	550	512	476	440	405	371
Maximaal vermogen [W/m ²]	850	840	828	816	803	789	774	759	743	726	708	690	671
Jaaropbrengst [kWh/kW/jaar]	971	935	900	865	830	795	760	725	690	655	621	586	552

Elektrische pompenergie

Wanneer er warmtelevering is dan is het noodzakelijk om het warmtevoerend medium middels een circulatiepomp te laten stromen. De vermogens van de pompen zijn aanzienlijk en kunnen een groot elektrisch vermogen vragen.

Voor de analyse voor de WarmingUP Design Toolkit wordt een eenvoudige veronderstelling gedaan om de benodigde pompenergie af te schatten. Enerzijds wordt verondersteld dat de pompenergie afhankelijk is van het geleverde thermisch vermogen. Anderzijds wordt aangenomen dat er een vaste verhouding is tussen het geleverde thermisch vermogen en de elektrische pompenergie. De getalsmatige aanname is dat de elektrische pompenergie 1% bedraagt van het geleverde thermische vermogen.

Voor het zonneveld wordt in Tabel 3.2 de elektrische pompenergie gegeven, volgens de boven beschreven inschatting.

¹³ WarmingUP Design Toolkit, software-pakket dat ontwerpers van warmtenetten helpt bij het ontwerp van toekomstbestendige warmtenetten: <https://www.warmingup.info/design toolkit>

Tabel 3.2: Aannames voor de elektrische pompenergie van een zonnewarmteveld.

	Qpomp [W/m ²] bij Tm = 20°C	Qpomp [W/m ²] bij Tm = 25°C	Qpomp [W/m ²] bij Tm = 30°C	Qpomp [W/m ²] bij Tm = 35°C	Qpomp [W/m ²] bij Tm = 40°C	Qpomp [W/m ²] bij Tm = 45°C	Qpomp [W/m ²] bij Tm = 50°C	Qpomp [W/m ²] bij Tm = 55°C	Qpomp [W/m ²] bij Tm = 60°C	Qpomp [W/m ²] bij Tm = 65°C	Qpomp [W/m ²] bij Tm = 70°C	Qpomp [W/m ²] bij Tm = 75°C	Qpomp [W/m ²] bij Tm = 80°C
Jaarpompvraag [kWh/m ²]	8,3	7,8	7,4	7,1	6,7	6,3	5,9	5,5	5,1	4,8	4,4	4,0	3,7
Maximaal pompvermogen [W/m ²]	8,5	8,4	8,3	8,2	8,0	7,9	7,7	7,6	7,4	7,3	7,1	6,9	6,7
Vollasturen circulatiepomp [uren/jaar] ofwel [kWh/kW/jaar]	971	935	900	865	830	795	760	725	690	655	621	586	552

3.4 Kosten van zonnewarmte in warmtenetten

Elk van de techniekvarianten van grootschalige zonnewarmtesystemen wordt gekenmerkt door eigen specifieke kosten. Die worden in dit hoofdstuk op een rij gezet. Daarbij is de focus op grote systemen die passend zijn bij aquathermieprojecten en warmtenetten op middentemperatuur voor de gebouwde omgeving. Omdat een warmtenet dat op een zeer lage temperatuur bedreven wordt qua configuratie vaak uit meerdere componenten bestaat, zoals een collectieve warmtepomp of meerdere individuele warmtepompen in combinatie met een opslag voor warmte en eventueel koude, wordt deze hier niet nader toegelicht.

Als bron voor de kosten wordt daarbij verwezen naar de kentallen uit de rapporten van PBL, met name de rapporten in het kader van SDE++.

Hierbij worden de kosten voor vlakkeplaatcollectoren en concentrerende collectoren beschouwd:

3.4.1 Vlakkeplaatcollectoren met een vermogen groter dan 1 MWth

Investeringskosten

Voor de investeringskosten wordt gebruik gemaakt van de schattingen voor grootschalige zonnewarmte zoals gedefinieerd in het Eindadvies SDE++ 2022 van PBL¹⁴. Dit is zonnewarmte met een vermogen boven 1 MWth (omgerekend zo'n 1429 m² collectoroppervlak). Voor de omrekening van 1 m² apertuuroppervlak naar kWth wordt de factor 0,7 kW/m² gebruikt, conform de definitie

¹⁴ Eindadvies basisbedragen SDE++ 2022, Sander Lensink, Koen Schoots (editors), maart 2022, <https://www.pbl.nl/publicaties/eindadvies-basisbedragen-sde-2022>

van IEA¹⁵. Gegevens voor zonnewarmte met een vermogen minder dan 1 MWth zijn in Bijlage A te vinden.

De investeringskosten volgens SDE++ 2022 bedragen 420 €/kWth. Op dit cijfer worden twee aanpassingen gedaan:

- In SDE++ worden geen ontwikkelkosten (leges, juridische kosten, kosten voor het rond krijgen van de financiering) meegenomen, en die worden hier daarom bijgeplust: we kiezen een percentage van 5% (van de investeringskosten volgens SDE++ 2022).
- In WarmingUP worden de aanlegkosten apart gespecificeerd (zie volgende paragraaf) en die worden dus op de waarde volgens SDE++ 2022 in mindering gebracht. Hiervoor wordt ter indicatie gekeken naar de Deense installatie in Vojens, waarvoor installatiekosten van ongeveer 7% gerapporteerd zijn¹⁶. Voor de analyse in WarmingUp kiezen we 10% aanlegkosten (van de investeringskosten volgens SDE++ 2022).

Daarmee komen de investeringskosten inclusief ontwikkelkosten en exclusief aanlegkosten op 399 €/kWth (279 €/m²).

Aanlegkosten van de bron

Zoals hierboven reeds toegelicht nemen we voor de aanlegkosten van de zonnewarmteinstallatie 10% van de investeringskosten: 42 €/kWth (29,4 €/m²).

Vaste onderhoudskosten en operationele kosten

De vaste O&M-kosten (*operation and maintenance*) voor zonnewarmte in SDE++ bedragen 4,0 €/kWth/jaar (2,8 €/m²/jaar), maar deze kosten zijn exclusief grondkosten of de huur van grond. De uitgaven voor elektriciteit ten behoeve van de circulatiepompen zijn wel inbegrepen. Om de grondkosten mee te nemen kiezen we grondkosten van 1000 €/ha/jaar, ofwel 0,1 €/m²/jaar. Omdat het grondoppervlak bij een zuidopstelling ongeveer twee maal zo groot is als de apertuuroppervlakte (zie paragraaf 2.3) verdubbelt dit bedrag. De vaste O&M-kosten voor zonnewarmte inclusief grondkosten worden zo 4,3 €/kWth/jaar (3,0 €/m²/jaar).

Variabele onderhoudskosten en operationele kosten

De variabele O&M-kosten voor zonnewarmte in SDE++ bedragen volgens het SDE++ rapport 0,0019 €/kWh (transactie- en contractkosten) en die waarde wordt hier overgenomen.

Levensduur

De levensduur van een veld voor zonnewarmte wordt op 25 jaar gesteld.

Tabel 3.3 geeft de financiële gegevens voor zonthermische veldopstelling, bedoeld voor netintegratie. Daarbij zijn de kosten zowel per thermisch vermogen als per oppervlakte-eenheid weergegeven.

¹⁵ IEA (2004): Gleisdorf meeting. Recommendation for converting solar thermal collector area into installed capacity, 2004, https://www.iea-shc.org/data/sites/1/documents/statistics/technical_note-new_solar_thermal_statistics_Conversion.pdf

¹⁶ Wärmewende-Info 15, Weltgrößte Solarthermieranlage in Vojens, Ralf Radloff, Januar 2015

Tabel 3.3: Financiële gegevens voor zonthermische veldopstellingen voor koppeling met warmtenetten, uitgaande van vlakkeplaatcollectoren met een totaal vermogen groter dan 1 MWth.

Investeringskosten incl. ontwikkelkosten excl. aanlegkosten	399 EUR/kWth	279 EUR/m ²
Aanlegkosten	42 EUR/kWth	29,4 EUR/m ²
Investeringskosten incl. ontwikkelkosten incl. aanlegkosten	441 EUR/kWth	309 EUR/m ²
Vaste onderhoudskosten en operationele kosten inclusief grondkosten	4,3 EUR/kWth/jaar	3,0 EUR/m ² /jaar
Variabele onderhoudskosten en operationele kosten volgens SDE++	0,0019 EUR/kWh	
Levensduur	25 jaar	
Grondoppervlak per eenheid van vermogen (bij 2 m ² grond per 1 m ² apertuuroppervlak)	2,9 m ² /kWth	

3.4.2 Concentrerende collectoren met een vermogen groter dan 1 MWth

Investeringskosten

Voor de investeringskosten van grootschalige zonvolgende concentrerende collectoren wordt gebruik gemaakt van de schattingen voor zonnewarmte op basis van concentrerende collectoren zoals gedefinieerd in het Eindadvies SDE++ 2022 van PBL¹⁷. Dit is zonnewarmte met een vermogen boven 1 MWth en voor de toepassing in warmtenetten beneden 120°C (zie Bijlage A voor andere varianten). Voor de omrekening van 1 m² apertuuroppervlak naar kWth wordt een factor 0,5 kW/m² gebruikt. De investeringskosten volgens SDE++ 2022 bedragen 600 €/kWth. Op dit cijfer worden twee aanpassingen gedaan:

- In SDE++ worden geen ontwikkelkosten meegenomen, en die worden hier daarom extra toegevoegd: we kiezen een percentage van 5% (van de investeringskosten volgens SDE++ 2022).
- In WarmingUP worden de aanlegkosten apart gespecificeerd (zie volgende paragraaf) en die worden dus op de waarde volgens SDE++ 2022 in mindering gebracht. Hiervoor wordt ter indicatie gekeken naar de Deense installatie in Vojens, waarvoor installatiekosten van ongeveer 7% gerapporteerd zijn¹⁸. Voor de analyse in WarmingUp kiezen we 10% aanlegkosten (van de investeringskosten volgens SDE++ 2022).

Daarmee komen de investeringskosten inclusief ontwikkelkosten en exclusief aanlegkosten op 570 €/kWth (285 €/m²).

Aanlegkosten van de bron

Zoals hierboven reeds toegelicht nemen we voor de aanlegkosten 10% van de investeringskosten: 60 €/kWth (30 €/m²).

Vaste onderhoudskosten en operationele kosten

De vaste O&M-kosten voor zonnewarmte in SDE++ bedragen 6 €/kWth/jaar (3 €/m²/jaar), maar deze kosten zijn exclusief grondkosten of de huur van grond. De uitgaven voor elektriciteit ten behoeve van de circulatiepompen zijn wel inbegrepen. Om de grondkosten mee te nemen kiezen we grondkosten van 1000 €/ha/jaar, ofwel 0,1 €/m²/jaar. Omdat het grondoppervlak bij een zuidopstelling ongeveer twee maal zo groot is als de apertuuroppervlakte (zie paragraaf 2.3) verdubbelt dit bedrag. De vaste O&M-kosten voor zonnewarmte inclusief grondkosten worden zo 4,6 €/kWth/jaar (3,2 €/m²/jaar).

¹⁷ Eindadvies basisbedragen SDE++ 2022, Sander Lensink, Koen Schoots (editors), maart 2022, <https://www.pbl.nl/publicaties/eindadvies-basisbedragen-sde-2022>

¹⁸ Wärmewende-Info 15, Weltgrößte Solarthermieranlage in Vojens, Ralf Radloff, Januar 2015

Variabele onderhoudskosten en operationele kosten

De variabele O&M-kosten voor zonnewarmte in SDE++ bedragen volgens het SDE++ rapport 0,0019 €/kWh (transactie- en contractkosten) en die waarde wordt hier overgenomen.

Levensduur

De levensduur van een veld voor zonnewarmte wordt op 25 jaar gesteld.

Onderstaande tabel geeft de financiële gegevens voor zonthermische veldopstelling, bedoeld voor netintegratie. Daarbij zijn de kosten zowel per thermisch vermogen als per oppervlakte-eenheid weergegeven.

Tabel 3.4: Financiële gegevens voor zonthermische veldopstellingen voor koppeling met warmtenetten, uitgaande van concentrerende collectoren met een totaal vermogen groter dan 1 MWth en een temperatuur lager dan 120°C.

Investeringskosten incl. ontwikkelkosten excl. aanlegkosten	570 EUR/kWth	285 EUR/m ²
Aanlegkosten	60 EUR/kWth	30,0 EUR/m ²
Investeringskosten incl. ontwikkelkosten incl. aanlegkosten	630 EUR/kWth	315 EUR/m ²
Vaste onderhoudskosten en operationele kosten inclusief grondkosten	4,6 EUR/kWth/jaar	3,2 EUR/m ² /jaar
Variabele onderhoudskosten en operationele kosten volgens SDE++	0,0019 EUR/kWh	
Levensduur	25 jaar	
Grondoppervlak per eenheid van vermogen (bij 2 m ² grond per 1 m ² apertuuroppervlak)	4,0 m ² /kWth	

3.5 Netinpassing van zonnewarmte

Voor de integratie van een veldsysteem voor zonnewarmte bestaan verschillende mogelijkheden. Dit is ingegeven door de vermogenskarakteristiek van zonnewarmte, die immers bij grote warmtebehoefte (in de winter) laag is, terwijl in de zomer het thermisch vermogen hoog is maar de warmtevraag juist laag.

Hieronder worden diverse integratieconcepten opgesomd, waarbij onderscheid gemaakt tussen de centrale benadering (grootschalige zonnewarmte als centrale bron) en de decentrale benadering (grootschalige zonnewarmte als decentrale bron).

Bij het implementeren van zonnewarmte in de WarmingUP Design Toolkit is de wijze van inpassing en de bedrijfsmodus van zonnewarmte als warmtebron een belangrijk aandachtspunt.

3.5.1 Grootschalige zonnewarmte als centrale bron

Uit een document¹⁹ van IEA-SHC Taak 55 worden de volgende integratieconcepten geciteerd voor zonnewarmte als centrale bron. In de realiteit zijn deze concepten als regelstrategieën geïmplementeerd, op voorwaarde dat de installatie als zodanig ontworpen is. Zo kan er tijdens bedrijf gewisseld worden tussen de bedrijfsmodi die hieronder toegelicht worden.

- 1 *Uitgangstemperatuur zonneveld is gelijk aan de aanvoertemperatuur van het warmtenet*
In deze situatie kan het warmtemedium uit de retourleiding in het zonneveld opgewarmd

¹⁹ Integration concepts of central ST systems in DH, Paolo Leoni (AIT), Jan Erik Nielsen (PlanEnergi), IEA SHC FACT SHEET 55.A.3.1, June 2020, <https://task55.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-T55-A-D.3.1-FACT-SHEET-Integration-ST-in-central-DH.pdf>

worden en direct ingevoed worden in de aanvoerleiding van het warmtenet. In het geval er te veel warmte uit het zonneveld komt dan kan het overschot opgeslagen worden in een warmtebuffer.

- 2 *Uitgangstemperatuur zonneveld is lager dan de aanvoertemperatuur van het warmtenet*
Hiervoor bestaan verschillende mogelijkheden die mede afhankelijk zijn van de karakteristieken van de andere warmtebronnen in het systeem, evenals het laadniveau van de warmtebuffer. Varianten daarbij zijn:
 - Indirecte retour naar aanvoer: het zonneveld warmt het retourwater uit het warmtenet op, dat vervolgens gemengd wordt met de warmte die een hogetemperatuurbron levert (bijvoorbeeld een ketel).
 - Voorverwarmen van water voor een ketel: het zonneveld warmt het retourwater uit het warmtenet op, alvorens het aan een ketel aangeboden wordt.
 - Combinatie van zonneveld met warmtebuffer: het zonneveld warmt het retourwater uit het warmtenet op, dat vervolgens gemengd wordt met de warmte uit een warmtebuffer.
- 3 *Uitgangstemperatuur zonneveld is hoger dan de aanvoertemperatuur van het warmtenet*
Deze situatie komt veelal in de zomer voor en hierbij zijn twee mogelijke bedrijfsvormen:
 - Gelijktijdig leveren van warmte aan het net en het opladen van de warmtebuffer. Hierbij wordt het temperatuurniveau van de warmtebuffer verhoogd. Warmtelevering is hierbij de hoofdfunctie.
 - Opladen van de warmtebuffer en tegelijkertijd warmte leveren aan het net. Hierbij wordt het koudste water uit de buffer opgewarmd en teruggevoerd naar de opslag. Warmtebuffering is hierbij de hoofdfunctie.

3.5.2 Grootschalige zonnewarmte als decentrale bron

Uit een ander document²⁰ van IEA-SHC Taak 55 worden de volgende integratieconcepten geciteerd voor zonnewarmte als decentrale bron, wat hier niet verder uitgewerkt wordt omdat onderhavige analyse op centrale systemen focust. Ook hier geldt dat deze concepten in werkelijkheid doorgaans flexibel ingezet kunnen worden.

Voor decentrale inpassing zijn er vier benaderingen, die hieronder kort opgesomd worden:

1. Retour naar retour (zonnewarmte voegt energie toe aan de retourleiding)
2. Retour naar aanvoer (zonnewarmte voegt energie toe aan de retourleiding en voedt in op de aanvoerleiding)
3. Aanvoer naar aanvoer (doorgaans voor levering aan gebouw)
4. Aanvoer naar retour (als 3 maar dan met oververhittingsbeveiliging)

De twee eerstgenoemde zijn de meest voorkomende leveringsstrategieën.

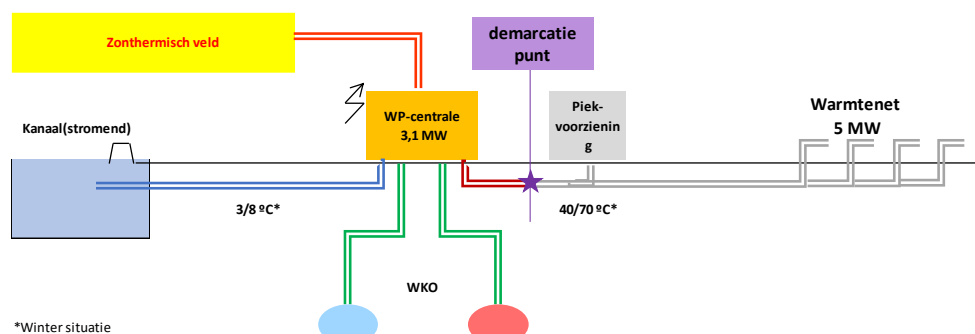
²⁰ Integration concepts of decentral ST systems in DHC, Paolo Leoni (AIT), Gunnar Lennermo (Energianalys), IEA SHC FACT SHEET 55.A.3.2, June 2020, <https://task55.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-T55-A-D.3.2-FACT-SHEET-Integration-ST-decentral-DH.pdf>

4 Combinatie van zonnewarmte en aquathermie

Eén van de in hoofdstuk 2 genoemde varianten betreft de combinatie van aquathermie en zonnewarmte. Deze combinatie kan een goede synergie opleveren waarbij de sterke kanten van beide technieken goed tot hun recht komen. Voor aquathermie is dat de mogelijkheid om, in combinatie met WKO, ook in de winter een stabiele bron van hernieuwbare warmte te zijn, voor zonnewarmte is dat het vermogen om mediumtemperaturen naar relatief hoge waarden te tillen (in de zomer) en ook warmte van een relatief laag temperatuurniveau te leveren (voor- en najaar), zonder hulp van fossiele energiedragers. Dit hoofdstuk wijdt uit over deze combinatie.

4.1 Systeemschets aquathermie met zonnewarmte

Voor een toepassing van de lageretemperatuuropbrengst van zonnewarmte is een WKO gunstig omdat daarvan de maximaal toegestane temperatuur 25°C bedraagt. Doorgaans is een WKO reeds voorhanden bij aquathermie. Zie de figuur hieronder²¹.



Systeemschets aquathermie met zonnewarmte. Figuur uit rapport “Gedetailleerde kostenberekening aquathermie”, zie voetnoot 21.

4.2 Bedrijfsmodi zonnecollectoren

Vanwege de temperatuurafhankelijke opbrengst in de verschillende seizoenen kunnen vier bedrijfsmodi onderscheiden worden voor de zonnecollectoren:

Modus 1 (zomer, voor- en najaar): direct zonnewarmte invoeden op warmtenet (met of zonder warmtelevering door aquathermie). Daarbij hoeft geen warmte door de warmtepomp geleverd te worden, wat operationele kosten uitspaart: er is geen elektriciteit voor de warmtepomp nodig.

Modus 2 (zomer) bij aanwezigheid van een WKO: laden van de WKO. Zonnewarmte verhoogt de temperatuur aan de warme zijde van de WKO naar 25°C (het maximaal toegestane

²¹ Figuur overgenomen (en aangepast) uit ‘Gedetailleerde kostenberekening aquathermie’, Ruben Cardose (Techniplan), Tom van der Velden (IF Technology), Jan Westerweel (Techniplan), Frank Niewold (IF Technology), Rik Molenaar (Techniplan), 10 juni 2022
<https://www.warmingup.info/documenten/gedetailleerde-kostenberekening-aquathermie.pdf>

temperatuurniveau, alleen bij een overschot aan warmte). Hiermee wordt een hoger laadniveau van de WKO bereikt na de zomer (hogere temperatuur van de WKO en daardoor ook een hogere COP voor de warmtepomp, waardoor er minder elektriciteit nodig is).

Modus 3 (voor- en najaar) zonder aanwezigheid van WKO: mediumtemperatuur verhogen van ingenomen water (uit waterlichaam) voor warmtepomp, zodat er een hogere COP behaald kan worden door de warmtepomp en er minder elektriciteit nodig is.

Modus 4 (winter): temperatuur verhogen van warmte uit WKO, waardoor een hogere COP behaald kan worden door de warmtepomp, er is minder elektriciteit nodig.

Wanneer er in de systeemconfiguratie bovendien een dagopslag voor (hoge temperatuur) warmte (buffervat) is voor warmte dan neemt de flexibiliteit nog verder toe.

Merk op dat er ook een aantal punten is dat de business case van de combinatie van aquathermie en zonnewarmte negatief beïnvloeden:

- Extra investeringskosten (Capex) en operationele uitgaven (Opex) door zonnewarmte
- Extra inpassingskosten
- Extra elektriciteit voor de circulatiepomp van het zonneveld
- Meer stilstand van de warmtepomp geeft mogelijk meer onderhoud

In de volgende paragrafen wordt een inschatting gegeven van het effect van bovenstaande aspecten op de kosten van warmteproductie.

In eerste aanleg worden er alleen varianten doorgerekend zonder WKO, dit vanwege rekenkundige beperkingen omdat de jaarbelastingduurkrommes die daarvoor nodig zijn niet beschikbaar zijn. Hierbij wordt verwezen naar de gedetailleerde kostenberekening die in WarmingUP Thema 3 voor aquathermie samengesteld is²². Het gaat dus om scenario 4 en 6 uit het genoemde rapport.

4.3 Aquathermie scenario 4 met zonnewarmte

Beschrijving van de variant

Variant 4 maakt gebruik van thermische energie uit afvalwater (TEA). Het TEA-systeem levert gedurende het hele jaar warmte aan de warmtepompcentrale, waardoor een WKO-systeem niet nodig is. Systeem is aangesloten op een warmtenet van 5 MW en de warmtepomp draait jaarlijks 3500 vollasturen. De aanvoertemperatuur in het net is 70°C. Belangrijke aanname bij de berekening in het rapport is de prijs voor elektriciteit die door de warmtepomp gebruikt wordt. Voor de elektriciteitsprijs wordt prijsscenario 2 gebruikt, waarvoor ook in het betreffende rapport gekozen is.

Inpassing zonnewarmte in scenario 4

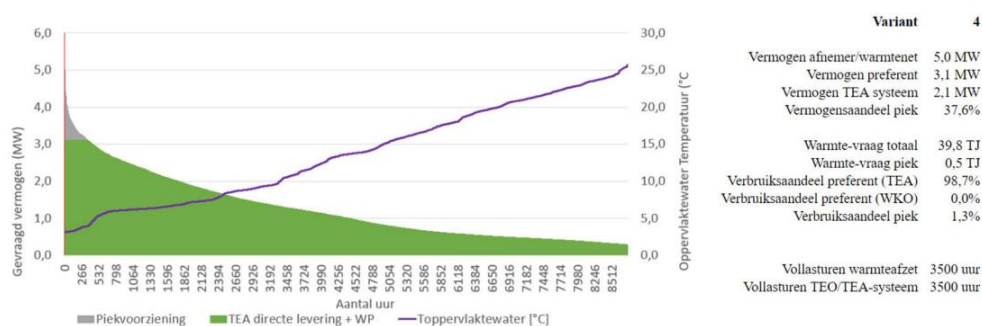
Op basis van de jaarbelastingduurkromme (Figuur 4.1) wordt aangenomen dat het vermogen van een zonneveld zonder inpassingsproblemen 0,3 MW kan zijn (op basis van het bedrijfspunt aan de rechterzijde van de figuur). Dit correspondeert met een apertuuroppervlak voor zonnewarmte van 424 m² (grondoppervlak circa 29 x 29 m²) dat op basis van de aanbodkromme van zonnewarmte bij

²² Gedetailleerde kostenberekening aquathermie, Varianten onderzoek en gedetailleerde Kostenberekeningen, Ruben Cardose (Techniplan), Tom van der Velden (IF Technology), Jan Westerweel (Techniplan), Frank Niewold (IF Technology), Rik Molenaar (Techniplan), 10 juni 2022, <https://www.warmingup.info/documenten/gedetailleerde-kostenberekening-aquathermie.pdf>

het gevraagde temperatuurniveau van 70°C jaarlijks 0,7 TJ levert. Het aandeel zonnewarmte in de totale warmtevraag kan daarmee 1,7% zijn.

Kosten zonnewarmte in scenario 4

Op basis van de kentallen uit paragraaf 3.4 (Tabel 3.3) worden de investeringskosten (Capex) van het zonnewarmte systeem van 0,3 MW inclusief ontwikkel- en aanlegkosten geschat op k€163. De vaste onderhoudskosten en operationele kosten inclusief grondkosten (Opex) worden voor een systeem van 0,3 MW ingeschat op €563 per jaar.



Figuur 4.1: Jaarbelastingduurkromme van variant 4 (TEA). *Figuur uit rapport 'Gedetailleerde kostenberekening aquathermie', zie voetnoot 21.*

Effect van zonnewarmte op warmteproductiekosten in scenario 4

Het effect hiervan is dat de warmteproductiekosten (inclusief Capex en Opex voor de zonnewarmte) dalen van 22,8 €/GJ naar 21,1 €/GJ, een verlaging van 7,2%. Hiermee wordt aangetoond dat in variant 4 het toevoegen van zonnewarmte de warmteproductiekosten kan verlagen.

Bij een meer gedetailleerde analyse, waarbij de prestatie van de warmtepomp verbeterd kan worden door toevoer van lagetemperatuurwarmte uit de zonnecollectoren, zal naar verwachting het kostenreducerende effect van zonnewarmte groter worden.

4.4 Aquathermie scenario 6 met zonnewarmte

Beschrijving van de variant

Variant 6 maakt gebruik van thermische energie uit oppervlaktewater (TEO) aan een grote rivier in een grote stad. Uit de rivier kan jaarrond warmte onttrokken worden. Het systeem is aangesloten op een 20 MW warmtenet. De warmtepomp draait jaarlijks 3500 vollasturen en de aanvoertemperatuur in het net is 45°C. Voor de elektriciteitsprijs wordt prijsscenario 2 gebruikt, waarvoor ook in het betreffende rapport gekozen is.

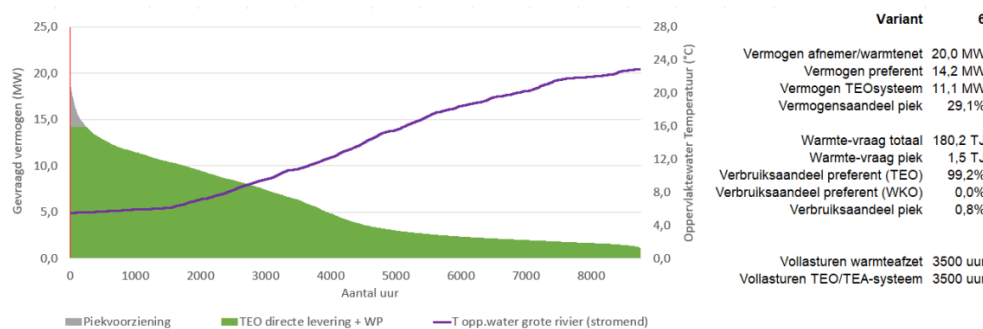
Inpassing zonnewarmte in scenario 4

Op basis van de jaarbelastingduurkromme (**Figuur 4.2**) wordt aangenomen dat het vermogen van een zonneveld zonder inpassingsproblemen 1,1 MW kan zijn (op basis van het bedrijfspunt aan de rechterzijde van de figuur). Dit correspondeert met een apertuuroppervlak voor zonnewarmte van 1395 m² (grondoppervlak circa 53 x 53 m²) dat op basis van de aanbodkromme van zonnewarmte bij het gevraagde temperatuurniveau van 70°C jaarlijks 3,1 TJ levert. Het aandeel zonnewarmte in de totale warmtevraag kan daarmee 1,7% zijn.

Kosten zonnewarmte in scenario 6

Op basis van de kentallen uit paragraaf 3.4 worden de investeringskosten (Capex) van het zonnewarmte systeem inclusief ontwikkel- en aanlegkosten geschat op k€431. De vaste

onderhoudskosten en operationele kosten inclusief grondkosten (Opex) worden ingeschat op €4184 per jaar.



Figuur 4.2: Jaarbelastingduurkromme van variant 6 (TEO). Figuur uit rapport 'Gedetailleerde kostenberekening aquathermie', zie voetnoot 21.

Effect van zonnewarmte op warmteproductiekosten in scenario 6

Het effect hiervan is dat de warmteproductiekosten (inclusief Capex en Opex voor de zonnewarmte) dalen van 18,1 €/GJ naar 17,8 €/GJ, een verlaging van 1,6%. Hiermee wordt aangetoond dat in variant 6 het toevoegen van zonnewarmte de warmteproductiekosten kan verlagen.

Bij een meer gedetailleerde analyse waarbij de prestatie van de warmtepomp verbeterd kan worden, door toevoer van lagetemperatuurwarmte uit de zonnecollectoren, zal naar verwachting het kostenreducerende effect van zonnewarmte groter worden.

4.5 Samenvatting aquathermie met zonnewarmte

In voorgaande twee paragrafen zijn twee cases doorgerekend van zonnewarmte gekoppeld aan een TEA en TEO installatie zonder WKO. De Capex en Opex van zonnewarmte zorgen voor een toename van de warmteproductiekosten, maar de uitgespaarde kosten voor elektriciteit compenseren dat in zodanige mate dat de uiteindelijke warmteproductiekosten tot enkele procenten lager uitvallen.

Tabel 4.1: Resultaten van de analyse voor scenario's 4 en 6 ten opzichte van de basisvariant zoals gerapporteerd in rapport 'Gedetailleerde kostenberekening aquathermie', zie voetnoot 21. Variaties 1 (toename Capex) en 2 (toename Opex) verhogen de warmteproductiekosten terwijl variatie 3 (besparing op elektriciteit voor warmtepomp) deze weer verlaagt, in beide scenario's tot onder het niveau van de basisvariant. Daarmee is het gunstige effect van zonnewarmte op de business case van aquathermie aannemelijk gemaakt.

[€/GJ]	Scenario 4	Scenario 6
Basisvariant: warmteproductiekosten bij prijsscenario 2	22,8	18,1
Variatie 1: basisvariant inclusief Capex zonnewarmte	23,0	18,2
Variatie 2: variatie 1 inclusief Opex zonnewarmte	23,0	18,2
Variatie 3: variatie 2 met minder warmtelevering door warmtepomp	21,1	17,8
Effect op warmteproductiekosten variatie 3 tov basis	-7%	-2%

Tabel 4.1 laat zien dat er inderdaad in beperkte mate synergie is. Merk daarbij op dat met name het gebruik van de lageretemperatuurwarmte, één van de voordelen, niet gemodelleerd kon worden omdat de daarvoor benodigde informatie over warmtepomp en WKO niet beschikbaar waren. Dus mogelijk is het voordeel groter.

Uit de markt is vernomen dat het combineren van zonnewarmte en aquathermie niet altijd voordelig uitpakt, maar afhangt van de specifieke situatie.

Wat SDE++ subsidie betreft is het geen probleem om voor één locatie de combinatie van zonnewarmte en aquathermie aan te vragen, omdat het verschillende SDE++-categorieën betreft.

5 Conclusie en aanbevelingen

Zonnewarmte kan een significante bijdrage leveren aan de energietransitie, met een indicatief potentieel van 60 tot 80 PJ/jaar tegen 2050. Hiervan zou indicatief 10 tot 20 PJ/jaar uit integratie van zonnewarmte in bestaande en nieuwe warmtenetten gerealiseerd kunnen worden. Grootschalige zonnewarmte kan ook in de utiliteit toegepast worden, bij tuinbouw en veeteelt en in de industrie (doorgaans zonder warmtenetten).

Voor elk temperatuurniveau bestaan verschillende collectortypes, die allemaal in een ver stadium van technische rijpheid verkeren. Het gaat bij de toepassingen in dit rapport voornamelijk om vlakkeplaatcollectoren, vacuümbuiscollectoren en zonvolgende concentrerende collectoren, alle drie collectoren van het afgedekte type.

Kostenkentallen voor grootschalige zonnewarmte zijn gebaseerd op publiek beschikbare gegevens uit SDE++, waarbij de systeemgrenzen uit SDE++ aangepast zijn aan de manier waarop de kosten in WarmingUP gedefinieerd zijn. Bij het modelleren van zonnewarmte is de integratie ervan als centrale bron in een warmtenet een aandachtspunt. Het vraagt om een regeling met verschillende bedrijfsmodi. Zonnewarmte kan ook als decentrale bron ingepast worden in warmtenetten, bijvoorbeeld wanneer de collectoren op een utiliteitsgebouw staan.

De mogelijke synergie tussen zonnewarmte en aquathermie wordt toegelicht en er wordt op basis van indicatieve berekeningen op basis van twee cases aangetoond dat integratie van zonnewarmte (met een energieaandeel van 1,7% van de warmtevraag) een verlagend effect van 2% tot 7% kan hebben op de kosten van warmte uit een systeem van aquathermie met warmtepomp. Deze analyse op basis van cases is indicatief, maar duidt wel op de mogelijkheid van synergie. In specifieke situaties kan de synergie ook afwezig zijn, bijvoorbeeld in situaties waarin toch hogere kosten en minder opbrengsten gelden voor zonnewarmte. Merk op dat dit een klein energieaandeel is, waarbij wel extra complexiteit ingebracht wordt. Grotere aandelen zonnewarmte zijn ook mogelijk, maar in dit rapport niet uitgewerkt.

Een aanbeveling uit dit rapport is om in de WarmingUP Design Toolkit zonnewarmte op te nemen, en daarmee dan ook cases in combinatie met (en zonder) aquathermie door te rekenen, en met (en zonder) warmtekoudeopslag.

Het aanvragen van SDE++ subsidie voor de combinatie van aquathermie met zonnewarmte is geen probleem omdat het verschillende categorieën betreft.

Tenslotte zou bovenstaande rekenmethode nog gevalideerd kunnen worden aan de hand van een echt ontwerp van zonnewarmte in combinatie met aquathermie.

Bijlage A Kosten van grootschalige zonnewarmtesystemen

Onderstaande tabellen geven, in aanvulling op de informatie uit paragraaf 3.4, kostenkentallen voor systemen kleiner dan 1 MWth en voor zonvolgende concentrerende systemen met andere temperatuurniveaus. Kosten zijn uitgedrukt in euro's van het jaar 2022 en de oppervlakte-eenheid m² verwijst naar de apertuur.

Samenvattingstabel voor vlakkeplaatcollectoren met een vermogen <1 MW

Investeringskosten incl. ontwikkelkosten excl. aanlegkosten	499 EUR/kWth	349 EUR/m2
Aanlegkosten	53 EUR/kWth	37 EUR/m2
Investeringskosten incl. ontwikkelkosten incl. aanlegkosten	551 EUR/kWth	386 EUR/m2
Vaste onderhoudskosten en operationele kosten inclusief grondkosten	1,9 EUR/kWth/jaar	1,3 EUR/m2/jaar
Variabele onderhoudskosten en operationele kosten volgens SDE++	0,0019 EUR/kWh	
Levensduur	25 jaar	
Grondoppervlak per eenheid van vermogen (bij 2 m2 grond per 1 m2 apertuuroppervlak)	2,9 m2/kWth	

Samenvattingstabel voor vlakkeplaatcollectoren met een vermogen >1 MW

Investeringskosten incl. ontwikkelkosten excl. aanlegkosten	399 EUR/kWth	279 EUR/m2
Aanlegkosten	42 EUR/kWth	29,4 EUR/m2
Investeringskosten incl. ontwikkelkosten incl. aanlegkosten	441 EUR/kWth	309 EUR/m2
Vaste onderhoudskosten en operationele kosten inclusief grondkosten	4,3 EUR/kWth/jaar	3,0 EUR/m2/jaar
Variabele onderhoudskosten en operationele kosten volgens SDE++	0,0019 EUR/kWh	
Levensduur	25 jaar	
Grondoppervlak per eenheid van vermogen (bij 2 m2 grond per 1 m2 apertuuroppervlak)	2,9 m2/kWth	

Samenvattingstabel voor zonvolgende concentrerende collectoren met een vermogen <1 MW en een bedrijfstemperatuur <120°C

Investeringskosten incl. ontwikkelkosten excl. aanlegkosten	665 EUR/kWth	333 EUR/m2
Aanlegkosten	70 EUR/kWth	35,0 EUR/m2
Investeringskosten incl. ontwikkelkosten incl. aanlegkosten	735 EUR/kWth	368 EUR/m2
Vaste onderhoudskosten en operationele kosten inclusief grondkosten	5,0 EUR/kWth/jaar	3,5 EUR/m2/jaar
Variabele onderhoudskosten en operationele kosten volgens SDE++	0,0019 EUR/kWh	
Levensduur	25 jaar	
Grondoppervlak per eenheid van vermogen (bij 2 m2 grond per 1 m2 apertuuroppervlak)	4,0 m2/kWth	

Samenvattingstabel voor zonvolgende concentrerende collectoren met een vermogen >1 MW en een bedrijfstemperatuur <120°C

Investeringskosten incl. ontwikkelkosten excl. aanlegkosten	570 EUR/kWth	285 EUR/m2
Aanlegkosten	60 EUR/kWth	30,0 EUR/m2
Investeringskosten incl. ontwikkelkosten incl. aanlegkosten	630 EUR/kWth	315 EUR/m2
Vaste onderhoudskosten en operationele kosten inclusief grondkosten	4,6 EUR/kWth/jaar	3,2 EUR/m2/jaar
Variabele onderhoudskosten en operationele kosten volgens SDE++	0,0019 EUR/kWh	
Levensduur	25 jaar	
Grondoppervlak per eenheid van vermogen (bij 2 m2 grond per 1 m2 apertuuroppervlak)	4,0 m2/kWth	

Samenvattingstabel voor zonvolgende concentrerende collectoren met een vermogen <1 MW en een bedrijfstemperatuur >120°C

Investeringskosten incl. ontwikkelkosten excl. aanlegkosten	665 EUR/kWth	333 EUR/m2
Aanlegkosten	70 EUR/kWth	35,0 EUR/m2
Investeringskosten incl. ontwikkelkosten incl. aanlegkosten	735 EUR/kWth	368 EUR/m2
Vaste onderhoudskosten en operationele kosten inclusief grondkosten	5,0 EUR/kWth/jaar	3,5 EUR/m2/jaar
Variabele onderhoudskosten en operationele kosten volgens SDE++	0,0019 EUR/kWh	
Levensduur	25 jaar	
Grondoppervlak per eenheid van vermogen (bij 2 m2 grond per 1 m2 apertuuroppervlak)	4,0 m2/kWth	

Samenvattingstabel voor zonvolgende concentrerende collectoren met een vermogen >1 MW en een bedrijfstemperatuur >120°C

Investeringskosten incl. ontwikkelkosten excl. aanlegkosten	570 EUR/kWth	285 EUR/m2
Aanlegkosten	60 EUR/kWth	30 EUR/m2
Investeringskosten incl. ontwikkelkosten incl. aanlegkosten	630 EUR/kWth	315 EUR/m2
Vaste onderhoudskosten en operationele kosten inclusief grondkosten	4,6 EUR/kWth/jaar	3,2 EUR/m2/jaar
Variabele onderhoudskosten en operationele kosten volgens SDE++	0,0019 EUR/kWh	
Levensduur	25 jaar	
Grondoppervlak per eenheid van vermogen (bij 2 m2 grond per 1 m2 apertuuroppervlak)	4,0 m2/kWth	

Adres

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht

Postadres

Postbus 80015
3508 TA Utrecht

Telefoon

088 866 42 56

E-mail

contact@warmingup.info

Website

www.warmingup.info