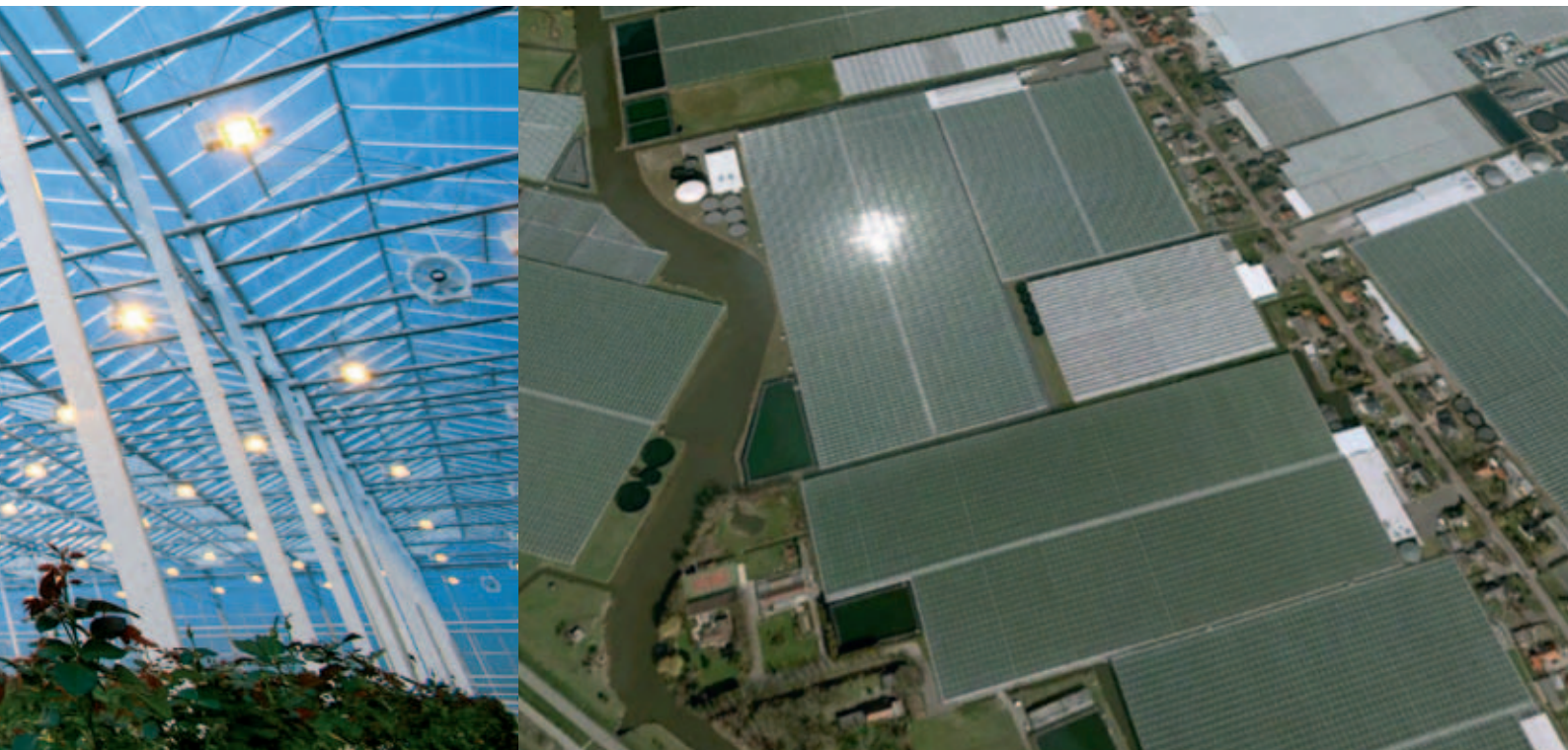




# Benutting van zonne-energie in de tuinbouw – een strategische verkenning

Feije de Zwart<sup>1</sup>, Silke Hemming<sup>1</sup>  
Marc Ruijs<sup>2</sup>, Theo Gieling<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Wageningen UR Glastuinbouw, <sup>2</sup> LEI Wageningen UR 2011



### **Abstract NL**

In het jaarplan Kas als Energiebron wordt aangegeven in 2011 een strategische verkenning uit te voeren naar de mogelijkheden van benutting van warmte uit zonne-energie voor de glastuinbouw in 2020. Naast de ambitie om in 2020 in nieuw te bouwen kassen klimaatneutraal te telen bestaat de ambitie om een aandeel van 20% duurzame energie in te zetten in 2020. Naast aardwarmte en bio-energie is een flinke bijdrage vanuit zonne-energie nodig om deze ambitie te verwezenlijken. Er is dus behoefte aan een verzameling van nieuwe ideeën en een overzicht van de potenties en nieuwe (deel) voorzieningen die nodig zijn om deze bijdrage uit zonne-energie te kunnen verwezenlijken. De technische en economische mogelijkheden voor het benutten van zonne-energie in de glastuinbouw worden in dit rapport beschreven. Tevens worden de potentiële energetische bijdrages voor de glastuinbouwsector voor het benutten van zonnewarmte of conversie naar elektriciteit geschat. Een aantal concrete casussen op bedrijfsniveau worden berekend. Deze studie is gefinancierd door het ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovaties en het Productschap Tuinbouw.

### **Abstract EN**

In the yearly program of "Kas als Energiebron" 2011 it is stated to carry out a strategic research on the possibilities of using solar energy for greenhouse production in 2020. The ambitions are to build all new greenhouses in 2020 in a climate neutral way and to use 20% of sustainable energy. Next to geothermal heat and biofuels a large contribution from solar energy is necessary in order to fulfil these ambitions. Therefore new ideas to use solar energy in greenhouse production have to be collected. The energetic and economic potentials of the use of new technologies in greenhouses have to be estimated. The technical and economical possibilities for using solar energy in greenhouse horticulture are described in this report. Next to that the potential energetic contributions of solar heat or solar electricity in Dutch greenhouse horticulture are described. A number of specific cases of using solar energy on company level are calculated. This study is financed by the Ministry of Economic Affairs, Agriculture and Innovations and the Dutch Productboard of Horticulture.

© 2011 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw.

## **Wageningen UR Glastuinbouw**

Adres: Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen  
Postbus 16, 6700 AA Wageningen  
Tel.: 0317 - 48 60 01  
Fax: 0317 - 41 80 94  
E-mail: [glastuinbouw@wur.nl](mailto:glastuinbouw@wur.nl)  
Internet: [www.glastuinbouw.wur.nl](http://www.glastuinbouw.wur.nl)

# Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
2	Synchroniteit vraag en aanbod van zonne-energie	7
3	Technieken voor verzameling zonne-energie	9
3.1	Energie uit overtollige zonnestraling	9
3.1.1	Warmte en elektriciteit verzamelen buiten de kas	9
3.1.1.1	Warmte uit thermische collectoren	9
3.1.1.2	Elektriciteit uit fotovoltaïsche zonnepanelen	11
3.1.1.3	Warmte en elektriciteit uit thermisch-fotovoltaïsche collectoren	12
3.1.2	Warmte of elektriciteit producerende kasdekken en schermen	13
3.1.2.1	Fotovoltaïsche zonnecellen geïntegreerd in kasdekken	13
3.1.2.2	Fotovoltaïsche zonnecellen op kasinstallaties	15
3.1.2.3	Flexibele fotovoltaïsche zonnecellen op schermen	16
3.1.2.4	Lamellen voor directe onderschepping van zonne-energie	18
3.1.3	Additioneel licht uit zonnestraling buiten de kas	20
3.2	Energie uit ongebruikte golflengten zonnestraling	21
3.3	Energie uit overtollige warmte	22
3.3.1	Onttrekken van warmte uit lucht	22
3.3.2	Onttrekken van warmte uit water	24
3.3.2.1	Onttrekken warmte via dekbevoeiing	24
3.3.2.2	Onttrekken warmte uit oppervlaktewater	24
3.4	Samenvatting energetische bijdrages verschillende technieken	25
4	Investeringsruimte technieken voor verzameling zonne-energie	27
4.1	Energie uit overtollige zonnestraling	27
4.1.1	Warmte en elektriciteit verzamelen buiten de kas	27
4.1.1.1	Warmte uit thermische collectoren	27
4.1.1.2	Elektriciteit uit fotovoltaïsche zonnepanelen	28
4.1.1.3	Warmte en elektriciteit uit thermisch-fotovoltaïsche collectoren	28
4.1.2	Warmte of elektriciteit producerende kasdekken en schermen	28
4.1.2.1	Fotovoltaïsche zonnecellen op kasinstallaties	28
4.1.2.2	Flexibele fotovoltaïsche zonnecellen op schermen	29
4.1.2.3	Lamellen voor lichtonderschepping zonne-energie	29
4.1.2.4	Lenzen voor selectieve onderschepping zonne-energie	30
4.2	Energie uit ongebruikte golflengten zonnestraling	30
4.3	Energie uit overtollige warmte	31
4.3.1	Onttrekken van warmte uit lucht	31
4.3.2	Onttrekken van warmte uit water	31
4.3.2.1	Onttrekken van warmte via dekbevoeiing	31
4.3.2.2	Onttrekken van warmte uit oppervlaktewater	31
4.4	Samenvatting investeringsruimte verschillende technieken	31

5	SWOT Analyse verschillende opties benutting zonne-energie	35
6	Toekomstige opties voor benutting zonne-energie op glastuinbouwbedrijven	39
6.1	CASUS a: Bedrijf met warmteonttrekking aan oppervlaktewater	39
6.2	CASUS b: Bedrijf met thermische collectoren buiten de kas	42
6.3	CASUS c: Bedrijf met een semi-gesloten kas	45
6.4	CASUS d: Bedrijf met een DaglichtKas	48
6.5	CASUS e: Standaardbedrijf met PV-panelen op vrij beschikbare oppervlakken	50
6.6	CASUS f: Bedrijf met PV-panelen voor beschaduwing	51
6.7	Samenvatting casussen	54
7	Conclusies	57
8	Aanbevelingen en uitdagingen	59
9	Samenvatting	61
10	Summary	63
Bijlage I	Technische beschrijving verschillende typen zonnecollectoren	65
Bijlage II	Technische beschrijving verschillende typen zonnecellen	69
Bijlage III	Leveranciers en dienstverleners van systemen voor zonne-energie	71
Bijlage IV	Eigen zonne-energie in concurrentie met ingekochte duurzame energie	75
Bijlage V	Energiebehoefte glastuinbouwbedrijven	77

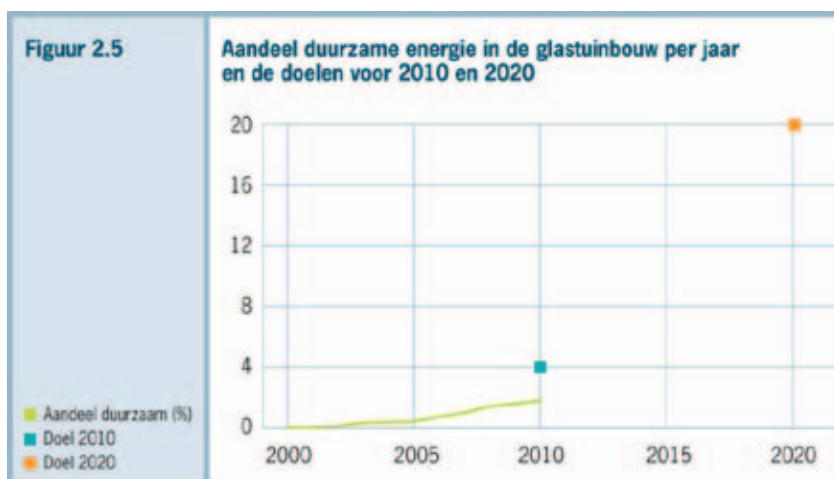
# 1 Inleiding

Het programma Kas als Energie Bron (KaEB) omvat een 7-tal transitiepaden waarlangs de tuinbouwsector gestalte geeft aan haar duurzaamheidsambities.



Een belangrijke rol is hierbij weggelegd voor duurzame energieopties, waarvoor maar liefst 3 transitiepaden zijn onderscheiden. Het betreft het gebruik van zonne-energie, geothermie en biobrandstoffen. Voor deze drie paden tezamen wordt een bijdrage van 20% ten opzichte van het totale energieverbruik van de sector verwacht. Het intensieve gebruik van zonne-energie zal hiervan een substantieel deel moeten invullen. Daarnaast is de ambitie van het programma Kas als Energie Bron om in 2020 in alle nieuw gebouwde kassen klimaatneutraal te telen.

Op dit moment worden verschillende vormen van duurzame energie toegepast: aardwarmte, biobrandstof, zonnewarmte en de inkoop van duurzame warmte, elektriciteit en gas. Het totale aandeel duurzame energie is echter met 1.3% nog steeds laag, zoals is te zien in onderstaande figuur<sup>1</sup>.



Figuur 1. Aandeel duurzame energie in de glastuinbouw en doelen 2010 en 2020 (LEI, 2010<sup>1</sup>).

Op dit moment wordt 650 TJ zonnewarmte toegepast in de glastuinbouw. Dat is 0.5% van het totale energieverbruik, maar het areaal thermische zonnewarmte groeit wel de laatste jaren. Elektriciteit uit zonne-energie wordt op een enkel geval na niet toegepast. Het grote verschil tussen zonne-energie en de andere duurzame energiebronnen is dat zonne-energie door iedereen gebruikt kan worden die aanspraak kan maken grondoppervlak. Wie zonne-energie wil benutten komt echter het probleem van de synchroniteit van vraag en aanbod tegen. Hoofdstuk 2 geeft een inzage in deze synchroniteitsproblemen en de relevante oplossingen daarvoor in de glastuinbouw.

Een belangrijk deel van het zonlicht wordt door kasgewassen reeds gebruikt. Zonlicht is immers de motor voor de gewasgroei. Echter, dit document bespreekt niet de plantkundige mogelijkheden voor het behalen van meer productie uit het zonlicht, maar gaat in op de technische mogelijkheden om het nu ongebruikte deel van de zonnestraling te benutten als bijdrage aan de duurzame energievoorziening.

1 LEI 2010. Energiemonitor van de Nederlandse glastuinbouw 2009. Rapport LEI 2010-091

Onbenutte zonnestraling is bijvoorbeeld het zonlicht dat geabsorbeerd wordt door oppervlakken waar geen planten groeien (het dak van de bedrijfsruimte en andere bebouwing rond de kas, het middenpad, restlicht onder het gewas, constructiedelen) en het zonlicht dat gereflecteerd of geabsorbeerd wordt door schermen die het zonlicht in de kas en op het gewas temperen. Deze laatste komen vooral voor bij schaduwminnende teelten. Hoofdstuk 3 brengt de bijdrage in kaart, die van onbenut licht kan worden verwacht. Het gaat in op zowel de technische mogelijkheden om warmte en/of elektriciteit uit dit onbenutte zonlicht te gebruiken.

In het algemeen kan zonlicht als zodanig maar één keer gebruikt worden. Bij absorptie van licht door bladeren of zonnecellen wordt de energie in fotonen boven een bepaalde drempelwaarde benut. Voor de fotosynthese ligt die drempelwaarde op ongeveer 1.7 eV (electronvolt), wat betekent dat fotonen alleen groei opleveren als ze een kortere golflengte hebben dan rood licht. Ongeveer 55% van de energie in het zonlicht voldoet aan deze eis. Dit betekent evenwel dat 45% van het zonlicht niet bruikbaar is voor de fotosynthese. Dit betreft het NIR spectrum, dat loopt van 2500 nm tot aan het zichtbaar licht (750 nm). Het voorgaande betekent dat, afgezien van scherming en lichtonderschepping, 45% van de zonne-energie grotendeels ongebruikt blijft (in de winter draagt het NIR-aandeel van de zonne-energie bij aan de kasverwarming en vormt dan geen overschot). Hoofdstuk 3.2 gaat nader in op deze spectrale uitsplitsing, waarbij ook de technische mogelijkheden om dit deel van het zonlicht te benutten aan de orde komen.

Tenslotte levert de benutting van zonne-energie in een kas een grote hoeveelheid warmte op als overtollig restproduct. Gedurende de winter wordt van deze energie-input door de zon overdag dankbaar gebruik gemaakt voor de directe verwarming van de kas. Een groot deel van het jaar leidt deze warmte echter tot een warmte-overschot in de kas. Ook dit overschot aan zonne-energie kan worden gebruikt als bron van duurzame energie, hoewel de energiekwaliteit daarvan erg laag is. De toepassing van dit energie-overschot beperkt zich tot het opwarmen van koud water naar temperaturen rond de 18 °C, waarbij er ook nog een substantiële hoeveelheid elektriciteit als hulpenergie moet worden ingezet. Toch mag voor bijvoorbeeld de groententeelt verwacht worden dat deze inzet van zonne-energie een belangrijke bijdrage aan de duurzame energievoorziening van de sector kan leveren. Hoofdstuk 3.3 beschrijft de mogelijkheden van het benutten van de overtollige warmte uit licht in semi-gesloten kassen. In ditzelfde hoofdstuk wordt ook de mogelijke bijdrage van het gebruik van overtollige zonnewarmte uit water (dek bevoeiing en oppervlaktewater) besproken.

## 2 Synchroniteit vraag en aanbod van zonne-energie

Een belangrijk kenmerk van zonne-energie in vergelijking met andere vormen van duurzame energie is dat het aanbod zowel een sterk seizoenspatroon als een sterk dag/nachtpatroon kent. Aangezien het behoeft patroon in de regel niet aansluit bij dit aanbodpatroon is opslag nodig.

Thermische zonnecollectorsystemen die in de gebouwde omgeving worden toegepast hebben dan ook vrijwel altijd grote buffervaten waarin de zonnewarmte wordt geaccumuleerd.

(Semi)-gesloten kassen gebruiken een combinatie van etmaalbuffers en seizoenopslag om de duurzame zonne-energie van de zomer naar de winter te brengen. Voor de seizoenopslag wordt hierbij momenteel gebruik gemaakt van ondergrondse aquifers. Andere geïsoleerde bovengrondse of half ondergrondse opslagsystemen zijn denkbaar<sup>2</sup>. Standalone fotovoltaïsche toepassingen (boeien op zee, lantarenpalen op afgelegen plaatsen etc.) hebben accu's voor de overbrugging van perioden waarin er wel een vraag naar elektriciteit is maar geen aanbod.



Fotovoltaïsche systemen die aan het net zijn gekoppeld hebben in de regel echter geen opslag voorzieningen. Als de momentane productie uit de PV-installatie op lichtrijke momenten het verbruik van het bedrijf overschrijdt zal het overschot dan worden afgeleverd aan het openbare net.

Op een groot aantal plaatsen in het openbare elektriciteitsnet zijn mogelijkheden aanwezig voor de regeling van het vermogen. Meestal betekent deze regelbaarheid dat de inzet van fossiele brandstoffen voor de elektriciteitsproductie wordt aangepast (vooral aardgas en bij langzame capaciteitsveranderingen ook steenkool). WKK's kunnen worden in- of uitgeschakeld en gascentrales kunnen meer of minder gaan leveren. Tevens kan de opnamecapaciteit van het openbare net zich aanpassen door kleine veranderingen van de netspanning. In feite wordt de buffering van energie uit netgekoppelde PV-systemen dus teruggevonden in fluctuaties van de inzet van fossiele brandstoffen. Dit systeem zal kunnen blijven functioneren zolang het totale piekvermogen aan PV-energie (maar ook windenergie) ruim onder de vraag naar elektrisch vermogen blijft. De eerstkomende jaren zal dit waarschijnlijk het geval blijven, maar op de lange duur zullen ook tijdelijke elektriciteitsoverschotten uit netgekoppelde systemen ergens gebufferd moeten worden, of zal op zonnige of windrijke dagen productievermogen uitgeschakeld moeten worden. In het eerste geval zullen er omzettingsverliezen gaan optreden en in het tweede geval zijn het met name investeringsverliezen. Er worden op tal van plaatsen inspanningen op het gebied van elektriciteitsopslag verricht maar omdat het naar verwachting nog lang duurt voordat dit een echt probleem gaat worden wordt hier in dit rapport niet nader op ingegaan.

De gemakkelijke transporteerbaarheid van elektriciteit en de bescheiden vermogens voor PV in en om kassen maken dat de synchroniteit van vraag en aanbod van elektriciteit geen technisch punt is. Voor elektriciteit zal dus eenvoudigweg worden gesteld dat een elektriciteitsproductie uit PV van bijvoorbeeld 10 kWh/m<sup>2</sup> kas per jaar 20% duurzame energie levert aan een tuinbouw bedrijf als dat 50 kWh/m<sup>2</sup> kas per jaar zou verbruiken, hoewel de productie vooral in de zomer geconcentreerd zal zijn en het verbruik een zwaartepunt heeft in de winter.

Overigens kan het vanuit economisch oogpunt wel interessant zijn om elektriciteit tijdelijk op te slaan. Wanneer dit betrokken wordt op elektriciteit uit zonne-energie kan korte termijn buffering interessant zijn wanneer de verkoopwaarde op zonnige momenten beduidend lager is dan op andere momenten. Het verkoopwaarde-voordeel moet dan worden afgewogen tegen de kosten voor de opslagmogelijkheid en de omzettingsverliezen.

2 H.F. de Zwart, 2010, De performance van de drie demo-kassen op het Innovatie en Demo Centrum. Rapport Wageningen UR Glastuinbouw GTB-1030.

Voor thermische zonne-energie is de opslag een heel belangrijk punt omdat ook hiervoor de vraag naar warmte vooral in de winterperiode ligt en het aanbod van zonne-energie vooral in de zomer, terwijl er geen groot warmtenet is dat de tijdelijke overschotten kan absorberen.

Een belangrijk aspect dat bij deze opslag speelt zijn de verliezen in het opslagsysteem. Isolatie bij bovengrondse warmteopslag (of opslag vlak onder de oppervlakte) is een serieuze kostenpost en bij energieopslag in aquifers is warmte uitwisseling met de omgeving onoverkomelijk.

Bij een bronnenpaar waarvan de gemiddelde temperatuur gelijk is aan de omgevingstemperatuur is het energieverlies per definitie 0 en gaat het vooral om temperatuurveranderingen die ongewenst zijn voor een efficiënte werking van het systeem (de warme bron koelt af en de koude bron warmt op). Bij ondergrondse warmteopslag op temperaturen boven de omgevingstemperatuur zijn de energieverliezen substantieel (30 tot 60%).



## 3 Technieken voor verzameling zonne-energie

### 3.1 Energie uit overtollige zonnestraling

#### 3.1.1 Warmte en elektriciteit verzamelen buiten de kas

##### 3.1.1.1 Warmte uit thermische collectoren

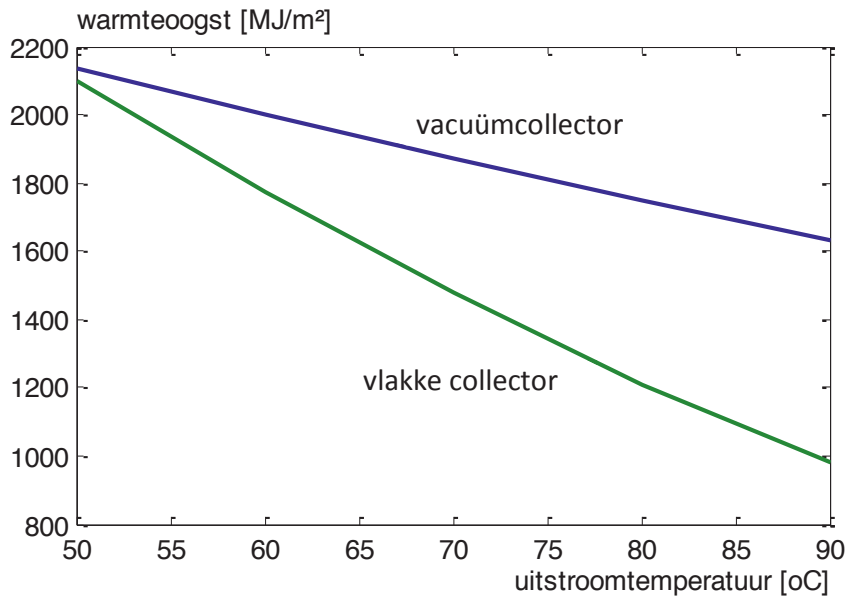
Wie om zich heen kijkt ziet dat er veel zonlicht onbenut wordt. Daken van huizen, bedrijfsgebouwen en utiliteitsgebouwen schermen het overgrote deel van het zonlicht af van de gebruiksruidten eronder. Bedrijfsgebouwen bij kassen maken hierop geen uitzondering. Ongeveer 5% van dakoppervlak van het kassen-areaal wordt gevormd door bedrijfsgebouwen, kantoor, ketelhuis, etc. Het regenwaterbassin kan bovendien worden overkapt met zonnepanelen, met het bijkomende voordeel dat tegelijkertijd ook de algengroei en het binnenwaaien van verontreiniging (zout, stof, papier en plastic) wordt tegengegaan. Figuur 2. toont in de eerste foto een willekeurig tuinbouwgebied (vlak bij Moerkapelle). In de 2<sup>e</sup> foto daaronder zijn het oppervlak glas, het oppervlak bedrijfsgebouw en het oppervlak waterbassin gemarkeerd.



*Figuur 2. Glasoppervlak en niet-glas oppervlak in een typisch tuinbouwgebied (lichtblauw teeltoppervlak, lichtgeel daken bedrijfsruimten en regenwaterbassins).*

Als alle lichtblauwe oppervlakken uit Figuur 2. worden opgeteld blijkt het teeltoppervlak in dit gebied 68 ha te bedragen. De andere oppervlakken (lichtgeel gemarkeerd) bestaan uit de daken van bedrijfsruimten en de regenwaterbassins. Deze hebben een gezamenlijk oppervlak van 7.1 ha. Het is dus reëel te veronderstellen dat 10% van het bruto kasareaal van zonnepanelen zou kunnen worden voorzien die in geen enkel opzicht in concurrentie staan met de teelt, het primaire proces in de tuinbouw.

Daarnaast is het denkbaar dat wegen en erfverharding gebruikt worden als thermische collector. Dit kan door direct warmte aan het wegdek te onttrekken of door een overkapping over de weg te plaatsen. Voor het verzamelen van warmte uit zonlicht buiten de kas kunnen verschillende uitvoeringen van thermische collectoren worden gebruikt. Een standaard thermische collector kan een substantieel deel van het zonlicht in de vorm van heet water verzamelen, waarbij de warmte-oogst sterk afhangt van de temperatuur waarnaar het water opgewarmd wordt. Figuur 3. geeft hiervan een indruk.



Figuur 3. Warmte-oogst door een eenvoudige vlakke collector en door een vacuümcollector onder Nederlandse omstandigheden als functie van de uitstroomtemperatuur.



Figuur 4. Vlakke thermische collector (Foto Vaillant, [www.vaillant.be](http://www.vaillant.be)).



Figuur 5. Thermische collector op basis van vacuümbuizen (Foto Northers Lights Solar Solutions, [www.solartubs.com](http://www.solartubs.com)).

De vacuümcollector is duurder, maar heeft vooral bij een hoge uitstroomtemperatuur een beter rendement dan de vlakke collector. Het energieverbruik voor het rondpompen van water door thermische collectoren is erg klein. Als dit wordt uitgedrukt als factor ten opzichte van de verzamelde zonne-energie is het elektriciteitsverbruik voor het rondpompen een factor 100 tot 200 kleiner ten opzichte van de oogst aan zonne-energie. Uitgaande van warmteverzameling op een temperatuur rond de 65 °C zouden thermische collectoren onder Nederlandse omstandigheden rond de 1800 MJ/m<sup>2</sup> collectoroppervlak kunnen verzamelen. Aangenomen dat 10% van het grondoppervlak van een tuinbouwbedrijf van thermische collectoren zou worden voorzien (bedrijfsruimten en waterbassin) betekent dit een warmteverzamelingspotentieel van 180 MJ/m<sup>2</sup> kas per jaar op een temperatuurniveau rond de 65 °C. Het elektriciteitsverbruik voor het rondpompen van water door de collectoren bedraagt ongeveer 0.1 kWh per m<sup>2</sup>.

Indien deze warmte ondergronds zou worden opgeslagen (ervan uitgegaan dat wetgeving dit zou toestaan) dan zou bij een opslagrendement van 70% een thermische collector een bijdrage van ongeveer 130 MJ/m<sup>2</sup> kas per jaar aan de verwarming kunnen leveren. Voor een energiezuinig groentebedrijf (met een warmtevraag van 25 m<sup>3</sup> aardgas equivalenten per jaar) zou dit betekenen dat de kasverwarming voor ongeveer 20% op duurzame energie zou draaien. Het elektriciteitsverbruik voor de deze opslag van warmte in aquifers bedraagt ongeveer 0.4 kWh per m<sup>2</sup> kas en is dus erg laag.

### 3.1.1.2 Elektriciteit uit fotovoltaïsche zonnepanelen

In plaats van een thermische collector, zoals beschreven in de vorige paragraaf, kan de 10% van het bedrijfsoppervlak rondom de kas ook worden voorzien van conventionele PV panelen (= PhotoVoltaïsche), waarbij zonne-energie kan worden geoogst zonder interferentie met de teelt. PV panelen kunnen worden geplaatst op daken van bijvoorbeeld het bedrijfsgebouw (Figuur 6.), het kantoor, het ketelhuis en boven het regenwaterbassin (Figuur 7.). Ook boven wegen of parkeerplaatsen kunnen PV panelen worden geplaatst. Een voorbeeld van het plaatsen van PV-panelen boven wegen is te zien in Figuur 8. Hier zijn PV-panelen gebruikt als overkapping van een gedeelte van de spoorweg langs de E19 van Breda naar Antwerpen. 16000 zonnepanelen zijn gemonteerd met een piekvermogen van ongeveer 4 MW elektriciteit en een jaaropbrengst rond de 3.3 GWh, genoeg om anderhalve hectare rozenkas van groene stroom te voorzien (Solar Power Systems, [www.sps.be](http://www.sps.be)). De huidige generatie panelen leveren rond de 125 kWh/m<sup>2</sup> paneel per jaar aan elektrische energie. Dit betekent, dat de overkapping van 10% van het bedrijfsoppervlak buiten de kas een elektriciteitsproductie van 12.5 kWh per m<sup>2</sup> bedrijfsoppervlak per jaar uit zonne-energie kan leveren. De meeste groentekassen zouden met een dergelijke productie op jaarbasis netto elektriciteit neutraal worden. Ze functioneren dan 100% op duurzame elektriciteit.



*Figuur 6. Zonnepanelen op bedrijfsgebouw (Foto SolSolutions, Pijnakker).*



*Figuur 7. Zonnepanelen boven het regenwaterbassin (Foto Kubo, Monster).*



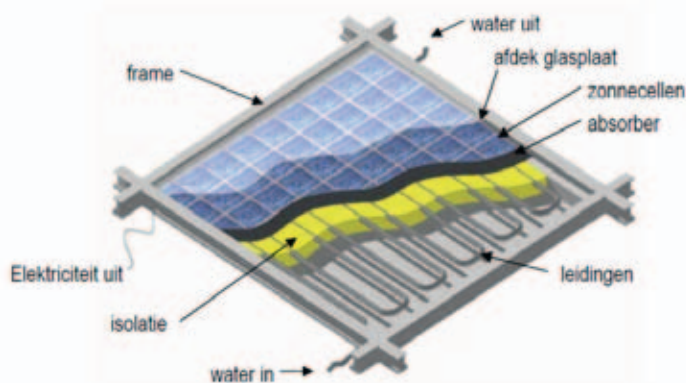
*Figuur 8. Spoorwegoverkapping langs E19 van Breda naar Antwerpen waarop (Foto Solar Power Systems, [www.sps.be](http://www.sps.be)).*

In veel systemen worden beweegbare zonnepanelen gebruikt, zoals ook op de foto van Figuur 7. is te zien. Het kenmerk van deze systemen is, dat het totale collector-oppervlak kleiner is dan het oppervlak waarboven de collectoren gemonteerd zijn. Dit betekent dat de totale elektriciteitsproductie per m<sup>2</sup> grondoppervlak bij een dergelijk beweegbaar PV-paneel meestal kleiner is dan wanneer het volledige oppervlak met vaste PV-panelen zou zijn bedekt. Door de panelen beweegbaar te maken is de teruggang in elektriciteitsproductie echter kleiner dan de vermindering van het aantal m<sup>2</sup> PV-paneel. Het jaarrond gemiddelde elektrisch rendement van het PV-paneel wordt dus wat groter, wat vooral een financieel voordeel kan opleveren (de stroom kost minder per kWh).

### 3.1.1.3 Warmte en elektriciteit uit thermisch-fotovoltaïsche collectoren

In paragraaf 3.1.1 zijn de locaties omschreven rondom de kas waar zonder interferentie met de teelt thermische collectoren of PV panelen kunnen worden geplaatst. Op dezelfde plekken is het mogelijk om gebruik te maken van gecombineerde fotovoltaïsche en thermische modules, de zogenaamde PVT-modules. De PVT module combineert warmte- en elektriciteitsoogst in één module, waardoor er een combinatie van functies wordt gemaakt en het ruimtebeslag afneemt. Een PVT module heeft een hoger energetisch rendement per m<sup>2</sup> dan de combinatie van separate PV- en zon-thermische systemen, waardoor effectiever gebruik wordt gemaakt van de beschikbare ruimte (ECN -C—03-103, 2003). In grote lijnen worden 2 soorten PVT panelen onderscheiden, het afgedekte en het onafgedekte paneel.

De afgedekte PVT cellen zijn in feite watergekoelde fotovoltaïsche modules. De onafgedekte PVT modules zijn luchtgekoeld en verreweg het meest verbreid. De standaard luchtgekoelde modules laten de warmteproductie op het oppervlak van de PV-collector onbenut, waardoor het totale rendement lager is dan van de afgedekte uitvoering. De afgedekte uitvoering is duurder en heeft t.g.v. de verliezen in de glasplaat een lagere elektriciteit productie per m<sup>2</sup> dan de onafgedekte module.



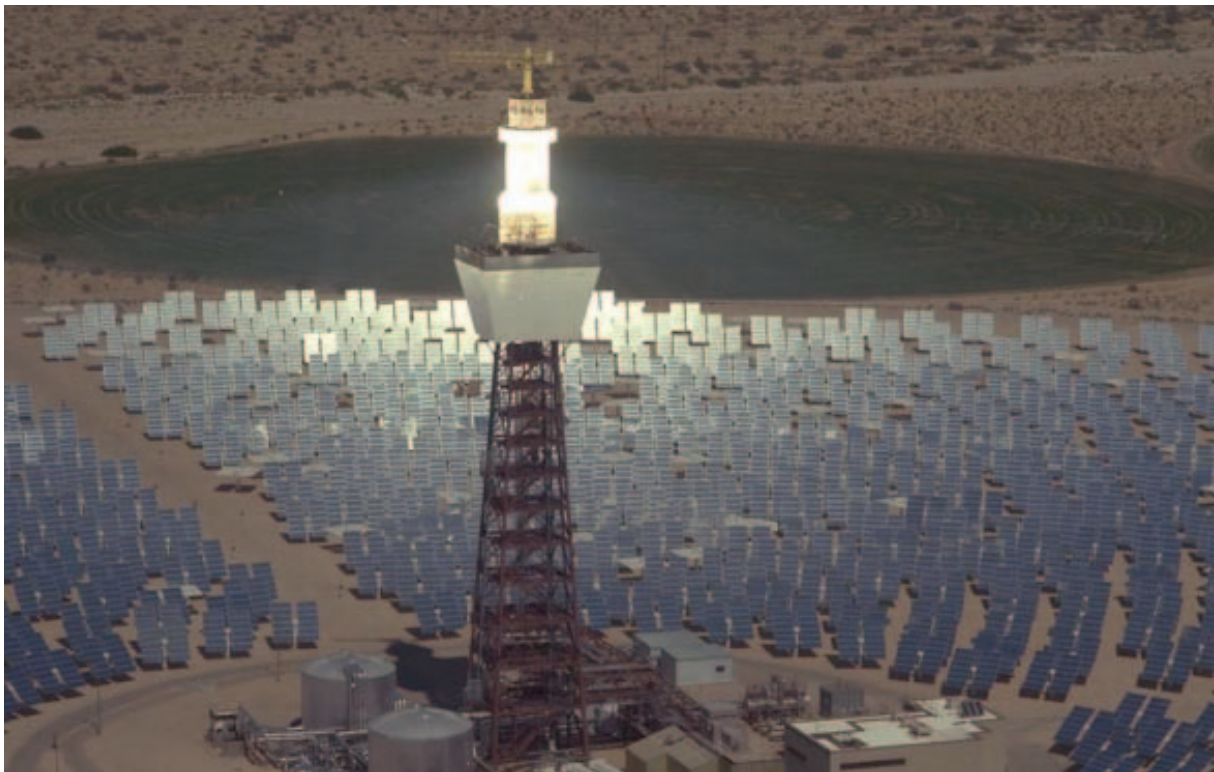
Figuur 9. Werkingsprincipe afgedekte PVT collector (Konings, 20073).

De elektriciteitsproductie van een PVT-paneel neemt duidelijk af bij een toename van de temperatuur van het water dat uit de collector stroomt. De PVT module levert om die reden in het algemeen warmte op een laag temperatuurniveau (30 tot 40 °C). Een dergelijke lage uittrede temperatuur maakt een warmteverzameling van 200 MJ per m<sup>2</sup> kas per jaar mogelijk (uitgaande van 10% collectoroppervlak per m<sup>2</sup> kas). Een lage uittrede temperatuur betekent echter ook dat voor de benutting van de warmte een warmtepomp nodig zal zijn. Uitgaande van een koude bron op 15 °C en een verwarmingstemperatuur van 40 °C zal deze warmtepomp met een COP van 5 kunnen werken en is dus 50 MJ aan elektriciteit per m<sup>2</sup> kas nodig. Dit is 13.8 kWh/m<sup>2</sup> kas/jaar en dus een beetje meer dan de elektriciteitsproductie van de panelen. Het gebruik van PVT-panelen zal het elektriciteitsverbruik van het bedrijf dus iets omhoog brengen (ordegrootte 2 kWh/m<sup>2</sup>/jaar), maar de hogere warmte-opbrengst en de grotere warmte-input naar de kas via het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp maakt dat het aandeel duurzame energie in de kasverwarming oploopt naar 30%.

3 Konings J.H.P.M. 2007. Kansen voor PVT? Afstudeerwerk opleiding Technology Management, Technische Universiteit Eindhoven.

Een speciale categorie thermisch-fotovoltaïsche collectoren zijn de zogenaamde solar concentrators. Dit zijn collectoren die het directe stralingsaandeel van het zonlicht in een klein punt of lijn concentreren, zodat de afmeting van de relatief dure zonnecellen klein kan blijven. Grote arealen solar concentrators met zeer hoge concentratiefactoren worden bijvoorbeeld in woestijngebieden geplaatst (Figuur 10). Solar concentrators zijn ook op kleinere oppervlaktes buiten de kas denkbaar. Voorbeelden van de vele soorten van solar concentrator opstellingen (Power Towers, schotel systemen, gootsystemen, ring arrays, latcollectoren, lineaire fresnel arrays) zijn te vinden op <http://pointfocus.com/>. In dat geval zijn typische concentratiefactoren van zulke systemen tussen de 30 en 50. In de literatuur worden dit daarom LCPV systemen genoemd (Low Concentrating Photo Voltaic). Per m<sup>2</sup> lichtonderschepping is dan slechts 0.033 tot 0.020 m<sup>2</sup> PV-cel nodig. Tegenover deze kostenbesparing staat een duurdere constructie vanwege het benodigde zonvolgsysteem, en een duurdere collector vanwege de hoge energie dichtheden ter plaatse van de collector. Ook is de beschikbare hoeveelheid zonne-energie bij deze systemen kleiner omdat ze alleen gebruik kunnen maken van het directe zonlicht. De elektriciteitsproductie per m<sup>2</sup> grondoppervlak is met deze systemen dus meestal lager, maar als de kosten meer dan evenredig lager zijn kan dit toch een interessante oplossing zijn.

Door de hoge thermische belasting bij de (L)CPV-modules moeten deze modules gekoeld worden. De modules genereren dan tevens thermische energie in de vorm van warm water. De concentratie van direct licht kan ook plaatsvinden in combinatie met het kassysteem (zie paragraaf 3.1.2.5 en 3.2).



*Figuur 10. Concentrated power tower in een woestijngebied. Hier is de concentratiefactor 500 tot 1000 (Foto [www.pointfocus.com](http://www.pointfocus.com)).*

### 3.1.2 Warmte of elektriciteit producerende kasdekken en schermen

Naast overtollig licht buiten de kas is er bij sommige teelten (met name potplanten) ook sprake van overtollig licht in de kas. Het overtollige licht kan worden gereduceerd door schermen of gebruik van kassen met een hogere lichtonderschepping. In de volgende paragrafen zullen de verschillende mogelijkheden voor het benutten van overtollig zonlicht in de kas voor elektriciteitsproductie worden beschreven.

### 3.1.2.1 Fotovoltaïsche zonnecellen geïntegreerd in kasdekken

Vlakke fotovoltaïsche zonnecellen kunnen in het geval van schaduwminnende teelten en overtollige zonnestraling (zuidelijke landen) in een bepaald percentage ook direct op het dak van de kas worden geplaatst. Verschillende kassenbouwers bieden hiervoor oplossingen aan. In geval van plaatsing van zonnecellen direct op de kas, vermindert de hoeveelheid licht in de kas en afhankelijk van het gewas kan in bepaalde periodes ook de groei en/of ontwikkeling verminderen.



Figuur 11. Enkele technologieën waarbij de zonnecelmodules direct in het kasdek aangebracht zijn. (Foto Hermans Techniek Nederland bv, Kaatsheuvel).

Sommige bedrijven bieden ook beweegbare systemen aan die op het kasdek kunnen worden gemonteerd. Zoals al eerder aangegeven geeft een beweegbaar systeem een grotere elektriciteitsproductie per m<sup>2</sup> PV-paneel. Op een kasdek waar een bepaalde fractie met PV-panelen wordt bedekt zal de elektriciteitsproductie met een dergelijke solar tracker ongeveer 20 tot 30% toenemen ten opzichte van de situatie waar hetzelfde paneel-oppervlak niet beweegbaar in het dek is gemonteerd. De extra elektriciteitsproductie van de trackers betekent een navenant lagere lichttransmissie van de kas voor direct licht. De lagere lichttransmissie ten opzichte van vaste panelen is vooral merkbaar aan de randen van de dag. Midden op de dag is de lichttransmissie van een kasdek dat voorzien is van een tracker-systeem niet anders dan bij een vast systeem. Een tracker-systeem leidt hierdoor tot een relatief ongunstiger verhouding tussen minimale en maximale lichttransmissie dan een systeem met vaste panelen in het dek.

Een lijst met aanbieders van fotovoltaïsche zonnecellen geïntegreerd in kasdekken is te vinden in Bijlage III. Leveranciers en dienstverleners van systemen voor zonne-energie.



Figuur 12. Beweegbare zonnecelmodules op het kasdek (Foto's Van der Valk Solar Systems bv, Monster).

In de groenteteelt is er onder Nederlandse omstandigheden zelden sprake van een lichtoverschot in het zichtbare golflengtegebied. Onderscheppen van zonlicht, zoals bij het gebruik van schermen of bij dakvlakken die gedeeltelijk met PV-cellen zijn belegd, zal dan dus ook duidelijk ten koste van de productie gaan.

Een eenvoudig sommetje geeft een indicatie voor de waarde die elektriciteit moet hebben voordat de opoffering van licht in de kas ten gunste van elektriciteitsproductie met panelen die eenvoudigweg in het glazen kasdek worden ingebed overwogen kan worden. Bij een productwaarde van bijvoorbeeld € 50 per m<sup>2</sup> kas en de toepassing van de 1% regel (1% lichtverlies geeft 1% opbrengstverlies) is de derving van productwaarde bij een 10% afdekking van de kas 5 € per m<sup>2</sup> per jaar. Bij een PV-rendement van 125 kWh per m<sup>2</sup> paneel levert 10% bedekking van de kas 12.5 kWh per m<sup>2</sup> per jaar op. De elektriciteitsprijs moet dan 40 cent per kWh bedragen om een break even point in variabele kosten te bereiken.

Uiteraard ligt de precieze economische berekening een stuk gecompliceerder omdat de minderproductie vooral in de winter zal plaatsvinden, terwijl de stroomproductie vooral in de zomer plaatsvindt. Bovendien geeft minderproductie ook minder arbeids- en afzetkosten en, bij sommige teelten, ook minder kosten voor uitgangsmateriaal. Het bovenstaand sommetje houdt echter ook geen rekening met de kapitaallasten van de PV-panelen. Daarom kan dit niet anders dan als een grove indicatie worden gezien.

In Italië was de gedeeltelijke vervanging van het transparante kasdek door zonnepanelen in de periode van 2008 t/m 2011 overigens wél interessant omdat de productwaarde daar lager is, de elektriciteitsproductie hoger en het feed-in tarief (de vergoeding voor levering van groene stroom aan het openbare net) ook hoog is. Op basis van productiegegevens uit Italië heeft Stanghellini (2011)<sup>4</sup> geschat dat de productie van 1 kWh elektrisch door permanente zonnepanelen in het kasdek het agrarische rendement met ongeveer €0.10 vermindert in Sicilië en met €0.20 in het Po dal, hetgeen minder is dan het gesubsidieerd feed-in tarief.

In schaduwminnende teelten mag gedurende delen van het jaar een deel van het licht door zonnepanelen in het dak worden onderschept. In combinatie met een diffuus dek is het denkbaar dat een PV paneel in delen van het dak minder voor lokale schaduwvorming gaat zorgen. Nieuwe creatieve ideeën voor schuifbare (of oprolbare) PV panelen in het kasdek worden in dat geval mogelijk.

### 3.1.2.2 Fotovoltaïsche zonnecellen op kasinstallaties

Uiteraard kunnen ook op verschillende plekken op en binnen in de kas fotovoltaïsche cellen worden geïnstalleerd zonder interferentie met de teelt. Hierbij valt te denken aan de volgende locaties:

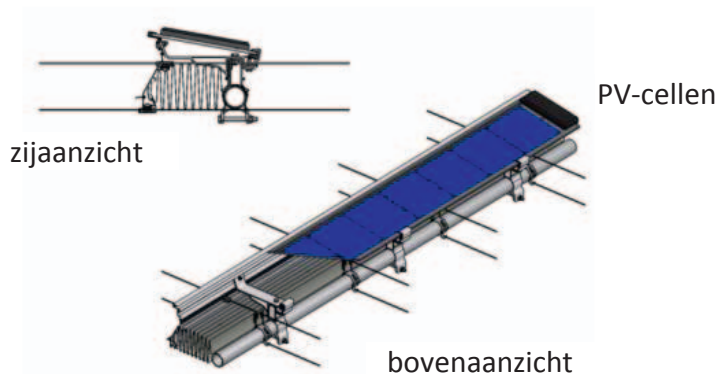
- Op constructiedelen zoals de nok en de roeden (dit zouden dan heel smalle cellen moeten zijn (ordergrootte 2 cm breed)).
- In de zuidgevel (in de vorm van gedeeltelijk doorlatende panelen)
- Boven het centrale pad ( een strook van 2 tot 3 meter)
- Boven het schermpakket buiten (als er een buitenscherm wordt gebruikt).

Een voorbeeld waar de laatstgenoemde optie is uitgewerkt is het systeem van Van der Valk Systemen (zie Figuur 12.). Ter bescherming van het schermmateriaal als het scherm 'op pakket staat' hebben buitenschermen-installaties in de regel een afdekkapje. Een dergelijk kapje is 20 cm breed en in samenspraak tussen van der Valk en Scheuten Solar is een PV-module gemaakt die hier precies op past. In het geval van het systeem van Van der Valk Systemen bestaat 4 tot 5% van het totale kasoppervlak uit dergelijke afdekkapjes. Er is berekend dat met deze uitvoering van PV-panelen 4 kWh per m<sup>2</sup> kas per jaar kan worden geproduceerd. Op dit moment is dit systeem operationeel bij de gebr. Ter Laak in 's Gravenzande.



*Figuur 13. Afdekkapjes boven het buitenscherm kunnen plaats bieden aan PV cellen (Foto van der Valk Systemen, Monster).*

4 Stanghellini C. 2011: Quanto costa alla coltura il fotovoltaico su serra. Supplemento a L'Informatore Agrario,, 26/2011, in press.



Figuur 14. Detailtekeningen van PV-cellen boven het scherm pakket voor buitenschermen (bron van der Valk Systemen, Monster).

Indien stroken PV-panelen boven het middenpad worden gemonteerd, kan dit een strook van 2 tot 3 meter breedte bevatten. Bij een kasbreedte van ongeveer 160 meter, beslaat het oppervlak dan ongeveer 1.5% van het kasoppervlak. Aangezien het hier om oppervlak in de kas gaat is de elektriciteitsopbrengst hieruit dan 1 tot 1.5 kWh per m<sup>2</sup> kas per jaar. Nokken en glasroeden bestrijken samen ongeveer 3% van het kasoppervlak. In theorie zou hier dus ruim 3 kWh/m<sup>2</sup> kas per jaar mee kunnen worden geproduceerd (uitgaande van 125 kWh per m<sup>2</sup> zonnecel). Daar waar het gebruik van PV-panelen boven het bassin, op afdekkapjes en op schuurdaken al op veel plaatsen in praktische zin is toegepast, is de toevoeging van PV-panelen op smalle constructiedelen zoals hierboven genoemd zeker geen gemakkelijke zaak.

Op glasroeden zouden de cellen ongebruikelijk smal worden. Soms wordt ook de kasgoot als mogelijk oppervlak genoemd. In dat geval moeten de cellen zelfs beloopbaar zijn en het gewicht van dekwassers kunnen dragen. Een groot nadeel van de goot is overigens ook nog dat deze vrijwel horizontaal ligt en dus gauw vuil wordt. Om bovengenoemde redenen is het dus zeer onwaarschijnlijk dat goten en roeden van PV-cellen zullen worden voorzien. Een lijst met aanbieders van leveranciers/dienstverleners van zonnepanelen voor algemene toepassingen is te vinden in bijlage III.

### 3.1.2.3 Flexibele fotovoltaïsche zonnecellen op schermen

In schaduwminnende teelten is het gebruikelijk om overtollig zonlicht weg te schermen. In dat geval wordt met een scherm een bepaalde fractie van het binnenvallende licht gereflecteerd (en vaak onverhoopt ook geabsorbeerd). Onderstaande tabel laat zien hoeveel licht voor een potplantenteelt als overtollig licht kan worden beschouwd, als functie van de schermeigenschappen en instellingen die voor de scherming worden gebruikt. In deze tabel is rekening gehouden met 75% transmissie van het kasdek (dus een enkel-glas kas).

Tabel 1. Jaarlijkse hoeveelheid licht in MJ/m<sup>2</sup> kas die in een kas wordt weggeschermd bij verschillende sluitingscriteria en bij verschillende schaduwpercentages.

Sluitingscriterium (zonnestraling buiten)	Schaduwpercentage		
	20% schaduw	40% schaduw	60% schaduw
200 W/m <sup>2</sup>	465	930	1395
300 W/m <sup>2</sup>	393	786	1178
400 W/m <sup>2</sup>	317	634	951
500 W/m <sup>2</sup>	241	481	722
600 W/m <sup>2</sup>	164	329	493

Om gebruik te kunnen maken van het lichtoverschot dat met het gebruik van schermen wordt afgevangen zouden flexibele zonnecellen gebruikt kunnen worden die in het scherm kunnen worden verwerkt. Meer informatie over flexibele zonnecellen is te vinden in Bijlage II.



Er wordt op verschillende plaatsen gewerkt aan productiesystemen die dit materiaal op rol aan de meter zou kunnen produceren.

Productielijnen die momenteel in ontwikkeling zijn werken toe naar cel breedtes van 30 cm tot 120 cm, maar als het materiaal ook op heel smalle stroken zou kunnen worden aangebracht (ordegrootte van 1 cm) zouden er schermmaterialen gemaakt kunnen worden met een bepaalde schaduwfractie.

Een scherm met een schaduwfractie van 20% zou voor bijvoorbeeld 15% met zulk flexibel materiaal kunnen worden gemaakt. Het percentage PV-materiaal is wat lager dan de schaduwfactor omdat andere delen van het scherm (het weefsel, en de bekabeling) ook schaduw zullen geven. Een scherm met een schaduwfractie van 40% zou voor 33% uit PV-materiaal kunnen bestaan en een scherm dat 60% schaduw geeft zou voor de helft uit flexibel PV-materiaal kunnen worden opgebouwd.



foto:www.solarpowernotes.com

Het omzettingsrendement dat op dit moment behaald wordt is 9% (Nuon, 2011<sup>5</sup>), maar dit materiaal wordt nog niet in serieproductie gemaakt (en zeker niet in smalle reepjes). Uitgaande van dit omzettingsrendement, de bovengenoemde oppervlakken van dit PV-materiaal en de beschikbare hoeveelheid licht zoals genoemd in de tabel kunnen de onderstaande hoeveelheden elektriciteit worden geproduceerd door een schaduw scherm met geïntegreerde PV-cellen.

Tabel 2. Jaarlijkse hoeveelheid elektriciteit in kWh/m<sup>2</sup> kas bij een cel rendement van 9% bij verschillende sluitingscriteria en bij verschillende schaduwpercentages van flexibele elektriciteit producerende schermen.

Sluitingscriterium (zonnestraling buiten)	Schaduwpercentage		
	20% schaduw	40% schaduw	60% schaduw
200 W/m <sup>2</sup>	9	20	31
300 W/m <sup>2</sup>	8	17	26
400 W/m <sup>2</sup>	6	14	21
500 W/m <sup>2</sup>	5	11	16
600 W/m <sup>2</sup>	3	7	11

De tendens in de teelt van potplanten (Het Nieuwe Telen Potplanten) is dat er minder uren geschermd wordt en lagere schaduwfracties worden toegepast. De getallen in de rechterbovenhoek van de tabel hebben dan ook geen praktische waarde. Uitgaande van de getallen in de rest van de tabel zou gezegd kunnen worden dat een ordegrootte getal voor de elektriciteitsproductie uit schaduw schermen rond de 10 tot 15 kWh/(m<sup>2</sup> kas) ligt.

Flexibele fotovoltaïsche zonnecellen kunnen ook op verduisteringsschermen worden geplaatst, waarbij de lichtonderschepping maximaal mag zijn. Deze schermen worden echter vooral in de randen van de dag gebruikt zodat de elektriciteitsopbrengst daarvan zeer beperkt is. Uitgaande van een lichttransmissie van het kasdek van 80% en een elektrisch rendement van weer de bovengenoemde 9% zou de opbrengst uit een elektriciteit producerend verduisteringsscherm 5 kWh per m<sup>2</sup> verduistering per jaar bedragen bij een gewas met een maximale daglengte van 11 uur. Is de maximale daglengte 12 uur, dan zal een elektriciteit producerend verduisteringsscherm 2.8 kWh per m<sup>2</sup> verduistering per jaar produceren. De feitelijke elektriciteitsproductie per m<sup>2</sup> kas in bijvoorbeeld de chrysantenteelt, dat een daglengte van 11 uur nodig heeft om in bloei te komen, komt echter nog lager uit omdat steeds een kwart van het bedrijf niet in de verduistering zit. Bij een klein deel van de gewassen, zoals bijvoorbeeld Gerbera, wordt wél het gehele oppervlak verduisterd. De (zeer) geringe stroomproductie die een PV-verduisteringsscherm per m<sup>2</sup> PV-materiaal zou opleveren maakt het gebruik van zulke schermen echter onwaarschijnlijk.

5 Nuon, 2011. [www.nuon.com/nl/het-bedrijf/innovatieve-projecten/helianthos](http://www.nuon.com/nl/het-bedrijf/innovatieve-projecten/helianthos)

### 3.1.2.4 Lamellen voor directe onderschepping van zonne-energie

In de ZonWindKas, die beproefd is op het Innovatie- en Democentrum, zijn lamellen gebruikt om de hoeveelheid licht in de kas te regelen. De lichttransmissie van deze kas kan zo traploos worden geregeld van 10% tot 28%. Door het gebruik van de lamellen als absorberend oppervlak kan water worden opgewarmd naar temperaturen van 65 °C of meer (waarbij de verliezen uiteraard toenemen met de uitstroomtemperatuur). Onderzoek naar het plaatsen van PV cellen op deze lamellen heeft aangetoond dat bij een bedekking van slechts 15% van de lamellen met PV-cellen de ZonWindKas 12 kWh elektriciteit per m<sup>2</sup> kasoppervlak zal opleveren. In dit geval is gerekend met een cel rendement van 15% en wordt alleen het gunstigste deel van het dakoppervlak gebruikt. Wanneer alle lamellen volledig van PV-cellen zouden worden voorzien bedraagt de potentiële elektriciteitsproductie van de ZonWindKas 65 kWh/m<sup>2</sup> per jaar (de Zwart, 2010<sup>6</sup>).



*Figuur 15. ZonWindKas met beweegbare lamellen in het zuiddek die overtollig zonlicht om kunnen zetten in warmte en in principe ook in elektriciteit (foto links buitenkant, foto rechts binnenkant).*

Ook de ontwikkeling van nieuwe vormen van flexibele lamelschermen in de kas is denkbaar. Nieuwe schermen zouden kunnen bestaan uit een combinatie van lamellen, zonnecellen en schermdoekmateriaal. Als zonnecellen op stroken lamellen in de kas onder de tralie worden geplaatst en deze zowel opvouwbaar als ook kantelbaar zijn, kan de hoeveelheid licht op het gewas worden gereguleerd met een geringere permanente lichtonderschepping dan in de ZonWindKas. Door het al dan niet verbinden van de lamellen met stroken doek kan de luchtuitwisseling in gesloten toestand worden beperkt indien wenselijk. Warmteverzameling met een uitschuifbaar scherm lijkt echter onwaarschijnlijk door de benodigde dikte voor de waterdoorvoer en de gecompliceerde waterzijdige doorkoppeling.

De ontwikkelingen in de toepassing van diffuus glas maken dat het bij de toepassing van schaduwschermen minder belangrijk wordt om smalle reflecterende (of absorberende) bandjes te gebruiken. In combinatie met diffuus glas zouden schaduwschermen die een bepaalde schaduwfractie moeten opleveren dus wellicht uit grotere schaduw gevende oppervlakken kunnen worden gemaakt dan de gebruikelijke smalle reepjes. In dat geval zouden deze oppervlakken gemakkelijker van PV-materiaal kunnen worden gemaakt.

### 3.1.2.5 Lenzen voor selectieve onderschepping zonne-energie

Behalve de eenvoudige verlaging van de kastransmissie via reflectie of absorptie door een scherm kan voor de beperking van het directe zonlicht in de kas ook gebruik gemaakt worden van afbuiging van dit directe licht, gevolgd door absorptie van dit licht in een geconcentreerd punt of lijn. Het diffuse deel van het zonlicht is ongericht en wordt dus niet selectief naar de brandlijn afgebogen. Daardoor valt het diffuse licht nauwelijks gehinderd binnen. Zonne-energieverzameling door middel van Fresnelenzen wordt op dit moment in het Innovatie en Democentrum beproefd en gedemonstreerd met de zogenaamde DaglichtKas.

6 De Zwart, H.F. 2010. De performance van de drie demo-kassen op het Innovatie en Democentrum. Rapport Wageningen UR Glastuinbouw GTB-1030.



*Figuur 16. Concentratie en absorptie van direct zonlicht via Fresnellenzen op twee collectoren in de DaglichtKas (IDC in Bleiswijk). De felle streep over de collector wordt veroorzaakt door de hoge intensiteit van het zonlicht in de brandlijn.*

In de brandlijn van de lens kan een thermische collector worden geplaatst, maar kunnen ook zonnecellen worden gemonteerd. Deze moeten geschikt zijn voor een hoge lichtdichtheid en moeten dus CPV-cellen zijn. Onderstaande foto toont een dergelijk CPV-collector, bestemd voor de productie van stroom uit een brandlijn.



*Figuur 17. Een prototype voor een CPV-module in de DaglichtKas.*

Het getoonde collectorsegment is een serie schakeling van 2 modules die elk bestaan uit 11 parallel geschakelde PV-cellen. Een 60 tot 70-tal van deze modules achter elkaar vormen de elektrische collector.

Een belangrijk probleem bij het gebruik van PV-cellen in het algemeen en bij CPV-cellen voor geconcentreerd licht in het bijzonder is het voorkomen van nadelige effecten van schaduwvlekken. Deze schaduwvlekken zijn in Figuur 16. goed te zien. De schaduwbanen zijn afkomstig van de roeden in het glasdek. In de regel zijn zonnepanelen opgebouwd uit een serieschakeling van cellen zodat de serie een behoorlijke spanningsopbouw geeft en een beperkte stroom. Als echter één cel in de serie gedeeltelijk in de schaduw ligt geeft dit een verlaging van de stroom in de gehele keten, waardoor in theorie bijvoorbeeld 5% beschaduwing op een concentrerende CPV-module tot wel 50% vermindering van het elektrisch vermogen kan leiden. Om dit probleem op te lossen worden voor de huidige DaglichtKas modules ontwikkeld die aansluiten bij de stramien-maat van de kas. Daardoor heeft elke module precies evenveel last van de schaduwstreep en is de beperking van de elektriciteitsproductie niet meer dan het relatieve schaduwoppervlak. De consequentie hiervan is dat er in het systeem zeer hoge stromen omgaan (tot 300 A).

De mate waarin het directe licht kan worden onderschept wordt bepaald door de nauwkeurigheid waarmee de kas gebouwd is, de nauwkeurigheid van de lenzen en de sterkte van de lenzen. Concessies op één of meerdere van deze drie punten betekent dat delen van het directe licht niet op de brandlijn vallen. De huidige lenzen in de DaglichtKas concentreren onder gunstige omstandigheden ongeveer 55% van het directe licht wat op de lenzen valt in de brandlijn. In combinatie met de lichttransmissie van de dubbele ruit komt bij inval van het licht onder een gunstige hoek 44% van het directe licht op de collector. Aan de randen van de dag zijn de hoeken van inval minder gunstig en er zijn ook momenten waarop de collector door beperkingen in het mechaniek niet in de focus geplaatst kan worden. Deze momenten liggen overigens ook in de randen van de dag, waardoor deze mechanische beperking weinig invloed heeft op het elektriciteitsproductiepotentieel.

Door al deze factoren samen bedraagt het lichtaanbod op de collector in de DaglichtKas zoals die in 2011 beproefd is 26% van de directe straling. Een gemiddeld Nederlands jaar heeft 1900 MJ directe straling per m<sup>2</sup> en daarvan kan met een kas zoals de DaglichtKas dus 500 MJ in een geconcentreerde lijn worden gebracht.

Verbeteringen in het gebruikte glastype kan de totale hoeveelheid zonne-energie in de brandlijn echter nog wat opvoeren naar 620 MJ/(m<sup>2</sup> kas). Een goede thermische collector kan hieruit 500 MJ per m<sup>2</sup> kas per jaar aan warmte verzamelen en de huidige generatie PV-cellen kunnen hier 20 kWh per m<sup>2</sup> kas per jaar groene stroom mee produceren. Overigens betekent de toevoeging van PV aan de collector dat de thermische warmteverzameling naar 400 MJ/m<sup>2</sup> per jaar zal terugzakken. De genoemde 20 kWh voorziet in ongeveer 44% van de elektriciteitsbehoefte van deze kas. Behalve dat deze kas duurzame warmte en elektriciteit produceert geeft het dubbele kasdek ook nog een goede isolatie zodat verwacht mag worden dat de jaarlijkse verwarmingsbehoefte van de kas niet boven de 510 MJ zal uitkomen. De thermische warmteproductie uit duurzame bron is dus goed voor 98% van de warmtevraag indien alleen thermische collectoren worden gebruikt en 78% in geval van PVT collectoren.

### **Vervolontwikkelingen**

Behalve de verandering van het glastype in het kasdek, zoals hierboven besproken, kan er ook nog een verbetering worden gerealiseerd in de kwaliteit van de lens en in het elektrisch rendement van de CPV-cel kunnen toenemen. Dit laatste wordt vooral mogelijk gemaakt doordat er slechts weinig m<sup>2</sup> PV-cel nodig zijn (slechts 2% van het vloeroppervlak van de kas is PV-materiaal). Dit opent de weg naar hoog-rendement cellen; de zogenaamde triple junction cellen. Deze hebben een twee maal hoger rendement dan de gebruikelijke cellen en produceren daarmee twee keer zoveel elektriciteit.

Een andere ontwikkelingsrichting met een Concentrated Solar Power systeem is een specialisatie in de richting van thermische toepassingen. Hierbij wordt bedoeld op de productie van heet water (70-90 °C). In dit geval moet de collector worden uitgevoerd als vacuümcollector om de verliezen te beperken (zie ook hoofdstuk 3.1.1). Hierdoor kan de verzamelde energie makkelijk worden gebufferd in een bovengrondse korte termijn buffer. Ook ondergrondse opslag van energie die na verloop van tijd weer voor verwarming kan worden gebruikt zonder tussenkomst van een warmtepomp wordt in dat geval mogelijk. Overigens moet in dit geval wel een verlies van ongeveer 30% worden ingecalculeerd en is het wetgevings-traject rond het gebruik van de ondergrond voor zulke systemen nog niet eenduidig.

Tenslotte kan warmte op een dergelijke temperatuur worden gebruikt voor het droogstoken van droogmiddelen of het gebruik van Phase Change Materials die later gebruikt kunnen worden voor ontvochtiging. In dat geval hoeft niet de warmte te worden gebufferd, maar wordt in feite 'ontvochtigingspotentieel' gebufferd.

Een ontwikkeling die niet zozeer tot een hogere output aan warmte of elektriciteit leidt, maar mogelijk wel tot een kostenbesparing is de productie van hete thermische olie. Ook hier moet gebruik gemaakt worden van een vacuümcollector. Een dergelijke hete olie (bijv. 300 °C) kan een warmtemotor aandrijven (Organic Rankine Cycle (ORC), Thermo akoestische power conversie (TAP) of Stirlingmotor) waarmee warmte met een rendement van 20% in elektriciteit kan worden omgezet. De thermische verliezen (onder andere door de opwarmtijd) zullen echter aanzienlijk toenemen zodat het onwaarschijnlijk is dat het overall rendement door deze uitvoeringsvormen toeneemt ten opzichte van het rendement dat met PV-cellen kan worden gerealiseerd.

Het belangrijkste voordeel van elektriciteitsproductie langs thermische weg is evenwel het eerder genoemde mogelijke kostenvoordeel en een stabielere elektriciteitsproductie omdat hete olie gebufferd kan worden. Ook heeft de afvalwarmte van deze wijze van stroomproductie een hogere temperatuur en daarmee een grotere gebruikswaarde.

Het belangrijkste nadeel van deze thermische weg is de hoge concentratiefactor die nodig is om met beperkte verliezen zulke hete olie te kunnen maken. Bij gebruik van Fresnellenzen zullen de lensverliezen toenemen en ook de bouwtoelanties moeten in dat geval nog weer een stapje hoger worden.

## **3.1.3    Additioneel licht uit zonnestraling buiten de kas**

### **Lightpipes**

Af en toe wordt gesproken over het oogsten van licht buiten de kas en het leiden van het geogste licht in de kas via licht geleidende vezels, de zogenoemde lightpipes. Op momenten dat licht een beperkende factor in de kas is kan op deze manier extra zonlicht (zonne-energie) worden binnengebracht.

Op een oppervlak naast de kas wordt dan een transparante overkapping uit glas of acryl geplaatst welke door zijn vorm in staat is om licht op te vangen. Van deze overkapping wordt via een pijp met zeer hoge reflectie-eigenschappen het opgevangen licht naar de kas gebracht. Dit vereist dat het einde van de pijp in de kas / tussen het gewas geïnstalleerd wordt. De hoeveelheid licht die in de kas kan worden gebracht is afhankelijk van de vorm en afmeting van de overkapping buiten de kas, de doorsnede van de pijp (ca. 150 tot 760 mm), de lengte van de pijp (i.v.m. lichtverliezen, tot ca. 20m) en de reflectie-eigenschappen van het gebruikte materiaal.

Afhankelijk van de reflectie-eigenschappen komt 40-90% van het ingevangen licht in de kas aan. De efficiëntie is bij flexibele pijpsystemen minder dan bij vaste pijpvormen.

Naast de lichtwinst door het extra licht-Invangende oppervlak staat evenwel een zekere hoeveelheid lichtonderschepping van de pijp als deze in de kas wordt geïnstalleerd. De kosten zijn voorlopig nog zeer hoog.

Lightpipes of vergelijkbare technieken geven wellicht de mogelijkheid om licht gericht te verzamelen, te bundelen en lokaal aan het gewas toe te voegen in het kader van lokale verhoging van de hoeveelheid licht of verwarming. Dit zou betekenen dat ook in lichtarme-omstandigheden de hoeveelheid zonlicht in de kas zou kunnen worden verhoogd, wat de vraag naar assimilatiebelichting zou kunnen verlagen.

### Luminiscent solar concentrators

Het MIT (Massachusetts Institute of Technology) in de USA past lichtgeleidingstechnieken (waveguide) toe in zogenoemde luminiscent solar concentrator (LSC), waarbij een concentratie factor van 40 wordt gehaald. Lichtdoorlatend glas (of plastic) wordt bedekt met een dunne kleurcoating, waarbij aan de rand van het glas een PV-materiaal wordt aangebracht (Zie Figuur 18). De kleurcoating zorgt voor absorptie en opnieuw in de glasplaat emitteren van het licht om daarna, geleid door de glasplaat, aan de rand m.b.v. PV cellen te worden omgezet naar elektriciteit. Het onderzoek aan het MIT heeft verbeteringen opgeleverd van de stabiliteit van de gekleurde coating. Tevens is gebruik gemaakt van technieken uit de lichtgeleiding door fibers om de verliezen in de glasplaat te verminderen (Currie *et al.* 2008<sup>7</sup>). Eerste producten zijn op de markt (<http://www.covalentsolar.com>). Het onderzoek vermeldt niet wat de overblijvende lichtdoorlatendheid van het transparante materiaal is, waardoor het onduidelijk is of het in de toekomst als kasdek kan worden gebruikt. Het mag echter worden verwacht dat de lichtdoorlatendheid sowieso is verlaagd naar rato van de elektriciteitsproductie gedeeld door het elektrisch rendement van de cellen.



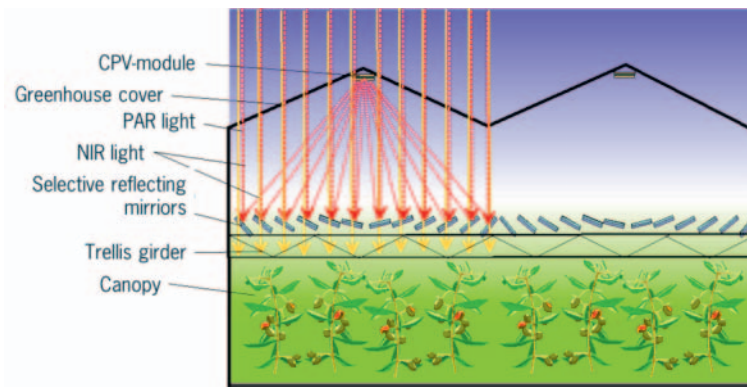
Figuur 18. Voorbeelden van glas uitgevoerd met coating (foto links en midden), waarbij het invangen van licht en de lichtgeleiding in het glas is verbeterd. Productie ook op grote oppervlakken mogelijk (foto rechts).

## 3.2 Energie uit ongebruikte golflengten zonnestraling

Het feit dat planten de Nabij Infra Rode straling uit het zonnespectrum niet nodig hebben voor de groei maakt dat het afscheiden van dit NIR-deel van het zonlicht een bron van zonne-energie geeft die niet in concurrentie staat met de plantengroei. Dit zou betekenen dan ook lichtminnende teelten, zoals de groenteteelt, elektriciteit zouden kunnen genereren uit het licht dat het teeltoppervlak binnenvalt (Sonneveld *et al.* 2009<sup>8</sup>). Deze wijze van zonlichtbenutting wordt onderzocht in het Elkas-project. Het principe hiervan is weergegeven in Figuur 19.

7 Michael J. Currie *et al.* 2008. High-Efficiency Organic Solar Concentrators Science 11 July 2008: vol. 321 no. 5886 pp. 226-228, DOI: 10.1126/science.1158342

8 P.J. Sonneveld, G.L.A.M. Swinkels, V. Mohammadkhani, H.J. Holterman, H.F. de Zwart, G.P.A. Bot, H.J.J.Janssen, B.A.J. van Tuijl & J.B. Campen, 2009. Ontwikkeling van de Elektriciteit Leverende Kas (ELKAS). Rapport Wageningen UR Glastuinbouw 236.



*Figuur 19. Afscheiding van Nabij Infra Rode straling uit het directe zonlicht via spectraal selectieve spiegels die het licht naar een concentrated PV module reflecteren.*

De energiebron waaruit de Elkas elektriciteit maakt is dus het Nabij Infrarood in het directe zonlicht. In Nederland is er ongeveer 1900 MJ direct zonlicht per m<sup>2</sup> per jaar, waarvan na de passage voor het kasdek (de collectoren zitten in de kas) 1500 MJ resteert. Bij een aandeel van 45% NIR in het zonlicht zou er bij 100% reflectie van het NIR en een perfecte focussing van het licht op de collector 625 MJ lichtenergie per m<sup>2</sup> kas op de fotonvoltaïsche cel kunnen worden geprojecteerd. Bij een cel rendement van 15% is de theoretisch maximale elektriciteitsproductie die in een dergelijk systeem kan worden gegenereerd 94 MJ/m<sup>2</sup> kas per jaar, ofwel 26 kWh/m<sup>2</sup> kas per jaar. Prognoses op ervaringen met een soortgelijk project, waar het effect van een aantal suboptimale gegevens (zoals het feit dat de spiegelende lamellen elkaar soms in de weg zitten en grote randeffecten) een reductie van ongeveer 25% te zien geven brengen de geschatte elektriciteitsproductie volgens dit principe op 20 kWh/m<sup>2</sup> kas per jaar. De CPV collector kan en moet worden gekoeld en dit levert naar verwachting ongeveer 400 MJ/m<sup>2</sup> kas per jaar. Bovenstaande getallen gaan uit van een 100% reflectie van NIR en 0% reflectie van PAR op de spiegels. Een spiegel met een dergelijke scherpe spectrale selectiviteit zal niet gemaakt kunnen worden. Indien de reflectie van NIR lager is, maar er ook een gedeeltelijke reflectie van PAR plaatsvindt, kan de elektriciteitsproductie nog wat hoger uitkomen, maar zal de gewasproductie in lichtminnende teelten teruglopen. Als een verminderde praktische reflectie in het NIR-gebied niet wordt gecompenseerd door reflecties uit het PAR-gebied zal de elektriciteitsproductie minder zijn dan de genoemde 20 kWh/m<sup>2</sup>.

### **Toekomstige ontwikkelingen**

Ook bij gebruik van het NIR golflengte gebied kan de elektriciteitsproductie eventueel langs thermische weg plaatsvinden. In dat geval moet de concentratiefactor voor een vergelijkbaar resultaat als bij de eerder genoemde concentrerende systemen echter ruim twee keer zo groot zijn omdat de energiedichtheid in het NIR-gebied ruim twee keer zo klein is. In de toekomst is het denkbaar dat het principe van het gebruik van directe straling in de DaglichtKas (paragraaf 3.1.2.5) en het principe van energie uit ongebruikte golflengtes gecombineerd worden. Zo is het denkbaar de DaglichtKas te voorzien van spectrale spiegels waardoor alleen directe NIR straling wordt verzameld of de Elkas te voorzien van direct licht reflecterende lamellen waardoor de lamellen een grotere fractie van het directe licht zouden reflecteren, terwijl het diffuse licht nog steeds het gewas zou bereiken. Andere toekomstige ontwikkelingen die ook relevant zijn voor het Elkas principe worden beschreven in paragraaf 3.1.2.5

## **3.3 Energie uit overtollige warmte**

### **3.3.1 Onttrekken van warmte uit lucht**

Zonlicht heeft een hoge toegevoegde waarde voor plantengroei onder Nederlandse omstandigheden. Desondanks wordt slechts een heel klein deel van de energie uit het zonlicht op chemische wijze in de vorm van suikers vastgelegd. Het overgrote deel van het zonlicht wat in de kas binnenkomt wordt omgezet in warmte. Wanneer de kas gesloten gehouden wordt kan deze warmte worden geoogst, maar op een laag temperatuurniveau (ongeveer 18 °C).

Gebruik van deze warmte voor verwarming betekent dus dat er gebruik moet worden gemaakt van een warmtepomp. De warmtepomp onttrekt warmte uit een aquifer door het naar ongeveer 8 °C af te koelen. Het water uit deze koude bron kan dan in de zomer weer worden opgewarmd met overtollige zonnewarmte en op ongeveer 16 °C in een warme bron worden opgeslagen (rekening houdend met het temperatuurverlies over een scheidingswisselaar die het aquifer water scheidt van het water in het koelsysteem van de kas). Dit levert koeling in de kas, waarmee een teeltkundig voordeel kan worden behaald. Het gebruik van het koude aquifer water voor koeling kan in principe worden gecombineerd met het verder doorwarmen van water in een TPV collector die daarmee meteen een gunstig elektrisch rendement behaalt. Gezien de oppervlaktereverhoudingen tussen de te koelen kas en het oppervlak dat beschikbaar is voor PV-panelen zal het koelwater echter hooguit 1 °C verder opwarmen dus voor de optredende aquifer temperaturen maakt dit weinig verschil. Ditzelfde geldt voor het geval er een thermische collector in serie met de kaskoeling zou worden geplaatst omdat die nauwelijks meer thermisch vermogen zal leveren.



*Figuur 20. Warmtewisselaars voor onttrekking overtollige warmte uit lucht boven in een semi-gesloten kas.*

Berekeningen en metingen hebben laten zien dat met dit soort gekoelde kassen op jaarbasis ongeveer 450 MJ/m<sup>2</sup> kas aan duurzame energie kan worden geleverd (de Zwart, 2010<sup>9</sup>). Deze duurzame energie wordt gebruikt in het verwarmingsnet. Op jaarbasis gebruikt een dergelijke kas daarnaast nog ongeveer 22 m<sup>3</sup> aardgas waarmee een WKK wordt aangedreven die elektriciteit maakt voor de warmtepomp, circulatiepompen en ventilatoren. De jaarlijkse elektriciteitsproductie van een dergelijke WKK (80 kWh) is gelijk aan het elektriciteitsverbruik van de kas zodat het totale energieverbruik 450 MJ + 700 MJ (namelijk die 22 m<sup>3</sup> aardgas) 1150 MJ bedraagt. Een semigesloten kas kan dus voor 40% op duurzame zonne-energie functioneren. De kas kan in principe verder worden verbeterd zodat de warmtevraag afneemt. Dan zal het elektriciteitsverbruik voor de warmtepomp afnemen en dus ook het gasverbruik van de WKK. Het feit echter dat er onverminderd een warmtepomp nodig blijft en dat de onttrekking van laagwaardige energie aan de kaslucht en de seizoensopslag nodig blijft maakt dat deze ontwikkelingen niet veel zullen veranderen aan de bijdrage van de zonnewarmte voor de verwarming van de kas. Overigens speelt in alle situaties waarbij zonnewarmte wordt gebruikt voor de verwarming van de kas (hetzij direct vanuit hoogwaardige warmteverzameling, hetzij middels een warmtepomp) dat dit warmtegebruik in concurrentie staat met de afvalwarmte die in de huidige tuinbouw in grote hoeveelheden vrijkomt bij de productie van CO<sub>2</sub>. Het gebruik van duurzame warmte zal dus naast besparingen op warmtekosten enige extra kosten voor de CO<sub>2</sub>-bemesting opleveren, of enige productiederving door lagere CO<sub>2</sub>-concentraties. De productiederving zal echter vooral in de zomer plaatsvinden en heeft dus slechts een klein economisch effect.

9 De Zwart, H.F. 2010. De performance van de drie demo-kassen op het Innovatie en Democentrum. Rapport Wageningen UR Glastuinbouw GTB-1030.

## 3.3.2 Onttrekken van warmte uit water

### 3.3.2.1 Onttrekken warmte via dekbevoeiing

In de zomer wordt het kasdek warm, deels door absorptie van zonlicht in het glas (het absorbeert ongeveer 4% van het licht), maar vooral doordat de kaslucht warm is en naar de nok stijgt. Indien het kasdek van buitenaf bevoeid wordt met koud water zal het water opwarmen en daarmee energie verzamelen uit overtollige zonnearmte.

In een praktijkexperiment op een potplantenbedrijf in 2003 en 2004 is een warmteverzameling van 26 MJ per m<sup>2</sup> kas in 295 draaiuren vastgesteld (de Zwart, 2004)<sup>10</sup>. Deze warmte werd vergaard door water van gemiddeld 10 °C op het dek te spuiten met een sproeidebiet van gemiddeld 2 liter per m<sup>2</sup> dak per uur. Hiermee is dus ongeveer een halve m<sup>3</sup> water per m<sup>2</sup> kas naar gemiddeld 21 °C opgewarmd. In dit experiment was het aantal bedrijfsuren door allerlei technische en praktische factoren zeer beperkt. Het was bijvoorbeeld een erg droge zomer waardoor de betreffende tuinder zijn dekbevoeiingsinstallatie niet wilde gebruiken om water te besparen. Bovendien waren er veel problemen met verstopping van het filter in het systeem waardoor de sproeicapaciteit vaak laag was.

In het betreffende project zijn ook simulatieberekeningen gemaakt. Deze berekeningen beschreven de waargenomen warmteverzameling in die 295 draaiuren zeer goed en wanneer met het simulatiemodel werd berekend wat de warmteverzameling had kunnen zijn dan blijkt een warmteverzameling van 300 MJ/m<sup>2</sup> kas per jaar voor bijvoorbeeld een tomatenteelt heel goed mogelijk (de Zwart, 2005)<sup>11</sup>. Het temperatuurniveau waarop de warmte wordt onttrokken is in deze gevallen laag (rond de 16 °C) zodat ook hier gebruik gemaakt moet worden van een warmtepomp om deze energie te kunnen benutten. Desalniettemin blijkt een eenvoudige techniek zoals het gebruik van deksproeiers dus een bijdrage van 30 tot 40% duurzame energie voor de verwarming van kassen te kunnen leveren.

Er zijn ook metingen en berekeningen gedaan aan het gebruik van waterbevoeide schermen in de kas, het zogenaamde KlimrekScherm (de Zwart, 2008)<sup>12</sup>. Deze berekeningen laten een vergelijkbaar warmteverzamelingspotentieel zien, maar met een wat hogere afstroomtemperatuur (19 °C in plaats van 16 °C). Op zich is het warmte-onttrekkingsvermogen in de kas aanzienlijk groter dan buiten kas, maar in de voorgestelde uitvoering is het gebruikte oppervlak en het aantal gebruiksuren kleiner, waardoor de jaarlijkse warmteverzameling ergens rond de 300 MJ/m<sup>2</sup> kas uitkomt. Ook hiermee is een aandeel van 30 tot 40% duurzame energie in de verwarming van kassen reëel, maar ook hierbij moet weer gebruik gemaakt worden van een warmtepomp en een aquifer.

Het toevoegen van zonnestraling absorberende pigment in het water is een theoretische mogelijkheid om de hoeveelheid verzamelde zonnestraling te verhogen. Gedacht kan worden aan pigmenten die zichtbare en/of nabij infrarode straling absorberen. Alle beschikbare pigmenten zullen de hoeveelheid licht voor de plantengroei verminderen. In praktijkvoorbeelden in het verleden waren optredende lekkage, algengroei en vervuiling de grootste bottlenecks voor verdere implementatie in de praktijk.

### 3.3.2.2 Onttrekken warmte uit oppervlaktewater

Behalve de onttrekking van duurzame energie aan warmtebronnen die op het tuinbouwbedrijf zelf door zonne-energie gevoed worden kan er ook gedacht worden aan het gebruik van oppervlaktewater uit meren, kanalen of rivieren. Er bestaat de mogelijkheid om jaar rond warmte uit het oppervlaktewater te onttrekken of alleen in de zomermaanden warmte te onttrekken om deze dan in een aquifer op te slaan en deze vervolgens te gebruiken in de wintermaanden. Het onttrekken van warmte uit oppervlaktewater heeft als bijkomend effect dat de waterkwaliteit kan verbeteren door de lagere temperaturen waardoor blauwalg minder groeit.

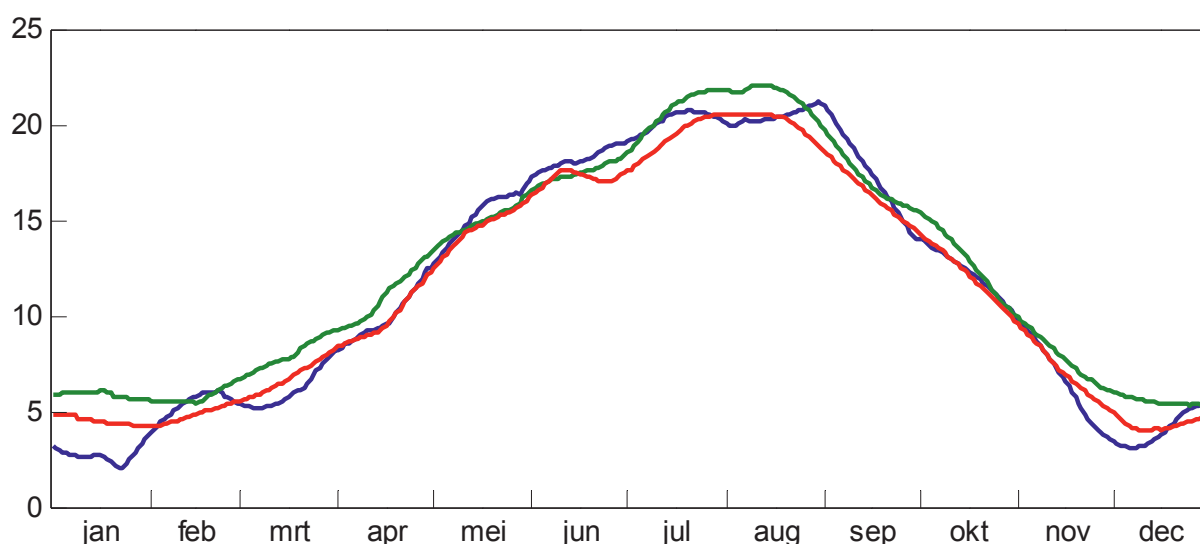
---

10 Zwart, H.F. de, 2004, Praktijkexperiment Duurzame energie-verzameling door middel van daksproeiers. Rapport Agrotechnology and Food Innovations 233.

11 Zwart, H.F. de, 2005. Evaluation of roof spraying as a low cost system for sustainable energy collection. Acta Hort. (ISHS) 691:597-604.

12 Zwart, H.F. de, 2008. Koel- en schermerspectieven van het Klimrek scherm. Rapport Wageningen UR Glastuinbouw 239.





Figuur 21. *Temperatuur van open oppervlaktewater op drie plaatsen in Nederland.*

Figuur 21. toont het verloop van de temperatuur van oppervlaktewater in Nederland in drie stromende watermassa's (Ketelmeer, Gooise Meer en de Rijn). Het verloop van de oppervlaktewatertemperatuur toont een typisch seizoenpatroon, wat het gebruik van dit water als directe warmtebron voor een warmtepomp minder gunstig maakt. Vooral in de wintermaanden zal de warmtepomp het water tot temperaturen rond het vriespunt moeten afkoelen om nog energie aan het water te kunnen onttrekken. Hierdoor zakt de COP van de warmtepomp met 0.5 tot 1 punt. Ondanks de lage uitstroomtemperatuur zullen de te verpompen debieten groot worden (ordegrootte 60 m<sup>3</sup> per ha kas per uur), maar omdat het oppervlaktewater betreft zou het water in goedkope, open kanalen kunnen worden aan- en afgevoerd.

Indien het gebruik van warmte uit oppervlaktewater gecombineerd zou worden met energieopslag in een aquifer zou het bovengenoemde nadeel van het wegzakken van de temperatuur in de winter geheel kunnen worden ondervangen. In de zomer zou het oppervlaktewater dan kunnen worden gebruikt om de warme bron van een aquifer op bijvoorbeeld 15 °C te brengen en in de winter zou dan aquifer water in plaats van oppervlaktewater als warmtebron voor de warmtepomp kunnen worden gebruikt.

Gebruik van oppervlaktewater is in technische zin dus goed mogelijk en kan leiden tot een 40 tot 50% aandeel van duurzame energie voor de verwarming van kassen. De belangrijkste vraag bij de toepassing van oppervlaktewater is de invloed van het invoegen van aanzienlijke hoeveelheden koud water op benedenstroomse medegebruikers van dat water.

### 3.4 Samenvatting energetische bijdrages verschillende technieken

In de hoofdstukken 3.1, 3.2 en 3.3 worden de technische mogelijkheden voor het benutten van zonne-energie in de glastuinbouw beschreven. Tevens worden de potentiële energetische bijdrages voor de glastuinbouwsector voor het benutten van zonnewarmte of conversie naar elektriciteit geschetst.

Zonne-energie kan maar één keer gebruikt worden. Een belangrijk deel van het zonlicht wordt door kasgewassen reeds gebruikt voor de gewasgroei. **Energie uit overtollig zonlicht** kan gebruikt worden indien warmte en elektriciteit worden verzameld buiten de kas (hoofdstuk 3.1.1) of op kasinstallaties zonder beïnvloeding van het gewas. Dit is mogelijk voor alle sectoren en gewassen. Voor sommige schaduwminnende teelten ontstaat overtollig zonlicht op bepaalde momenten van het jaar. Warmte en elektriciteit kan in deze gevallen op kasdekken of schermen worden verzameld (hoofdstuk 0). Aangezien niet alle golflengtes van het licht worden gebruikt voor de gewasgroei, kan ook **energie uit ongebruikte golflengtes van de zonnestraling** worden verzameld (hoofdstuk 3.2). Dit is in principe toepasbaar in alle sectoren/gewassen. Tenslotte levert de benutting van zonne-energie in een kas een grote hoeveelheid warmte op als overtollig restproduct. Het onttrekken van **energie uit overtollige warmte** uit de lucht in semi-gesloten kassen is technisch in alle sectoren/gewassen mogelijk (hoofdstuk 3.3.1).

Daarnaast is het bij veel bedrijven in Nederland mogelijk om overtollige warmte uit water (dekbevoeiing en oppervlaktewater) te onttrekken (hoofdstuk 3.3.2).

Niet alle technische oplossingen zijn voor alle glastuinbouwsectoren relevant. Sommige technische oplossingen kunnen in combinatie worden toegepast, maar andere sluiten elkaar uit of staan in concurrentie met elkaar. De volgende tabel vat de energetische bijdragen voor de glastuinbouwsector van verschillende mogelijkheden voor het benutten van zonne-energie samen:

	Warmte	Elektriciteit
<b>Basispotentieel, in alle sectoren toepasbaar</b>		
Warmte uit thermische collectoren • Bedrijfsruimtes en waterbassins	200 MJ/(m <sup>2</sup> kas)	
<b>Of</b>		
Elektriciteit uit fotovoltaïsche zonnepanelen • Bedrijfsruimtes en waterbassins		12 kWh/(m <sup>2</sup> kas)*
<b>Of</b>		
Warmte en elektriciteit uit thermisch-fotovoltaïsche collectoren buiten de kas	180 MJ/(m <sup>2</sup> kas)	10 kWh/(m <sup>2</sup> kas)*
*Ca. 10% van kasoppervlak zijn benutbare ruimtes buiten de kas		
<b>Hier bovenop kan</b>		
Fotovoltaïsche zonnecellen op kasinstallaties		5 kWh/(m <sup>2</sup> kas)
<b>En</b>		
Onttrekken van warmte uit lucht • Semi-gesloten kassen	450 MJ/(m <sup>2</sup> kas)	
<b>Of (in concurrentie met onttrekking van warmte uit kaslucht)</b>		
Onttrekken warmte uit water • Dekbevoeiing	300 MJ/(m <sup>2</sup> kas)	
<b>En op veel plaatsen</b>		
Onttrekken warmte uit water • Oppervlaktewater	300 MJ	
<b>En (maar dan met reductie op de meeste andere opties)</b>		
Energie uit ongebruikte golflengten zonlicht • Elkas (PAR-intensiteit in kas nog onbekend)	400 MJ/(m <sup>2</sup> kas)	20 kWh/(m <sup>2</sup> kas)
<b>Additioneel potentieel, alleen in schaduwminnende teelten (maar niet in combinatie met het Elkas principe)</b>		
Fotovoltaïsche zonnecellen geïntegreerd in kasdekken • Vast op kasdekken • Beweegbaar op kasdek		20 tot 30 kWh/m <sup>2</sup> 5 tot 10 kWh/m <sup>2</sup>
<b>Of</b>		
Flexibele fotovoltaïsche zonnecellen op schermen • Schaduwscherm • Verduisteringsscherm		15 kWh/(m <sup>2</sup> kas) 3 kWh/(m <sup>2</sup> kas)
<b>Of (in concurrentie met andere vormen van warmteonttrekking aan de kas)</b>		
Lamellen voor lichtonderschepping zonne-energie • ZonWindKas (max. 6 mol/(m <sup>2</sup> dag) licht in de kas)	700 MJ/(m <sup>2</sup> kas)	25-65 kWh/(m <sup>2</sup> kas)
<b>Of (in concurrentie met andere vormen van warmteonttrekking aan de kas)</b>		
Lenzen voor selectieve onderschepping zonne-energie • DaglichtKas (max. 16 mol/(m <sup>2</sup> dag) in de kas)	400 MJ/(m <sup>2</sup> kas)	20 kWh

## 4 Investeringsruimte technieken voor verzameling zonne-energie

In dit hoofdstuk wordt een globale berekening uitgevoerd naar de investeringsruimte van technieken om zonne-energie in de glastuinbouw te benutten. De investeringsruimte beoogt een indicatie te geven van de potentiële investeringen, die samenhangen met een techniek om zonne-energie doelmatig aan te wenden binnen het glastuinbouwbedrijf.

De globale kosten-batenanalyse gaat uit van de technieken zoals in hoofdstuk 3 beschreven. Hierin worden de technische mogelijkheden weergegeven om het nu ongebruikte deel van de zonnestraling te benutten als bijdrage aan de duurzame energievoorziening van de glastuinbouw. De plantkundige mogelijkheden om meer uit het zonlicht te halen worden hierbij niet beschouwd. Levering van warmte aan derden wordt niet bekeken, maar levering van elektriciteit aan het openbare net wordt daarentegen wel in aanmerking genomen.

In de analyse ter bepaling van de investeringsruimte is van de volgende uitgangspunten uitgegaan, waarbij naar de lange termijn situatie wordt gekeken:

- Gas: Integrale prijs is 0,35 €/m<sup>3</sup> (voor commodity, capaciteit en transport);
- Elektriciteit: Prijs is 0,10 €/kWh

In de prijs voor geproduceerde elektriciteit is geen rekening gehouden met de SDE-regeling (Regeling Stimulering Duurzame Energieproductie). Dit moet per situatie/project worden bekeken. De (hoogte van de) vergoeding is afhankelijk van de subsidievoorwaarden.

- Warmte: Prijs of waarde van warmte(oogst) is uitgedrukt in €/m<sup>3</sup> aardgasequivalenten, waarbij twee situaties worden onderscheiden:
  - o De geogste warmte is hoogwaardig (qua temperatuurniveau) en kan direct in het verwarmingssysteem worden ingezet: waarde is 0,35 €/m<sup>3</sup> a.e. (= gasprijs);
  - o De geogste warmte is laagwaardig (qua temperatuurniveau) om direct te benutten, maar wordt na opslag in de bodem bij toepassing in temperatuur opgehoogd met een warmtepomp. De waarde bedraagt 0,15 €/m<sup>3</sup> a.e. De warmteprijs is lager dan bij hoogwaardige warmte, omdat de kosten van elektriciteit voor de warmtepomp zijn verdisconteerd (bij COP warmtepomp = 4).

Met de geschatte elektriciteitsproductie en/of warmteoogst uit de technische inventarisatie zijn bovenstaande uitgangspunten de opbrengsten voor de verschillende technieken bepaald. Op basis van de opbrengsten is de investeringsruimte berekend. Onder dit bedrag vallen alle installaties, die nodig zijn om zonne-energie te oogsten en om te zetten voor toepassing als elektriciteit en/of warmte. Bij laagwaardige warmte betreft dit ook de kosten voor opslag (aquifer) en de warmtepomp. Voor de omrekening van opbrengsten naar investeringsruimte is gerekend met 10% aan jaarkosten voor de verschillende installaties. De jaarkosten zijn samengesteld uit afschrijving, onderhoud en rente. De afschrijving en onderhoud kunnen in werkelijkheid tussen de installatie verschillen. Er is geen rekening gehouden met schaaffecten van investeringen, zoals bij investeringen in aquifer. In sommige gevallen zal nog rekening moeten worden gehouden met lichtverlies/productieverlies, CO<sub>2</sub> aanvulling, etc. Dit wordt in specifieke cases nader bekeken. Er is geen rekening gehouden met subsidiemogelijkheden en/of vergoedingen voor groene stroom.

### 4.1 Energie uit overtollige zonnestraling

#### 4.1.1 Warmte en elektriciteit verzamelen buiten de kas

##### 4.1.1.1 Warmte uit thermische collectoren

De warmteoogst van de thermische collectoren wordt becijferd op 180 MJ per m<sup>2</sup> per jaar (zie 3.1.1.1). De warmte kan qua temperatuur direct voor verwarming worden benut. Hierdoor kan deze warmte worden gewaardeerd tegen de prijs van ketelgas. De warmteoogst bedraagt omgerekend 5.6 m<sup>3</sup> a.e. per m<sup>2</sup> per jaar (= 180/31.65). De waarde van de warmteoogst is 2 €/m<sup>2</sup> (à 0,35 €/m<sup>3</sup>). Hierbij wordt er dus vanuit gegaan dat de geproduceerde warmte direct en volledig kan worden benut ter vervanging van ketelgas.

De investeringsruimte bedraagt bij 10% jaarkosten van de installaties ca. 22 €/m<sup>2</sup> kas. Hieruit moeten de installaties worden bekostigd, zoals thermische collectoren, installatiekosten, etc.

Het elektriciteitsverbruik voor het rondpompen van het water door de collectoren is nagenoeg verwaarloosbaar (0,1 kWh/m<sup>2</sup> of 0,01 €/m<sup>2</sup>).

De investeringsruimte bedraagt 210-235 €/m<sup>2</sup> collector uitgaande van een collectoroppervlak van ca. 10% van het kasoppervlak. De investeringsruimte is kleiner dan de aanschaf van thermische collectoren, welke ca. 300-600 €/m<sup>2</sup> collector bedraagt (vlakke collector respectievelijk vacuüm buizen, huishoudelijke toepassing).

Ingeval de warmteogst (hoogwaardig) mag worden opgeslagen in een aquifer, neemt enerzijds de warmteogst af (70% opslag rendement) en moet anderzijds geïnvesteerd worden in een aquifer en extra elektraverbruik van 0,4 kWh/m<sup>2</sup>. Dit maakt de toepassing minder interessant.

Er worden geen effecten op de teelt verwacht. Er kan in de zomer een kleine additionele CO<sub>2</sub> behoefte in de zomer zijn.

#### **4.1.1.2 Elektriciteit uit fotovoltaïsche zonnepanelen**

De PV zonnepanelen geven volgens de technische inventarisatie een elektriciteitsproductie van 12 kWh/m<sup>2</sup> kas (zie 3.1.1.2). Deze elektra wordt terug geleverd aan het net.

De elektriciteitsproductie vertegenwoordigt een waarde van 1,2 €/m<sup>2</sup> kas (à 0,1 €/kWh). Op basis hiervan bedraagt de investeringsruimte ca. 12 €/m<sup>2</sup> kas of 115-125 €/m<sup>2</sup> collector (bij 10% van kasoppervlak). Hieruit moeten de PV panelen en de installatiekosten worden bekostigd. De investeringsruimte is duidelijk kleiner dan aanschafkosten van PV panelen, welke ca. 500-700 €/m<sup>2</sup> paneeloppervlak bedraagt. Ook bij een hogere elektriciteitsprijs (0,15 €/kWh) is de berekende investeringsruimte van 180 €/m<sup>2</sup> collector onvoldoende.

Er worden geen effecten op de teelt of andere bedrijfsprocessen verwacht. De productie van en levering van elektra aan het openbare net vindt geheel plaats buiten het glastuinbouwbedrijf.

#### **4.1.1.3 Warmte en elektriciteit uit thermisch-fotovoltaïsche collectoren**

Op basis van de technische inventarisatie kan een potentiële warmteogst worden behaald van 180 MJ per m<sup>2</sup> kas per jaar en 10 kWh per m<sup>2</sup> kas per jaar worden geproduceerd (zie 3.1.1.3).

De warmte is van lagere temperatuur (30-40 °C), waardoor voor benutting in het verwarmingssysteem een warmtepomp nodig is. Daarnaast wordt de warmte opgeslagen in een aquifer. Omdat de warmte laagwaardig is, is de waarde daarvan ook lager. Rekening houdend met de elektriciteitskosten voor de warmtepomp bedraagt de prijs van laagwaardige warmte 0,15 €/m<sup>3</sup> a.e. Hiermee komt de waarde van de warmteogst uit op 0,9 €/m<sup>2</sup> kas.

De elektriciteitsproductie heeft een waarde van 1 €/m<sup>2</sup> kas (= 10 \* 0,1€/kWh).

In totaal levert dit een opbrengst van 1,85 €/m<sup>2</sup> kas. Op basis hiervan bedraagt de investeringsruimte ca. 18,5 €/m<sup>2</sup> kas of ca. 175-195 €/m<sup>2</sup> collectoroppervlak. Hiervoor moet geïnvesteerd worden in de PVT collector, installatiekosten, aquifer en warmtepomp.

De investeringsruimte is op basis van de gehanteerde elektriciteitsprijs ontoereikend. De investering in watergekoelde PVT collectoren alleen bedraagt al 650-1000 €/m<sup>2</sup> collectoroppervlak. Daarbij bedraagt de investering in een warmtepomp en aquifer ca. 25 €/m<sup>2</sup> kas en overschrijdt daarmee al de berekende investeringsruimte.

Er worden geen effecten op de teelt verwacht.

### **4.1.2 Warmte of elektriciteit producerende kasdekken en schermen**

#### **4.1.2.1 Fotovoltaïsche zonnecellen op kasinstallaties**

Deze PV cellen interfereren in deze optie niet met de teelt, waardoor er geen productieverlies optreedt (zie 3.1.2.2). Volgens de technische inventarisatie kan een elektriciteitsproductie van 5 kWh per m<sup>2</sup> kas per jaar worden behaald. Dit vertegenwoordigt een waarde van 0,5 €/m<sup>2</sup> kas. De investeringsruimte bedraagt daarmee 5 €/m<sup>2</sup> kas. Dit is bij 5% van het kasoppervlak een investeringsruimte van 95-105 €/m<sup>2</sup> collectoroppervlak. De investeringsruimte lijkt hiermee niet voldoende voor een investering in PV panelen.

Bij Ter Laak in Wateringen wordt de investering in PV cellen op afdekkapjes geraamd op ca. 32,5 €/m<sup>2</sup> kas (op 4-5% van het kasoppervlak). Daarbovenop komen nog de installatiekosten. Als in deze case de SDE-regeling van toepassing is, is de vergoeding voor de geproduceerde elektriciteit hoger. Volgens de SDE regeling 2010 kon een vergoeding van 43 eurocent per geproduceerde kWh worden verkregen, mits het piekvermogen kleiner is dan 15 kWh (Zwart, 2010<sup>13</sup>). Bij deze elektriciteitsvergoeding bedraagt de investeringsruimte 21,5 €/m<sup>2</sup> kas of 430 €/m<sup>2</sup> collectoroppervlak. Dit is minder dan de geraamde investering van 32,5 €/m<sup>2</sup> kas.

#### **4.1.2.2 Flexibele fotovoltaïsche zonnecellen op schermen**

Bij de inzet van flexibele fotovoltaïsche zonnecellen wordt onderscheid gemaakt naar PV cellen op schaduwschermen en op verduisteringsschermen. In beide gevallen wordt verondersteld dat de PV cellen tijdens gebruik van de schermen geen nadelig effect hebben op de groei en productie.

Voor PV cellen op schaduwschermen wordt een elektriciteitsproductie berekend van 15 kWh per m<sup>2</sup> per jaar (3.1.2.3). Dit komt overeen met een waarde van 1,5 €/m<sup>2</sup> kas en een investeringsruimte van 15 €/m<sup>2</sup> kas. Aangezien een PV-scherm in de plaats zou komen voor een standaard schaduw scherm zou dus gesteld kunnen worden dat een dergelijk PV-scherm (bestaande uit 33% PV-materiaal en met een 40% overall beschaduwing) niet meer dan 15 €/m<sup>2</sup> extra mag kosten ten opzichte van een standaard scherm.

Bij verduisteringsschermen met PV cellen is de elektriciteitsproductie kleiner: 3 kWh per m<sup>2</sup> kas per jaar. Dit resulteert in een waarde van 0,3 kWh per m<sup>2</sup> kas per jaar en een investeringsruimte van 3 €/m<sup>2</sup> kas. Dit is ook de investeringsruimte per m<sup>2</sup> 'collectoroppervlak' (het gehele verduisteringsscherm is voorzien van PV-materiaal). De investeringsruimte lijkt, met name bij verduisteringsscherm met PV-materiaal, niet toereikend om een investering in flexibele PV cellen en bijkomende kosten te bekostigen.

#### **4.1.2.3 Lamellen voor lichtonderschepping zonne-energie**

In de ZonWindKas (IDC, Bleiswijk) zijn lamellen gebruikt om met name in de zomer warmte te oogsten voor gebruik in de winterperiode. Door het plaatsen van PV cellen op de lamellen kan ook elektriciteit worden geproduceerd. Overigens leidt een bedekking van de lamellen met PV-cellen tot een beperkte afname van de warmte-oogst (tot 20% minder bij een volledige bedekking).

De warmte-oogst is geschat op 700 MJ per m<sup>2</sup> per jaar (zie 3.1.2.4). Deze warmteproductie wordt gehaald bij gebruik van een asymmetrisch kasdek waarin alle zuidvlakken van lamellen zijn voorzien. In het IDC-experiment betekende dit dat het lameloppervlak 78% van het kasoppervlak beslaat. De warmteoutput is hoogwaardige warmte (à 65 °C) die direct in het verwarmingssysteem kan worden benut. De warmteproductie komt overeen met 22,1 m<sup>3</sup> a.e. per m<sup>2</sup> per jaar. De warmte-oogst zal deels direct worden benut en deels worden opgeslagen voor toepassing op een later moment (zonder warmtepomp). De warmte-oogst vertegenwoordigt een waarde van 7,7 €/m<sup>2</sup> kas per jaar (à 0,35 €/m<sup>3</sup>). Daarnaast zorgt het dubbelwandige kasdek ook voor een extra isolatie van de kas, wat een waarde van ongeveer 2 €/m<sup>2</sup> vertegenwoordigt. Dit resulteert in een investeringsruimte van 97 €/m<sup>2</sup> kas, waarvoor het lamellensysteem en de asymmetrische kasvorm moet kunnen worden aangelegd. Bovendien moet voor dit bedrag de warmtebuffer worden aangelegd. Er zal een additionele CO<sub>2</sub> behoefte ontstaan omdat de warmte niet langer door een ketel wordt geproduceerd.

Afhankelijk van de bedekkingsgraad van de lamellen met PV cellen is een elektriciteitsproductie mogelijk van 25 tot 65 kWh per m<sup>2</sup> per jaar (zie 3.1.2.4). Bij volledige bedekking met PV cellen is de elektriciteitsproductie 65 kWh per m<sup>2</sup> per jaar en heeft een waarde van 6,5 €/m<sup>2</sup> kas per jaar. Dit verschaft een investeringsruimte van 65 €/m<sup>2</sup> kas. Bij hetzelfde percentage lameloppervlak van het kasoppervlak (78%) bedraagt de investeringsruimte 80 - 90 €/m<sup>2</sup> PV collector, inclusief elektrische aansluiting. De lichtintensiteit in de ZonWindKas is zeer laag, waardoor er geen gebruik gemaakt kan worden van ontwikkelingen in 'Het Nieuwe Telen Potplanten' waar juist door vergroting van de lichttoetreding productieverbeteringen worden gerapporteerd.

#### 4.1.2.4 Lenzen voor selectieve onderschepping zonne-energie

In de zogeheten DaglichtKas op het Innovatie en Democentrum wordt het directe licht met Fresnellenzen afgebogen en geabsorbeerd in een brandlijn. Het diffuse deel van het zonlicht komt ongehinderd binnen.

Voor de DaglichtKas is berekend dat een iets verder geoptimaliseerde uitvoering van de kas ongeveer 500 MJ thermische energie kan voortbrengen. Bij toevoeging van PV-cellen zal met de huidige omzettings-efficiënties ongeveer 20 kWh per m<sup>2</sup> per jaar aan groene stroom kunnen worden geproduceerd en zal de warmteverzameling dan terugzakken naar 400 MJ per m<sup>2</sup> per jaar.

Een verdere doorontwikkeling van de kas (een betere lens betere conversierendementen) kan de warmte- of elektriciteitsproductie toenemen naar 450 MJ respectievelijk 25 kWh per m<sup>2</sup> per jaar. De warmteoogst is laagwaardige warmte. Om de laagwaardige warmte doelmatig aan te wenden is een warmtepomp en een aquifer nodig.

De Fresnellenzen zijn alleen geschikt voor schaduwminnende teelten, zoals in de potplantenteelt. Het is gebleken dat het gewas in de DaglichtKas uitzonderlijk goed groeit. De verwachting is dat dit een meerproductie van 20% per jaar oplevert. Dit levert een saldo van meeropbrengsten en extra (variabele) kosten op van ongeveer 10 €/m<sup>2</sup> per jaar (BINternet; www.lei.wur.nl).

De waarde van de (laagwaardige) warmteoogst of de elektriciteitsproductie is als volgt bepaald:

- o Warmteoogst: 400 MJ per m<sup>2</sup> per jaar = 12,6 m<sup>3</sup> a.e. Waarde = 1,9 €/m<sup>2</sup> (à 0,15 €/m<sup>3</sup>).
- o Elektriciteitsproductie: 20 kWh per m<sup>2</sup> per jaar. Waarde = 2 €/m<sup>2</sup> (à 0,1 €/kWh).

Naast inkomsten ten gevolge van de energieproductie geeft de DaglichtKas ook een besparing op de warmtevraag ter waarde van ongeveer 4 €/m<sup>2</sup>.

De meerwaarde van de DaglichtKas komt bij warmteoogst en bijkomende revenuen uit op 15,9 €/m<sup>2</sup> (= 10+1,9+4). De investeringsruimte bedraagt bij 10% jaarkosten van de installaties 159 €/m<sup>2</sup> kas voor de thermische variant. De toevoeging van de fotovoltaïsche conversie geeft een extra investeringsruimte van 20 €/m<sup>2</sup> kas (tezamen met de warmteoogst in totaal 179 €/m<sup>2</sup> kas). De installaties betreffen: dubbel glasdek en lenzen, collector (al dan niet met PV-cellen), aquifer en warmtepomp. Er zal een additionele CO<sub>2</sub> behoefte ontstaan omdat een dergelijke energiezuinige kas nauwelijks of geen fossiele brandstof meer zal gebruiken.

## 4.2 Energie uit ongebruikte golflengten zonnestraling

Middels spectraal selectieve spiegels wordt het Nabij Infrarood afgescheiden uit het directe zonlicht en gereflecteerd op een CPV collector (concentrated PV module). De CPV collector moet worden gekoeld en levert een warmteoogst op. Het (gereflecteerde) NIR licht is niet nodig voor de groei en heeft als zodanig geen negatief effect op de productie.

Uit de technische verkenning blijkt dat met de CPV ca. 20 kWh per m<sup>2</sup> per jaar kan worden geproduceerd. Tegelijkertijd wordt ca. 400 MJ per m<sup>2</sup> per jaar aan hoogwaardige warmte geoogst. De warmteoogst wordt deels gebufferd (zie 3.2).

De waarde van de elektriciteitsproductie en de warmteoogst is als volgt bepaald:

- Elektriciteitsproductie: 20 kWh per m<sup>2</sup> per jaar. Waarde = 2 €/m<sup>2</sup> (à 0,1 €/kWh).
- Warmteoogst: 400 MJ per m<sup>2</sup> per jaar = 12,8 m<sup>3</sup> a.e. Waarde = 4,4 €/m<sup>2</sup> (à 0,35 €/m<sup>3</sup>).

Tezamen levert dit een opbrengst op van 6,4 €/m<sup>2</sup>.

De investeringsruimte bedraagt bij 10% jaarkosten van de installaties ca. 64 €/m<sup>2</sup> kas. Hieruit moeten de volgende installaties worden bekostigd: spectraal selectieve spiegels, CPV module, koelsysteem collectoren, aquifer en installatiekosten. Daarnaast kan er een behoefte aan additionele CO<sub>2</sub> ontstaan.

## 4.3 Energie uit overtollige warmte

### 4.3.1 Onttrekken van warmte uit lucht

Het onttrekken van warmte uit kaslucht via een warmtewisselaar levert laagwaardige warmte op. Om dit te benutten voor verwarming is warmteopslag (aquifer) en een warmtepomp nodig. Voor de elektriciteitsvraag van warmtepomp, ventilatoren, etc. wordt een WKK ingezet, die daarnaast de overige warmte en CO<sub>2</sub> produceert.

De warmteoogst bedraagt 450 MJ per m<sup>2</sup> per jaar (Zwart, 2010<sup>14</sup>, zie ook 3.3.1). Dit komt overeen met 14,2 m<sup>3</sup> a.e. De waarde van deze warmte bedraagt 2,1 €/m<sup>2</sup> (à 0,15 €/m<sup>3</sup>).

Naast deze directe waarde van de warmte kan een gekoelde kas een zekere verbetering geven in het productieniveau en/of de productiekwaliteit. Hierdoor kan de waarde van de installatie ongeveer worden verdubbeld (extra 2-3 €/m<sup>2</sup> kas).

De investeringsruimte komt daarmee bij 10% jaarkosten van de installaties uit op 40 tot 50 €/m<sup>2</sup> kas. De installaties betreffen: warmtepomp, aquifer, warmtewisselaars, ventilatoren, etc.

Hierbij is rekening gehouden dat extra elektriciteit wordt ingekocht voor de warmtepomp.

### 4.3.2 Onttrekken van warmte uit water

#### 4.3.2.1 Onttrekken van warmte via dekbevoeiing

Via bevoeiing van de buitenkant van het dek met koud water is warmte te verzamelen uit direct zonlicht en uit warme kaslucht dat het dek opwarmt. In een praktijkexperiment bij een potplantenbedrijf is becijferd dat ca. 300 MJ per m<sup>2</sup> per jaar aan warmte kan worden geoogst (zie 3.3.2.1). Dit is laagwaardige warmte, zodat een aquifer en warmtepomp nodig is om deze warmte te benutten voor verwarming. In een experiment met het KlimrekScherm is een waterbevoeide scherm in de kas gebruikt. Hierbij wordt een vergelijkbare warmteverzameling geschat als bij de dekbevoeiing.

De warmteoogst van 300 MJ per m<sup>2</sup> per jaar komt overeen met 9,5 m<sup>3</sup> a.e. In waarde uitgedrukt is dit 1,4 €/m<sup>2</sup> (à 0,15 €/m<sup>3</sup>).

De investeringsruimte bedraagt bij 10% jaarkosten van de installaties 13-15 €/m<sup>2</sup> kas. De installaties betreffen: warmtepomp, aquifer, (WKK), etc. Er wordt vanuit gegaan dat het bevoeien van het kasdek of het scherm niet of nauwelijks nadelig is voor de plantengroei en productie.

#### 4.3.2.2 Onttrekken van warmte uit oppervlaktewater

Warmte kan ook worden onttrokken uit het oppervlaktewater. Uit de technische verkenning volgt dat dit ongeveer 300 MJ per m<sup>2</sup> per jaar kan bedragen (zie 3.3.2.2).

Een warmteoogst van 300 MJ per m<sup>2</sup> per jaar betekent omgerekend 9.5 m<sup>3</sup> a.e. In waarde uitgedrukt is dit 1,4 €/m<sup>2</sup> (à 0,15 €/m<sup>3</sup>). De investeringsruimte bedraagt bij 10% jaarkosten van de installaties 14 €/m<sup>2</sup> kas. De installaties betreffen: een warmtepomp een warmtewisselaar en de installatiekosten. Er is geen invloed van deze optie op groei en productie van het gewas.

## 4.4 Samenvatting investeringsruimte verschillende technieken

In de hoofdstukken 3.1, 3.2 en 3.3 worden de technische mogelijkheden voor het benutten van zonne-energie in de glastuinbouw beschreven. Tevens worden de potentiële energetische bijdrages voor de glastuinbouwsector voor het benutten van zonnewarmte of conversie naar elektriciteit geschetst. Om het potentieel voor het benutten van zonne-energie in de glastuinbouw door een ondernemer te bepalen is naast een technisch-energetische inventarisatie een inschatting van de investeringsruimte gemaakt.

14 Zwart, H.F. de. 2010. De performance van de drie demokassen op het Innovatie en Democentrum. Rapport Wageningen UR Glastuinbouw GTB-1030.

Onderstaande tabel bevat een overzicht van de technieken en de potentiële investeringsruimte die met warmteoogst en/of elektriciteitsproductie uit zonne-energie kan worden behaald. Bij sommige technieken is de collector een onderdeel van een totaalconcept, zodat alleen de investeringsruimte per m<sup>2</sup> kas is weergegeven. In de investeringsruimte zijn ook de revenuen van bijkomende voordelen van de techniek meegenomen, zoals een extra energiebesparing, meerproductie en/of kwaliteitsverbetering.

	Potentiële investeringsruimte	
	(€/m <sup>2</sup> collector)	(€/m <sup>2</sup> kas)
	Warmte (W)/Elektra (E)	Warmte (W)/Elektra (E)
<b>Energie uit overtollige zonnestraling</b>		
<i>Warmte en elektriciteit buiten de kas</i>		
Warmte uit thermische collectoren	210-235 (W)	22 (W)
Elektriciteit uit PV zonnepanelen	115-125 (E)	12 (E)
Warmte en elektriciteit uit thermisch-PV collectoren	175-195 (W+E)	18,5 (W/E)
<i>Warmte en elektriciteit producerende kasdekken en schermen</i>		
PV cellen op kasinstallaties	95-105 (E)	5 (E)
Flexibele PV cellen op schaduwsschermen	Collector en scherm vormen één geheel	15 (E)
Flexibele PV cellen op verduisteringsschermen	Collector en scherm vormen één geheel	3 (E)
Lamellen voor lichtonderschepping zonne-energie (ZonWindKas)	Collector en kas vormen één geheel	97 (W) 162 (W+E)
Lenzen voor selectieve onderschepping zonne-energie (DaglichtKas)	Collector en kas vormen één geheel	159 (W) 179 (W+E)

**Energie uit ongebruikte golflengten zonnestraling**

Elkas	Collector en kas vormen één geheel	64 (W+E)
-------	------------------------------------	----------

**Energie uit overtollige warmte**

Onttrekken warmte uit lucht	.	40 - 50 (W)
Onttrekken warmte uit dekbevoeiing	.	13-15 (W)
Onttrekken warmte uit oppervlaktewater	.	14 (W)

De investeringsruimte per m<sup>2</sup> collectoroppervlak of per m<sup>2</sup> kasoppervlak geeft nog niet aan of de betreffende techniek om zonne-energie te benutten op termijn economisch interessant kan zijn. Hieronder is in globale zin aangegeven in welke mate de investeringsruimte verschilt van de prijzen in de markt. In onderstaande vergelijking is geen rekening gehouden met mogelijke stimuleringsmaatregelen, zoals investeringssubsidies.

De technieken om warmte en elektriciteit buiten de kas te verzamelen (zie 3.1.1) leiden tot een onvoldoende grote investeringsruimte om op korte en middellange termijn interessant te zijn. De globale investeringsbedragen voor warmtewinning uit thermische collectoren (zie 4.1.1.1) bedraagt 42 – 70 €/m<sup>2</sup> kas, afhankelijk van type collector (vlakke plaat of vacuumbuis) en schaalomvang. De berekende investeringsruimte (22 €/m<sup>2</sup> kas) is een factor 2-3,5 kleiner dan het geschatte investeringsbedrag.



Voor elektriciteitsproductie uit PV cellen (zie 4.1.1.2) is de globale investering bepaald op 55-75 €/m<sup>2</sup> kas, waarmee de investeringsruimte (12 €/m<sup>2</sup> kas) een factor 5-7 kleiner is dan het geraamde investeringsbedrag. Gelijktijdige warmte en elektriciteitsproductie met thermische-PV collectoren (zie 4.1.1.3) levert een globale investering op van 85-125 €/m<sup>2</sup> kas. Collectortype en schaalomvang bepalen mede de hoogte. De berekende investeringsruimte (18.5 €/m<sup>2</sup> kas) is een factor 5-7 kleiner dan het geraamde investeringsbedrag.

Ook al kan voor elektriciteitsproductie een vergoeding vanuit de SDE+ regeling worden verkregen, dan zal dit nu nog niet toereikend zijn. Verdere rendementsverbetering van PV panelen kunnen deze technieken mogelijk op langere termijn binnen bereik brengen.

Dit voorgaande geldt ook voor PV cellen op kasinstallaties (zie 3.1.2.2), ook al is er inmiddels een praktijkbedrijf met een dergelijke installatie. De globale investeringen voor PV cellen op kasdeinstallaties bedragen 30-40 €/m<sup>2</sup> kas, terwijl de investeringsruimte op 5 €/m<sup>2</sup> kas uit komt; een factor 6-8 kleiner.

Voor flexibele PV cellen op schaduw of verduisteringsschermen (3.1.2.3) lijkt het perspectief nog ver weg voor toepassing in de glastuinbouw. Hoewel geen goede informatie beschikbaar is over investeringsbedragen van flexibele PV-cellen op schermen is het zeer waarschijnlijk dat de investeringen veel groter zijn dan de berekende investeringsruimte van 15 respectievelijk 3 €/m<sup>2</sup> kas. Daarnaast is het toepassingsareaal beperkt.

Voor lichtonderschepping met lamellen t.b.v. warmteogst (ZonWindKas; zie 3.1.2.4 en 4.1.2.3) ligt de globale investering op 135-140 €/m<sup>2</sup> kas (Zwart, 2010<sup>15</sup>) en is daarmee een factor 1-2 groter dan de investeringsruimte (97 €/m<sup>2</sup> kas). Mogelijk ligt hier een perspectief op wat langere termijn. Nadeel van deze techniek is dat de opschaling beperkt van omvang zal zijn, omdat het alleen interessant is voor teelten die bij zeer weinig licht groeien. Daarnaast kan niet van de voordelen van het Nieuwe Telen potplanten worden geprofiteerd door de lage lichtintensiteit in de kas. Het toevoegen van PV cellen op de lamellen is weinig perspectiefvol, omdat de totale investeringen toenemen naar 530-690 €/m<sup>2</sup> kas, terwijl de investeringsruimte dan 162 €/m<sup>2</sup> kas bedraagt, een factor 3-5 kleiner.

De DaglichtKas (zie 3.1.2.5) biedt wat betere perspectieven voor schaduwminnende teelten dan de ZonWindKas. De investeringen bedragen globaal 200 €/m<sup>2</sup> kas (Sonneveld *et al.* 2009<sup>16</sup>) en liggen een factor 1-1,5 hoger dan de investeringsruimte voor de warmte en elektriciteitswinning (159-179 €/m<sup>2</sup> kas). De berekende investeringsruimte lijkt voldoende groot om toepassing op middellange termijn mogelijk te maken. Dit is vooral te danken aan bijkomende voordelen op het terrein van energiebesparing en productie en kwaliteitswinst.

De Elkas (zie 3.2en4.2) biedt nog niet direct perspectieven voor de middellange termijn. De globale investering bedraagt 150-175 €/m<sup>2</sup> kas (bewerkt naar Sonneveld *et al.* 2009<sup>1</sup>). De investeringsruimte (64 €/m<sup>2</sup> kas) is een factor 2-3 kleiner dan geraamde investering. Voordeel van het principe is echter dat het potentiële toepassingsareaal groot is.

Het onttrekken van warmte uit kaslucht (semi-gesloten kas; zie 3.3.1 en 4.3.1) heeft op dit moment al een perspectief. De globale investeringen (35-50 €/m<sup>2</sup> kas<sup>17</sup>) zijn van dezelfde orde van grootte als de investeringsruimte (40-50 €/m<sup>2</sup> kas). Vooral als de productie en kwaliteitswinst wordt behaald, is het perspectiefvol.

Het onttrekken van warmte via dekbevoeiing (zie 3.3.2 en 4.3.2) resulteert in een investering van globaal 12-17 €/m<sup>2</sup> kas. De investeringsruimte (13-15 €/m<sup>2</sup> kas) is bijna overeenkomstig het geraamde investeringsbedrag.

Warmteonttrekking uit oppervlaktewater (zie 3.3.3 en 4.3.3) is energetisch interessant en de investeringsruimte lijkt toereikend om het op korte termijn – met stimuleringsregelingen - interessant te laten zijn. De globale investering bedraagt 13-18 €/m<sup>2</sup> kas, terwijl de investeringsruimte bepaald is op ca. 14 €/m<sup>2</sup> kas. Indien de warmteonttrekking uit oppervlaktewater met energieopslag in een aquifer wordt gecombineerd, ligt het economisch perspectief verder weg. Voor deze aquifer gelden grote waterdebieten (zie 3.3.2.2) en dit betekent al gauw een extra investering van minimaal 12 €/m<sup>2</sup> kas.

15 Zwart, H.F., 2010. De performance van de drie demo-kassen op het IDC. Rapport Wageningen UR Glastuinbouw GTB-1030.

16 Sonneveld, P.J.; Swinkels, G.L.A.M.; Janssen, H.J.J.; Toenger, S.; Tuijl, B.A.J. van; Ruijs, M.N.A. (2009). Statusrapport Elkas en Fresnelkas. Rapport Wageningen UR Glastuinbouw 300.

17 Ruijs, M.N.A, Raaphorst, M.G.M, Dijkhoorn, Y. (2010). Meer mogelijkheden voor energiezuinige klimaatconditionering; Economische perspectieven. Rapport 2010-006, LEI Wageningen UR, Den Haag.



## 5 SWOT Analyse verschillende opties benutting zonne-energie

In hoofdstuk 3 worden de technische mogelijkheden voor het benutten van zonne-energie in de glastuinbouw beschreven. Tevens worden de potentiële energetische bijdragen voor de glastuinbouwsector voor het benutten van zonnewarmte of conversie naar elektriciteit geschat. In hoofdstuk 4 wordt vervolgens een inschatting van de investeringsruimte van de diverse opties gemaakt en aangegeven welke mogelijkheden voor de ondernemer op korte en welke op lange termijn rendabel kunnen zijn. Naast de op dit moment geldende technische, energetische en economische aspecten zijn verwachte ontwikkelingen relevant voor een inschatting van het toekomstige potentieel van zonne-energie in de glastuinbouw. Ook is het belangrijk om te weten welke opties voor bestaande kassen toepasbaar zijn en welke alleen bij nieuwbouw zinvol. Andere aspecten zoals specifieke voordelen voor een bepaalde teelt, sector of regio zullen in onderstaande SWOT analyse per optie voor het benutten van zonne-energie worden geïnventariseerd.

### Energie uit overtollige zonnestraling

Warmte uit thermische collectoren buiten de kas	
Bewezen, eenvoudige technologie Geen interactie met de teelt Toepasbaar naast bestaande kassen Voor alle bedrijfstypen toepasbaar	Levert alleen warmte Heeft een beperkte maximale bijdrage Ver van economisch haalbaar Geen extra voordelen voor de teelt Geen grote toename in rendementen te verwachten Lange-termijn opslag nodig
Integratiemogelijkheden met daken gebouwen Provincies zien mogelijkheden Geeft groen imago Schaalvergroting kan leiden tot kostenverlaging	Is minder kosteneffectief dan andere vormen van duurzame warmte, alleen haalbaar bij forse daling van kosten voor zonnepanelen

Elektriciteit uit standaard PV-panelen buiten de kas	
Bewezen, eenvoudige technologie Geen interactie met de teelt Toepasbaar naast bestaande kassen Voor alle bedrijfstypen toepasbaar Behoeft geen seizoensopslag	Heeft een beperkte maximale bijdrage Ver van economisch haalbaar Geen extra voordelen voor de teelt
Integratiemogelijkheden met daken gebouwen Geeft groen imago Verdere technische doorontwikkeling PV panelen en kostendaling verwacht	Snelle ontwikkeling leidt tot uitstelgedrag van investering

Warmte en elektriciteit uit PVT-panelen buiten de kas	
Geen interactie met de teelt Toepasbaar naast bestaande kassen Voor alle bedrijfstypen toepasbaar	Heeft een beperkte maximale bijdrage Ver van economisch haalbaar Geen extra voordelen voor de teelt
Integratiemogelijkheden met dakbedekking Geeft groen imago Langzame technische doorontwikkeling en kostendaling verwacht	Combinatie van warmte en elektriciteit geeft een slechter overall economische prestatie

Elektriciteit uit PV zonnecellen op kasinstallaties (roeden, nokken, zuidgevel etc.)	
Geen interactie met de teelt Invloed zijgevel op teelt minder bij toepassing in zuidgevel Voor alle bedrijfstypen toepasbaar	Moet geïntegreerd zijn met kasconstructie Alleen bij nieuwbouw toepasbaar Heeft ernstige problemen t.a.v. de economy of scale Heeft een zeer beperkte maximale bijdrage Ver van economisch haalbaar Veel bedrading voor weinig elektriciteit
Geeft groen imago Verdere technische doorontwikkeling PV panelen en kostendaling verwacht, nieuwe types PV cellen	Massaproductie van standaard-panelen geeft verslechtering van perspectief van specificaties.

Elektriciteit uit PV zonnecellen op het kasdek (vaste schaduwfractie)	
Eenvoudige technologie Toepasbaar in bestaande kassen Beperkt toepasbaar voor schaduwminnende teelten	Alleen betaalbaar onder zeer gunstige fiscale omstandigheden Jaarrond productieverlies bij lichtminnende teelten Productieverlies schaduwminnende teelten op stralingsarme momenten Geringe elektriciteitsproductie
Integratie kasdek mogelijk in nieuwbouw Geeft groen imago Enige technische doorontwikkeling PV panelen en kostendaling verwacht	Fiscale voordelen kunnen gemakkelijk wijzigen

Elektriciteit uit flexibele PV zonnecellen op schermen	
Multifunctioneel gebruik van schermen Toepasbaar in bestaande kassen bij vervanging schermstelsel	Alleen toepasbaar in schaduwminnende teelten Het toe te passen PV-materiaal heeft per definitie weinig gebruiksuren Flexibele bedrading maakt installatie omslachtig Geringe tot zeer geringe elektriciteitsproductie Flexibel PV-materiaal heeft lage omzettings-efficiëntie Kosteneffectiviteit ver weg
Geeft groen imago Hoge technische doorontwikkeling PV cellen verwacht, nieuwe technische mogelijkheden	Er zijn nog geen ervaringen met de benodigde materialen De tendens is dat er steeds minder beschaduwd wordt.

Elektriciteit en/of warmte uit kas met lamellen (ZonWindKas)	
Snelle regelbaarheid van de schaduwfractie Op stralingsrijke momenten extra voordelen teelt Warmteverzameling op hoge temperatuur mogelijk Combinatie met PV mogelijk	Alleen bij nieuwbouw toepasbaar Alleen toepasbaar in schaduwminnende teelten Lage lichttransmissie in de winter Complexe constructie Veel bedrading noodzakelijk (bij toevoeging van PV aan het concept) Kosteneffectiviteit lijkt ver weg
Geeft groen imago	De tendens is dat er steeds minder beschaduwd wordt.

Elektriciteit en/of warmte uit kas met lenzen en PVT collectoren (DaglichtKas)	
<p>Zeer snelle regelbaarheid van de schaduwfractie en weghalen pieklasten            Warmteverzameling op hoge temperatuur mogelijk            Combinatie met PV mogelijk            Leidt tot zeer groeizaam teeltklimaat door regeling en diffuus licht            Leidt tevens tot verlaging warmtevraag</p>	<p>Alleen bij nieuwbouw toepasbaar            Vereist seizoensopslag in aquifers            Alleen toepasbaar in schaduwminnende teelten            Toevoeging van PV ligt economisch lastig</p>
<p>Geeft groen imago            Hoge technische doorontwikkeling en kostendaling PV modules mogelijk</p>	<p>De tendens is dat er steeds minder beschaduwd wordt.</p>

### Energie uit ongebruikte golflengten zonnestraling

Elektriciteit en/of warmte uit niet gebruikte golflengten (Elkas)	
<p>Leverd warmte en elektriciteit            Voor alle bedrijfstypen toepasbaar            Geeft mogelijk verbetering van zomerklimaat voor teelt</p>	<p>Alleen bij nieuwbouw toepasbaar            Vereist seizoensopslag in aquifers            Onderhoudsintensief (schoonmaken)            Kosteneffectiviteit lijkt ver weg</p>
<p>Geeft groen imago            Hoge technische doorontwikkeling en kostendaling PV modules mogelijk            Verdere technische verbetering NIR folie mogelijk</p>	<p>Principe heeft zich nog niet in de praktijk bewezen            Productiederving bij minder-optimale spectrale eigenschappen van de reflectoren</p>

### Energie uit overtollig warmte

Onttrekken warmte uit kaslucht (semi-gesloten kassen)	
<p>Bewezen technologie            Voor alle bedrijfstypen toepasbaar            Geeft verbetering stuurbaarheid kasklimaat en daarmee teeltvoordelen            Hogere CO<sub>2</sub> concentratie, minder CO<sub>2</sub> emissies            50% duurzame warmte mogelijk            Economisch rond break-even</p>	<p>Leverd alleen duurzame warmte            Geeft verschuiving van warmtevraag naar kracht-vraag            Vereist seizoensopslag in aquifers</p>
<p>Geeft groen imago            Techniek kan nog verder worden ontwikkeld</p>	<p>Staat in concurrentie met andere vormen van laagwaardig warmtegebruik</p>

Onttrekken warmte uit dekbevoeiing	
<p>Bewezen technologie            Toepasbaar in bestaande kassen            Voor alle bedrijfstypen toepasbaar            Geeft enige verbetering van zomerklimaat en daarmee kleine teeltvoordelen</p>	<p>Leverd een niet al te grote hoeveelheid duurzame warmte            Vereist seizoensopslag in aquifers            Vorstbeveiliging is een issue            Geen verdere doorontwikkeling techniek verwacht</p>
<p>Geeft groen imago</p>	<p>Heeft de afgelopen jaren nauwelijks aandacht gehad</p>

Onttrekken warmte uit oppervlaktewater	
Eenvoudige technologie Toepasbaar in bestaande kassen Geen interactie met de teelt Geeft gemakkelijk 50% duurzame warmte Is bijna kosteneffectief Goed toepasbaar in Westland/Oostland	Locatie-afhankelijk Alleen duurzame warmte Geen extra voordelen voor de teelt
Kan een voordeel opleveren voor oppervlaktewaterkwaliteit Geeft groen imago	Bij massale interesse mogelijk kan schaarste ontstaan (afhankelijk van lokale omstandigheden)

## 6 Toekomstige opties voor benutting zonne-energie op glastuinbouwbedrijven

### 6.1 CASUS a: Bedrijf met warmteonttrekking aan oppervlaktewater

Onderstaand bedrijf is een groentebedrijf met een kasoppervlak van 2.5 ha dat direct naast een grote vaart ligt.

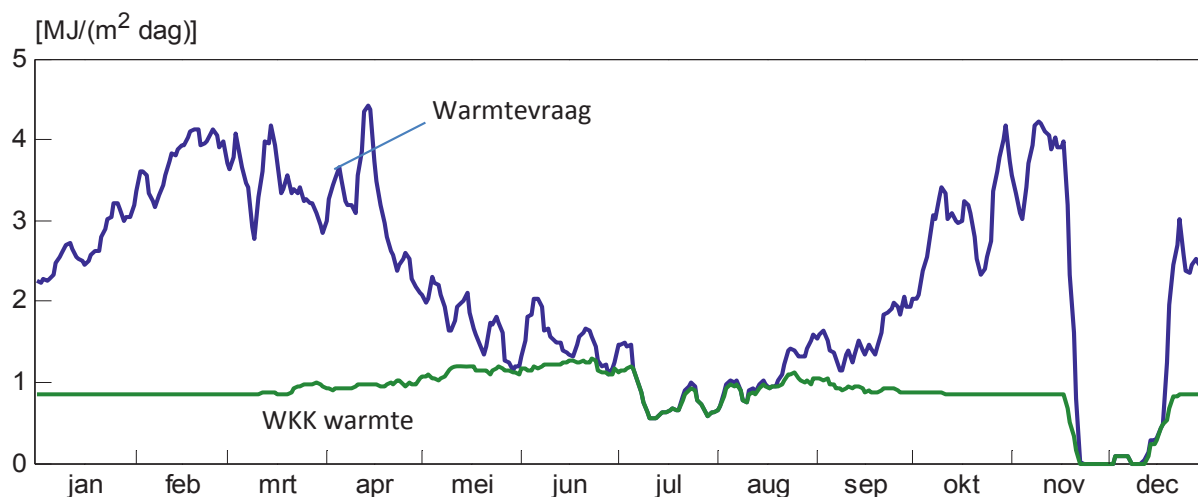


*Figuur 22. Bedrijfslayout van een groenten kas naast een grote vaart.*

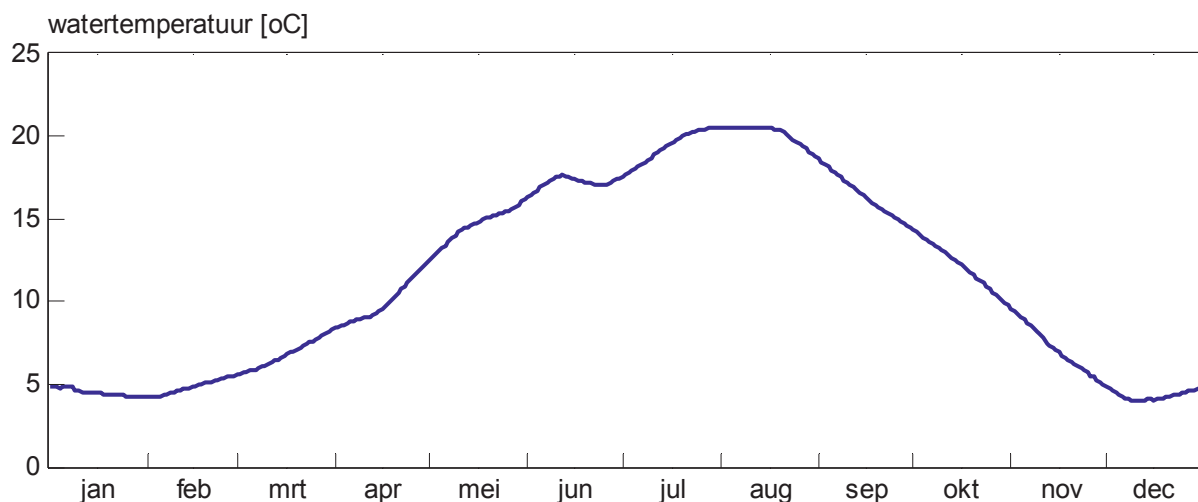
Dit bedrijf heeft een vergunning gekregen om water uit dit kanaal te gebruiken als warmtebron voor de verwarming van zijn kas. De betreffende tuinder maakt gebruik van de verworvenheden van het nieuwe telen, waaronder het gebruik van een vast foliescherm aan het begin van de teelt. Het maakt ook gebruik van buitenluchtaanzuiging waardoor het bedrijf bij hoge luchtvochtigheden kan telen. In de zomer wordt er verneveld om met een klein ventilatiedebiet te kunnen koelen en op die manier met een geringe hoeveelheid CO<sub>2</sub> toch een redelijk hoge CO<sub>2</sub> concentratie te kunnen aanhouden.

Het bedrijf wordt in eerste instantie verwarmd met de restwarmte vanuit de WKK. Die draait in principe altijd overdag voor de CO<sub>2</sub>-productie. In de zomer betekent dit 14 tot 16 draaiuren per dag. In de winter zijn de dagen veel korter en heeft de kas dus weinig CO<sub>2</sub> nodig, maar ook dan wordt de WKK nog 12 uur per dag aangezet, vooral vanwege de verkoopwaarde van elektriciteit overdag en het feit dat de warmte goed gebruikt kan worden. Tijdens de teeltwisseling staat de WKK stil. Onderstaande figuur toont de warmtevraag van de kas en de warmteproductie van de WKK.

Op bijna alle dagen is de dagelijkse warmtevraag groter dan de warmteproductie van de WKK. Dat is niet verwonderlijk aangezien de kleine WKK slechts 0.3 m<sup>3</sup> aardgas equivalenten aan warmte per m<sup>2</sup> per week oplevert. Alleen in juli en augustus dreigt de warmteproductie de warmtevraag te overschrijden zodat op die dagen de WKK minder uren gaat draaien. Dit levert uiteraard een verlaging van de CO<sub>2</sub>-dosering op, maar omdat in die periode van het jaar de productprijzen laag zijn wordt dit geaccepteerd. De resterende warmtevraag wordt op dit bedrijf zoveel mogelijk ingevuld met behulp van een warmtepomp. De verdamperszijde van de warmtepomp wordt verwarmd met energie die aan het voorbij stromende kanaalwater wordt onttrokken. Dit water heeft een temperatuurverloop zoals getoond in onderstaande grafiek.



Figuur 23. Warmtevraag van de kas (blauwe lijn) en de warmteproductie van de WKK (groene lijn) tijdens het jaar.

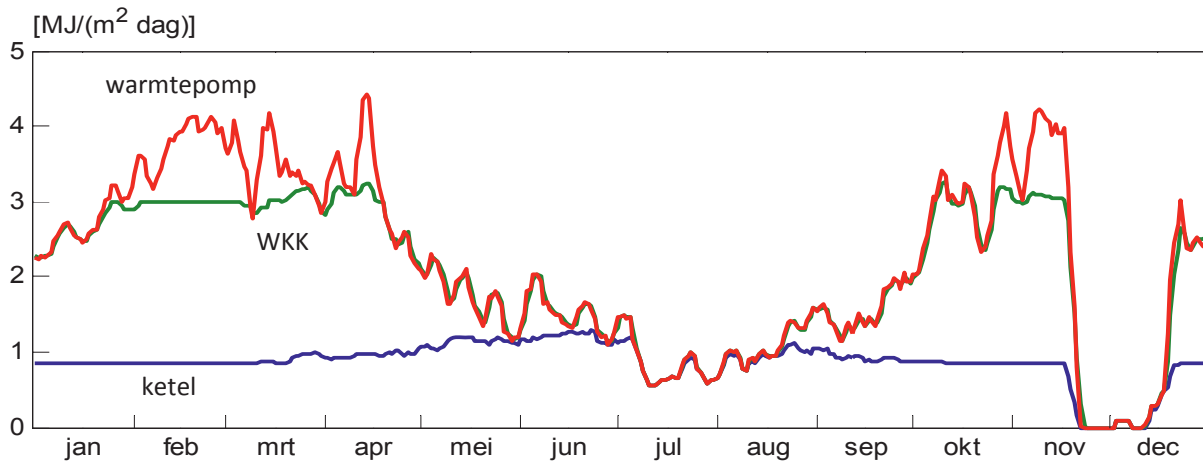


Figuur 24. Temperatuurverloop van het kanaalwater tijdens het jaar.

De figuur laat zien dat het temperatuurprofiel niet direct gunstig is voor de energielevering aan de warmtepomp omdat in de periode waarin de meeste warmte nodig is de watertemperatuur nu net het laagste is. Er zijn twee oplossingen voor dit gegeven.

De eerste mogelijkheid is deze situatie te accepteren en een installatie te bouwen waarin een groot waterdebiet wordt gecirculeerd en de warmtepomp met een zeer lage verdampertemperatuur werkt. Dit kan bijvoorbeeld door het kanaalwater in principe met 5 °C af te koelen, maar van eind november tot half februari met slechts 4 of 3 °C af te koelen om de uitstromende watertemperatuur boven het vriespunt te houden. Het maximale waterdebiet dat aan het kanaal onttrokken wordt, en een eindje stroomafwaarts weer in het kanaal wordt ingelaten is in dit geval 120 m<sup>3</sup> per uur. Debieten boven de 100 m<sup>3</sup>/uur komen overigens is deze situatie slechts 20 dagen per jaar voor. Ongeveer 100 dagen per jaar ligt het debiet rond de 80 m<sup>3</sup>/uur en de rest van het jaar is het debiet nog weer een stuk kleiner. Dergelijke waterhoeveelheden kunnen met lage drukverliezen door pijpen met een diameter van 20 cm worden getransporteerd. Aangezien vaarten met een afmeting zoals bij dit bedrijf (14 meter breed) al gauw veel meer water verplaatsen dan de bovengenoemde debieten wordt de inlaatzijde van de installatie niet beïnvloed door het water dat stroomafwaarts weer wordt ingelaten. Eventuele benedenstroomse tuinbouwbedrijven die op soortgelijke wijze warmte zouden willen onttrekken zouden echter wel gehinderd kunnen worden door stroomopwaartse activiteiten. Een bedrijf dat volgens deze benadering werkt gebruikt een warmtepomp met een elektrisch vermogen van 80 kW per hectare. Onderstaande grafiek toont de bijdrage van de verschillende warmtebronnen.





Figuur 25. Warmteproductie door WKK (groene lijn), warmtepomp (rode lijn) en ketel (blauwe lijn) over het jaar.

De warmtepomp levert de grootste hoeveelheid warmte, namelijk 414 van 795 MJ. Dat is 52%. De lage verdampertemperatuur die in de koudste maanden van het jaar nodig is om nog energie aan het water te kunnen onttrekken maakt dat de COP van de warmtepomp vaak rond de 3 ligt. Dit betekent dat het **aandeel duurzame energie** in de totale verwarming (de warmte die aan de watergang wordt onttrokken) uitkomt op 288 MJ/(m² jaar). Dit is **36% van de totale warmtevraag**. Het elektriciteitsverbruik bedraagt 35 kWh, wat aanzienlijk lager is dan de jaarlijkse elektriciteitsproductie van de WKK, die 66 kWh per m² per jaar voortbrengt. Het tuinbouwbedrijf blijft dus een **netto elektriciteitsproducent**. Het bedrijf gebruikt op jaarbasis 18 m³ aardgas per m² voor de WKK en 2 m³ voor de ketel. Deze ketel wordt vooral gebruikt in de periode met lage watertemperaturen in de watergang.

Een *tweede oplossing* voor het feit dat het onttrekken van warmte uit het kanaalwater in de winter moeizaam is om ook in deze toepassing van duurzame energie gebruik te maken van een aquifer. Wanneer de aquifer wordt geladen in juli en augustus dan kan een dergelijke aquifer op 15 °C gebracht worden. Gegeven dat er energie op dit temperatuurniveau beschikbaar is, wat gaandeweg de winter langzaam richting 11 °C zal zakken, maar lang niet zo koud zal worden als het winterse kanaalwater, hoeft in deze situatie de verdampertemperatuur niet kouder dan 7 °C te zijn, waardoor de COP oploopt naar 3.6. Door de hogere COP neemt de dekkingsgraad van de warmtepomp toe, het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp iets af en het gasverbruik van de ketel ook. Met aquifer zal het bedrijf nog een halve m³ aardgas minder met de ketel verstoffen en een kWh minder elektriciteit verbruiken en 310 MJ/(m² jaar) aan het kanaalwater onttrekken.

Dit is 39% van de totale warmtevraag. De regeneratie van de aquifer vindt plaats in juli en augustus. Hiervoor zijn dus ongeveer 65 dagen beschikbaar en daarmee 1560 uren. Uitgaande van een bedrijf van 2.5 ha en een regeneratiebehoefte van  $310 \cdot 25000 = 7.75$  mln. MJ en uitgaande van 8 graden afkoeling van het kanaalwater (19 °C kanaalwater inlaten en dit via een koude bron van 9 °C uitkoelen naar 11 °C) betekent dit een benodigd pompdebiet van  $7.75 \text{ mln.} / 4.18 / 8 / 1560 = 150 \text{ m}^3/\text{uur}$ .

Dit is een realistisch debiet voor één bronnenpaar en ook de het onttrekken en weer inlaten van een dergelijke hoeveelheid water in een kanaal is goed denkbaar. Een mogelijk groot voordeel van deze benadering is dat op deze manier kanalen in de zomer koeler blijven waardoor algenbloei zal worden geremd. Een mogelijk voordeel voor waterschappen. De impact van de onttrekking van warmte vanuit kanalen door tuinders hangt daarbij helemaal af van de verhouding van de genoemde 150 m³ per uur ten opzichte van de doorstromingsnelheid in het kanaal. Naar verwachting zijn de potenties aan zee of grote kanalen en tochten het grootst.

De investeringen voor deze techniek bedragen:

Een WKK van 180 kW/ha → € 9 per m² (incl. RGR. 11 €/m²)

Een Warmtepomp 80 kW<sub>elektrisch</sub>/ha → € 4 per m²

Een inlaat en uitlaat-combinatie, geschat op 1 tot 1.5 € per m².

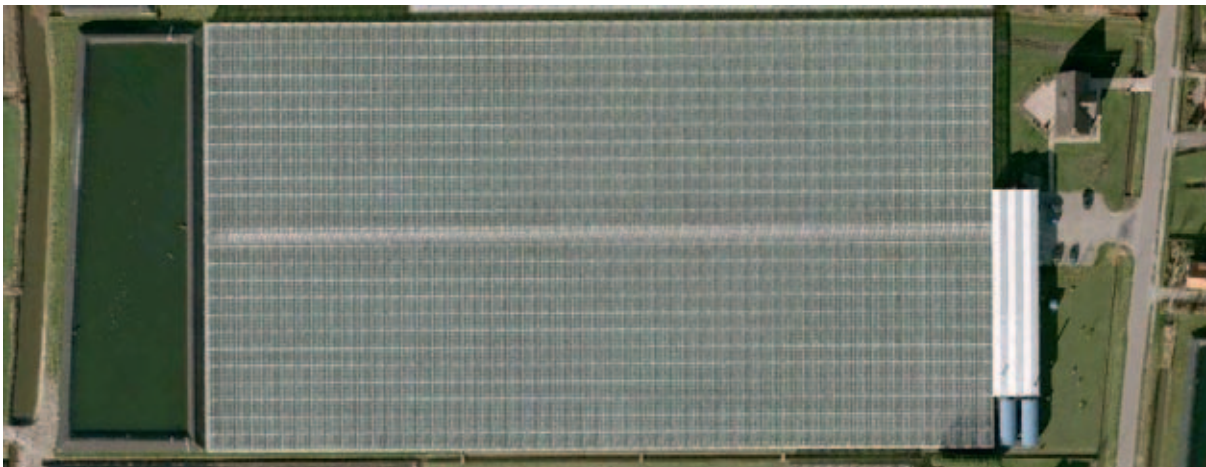
Als er gebruik wordt gemaakt van een aquifer dan heeft die een capaciteit van 60 m<sup>3</sup>/(ha uur). Deze kost dan € 15 per m<sup>2</sup>. Gegeven het geringe extra energiebesparingseffect van de toevoeging van een aquifer kan deze meer-investering niet op grond van energiekostenbesparingen worden verantwoord. Alleen eventuele belangen van de waterbeheerder (koeler water in het kanaal in de zomer en minder koud water in de winter) zouden kunnen pleiten voor de toevoeging van een dergelijk warmte-opslag systeem.

Voor onvoorziene zaken wordt weer 5% gerekend. De investering in de bedrijfsinstallatie bedraagt in totaal ca. 17 €/m<sup>2</sup> kas met jaarlijkse kosten van 1,70 €/m<sup>2</sup>.

De energiekosten bedragen ca. 6 €/m<sup>2</sup> voor het gasverbruik (20 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) en ca. 2,65 €/m<sup>2</sup> voor elektraverbruik (35 kWh/m<sup>2</sup>); in totaal 8,65 €/m<sup>2</sup>. De opbrengsten uit elektriciteitsverkoop zijn ca. 5,30 €/m<sup>2</sup> (bij 66 kWh/m<sup>2</sup>).

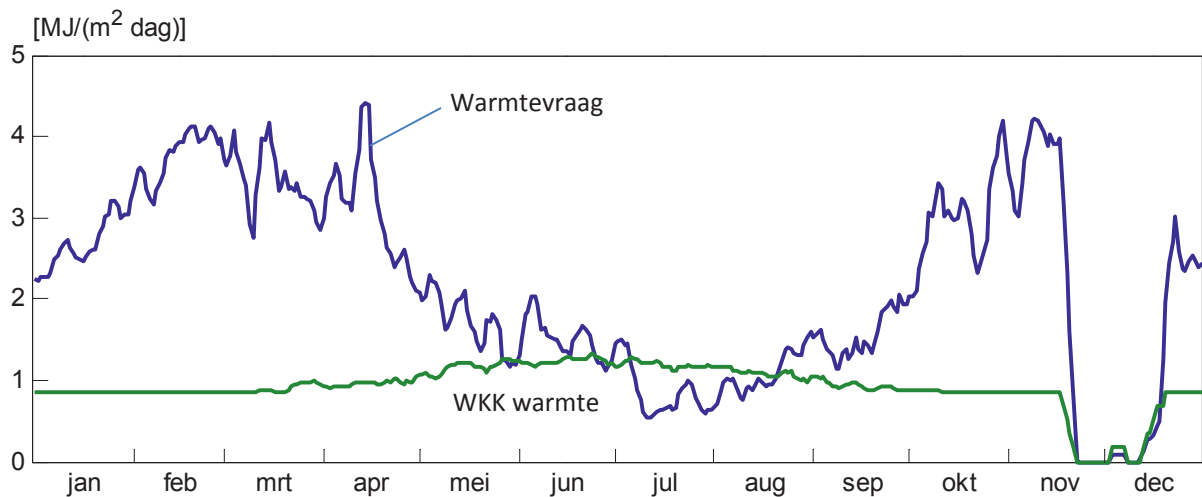
## 6.2 CASUS b: Bedrijf met thermische collectoren buiten de kas

Onderstaand bedrijf is een groentebedrijf met een kasoppervlak van 2.5 ha met een heel groot regenwaterbassin aan de achterzijde van het bedrijf. Het regenwaterbassin beslaat een oppervlak van 3000 m<sup>2</sup>.



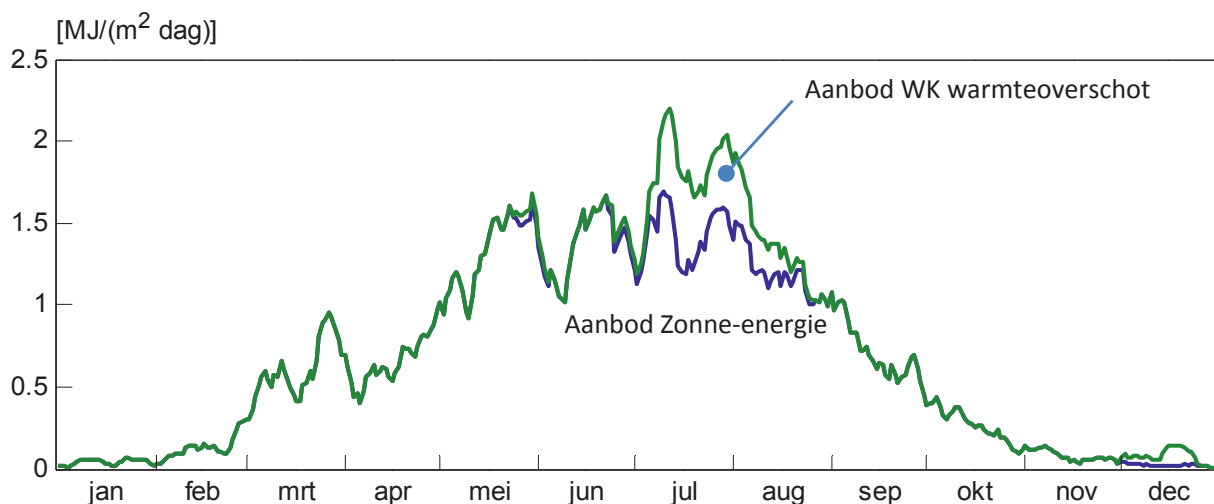
*Figuur 26. Bedrijfslayout van een groenten kas met bedrijfsgebouw en waterbassin.*

Dit bedrijf kan op een gemakkelijke manier veel zone-energie verzamelen door het regenwaterbassin te beleggen met drijvende thermische zonnecollectoren. Zodra de zon schijnt wordt koud water (15 °C) door de collectoren gepompt waardoor het water wordt opgewarmd naar een temperatuur van 50 °C. Op de warmste dagen verzamelen de zonnecollectoren op deze manier ongeveer 60 GJ per dag, waardoor er 410 m<sup>3</sup> water wordt opgewarmd. De verzamelde energie kan met een pompcapaciteit van 20 m<sup>3</sup>/uur, in combinatie met een etmaalbuffer van 150 m<sup>3</sup> in een aquifer worden opgeslagen. Voor het infiltreren van water op een dergelijke hoge temperatuur heeft het bedrijf een vergunning van de Provincie Zuid-Holland gekregen. Deze vergunning geeft tevens aan dat het aquiferdoublet thermisch niet in balans hoeft te blijven. Op jaarbasis wordt er op deze manier 6000 GJ aan thermische zonne-energie opgeslagen, wat overeenkomt met 240 MJ per m<sup>2</sup>. Bovenop deze 240 MJ zonne-energie wordt er in dezelfde aquifer ook 20 MJ afvalwarmte uit de WKK van het bedrijf opgeslagen. Deze kleine WKK (450 kW, wat voor dit bedrijf neerkomt op 180 kW/ha) levert in de zomer 80 kg CO<sub>2</sub> per ha per uur, en dat is een goed passende hoeveelheid die nodig is om de CO<sub>2</sub>-concentratie iets boven de buitenluchtconcentratie te houden. Het bedrijf wordt in eerste instantie verwarmd met de restwarmte vanuit de WKK. Die draait in principe altijd overdag voor de CO<sub>2</sub>-productie. In de zomer betekent dit 14 tot 16 draaiuren per dag. In de winter zijn de dagen veel korter en heeft de kas dus weinig CO<sub>2</sub> nodig, maar ook dan wordt de WKK nog 12 uur per dag aangezet, vooral vanwege de verkoopwaarde van elektriciteit overdag en het feit dat de warmte goed gebruikt kan worden. Tijdens de teeltwisseling staat de WKK stil. Onderstaande figuur toont de warmtevraag van de kas en de warmteproductie van de WKK.



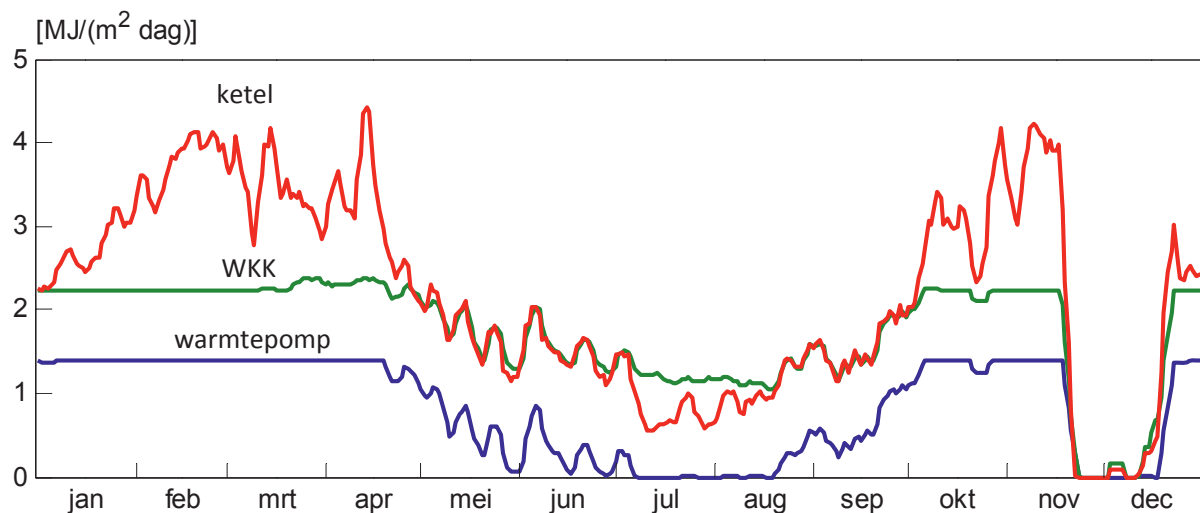
Figuur 27. Warmtevraag van de kas (blauwe lijn) en de warmteproductie van de WKK (groene lijn) tijdens het jaar.

Op bijna alle dagen is de dagelijkse warmtevraag groter dan de warmteproductie van de WKK. Dat is niet verwonderlijk aangezien de kleine WKK slechts  $0.3 \text{ m}^3$  aardgas equivalenten aan warmte per  $\text{m}^2$  per week oplevert. Alleen in juli en augustus is de warmteproductie wat meer dan de warmtevraag zodat op die dagen de WKK-warmte samen met de warmte uit de zonnecollector in de aquifer moet worden opgeslagen. Onderstaande figuur toont de cumulatie van zonnearmte en overtollige WKK-warmte als energiestroom van de koude naar de warme bron van het aquiferdoublet.



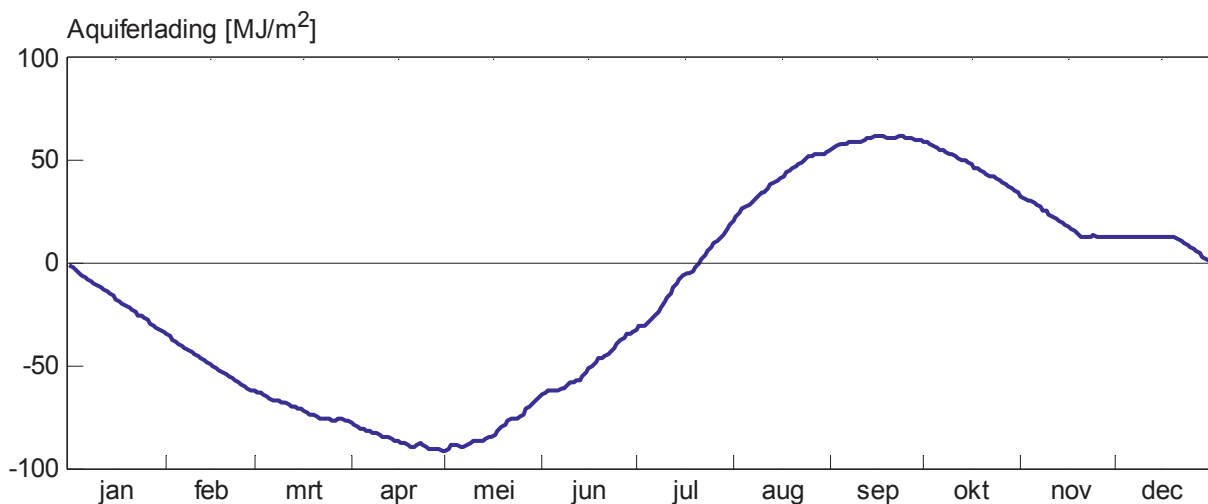
Figuur 28. Verloop van het energie-aanbod uit de zonnecollector (blauwe lijn), aangevuld met warmteoverschot uit de WKK (groene lijn) over het jaar.

Het overgrote deel van het zomerse energie-aanbod vanuit de zonnecollector kan niet op dezelfde dag worden gebruikt en wordt in de aquifer opgeslagen. In de koudere periode van het jaar wordt dit warme water weer opgepompt en met behulp van een warmtepomp afgekoeld naar  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Hiervoor wordt een warmtepomp gebruikt met een thermisch vermogen van maximaal  $160 \text{ kW}$  per ha ( $400 \text{ kW}$  voor dit bedrijf) die water van  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  maakt wat gebruikt kan worden voor de verwarming van de kas. Op heel koude dagen is een watertemperatuur van  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  te laag voor de kasverwarming, maar omdat de vermogensvraag dan veel groter is dan die  $150 \text{ kW}$  van de warmtepomp kan de extra watertemperatuur worden verkregen door naschakeling van de WKK en/of de ketel. Onderstaande figuur toont de inzet van de warmtepomp, de WKK en de ketel voor de invulling van de totale warmtevraag.



Figuur 29. Warmteproductie door warmtepomp (blauwe lijn), WKK (groene lijn) en ketel (rode lijn) over het jaar (voortschrijdend gemiddelde).

Op jaarbasis is de warmtevraag van het bedrijf 795 MJ/m<sup>2</sup> (25 m<sup>3</sup> aardgas equivalenten). 299 MJ daarvan, dat is 38%, wordt ingevuld door de warmtepomp. Een iets groter deel (316 MJ) wordt ingevuld door de WKK en het restant (180 MJ, 23%) komt voor rekening van de ketel. De combinatie van warmtegebruik aan de verdamperzijde van de warmtepomp en warmteproductie vanuit de zonnecollector (en het warmteoverschot uit de WKK) levert een netto lading en ontlading van de aquifer. Onderstaande figuur toont het verloop van de aquiferlading in de tijd. In deze lijn is een constante energielek van 2.25 GJ per dag in rekening gebracht (dat is 0.09 MJ/(m<sup>2</sup> dag) om rekening te houden met het feit dat een energieopslagsysteem waarbij beide bronnen een temperatuur boven omgevingstemperatuur hebben altijd energie zal verliezen. De jaarsom aan warmte die aan het opslagsysteem wordt onttrokken is daarmee 1.3% kleiner dan de hoeveelheid die nodig is om het systeem weer te regenereren. Dit kleine verlies zal pas na verloop van een aantal jaren gerealiseerd worden en wanneer het totale verlies over de aanloopjaren wordt meegenomen is het feitelijke verlies dus groter.



Figuur 30. Netto Aquiferlading door energieonttrekking in de winter en regeneratie in de zomer.

De warmtepomp gebruikt 21 kWh elektriciteit per jaar. De WKK produceert echter 71 kWh elektriciteit per m<sup>2</sup> per jaar. Het bovenbeschreven tuinbouwsysteem is dus ondanks het gebruik van een warmtepomp nog steeds ruimschoots een **netto elektriciteitsproducent**. Het gasverbruik van het bedrijf bedraagt 19.5 m<sup>3</sup> aardgas voor de WKK en 5.5 m<sup>3</sup> aardgas voor de ketel tijdens de piek-warmtevraag. Van de totale **warmtevraag** van het bedrijf (795 MJ/m<sup>2</sup>) wordt **28% ingevuld door zonne-energie**.

De specifieke bedrijfsinstallatie bestaat uit:

Een WKK van 180 kW/ha → € 9 per m<sup>2</sup> (incl. RGR → € 11 per m<sup>2</sup>)

Een Warmtepomp 160 kWth/ha → € 2 per m<sup>2</sup>

0.12 m<sup>2</sup> zonnecollector per m<sup>2</sup> kas → € 36 per m<sup>2</sup>

Een aquifer met een debiet van 8 m<sup>3</sup>/(ha uur) → 2.50 per m<sup>2</sup>.

Voor onvoorziene zaken wordt 5% van de investering gerekend.

De investering in de bedrijfsinstallatie bedraagt in totaal ca. 54 €/m<sup>2</sup> kas met jaarlijkse kosten van 5,4 €/m<sup>2</sup>.

De energiekosten bedragen ca. 7,50 €/m<sup>2</sup> voor het gasverbruik (25 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) en ca. 1,60 €/m<sup>2</sup> voor elektraverbruik (21 kWh/m<sup>2</sup>); in totaal 9,10 €/m<sup>2</sup>. De opbrengsten uit elektriciteitsverkoop zijn ca. 5,70 €/m<sup>2</sup> (bij 71 kWh/m<sup>2</sup>). In dit geval zijn de korte termijn energieprijzen gehanteerd.

Als uitgangspunt van deze berekening zijn de prijzen van thermische collectoren voor huishoudens genomen. Hier is verdere verbetering en opschaling mogelijk. Ontwikkelingen door de industrie voor tuinbouwapplicaties zijn gewenst, waardoor deze case in de toekomst nog aantrekkelijker wordt.

### 6.3 CASUS c: Bedrijf met een semi-gesloten kas

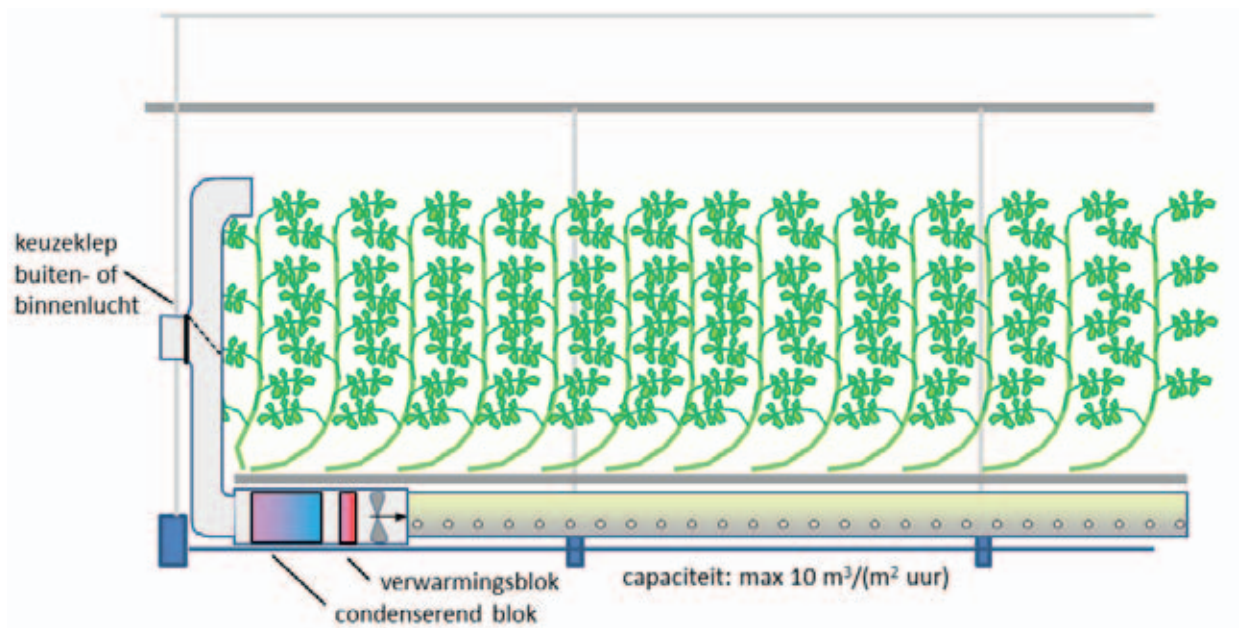
De semigesloten kas die in deze case beschreven wordt is gebaseerd op de ideeën voor de Next Generation semigesloten kas. Uitgangspunt hierbij is een tuinbouwbedrijf met een goed geïsoleerde kas op basis van twee schermen (waarvan tenminste één beweegbaar), buitenluchtaanzuiging met bijmenging van binnenlucht en een WK-installatie van 150 kWe per ha.

Het verwarmingsvermogen van een dergelijke WKK is weliswaar genoeg voor de zomer en de randen van de zomer, maar is duidelijk te klein voor de winter. In de winter is er dan ook een prominente rol weggelegd voor de warmtepomp.

Het grote verschil tussen de Next Generation semigesloten kas en de standaard semigesloten kas is nu dat bij de Next Generation semigesloten kas een belangrijk deel van de laagwaardige warmte voor de warmtepomp uit latente warmte die bij mechanische ontvochtiging vrijkomt wordt gehaald. In feite grijpt de Next Generation semigesloten kas daarmee terug op de eerste ontwerpen van gesloten kassen waar de kas in de winter zoveel mogelijk dicht werd gehouden.

Doordat de Next Generation Semigesloten Kas niet zozeer mikt op het sluiten van de kas in de zomer, maar juist in de winter gesloten blijft, neemt de warmtevraag van de kas af en is de uitkoeling van de aquifer in de winter gering. Dit heeft weer tot gevolg dat er in de zomer minder warmte hoeft te worden verzameld om het warmte/koude opslagsysteem aan te vullen en dat leidt tot een verkleining van de benodigde capaciteit. Die aquifer capaciteit is de duurste component van de semigesloten kas dus de besparing die op dit punt kan worden gemaakt telt zwaar door in het economische plaatje.

Het kernpunt van de Next Generation semigesloten kas is de mechanische ontvochtiging. Dit betekent dat luchtbehandelingskasten, zoals die nu ook gebruikt worden voor buitenluchtaanzuiging, voorzien moeten worden van twee in plaats van één warmtewisselaar-blok en dat deze luchtbehandelingskasten moeten kunnen kiezen uit het rondblazen van binnenlucht of het inblazen van buitenlucht. Daarnaast moet de luchtcirculatie capaciteit van de luchtbehandelingskasten wat hoger zijn dan gebruikelijk bij buitenlucht aanzuigsystemen, namelijk 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> uur). Dit is echter nog steeds drie tot vier keer zo laag als de circulatiecapaciteiten in de eerste gesloten kas experimenten werden gebruikt dus de toe te passen slangdiameters blijven beperkt tot ongeveer 40 cm. Onderstaande figuur geeft een schematische weergave van het centrale onderdeel van de Next Generation semigesloten kas en dat is de luchtbehandelingskast met een dubbel blok voor de mechanische ontvochtiging.

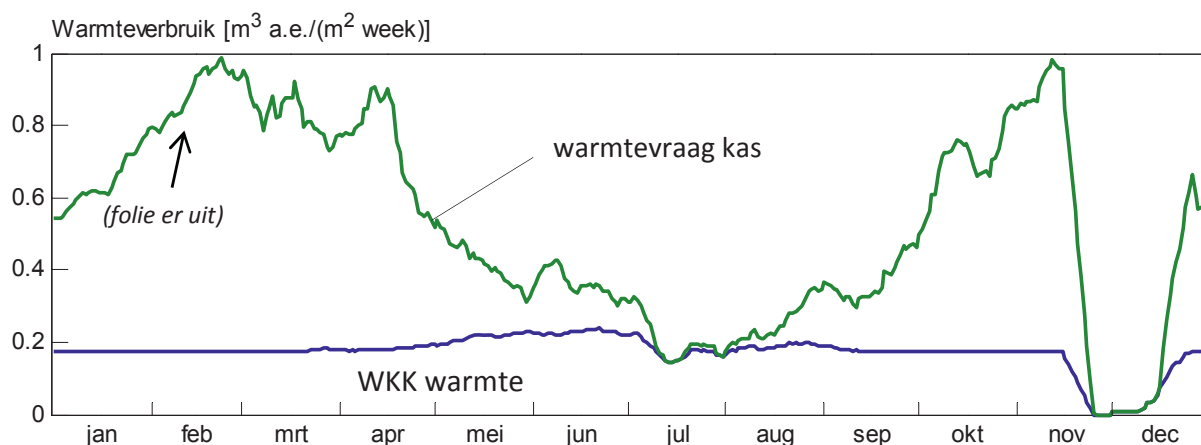


Figuur 31. Layout van een kas volgens het Next Generation Semigesloten Kas principe.

De energiebesparing in de Next Generation Semigesloten Kas wordt behaald langs twee wegen:

1. Vermindering van de stookbehoefte
2. Verlaging van het gas- en/of het elektriciteitsverbruik voor de verwarming.

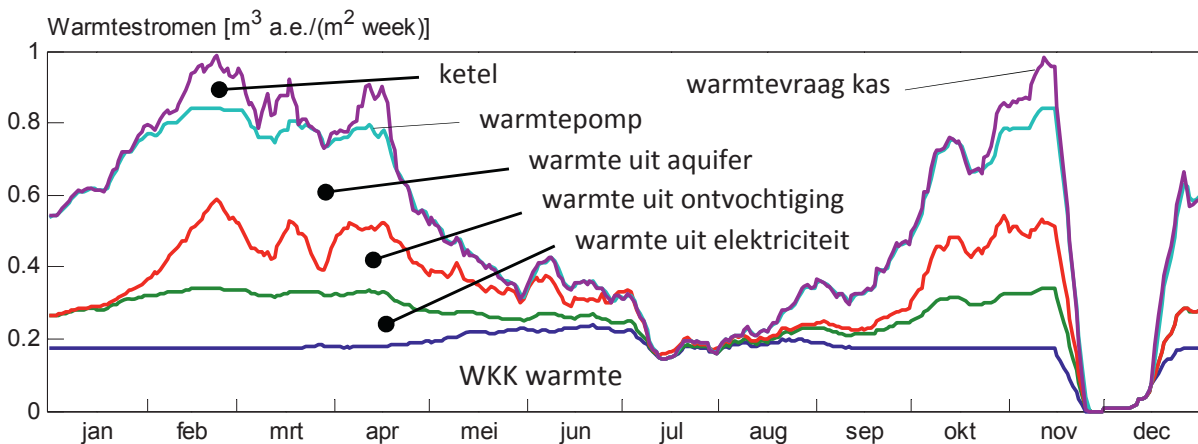
In de verschillende stappen van Het Nieuwe Telen wordt er van alles gedaan aan de verlaging van de stookbehoefte. De stappen 1 t/m 5 hebben ervoor gezorgd dat de verwarmingsbehoefte voor een tomatenteelt is teruggebracht naar 27 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> per jaar (850 MJ). Uiteraard zijn er maatregelen denkbaar om dit nog verder terug te brengen (bijvoorbeeld de toepassing van dubbel, gecoat glas). Een ander uitgangspunt is het gebruik van een kleine WKK-installatie van 150 kW/ha. Een dergelijke installatie levert 70 kg CO<sub>2</sub> per ha per uur en dit is een mooie basis CO<sub>2</sub>-dosering en een mooie basis elektriciteitslevering. Onderstaande grafiek laat het jaarverloop zien van de warmtevraag van de kas en het aandeel van die warmtevraag die met een dergelijke kleine WKK kan worden ingevuld. De WKK wordt daarbij alleen tijdens de plateau-uren ingezet en in de weekenden alleen op basis van CO<sub>2</sub>-behoefte.



Figuur 32. Jaarverloop van de warmtevraag (groene lijn) van de kas en het aandeel van een kleine WKK (blauwe lijn).

Het gasverbruik van de WKK die op deze manier wordt ingezet bedraagt 16 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> jaar en de elektriciteitsproductie bedraagt 60 kWh/(m<sup>2</sup> jaar). De grafiek laat zien dat er naast de WKK-warmte nog heel wat extra warmte nodig is. Volgens de modelberekeningen is dit 18.2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> per jaar. De warmte die dit vertegenwoordigt zou op een energiezuinige wijze met een elektrisch aangedreven warmtepomp kunnen worden gemaakt.

Een warmtepomp is vrij duur per kW vermogen, dus is het niet reëel om de hele resterende warmtevraag met een warmtepomp te genereren. Daarom wordt gesteld dat van die 18.2 m<sup>3</sup> aardgas equivalenten 2 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> per jaar) wordt voortgebracht door piekvermogens met de ketel en de resterende 16.5 m<sup>3</sup> aardgas equivalenten met de warmtepomp wordt geproduceerd. Bij een aangenomen COP van 4 vergt deze inzet van de warmtepomp 4.1 m<sup>3</sup> aardgas equivalenten in de vorm van elektriciteit voor de aandrijving van de warmtepomp (dat is 130 MJ/(m<sup>2</sup> jaar) = 36 kWh per m<sup>2</sup> per jaar). Het resterende deel, 12.4 m<sup>3</sup> aardgas equivalenten, ofwel 390 MJ/m<sup>2</sup> per jaar, onttrekt de warmtepomp aan de verdampers. In de Next Generation semigesloten kas komt een deel van die warmte uit de aquifer, net zoals in alle andere semigesloten kassen, maar de rest van de benodigde warmte komt uit de latente warmte die vrijkomt bij de mechanische ontvochtiging van de kas op momenten dat de kaslucht te vochtig dreigt te worden. Modelberekeningen geven aan dat er in een moderne kas ongeveer 30 liter waterdamp de kas wordt uitgeblazen wanneer de buitenluchtaanzuiging wordt ingeschakeld om de luchtvochtigheid te verlagen. Als dit vocht op een koud oppervlak wordt gecondenseerd dan komt hier 75 MJ latente warmte vrij. Echter, bij het condenseren van waterdamp op het koude blok wordt er (ongewild, maar onvermijdelijk) ook voelbare warmte aan de kaslucht onttrokken die in de winter direct weer aan diezelfde kaslucht moet worden toegevoegd. Dit betekent dat het warmteverlies van de kas weliswaar afneemt, maar de hoeveelheid warmte die de warmtepomp moet voortbrengen niet (de warmtepomp moet kaslucht naverwarmen die even daarvoor bij de ontvochtiging is afgekoeld). De ervaring met warmtewisselaars leert dat een dergelijk condenserend blok bij goede dimensionering 50% van het koelvermogen uit de latente warmte haalt en de andere helft uit de voelbare warmte van de langsstromende lucht. De jaarlijkse hoeveelheid warmte die tijdens het ontvochtigen op het koude blok wordt verzameld bedraagt dus 150 MJ/(m<sup>2</sup> per jaar) en vormt daarmee een substantieel deel van de warmte-onttrekking die jaarlijks nodig was voor de laagwaardige warmtelevering aan de warmtepomp. Deze 150 MJ/m<sup>2</sup> per jaar is warmte die bij een Next Generation semigesloten kas niet uit de aquifer gehaald hoeft te worden en dus ook in de zomer niet weer aangevuld hoeft te worden. De resterende regeneratiebehoefte is dus 390 – 150 = 240 MJ/m<sup>2</sup>. Onderstaande grafiek geeft een overzicht van de warmtestromen in het Next Generation semigesloten kasconcept.



Figuur 33. Warmtevraag en invulling van die warmtevraag uit de verschillende onderdelen van het verwarmingssysteem van de Next Generation semigesloten kas.

Zoals te zien in Figuur 33. is vanaf februari tot het eind van de teelt een substantieel deel van de warmte die de warmtepomp voortbrengt afkomstig uit het ontvochtigingsproces. In december en januari is de bijdrage hieruit 0 omdat het jonge gewas dan zodanig weinig verdampt dat het vocht ook zonder extra acties al onder het maximaal geaccepteerde niveau blijft.

Door het nuttig gebruik van de warmte die bij de ontvochtiging beschikbaar komt is hoeft er nog maar een geringe hoeveelheid warmte aan de aquifer te worden onttrokken en is de regeneratiebehoefte dus ook klein. Het blijkt dat deze geringe hoeveelheid gemakkelijk in die warmere zomerse condities kan worden verzameld met hetzelfde warmtewisselende oppervlak dat in de winter gebruikt wordt voor de koeling en de naverwarming. Een ontvochtigingscapaciteit van 15 gram per m<sup>2</sup> per uur betekent immers 10 W latente warmte onttrekking en dus een koelblok met 20 W/m<sup>2</sup> koelvermogen in koude omstandigheden (18 °C 86% RV). Onder warme omstandigheden haalt ditzelfde koelblok gemakkelijk 40 W/m<sup>2</sup> koelvermogen.

Daar komt bij dat in de zomer het tweede koelblok (dat tijdens de ontvochtiging in de winter de naverwarming verzorgt) ook van koud water wordt voorzien. Dit tweede blok is ongeveer 1/3 van de capaciteit van het hoofd-blok zodat het gezamenlijk koelvermogen 50 W/m<sup>2</sup> is. Met dit vermogen kan de benodigde 240 MJ/m<sup>2</sup> in 1300 uur worden verzameld. Eerder is voorgerekend dat de warmtepomp 36 kWh/m<sup>2</sup> per jaar zal gebruiken. De warmtepomp is de grootste elektriciteitsverbruiker. De tweede grote verbruiker is de luchtbehandelingsinstallatie. Het elektriciteitsverbruik voor het circuleren van de lucht zal ongeveer 4 W/m<sup>2</sup> bedragen en bij 5000 uur betekent dit 20 kWh per m<sup>2</sup> per jaar. Een volgende duidelijke elektriciteitsverbruiker is de aquifer. Uitgaande van 240 MJ energieopslag in de aquifer zal er ongeveer 14 m<sup>3</sup> water per m<sup>2</sup> per jaar over de aquifer verpompt moeten worden (7 m<sup>3</sup> heen en 7 m<sup>3</sup> terug) en dat betekent  $14 \cdot 0.16 = 2.2$  kWh per m<sup>2</sup> per jaar (0.16 kWh per m<sup>3</sup> is de gemiddelde prestatie van de bronpompen zoals die gemeten is bij BiJo). Bij deze grote verbruikscomponenten zal nog het elektriciteitsverbruik van circulatiepompen komen, maar het is duidelijk dat het totaal heel dicht bij de 60 kWh elektriciteitsproductie van de WKK uitkomt zodat de Next Generation semi gesloten kas bij gebruik van een 150 kW/ha WKK op jaarbasis **elektrisch neutraal** uitkomt.

### Economisch perspectief

De Next Generation semigesloten kas is de slimme verwezenlijking van de 6e en 7e stap van het stappenplan voor Het Nieuwe Telen. Door zoveel mogelijk gebruik te maken van installaties die toch al in het nieuwe telen worden gebruikt blijven de meer-investeringen voor de Next Generation semigesloten kas beperkt.

Deze meer-investering bestaat uit:

- Een luchtbehandelingskast met wat meer capaciteit en 2 warmtewisselaar-blokken in plaats van één → 6 € extra per m<sup>2</sup> kas ten opzichte van een luchtbehandelingskast die gebruikelijk is bij gebruik van buitenluchtaanzuiging.
- Toevoeging van de warmtepomp met een thermisch vermogen van 500 kW per ha aan het systeem → 6 € extra per m<sup>2</sup> kas.
- Toevoeging van een aquifer met een kleine capaciteit (25 m<sup>3</sup>/(ha uur)) → 5 € extra per m<sup>2</sup> kas.

De totale meer investering voor een Next Generation semigesloten kas ten opzichte van een kas waarin gebruik wordt gemaakt van buitenluchtaanzuiging bedraagt hiermee 18 € per m<sup>2</sup> (incl. 5% onvoorzien).

De revenuen uit de Next Generation semigesloten kas bestaan uit een energiebesparing van 9 m<sup>3</sup> aardgas per m<sup>2</sup> per jaar. Daarnaast worden ook verbeteringen van de productkwaliteit verwacht omdat de luchtvochtigheid nog weer wat beter in de hand kan worden gehouden dan bij Het Nieuwe Telen (geschat op 0,5 € per m<sup>2</sup>). Immers, met mechanische ontvochtiging kan ook vocht worden afgevangen op momenten dat het buiten vochtiger is dan binnen. De gebruikelijke systemen kunnen op die momenten niets uitrichten. Mogelijk levert ook het koelvermogen dat in de zomer wordt ingezet om de aquifer te regenereren nog enige productkwaliteit verbetering. Het koelvermogen is echter slechts klein (ordegrootte 50 W/m<sup>2</sup>) dus hier worden veiligheidshalve geen revenuen voor ingecalculleerd.

Een simpele terugverdientijdberekening, bestaande uit de investering gedeeld door de jaarlijkse revenuen geeft bij een gasprijs van 30 cent per m<sup>3</sup> een terugverdientijd van bijna 6 jaar.

## 6.4 CASUS d: Bedrijf met een DaglichtKas

In 2011 is de DaglichtKas als nieuw kastype voor de teelt van schaduwminnende potplanten op semi-praktijkschaal beproefd. Onderstaande foto's geven een beeld van de buitenkant en van de binnenkant van deze kas.

In de grote zuidwaarts gerichte dakvlakken van de kas zijn Fresnellenzen aangebracht die het licht in een brandlijn focuseren (zie ook paragraaf 3.1.2.5). Gedurende de zomer wordt de collector steeds in het brandpunt gehouden en verzamelt de collector zonne-energie globaal tussen 10:00-19:00 h zodra de zon achter de wolken vandaan komt. De hoeveelheid energie die hierdoor op een bedrijf kan worden verzameld is getoond in Figuur 36. De warmte die op deze manier verzameld wordt is opgeslagen in een aquifer en wordt op een later tijdstip gebruikt voor de opwarming van de verdampers van een warmtepomp. Het warmtegebruik door de verdampers is in dezelfde figuur weergegeven.

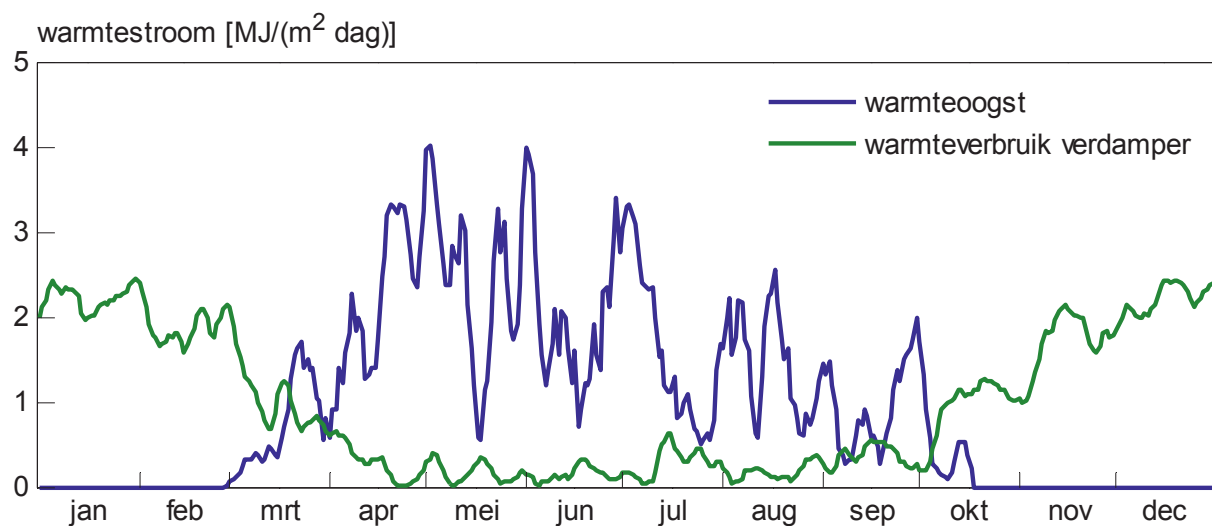




Figuur 34. Buitenkant van de DaglichtKas (IDC Bleiswijk) met asymmetrisch dek en relatief grote zuidvlakken.



Figuur 35. Binnenkant van de DaglichtKas (IDC Bleiswijk).



Figuur 36. Dagelijkse warmtestroom die door de verdamper van de warmtepomp wordt opgenomen en de warmteproductie met de zonnecollector (metingen Wageningen UR DaglichtKas IDC Bleiswijk).

Door gebruik te maken van een warmtepomp met een elektrisch vermogen van 150 kW per ha is de hoeveelheid warmte die in de winter onttrokken wordt gelijk aan de hoeveelheid warmte die in de zomer geproduceerd wordt. Daarmee is de aquifer in balans. Tijdens momenten van extreme kou is het vermogen van de warmtepomp ontoereikend en springt de ketel bij. Door de hoge isolatiegraad van de kas komt dit echter niet vaak voor waardoor het gasverbruik van die ketel in een gemiddeld jaar slechts 1 m<sup>3</sup> per m<sup>2</sup> per jaar bedraagt.

De warmtepomp gebruikt 36 kWh elektriciteit per m<sup>2</sup> per jaar en het totale elektriciteitsverbruik van de kas inclusief circulatiepompen en pompen van water naar aquifer ligt op 45 kWh per m<sup>2</sup> per jaar. De collector is uitgerust met PV-cellen die 20 kWh elektriciteit per m<sup>2</sup> per jaar produceren. Het netto elektriciteitsverbruik is daarmee 25 kWh per m<sup>2</sup> per jaar. **44% van het elektriciteitsverbruik kan worden gedekt door zonne-energie.**

Een iets verder geoptimaliseerde uitvoering van de DaglichtKas kan 500 MJ thermische energie voortbrengen bij installatie van een thermische collector. De warmtevraag van de Daglichtkas is 510 MJ per jaar bedraagt, **ruim 98% kan dus worden gedekt door zonne-energie.** Bij toevoeging van PV-cellen zal de warmteverzameling terugzakken naar 400 MJ per m<sup>2</sup> per jaar, nog steeds een 78% dekking door zonne-energie.

Na driekwart jaar telen in de DaglichtKas (IDC Bleiswijk) met 8 soorten potplanten kan worden geconcludeerd dat deze de afgelopen zomer een groeiversnelling lieten zien van 30 tot 40%. In de winter zullen de verschillen klein zijn zodat het verschil op jaarbasis naar verwachting kleiner zal zijn dan in de zomer. De verwachte jaarproductie op een bedrijf met een DaglichtKas wordt daarom nu geschat op +20%. Het productievoordeel in de DaglichtKas wordt ontstaat door het bijzondere lichtklimaat in de kas. De lichtintensiteit is hoog ten opzichte van de gangbare lichtintensiteiten in de potplantenteelt, maar het licht is zeer diffuus. De teler wordt dan ook praktisch niet met bladschade geconfronteerd. Daarnaast is de CO<sub>2</sub>-concentratie in de DaglichtKas hoog zonder dat er veel CO<sub>2</sub> wordt gedoseerd. De maximale doseercapaciteit is slechts 70 kg per ha per uur en de jaargift ligt onder de 20 kg per jaar.

De meer-investering voor de DaglichtKas uit:

Het dek met lenzen en collector → 150 € extra per m<sup>2</sup> kas

Een warmtepomp van 150 kW/ha → 7,50 € extra per m<sup>2</sup> kas

Een aquifer met een capaciteit van 30 m<sup>3</sup>/(ha uur) → 6 € extra per m<sup>2</sup> kas

PV-cellen → 50 € extra per m<sup>2</sup> kas

De totale meer investering komt daarmee op 213,50 € per m<sup>2</sup> kas

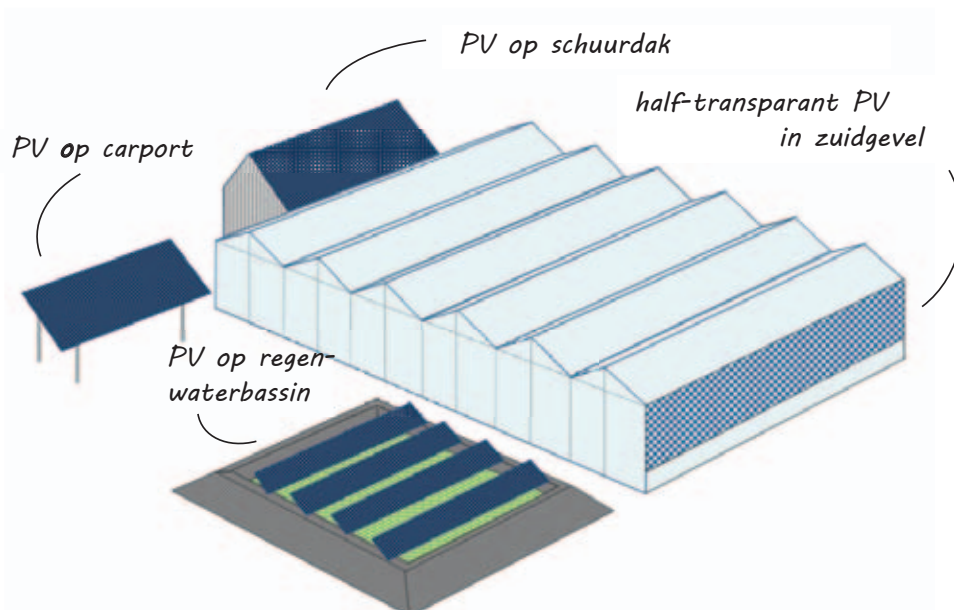
De revenuen uit de DaglichtKas bedragen een besparing van ongeveer 25 m<sup>3</sup> aardgas per m<sup>2</sup> per jaar, wat bij een gasprijs van 35 cent neerkomt op een besparing van € 8,75. De kas heeft een netto verbruik van 25 kWh/m<sup>2</sup> per jaar en dat is 15 kWh per m<sup>2</sup> meer dan in een referentiesituatie. Dit betekent meerkosten van € 1.50 zodat de netto besparing op energiekosten € 7,25 per m<sup>2</sup> per jaar bedraagt.

In paragraaf 4.1.2.4 is gesteld dat de waarde van de productietoename in de DaglichtKas € 10,- per jaar bedraagt, waarmee de totale revenuen € 17,25 bedragen.

De simpele terugverdientijd van de DaglichtKas komt daarmee op ca. 12 jaar.

## 6.5 CASUS e: Standaardbedrijf met PV-panelen op vrij beschikbare oppervlakken

Ondanks het feit dat kassen gebouwen zijn waarbij het zonlicht zoveel mogelijk wordt gebruikt voor de groei van gewassen zijn er oppervlakken aan te wijzen waar het gebruik van zonlicht voor PV geen concurrentie met de teelt oplevert. In de onderstaande figuur worden de drie meest voor de hand liggende oppervlakken aangegeven.



Figuur 37. Oppervlakken bij een standaardkas die in aanmerking komen voor de montage van PV-panelen die (praktisch) geen interactie met de teelt hebben.

Zoals in de figuur geschetst kan het dak van de bedrijfsschuur geheel met PV-cellen worden belegd en, omdat de schuur in de regel de laatste kap van de kas is, kan de dakhelling van dit dakvlak geoptimaliseerd worden voor het opwekken van zonne-energie. Bij een dakhelling van 35° leveren (vaste) PV-panelen de meeste elektriciteit per m<sup>2</sup> paneel. Een kwalitatief goed paneel levert in dat geval 150 kWh per m<sup>2</sup> paneel. Een dergelijk asymmetrisch dek heeft een oppervlak dat ongeveer 4% van het kasdek beslaat en produceert daarmee 6 kWh/m<sup>2</sup> kas per jaar.

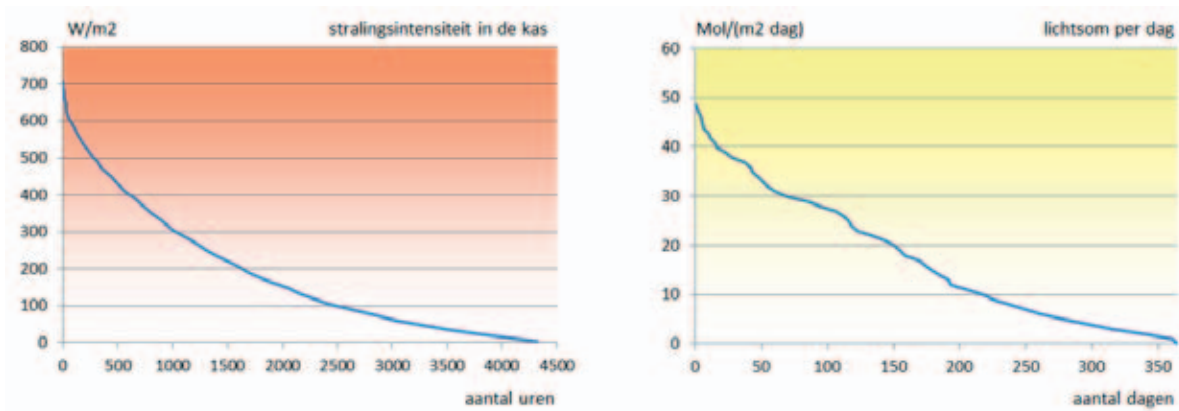
Een tweede oppervlak van behoorlijke afmeting, wat tevens gemakkelijk van PV-materiaal kan worden voorzien is de zuidgevel van de kas. In bestaande kassen wordt de zuidgevel vaak al minder doorlatend gemaakt door de gevel in stegdoppel paneel uit te voeren of door er een vliesdoek langs te spannen. Er zijn glaspanelen in de handel die gedeeltelijk met PV-cellen bedekt zijn. Dit zijn de gangbare mono-kristallijne siliciumcellen die dus per m<sup>2</sup> PV-materiaal een gelijk rendement halen als de panelen die op het schuurdak liggen. Verticaal gemonteerd PV-materiaal op het zuiden levert echter 80% van het rendement ten opzichte van optimaal geplaatste zonnepanelen en leveren dus 120 kWh per m<sup>2</sup> paneel. Aangenomen dat het benutbare oppervlak in de zuidgevel van 2.5% van het kasoppervlak beslaat (een strook van 5 meter hoog en 200 m lang op een kas van 4 ha) en dat dit oppervlak voor 50% met PV-cellen bedekt is die 120 kWh per m<sup>2</sup> leveren dan is de elektriciteitsproductie door de zuidgevel 1.5 kWh per m<sup>2</sup> kas. Het derde substantiële oppervlak dat gemakkelijk voor de montage van PV-panelen gebruikt zou kunnen worden is het regenwaterbassin. In de schets zijn de panelen getekend als vaste constructie over het bassin. Hierdoor kunnen de panelen het gehele bassin beslaan en kunnen de panelen onder de optimale hoek worden geplaatst (35°). Door de panelen enigszins uit elkaar te plaatsen wordt onderlinge beschaduwning voorkomen en zullen de panelen elk de eerder genoemde 150 kWh per m<sup>2</sup> paneel per jaar kunnen produceren. Aangenomen dat het bassinoppervlak 5% van het bedrijfsoppervlak beslaat en dat door de onderlinge afstand van de panelen het paneel-oppervlak 60% van het horizontale oppervlak beslaat komt de jaarproductie aan elektriciteit vanaf het bassin op 4.5 kWh per m<sup>2</sup> per jaar. Het feit dat het regenwaterbassin een vrij groot wateroppervlak betreft biedt mogelijkheden om een drijvende constructie te maken die daardoor zelfs draaibaar in de richting van de zon gemaakt zou kunnen worden. Hierdoor zal de elektriciteitsproductie per m<sup>2</sup> paneel nog ongeveer 10% hoger kunnen worden. Het feit dat de constructie draaibaar moet worden gemaakt kan er evenwel gemakkelijk toe leiden dat er minder m<sup>2</sup> paneel geïnstalleerd kan worden. Zo zal er bij een langwerpige bassin beduidend minder m<sup>2</sup> paneel kunnen worden geplaatst dan wanneer er op datzelfde bassin vaste panelen worden opgesteld. Het feit dat het waterniveau in een bassin sterk kan wisselen is een tweede complicatie voor drijvende panelen. Om bovengenoemde redenen wordt 4.5 kWh per m<sup>2</sup> kasoppervlak als reële bijdrage voor de stroomproductie vanaf het regenwaterbassin beschouwd.

De totale elektriciteitsproductie die op een tuinbouwbedrijf vanaf voorhanden zijnde oppervlakken kan worden gerealiseerd komt op grond van bovenstaande overwegingen uit op 12 kWh per m<sup>2</sup> per jaar. Hierbij zullend de kWh per m<sup>2</sup> per jaar vanaf het schuurdak relatief de goedkoopste stroom leveren en de 1.5 kWh vanuit de zuidgevel zal de duurste elektriciteit zijn. Elektriciteit vanaf het regenwaterbassin ligt qua prijs daar ergens tussenin omdat het PV-materiaal weliswaar efficiënt wordt ingezet, maar de draagconstructie redelijke kosten met zich mee zal brengen.

## 6.6 CASUS f: Bedrijf met PV-panelen voor beschaduwing

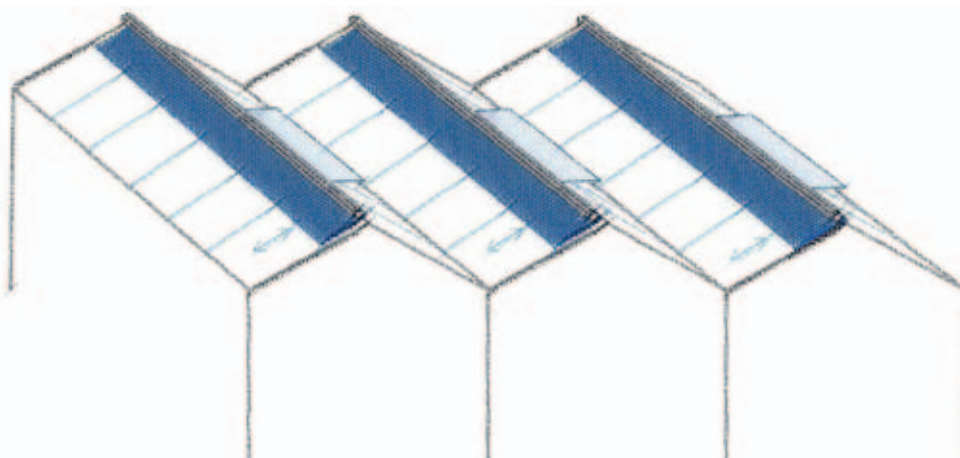
In de kas kunnen bijna alle groeifactoren zodanig worden ingesteld dat de groei optimaal verloopt, maar de primaire energiebron voor de groei, namelijk licht, wordt voor het grootste deel van het areaal nauwelijks geregeld. In de meeste kassen wordt het zonlicht zoveel mogelijk doorgelaten. Een deel van het areaal vult die doorgelaten lichthoeveelheid in de winter zelfs nog wat aan. Het is evident dat bij toename van de hoeveelheid licht op de dag de gewasproductie toeneemt, maar dat boven een bepaalde lichthoeveelheid het effect van extra licht afneemt of zelfs averechts werkt. Bij schaduwminnende teelten is dit al bij relatief kleine lichthoeveelheden het geval, maar ook in lichtminnende teelten, zoals de meeste groentegewassen, kan er bij hoge lichtintensiteiten sprake zijn van een verminderde efficiëntie van het groeiproces. In eerder onderzoek (Meijnen et.al., 2004) is aangegeven dat de vuistregel dat 1% minder licht ook 1% minder productie oplevert in de zomer niet opgaat. Het effect is in die periode minder, doordat de fotosynthesetoeename naar verhouding geringer wordt bij hoge lichtintensiteiten en in standaard kassen ook andere groeifactoren beperkend kunnen zijn.

Mogelijk is het verlies aan benuttingsefficiëntie bij diffuse kassen minder groot dan bij standaard kassen. In ieder geval is de productwaarde in de zomer lager dan in de winter, waardoor een beperking van de productie in de zomer naar verwachting geen grote vermindering van inkomsten oplevert. Als we kijken naar het lichtprofiel in een standaard kas onder Nederlandse omstandigheden dan worden er de onderstaande karakteristieke curven gevonden.



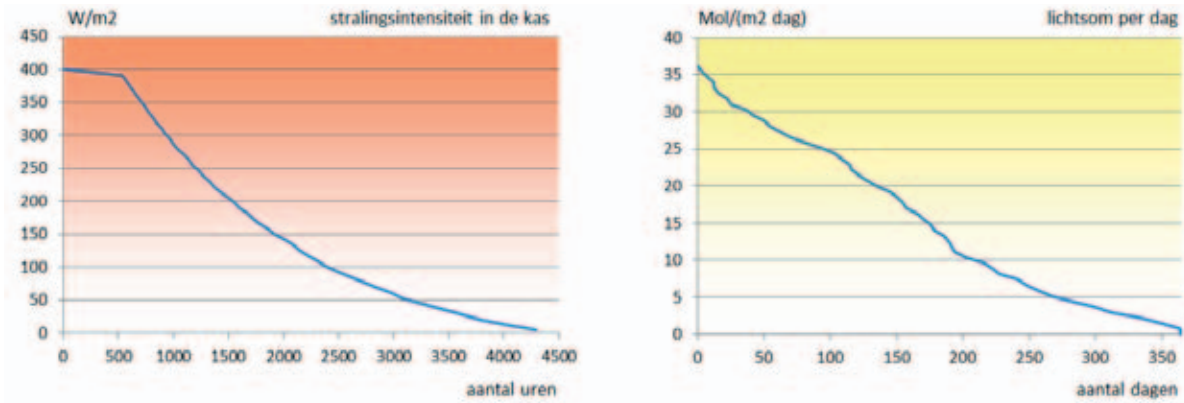
*Figuur 38. Jaarbelastingduurkromme van de stralingsintensiteiten in de kas en de resulterende lichtsommen per dag.*

Figuur 38. laat zien dat in een gemiddeld jaar de intensiteit in de kas (uitgaande van een kastransmissie van 75%) altijd onder de 700 W/m<sup>2</sup> blijft. De lichtsom per dag is maximaal 50 Mol/m<sup>2</sup>. Als wij de volgende hypothese aannemen: een groentegewas heeft bij hoge lichtintensiteiten een geringere toename aan lichtbenuttingsefficiëntie en daarmee productie-efficiëntie en de verdien capaciteit van een teler op deze momenten is laag. Als deze hypothese waar is zou de lichtintensiteit in de kas begrensd zou kunnen worden op 450 of zelfs 350 W/m<sup>2</sup>. Dit zou betekenen dat wanneer er gedurende 500 tot 800 uur per jaar een zekere mate van scherming zou worden toegepast, zodanig dat de lichtintensiteit niet boven een bepaalde waarde uitkomt, de gewasgroei of verdien capaciteit van een teler maar in geringe mate beïnvloedt wordt, terwijl er met het weg te schermen licht dan energie zou kunnen worden opgewekt. Tevens zou dit kunnen leiden tot een vitaler gewas in de herfstmaanden. Uitgaande van de toepassing van een diffuus kasdek zou het dan wellicht niet nodig zijn om de scherming sterk gedistribueerd over de kas te laten plaatsvinden, maar zouden schaduw gevende stroken kunnen worden toegepast. In Figuur 39. is een schets getekend van een kas waarop vanuit de nok op het zuiddek een scherm van PV-cellen kan worden uitgerold. Een dergelijk scherm zou kunnen bestaan uit stroken PV-materiaal dat als een soort rolscherm kan worden opgerold en afgerold.



*Figuur 39. Schets van een kas waarop vanuit de nok een schaduw gevend PV-scherm uitgerold kan worden.*

Omdat bij hoge stralingsintensiteiten het meest licht door het zuiddek valt (60%) hoeft voor een schaduwwerking van bijvoorbeeld 30% slechts de helft van het zuiddek te worden afgedekt door het scherm. In de praktijk zou een systeem zoals hierboven geschetst geheel zijn ingerold bij lage lichtintensiteiten en proportioneel kunnen worden uitgerold naar mate de lichtintensiteit toeneemt. Onderstaande figuur toont de jaarbelastingduurkromme van de lichtintensiteit in de kas wanneer er een maximale stralingsintensiteit van 400 W/m<sup>2</sup> op gewasniveau wordt geaccepteerd.



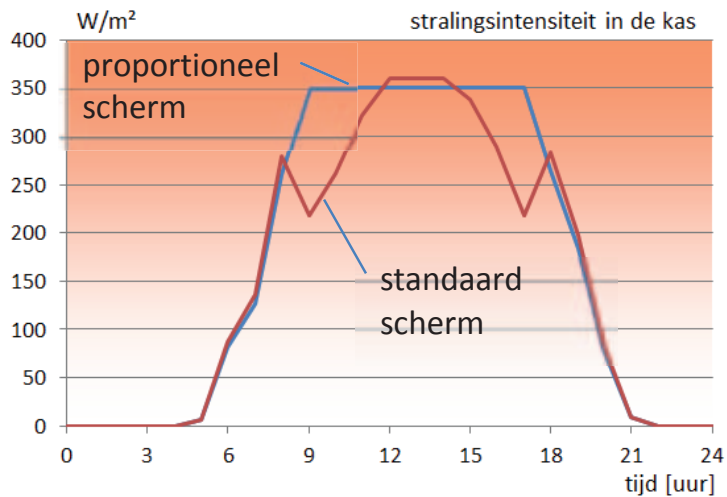
Figuur 40. Jaarbelastingduurkromme van de stralingsintensiteiten in de kas en de resulterende lichtsommen per dag bij gebruik van een proportioneel schaduw scherm dat de lichtintensiteit in de kas op 400 W/m<sup>2</sup> begrenst.

In de berekening voor Figuur 40. is er van uitgegaan dat de basistransmissie van de kas, door toevoeging van het rolscherm op de nok, met 5% is verlaagd ten opzichte van de referentiesituatie, waarbij de basistransmissie 75% bedraagt). Uit Figuur 40. kan worden afgeleid dat bij dit uitgangspunt (max. 400 W/m<sup>2</sup> straling in de kas), de variabele beschaduwing 550 uur per jaar in werking is. Gedurende die periode beschaduw het scherm tussen de 0 en 37% schaduw. Zo zal bij 950 W/m<sup>2</sup> buitenstraling het scherm 40% wegvangen zodat er dan op gewasniveau nog  $950 \times 0.6 \times 0.7 = 400$  W/m<sup>2</sup> resteert; precies het gewenste niveau. De totale hoeveelheid zonlicht die in de 550 uur bij de variabele beschaduwingsfactor wordt ingevangen bedraagt 220 MJ/m<sup>2</sup> per jaar. Als dit met een omzettingsefficiëntie van 15% wordt omgezet in elektriciteit dan resulteert dit in een stroomproductie van 9 kWh/m<sup>2</sup>kas per jaar. De totale hoeveelheid licht voor het gewas is met 750 Mol verlaagd van 6260 naar 5510 Mol groeilicht per m<sup>2</sup> per jaar. Dit is een vermindering van de lichtsom met 12%. In onderstaande tabel zijn de resultaten weergegeven bij andere criteria voor het maximale stralingsniveau.

Tabel 3. Lichtsom en potentiële elektriciteitsopstoot bij gebruik van PV rolschermen met verschillende schermpercentages en buitenstralingsniveaus.

	Gewenst max licht binnen [W/m <sup>2</sup> zonlicht]	Benodigde maximale beschaduwing [%]	Af te schermen hoeveelheid licht [MJ/(m <sup>2</sup> jaar)]	Elektriciteitsopstoot bij 15% rendement [kWh/(m <sup>2</sup> jr)]	Vermindering van de jaarlijkse lichtsom [%]
300	43	590	25	26	
350	45	380	16	19	
400	37	220	9	14	
450	30	110	5	10	

De tabel laat zien dat er een forse vermindering van de lichtsom optreedt om een elektriciteitsproductie van enige betekenis te leveren. Vanuit teeltkundig oogpunt zou het een voordeel kunnen zijn dat de proportionele beschaduwing die verkregen kan worden door het in- en uitrollen van het scherm een afgevlakt lichtniveau in de kas oplevert. Of deze hypothese waar is behoeft nader onderzoek. Onderstaande figuur laat zien wat het lichtprofiel is in een kas waar het lichtniveau wordt afgetopt met een standaard scherm dat 45% schaduw geeft in vergelijking met een proportioneel regelend PV rolscherm dat tussen de 0 en de 45% schaduw kan geven. Uitgangspunt bij deze grafiek is dat in de betreffende teelt licht weggeschermd moet worden als de intensiteit boven de  $350 \text{ W/m}^2$  dreigt te komen.



*Figuur 41. Verloop van de lichtintensiteit in de kas op een zonnige dag bij gebruik van een proportioneel uitrolbaar schaduwscherm in vergelijking met een standaard schaduwscherm dat in één keer open of dicht wordt getrokken.*

## 6.7 Samenvatting casussen

De hier boven beschreven casussen geven de huidige mogelijkheden voor verschillende technologieën voor het verzamelen en het gebruik van zonne-energie in de tuinbouw weer. Ze dienen daarnaast als inspiratie voor eerste demonstratie projecten, vervolgonwikkelingen van toeleveranciers en laten toekomstige onderzoeksvragen zien. Het huidige perspectief van de diverse casussen kan als volgt worden samengevat:

	Case	Gas <sub>in</sub> per m <sup>2</sup> per jaar	Elektra <sub>in</sub> per m <sup>2</sup> per jaar	% zonne-warmte	% zonne-elektra
a	Bedrijf met warmteonttrekking aan oppervlaktewater	Zonder aquifer: 18 m <sup>3</sup> voor WKK 2 m <sup>3</sup> voor ketel  Met aquifer: 18 m <sup>3</sup> voor WKK 1.5 m <sup>3</sup> voor ketel	warmtepomp: 35 kWh WKK -66 kWh (productie)  warmtepomp: 34 kWh WKK -66 kWh (productie)	36%  39%	0%  0%
b	Bedrijf met thermische collectoren buiten de kas	19.5 m <sup>3</sup> voor WKK 5.5 m <sup>3</sup> voor ketel	warmtepomp: 21 kWh WKK - 71 kWh (productie)	28%	0%
c	Bedrijf met een semi-gesloten kas	16 m <sup>3</sup> voor WKK 2.5 m <sup>3</sup> voor ketel	warmtepomp 36 kWh luchtbehandelingskast 20 kWh aquifer 2.2 kWh WKK -66 kWh (productie)	33%	0%
d	Bedrijf met een DaglichtKas	1 m <sup>3</sup> voor ketel	warmtepomp 35 kWh (Circulatie)pompen 10 kWh	78-98%	44%
e	Bedrijf met PV-panelen op diverse plekken buiten de kas	gemiddeld zuinig groenten bedrijf: 25 m <sup>3</sup>	gemiddeld onbelicht groenten bedrijf: 10 kWh  gemiddeld belicht groenten bedrijf: 250 kWh	0%  0%	100%  5%
f	Bedrijf met PV-panelen voor beschaduwing	gemiddeld zuinig groenten bedrijf: 25 m <sup>3</sup>	gemiddeld onbelicht groenten bedrijf: 10 kWh  gemiddeld belicht groenten bedrijf: 250 kWh	0%  0%	50-100%*  2-10%

\* effecten op teelt moeten verder worden onderzocht

Berekeningen zijn gedaan voor standaard cases. Bedrijfsspecifieke karakteristieken moeten worden meegenomen voor een meer gedetailleerde berekening voor een specifieke situatie van een teler. De gekleurde balk naast de tabel geeft de toename in perspectief van licht naar donker weer.





## 7 Conclusies

Zonlicht is een praktisch onbeperkte bron van stralingsenergie die iedereen die aanspraak kan maken op een stuk buitenoppervlak kan omzetten in andere bruikbare en/of verhandelbare andere vormen van energie.

In de tuinbouw wordt volop van deze energie van de zon gebruik gemaakt door met dit licht gewassen te laten groeien en het resultaat daarvan te verkopen. Binnen de tuinbouw staat **zonlicht voor plantengroei** daardoor in competitie met zonlicht voor andere toepassingen. Benutting van zonne-energie in de tuinbouw voor de **opwekking van duurzame energie kan alleen uit overtollig zonlicht**, of uit de restproducten van de energie uit dit zonlicht plaatsvinden, nadat het door de plant voor de groei is gebruikt.

In dit rapport is becijferd welke hoeveelheden zonne-energie als overtollig zonlicht of als restproduct kan worden beschouwd. De makkelijkst toegankelijke bron van overtollig zonlicht is dat licht wat onbenut blijft, zoals het licht dat op het dak van de bedrijfsschuur valt, of het licht dat op overige oppervlakken rondom het glas valt. Als ordegrootte geldt dat voor gemiddelde tuinbouwbedrijven voor elke m<sup>2</sup> glasoppervlak ongeveer 0.1 m<sup>2</sup> ander oppervlak aangewezen kan worden wat wel bij het bedrijf hoort, maar niet direct bijdraagt aan de groei van het gewas. Daarnaast is niet het gehele teeltoppervlak van glas (er zitten nokken en glasroeden in een kas) en zijn er stukken in de kas aan te wijzen die eveneens niet direct bijdragen aan de productie (het oppervlak boven het middenpad). Als deze oppervlakken worden meegeteld is er voor elke m<sup>2</sup> glasoppervlak 0.14 m<sup>2</sup> beschikbaar waar het zonlicht benut zou kunnen worden zonder dat dit de teelt hindert.

Met de op dit moment beschikbare technieken waarmee zonlicht kan worden omgezet naar andere vormen van energie kan er uit een m<sup>2</sup> grondoppervlak ongeveer 1800 MJ warmte op een temperatuurniveau van ongeveer 65 °C worden geproduceerd of ongeveer 125 kWh elektriciteit. Gecombineerde productie van warmte én elektriciteit is ook mogelijk, maar dan komt de elektriciteitsproductie op 100 kWh/m<sup>2</sup> per jaar en kan de warmte alleen op een lagere temperatuur worden verzameld (ordegrootte 30 °C). Wanneer deze getallen worden vermenigvuldigd met het beschikbare oppervlak (0.14 m<sup>2</sup>/(m<sup>2</sup>kas)) komt het basispotentieel qua ordegrootte op 300 MJ thermische energie en 15 kWh elektrische energie per m<sup>2</sup>kas per jaar.

Hier bovenop kan voor alle teelten nog een grote hoeveelheid thermische energie in de vorm van laagwaardige warmte worden gewonnen uit de voelbare en latente warmte die het gewas afgeeft. 450 MJ/m<sup>2</sup> op een temperatuurniveau van 15 tot 20 °C is gemakkelijk te realiseren. Tenslotte kan er in specifieke gevallen ook eenvoudig laagwaardige warmte worden verzameld uit watergangen rond de kas (mits in verbinding staand met oppervlaktewater). Additioneel kan hiermee 300 MJ thermische energie worden verzameld.

Uit het bovenstaande kan worden geconcludeerd dat de **verzameling van thermische zonne-energie** voor de duurzame verwarming van de glastuinbouw in technische zin geen enkel probleem vormt. Een energiezuinig groenten bedrijf heeft een warmtevraag van ca. 750MJ/(m<sup>2</sup> jaar). **Het potentieel beslaat daarmee in de meeste gevallen 30 tot 50% van de behoefte.** Bij verlaging van de warmtevraag zoals bijvoorbeeld bij de DaglichtKas kan de dekking oplopen tot **80-100%**.

In economische zin<sup>18</sup> ligt het gebruik van duurzame warmte op dit moment al rond het break even point. Indien de gasprijs stijgt, komt de economische haalbaarheid van thermische oplossingen dichterbij. Aangezien vraag en aanbod van thermische zonne-energie vaak niet synchroon lopen, is in veel gevallen opslag van warmte belangrijk.

Voor elektriciteit ligt dit heel anders. Anders dan thermische energie is elektriciteit een gemakkelijk transporteerbare en verhandelbare energiedrager. Het gemiddelde elektriciteitsverbruik in de sector ligt op dit moment rond de 70 kWh per m<sup>2</sup> per jaar. Het hierboven genoemde basispotentieel voor de productie van stroom door de glastuinbouw is nog niet de helft van het gemiddelde verbruik. Daar komt bij dat wanneer kassen op grote schaal gebruik gaan maken van duurzame warmte de elektriciteitsvraag verder zal oplopen. In een semi-gesloten kas loopt de behoefte op tot 40 kWh/m<sup>2</sup> kas per jaar. Dit is daarmee 30 kWh/(m<sup>2</sup> jaar) extra ten opzichte van een standaard groenten kas, waardoor het sectorgemiddelde verbruik zal oplopen.

18 In de economische analyse is uitgegaan van langere termijn energieprijzen, een (integrale) gasprijs van 0,35 €/m<sup>3</sup> en een elektriciteitsprijs van 0,10 €/kWh. Voor de bepaling van de investeringsniveaus is geen rekening gehouden met mogelijke stimuleringsmaatregelen, zoals investerings-subsidies.

Een vergroting van het elektriciteitsproductiepotentieel die in theorie voor de hele sector toegepast zou kunnen worden wordt bereikt met het Elkas-principe, waarbij de energie uit ongebruikte golflengtes van het zonlicht gebruikt wordt, namelijk de Nabij Infra Rode straling (NIR). Deze techniek kan met de op dit moment voor handen zijnde conversierendementen een elektriciteitsproductie leveren van 20 kWh/m<sup>2</sup> per jaar. De extra constructiedelen die in de kas voor deze techniek nodig zijn zullen echter niet geheel zonder gevolgen voor de gewasproductie zijn. De mate waarin de transmissie van de kas voor PAR-licht afneemt is nog niet bekend. De toevoeging van het Elkas-principe aan de glastuinbouw zou de mogelijke elektriciteitsproductie dicht bij het huidige gemiddelde niveau brengen.

Tenslotte is er voor een deel van de tuinbouw nog een bron van overtollig zonlicht en dat is het licht wat in schaduw minnende teelten wordt weggehouden om schadelijke lichtintensiteiten te vermijden. Het potentieel dat hiermee gehaald kan worden ligt op 15 kWh per m<sup>2</sup> per jaar (voor teelten waar licht geschermd) wordt tot 65 kWh per m<sup>2</sup> per jaar (voor teelten waar heel zwaar geschermd wordt). Deze systemen zijn echter niet of nauwelijks geschikt in combinatie met het Elkas-principe zodat deze stroomproducties niet bij de eerder genoemde 20 kWh per m<sup>2</sup> per jaar opgeteld kunnen worden. De zeer hoge elektriciteitsproductie van 65 kWh per m<sup>2</sup> per jaar, die gerealiseerd kan worden in een kas met een lamellenscherm dat volledig met PV-cellen is bedekt, impliceert een lichtniveau in de kas van 6 mol/(m<sup>2</sup> dag). Er zijn veel aanwijzingen dat het areaal waar dit soort lage stralingssommen worden gebruikt snel zal slinken met de voortschrijding van de teeltechniek.

Samenvattend kan worden gesteld dat het met huidige technologieën mogelijk is om de behoefte van een glastuinbouwbedrijf aan **warmte** voor ongeveer **50% te dekken uit zonne-energie**, waarmee de situatie op sectorniveau dicht bij de maximale dekking van de verwarming door zonne-energie is gebracht.

Daarnaast is het technisch goed mogelijk om **25%** van de huidige behoefte aan **elektriciteit** te dekken uit zonne-energie. Met toekomstige technieken is een dekking van 80% wellicht mogelijk. Economisch gezien zijn de terugverdientijden voor deze opties veel te lang. Daarnaast zal de elektriciteitsvraag van glastuinbouwbedrijven in de toekomst verder stijgen, zodat een dekking van **50% in de toekomst maximaal** haalbaar lijkt. Deze getallen gelden op sector niveau. Een dekking van het elektriciteitsverbruik van belichtende bedrijven door zonne-energie zal op bedrijfsniveau nooit op eigen erf mogelijk zijn.

## 8 Aanbevelingen en uitdagingen

De volgende algemene aanbevelingen voor verdere ontwikkelingen van het gebruik van zonne-energie in de glastuinbouw kunnen worden gegeven:

- De kas zelf is een prima zonnecollector. Maak zoveel mogelijk gebruik van natuurlijk zonlicht voor gewasgroei en opwarming van de kas.
- Het energieverbruik van een glastuinbouwbedrijf moet verder worden verlaagd door energieverliezen van de kas te beperken. Daarna is invulling door zonne-warmte of andere duurzame energiebronnen makkelijker mogelijk.
- Het gebruik van fossiele energie voor elektra voor belichting moet in de toekomst verder worden verlaagd. De inkoop van groene elektriciteit is een oplossing naast het ontwikkelen van nieuwe efficiënte belichtingsbronnen en nieuwe teelt- en belichtingsstrategieën.

Meer specifieke aanbevelingen voor verschillende doelgroepen zijn hieronder geformuleerd.

Aanbevelingen voor **toeleveranciers**:

- Huidige thermische collectoren zijn niet speciaal ontwikkeld voor tuinbouwtoepassingen. Er is wellicht winst te halen door goedkopere oplossingen waardoor wellicht het rendement daalt maar ook de investeringen lager worden. Bij grootschalige toepassingen kunnen de investeringen mogelijk ook substantieel omlaag (economy of scale).
- Verdere technische doorontwikkeling PV cellen en PV panelen is nodig om het rendement te verhogen en de kosteneffectiviteit te verbeteren.
- Integratie van huidige PV collectoren met andere functies is wenselijk, zodat kosten bespaard kunnen worden bijv. PV collector gelijktijdig gebruiken als dakpannen op schuur, Flexibele PV cellen integreren in folie en deze als afdekking gebruiken van waterbassin...
- Ontwikkeling van kostengunstige PVT collectoren voor het DaglichtKas of Elkas principe met gelijktijdig hoog rendement.
- Ontwikkeling van een NIR-selectieve folie met hoge lichttransmissie en hoge NIR-reflectie voor het Elkas principe.
- Doorontwikkeling goedkope en efficiënte luchtbehandelingskasten en warmtewisselaars (water-lucht en water-water) voor het semi-gesloten kas principe en warmteonttrekking uit oppervlaktewater.
- Doorontwikkeling van efficiënte warmtepompen.

Aanbevelingen voor **telers**:

- Het onttrekken van warmte uit kaslucht (**next generation semi-gesloten kas**; zie 3.3.1) biedt bij de aangenomen prijzen voor gas en elektriciteit (respectievelijk 35 ct./m<sup>3</sup> en 10 ct. per kWh) al perspectief. Met dit kasprincipe is het aannemelijk dat zowel productie en kwaliteitswinst kunnen worden behaald. Het gebruik van zonne-warmte is 33%.
- **Warmteonttrekking uit oppervlaktewater** (zie 3.3.3) is een energetisch interessante oplossing en de investeringsruimte lijkt toereikend om het op korte termijn – met stimuleringsregelingen - interessant te laten zijn voor een teler. Het gebruik van zonne-warmte is 36%.
- De technieken om **warmte en elektriciteit buiten de kas** te verzamelen op niet-kas oppervlaktes (zie 3.1.1) leiden nu nog tot een onvoldoende grote investeringsruimte om het op korte en middellange termijn interessant te laten zijn. Ook al kan voor elektriciteitsproductie een vergoeding vanuit de SDE+ regeling worden verkregen, dan zal dit nu nog niet toereikend zijn. Verdere rendementsverbetering van PV panelen en kostenverlaging door opschaling van warmtecollectoren kunnen deze technieken mogelijk op langere termijn binnen bereik brengen. Beide technieken geven op bedrijfsniveau direct een duurzame uitstraling. Het gebruik van zonne-energie voor opwekken van elektriciteit is voor 100% mogelijk voor niet-belichtende bedrijven.
- **PV collectoren op kasdek en kasinstallaties** (zie 3.1.2.1 en 3.1.2.2) zijn economisch op dit moment niet aantrekkelijk, ook al is er inmiddels een praktijkbedrijf met een dergelijke installatie. In de toekomst zouden teelt specifieke oplossingen voor een optimale lichtregeling van het gewas in combinatie met elektriciteitsopwekking onderzocht kunnen worden. Deze worden wellicht op zeer lange termijn interessant als nieuwe PV cellen voor een lagere prijs beschikbaar komen.

- Voor **flexibele PV cellen op schermen** (3.1.2.3) lijkt het perspectief nog ver weg voor toepassing in de glastuinbouw. Vanwege de relatief beperkte tijdsperiode dat schaduw- en verduisterings-schermen worden gebruikt is/blijft de investering zeer groot. Bovendien is het toepassingsareaal beperkt. Eventuele teeltvoordelen door een betere lichtregeling op piekmomenten zouden verder onderzocht moeten worden.
- Voor lichtonderschepping t.b.v. **warmteogst met lamellen** (ZonWindKas; zie 3.1.2.4) ligt er mogelijk een perspectief op lange termijn. Nadeel van deze techniek is dat de opschaling beperkt van omvang zal zijn, omdat het alleen interessant is voor teelten die bij zeer weinig licht groeien. Daarnaast kan niet van de voordelen van het Nieuwe Telen potplanten worden geprofiteerd door de lage lichtintensiteit in de kas. Het toevoegen van **PV cellen op lamellen** is weinig perspectiefvol.
- De **DaglichtKas** (zie 3.1.2.5) biedt betere perspectieven voor schaduwminnende teelten. De berekende investeringsruimte lijkt voldoende groot om toepassing op middellange termijn mogelijk te maken, zeker voor wat betreft de thermische variant. Dit is vooral te danken aan bijkomende voordelen op het terrein van energiebesparing en productie en kwaliteitswinst.
- Het gebruik van zonne-energie geeft een groen imago en kansen voor publiciteit.

#### Aanbevelingen voor **kennisontwikkeling**:

- Ontwikkelingen op gebied thermische collectoren en PV buiten de glastuinbouw goed volgen.
- Praktijkpilot ontwerp, bouw en monitoren casus a (Bedrijf met warmteonttrekking aan oppervlaktewater): vinden testlocatie; ontwerp technisch layout; realisatie; monitoren energiestromen en temperaturen omliggend oppervlaktewater; economische evaluatie
- Praktijk pilot, ontwerp, bouw en monitoren casus b (Bedrijf met thermische collectoren buiten de kas): vinden testlocatie; ontwerp technisch layout en opschaling thermische collectoren; realisatie; monitoren energiestromen; economische evaluatie
- Demonstratie en onderzoek Next Generation semi-gesloten kas zoals beschreven in casus c; monitoren energie en gewas; economische evaluatie
- Demonstratieproject PV-cellen op (alle) omliggende oppervlakken zoals beschreven in casus e, monitoren energiestromen, temperaturen in waterbassin
- Onderzoek haalbaarheid teeltconcept en technische layout casus f (Bedrijf met PV-panelen voor beschaduwning):
  - o Teeltperspectief: ontwikkelen compleet teeltconcept onder diffuus kasdek met lichtschermen op pieken voor lichtminnende gewassen; beproeven beschaduwing van lichtminnende gewassen onder verschillende lichtlimieten (Leidt schermen in de zomer tot minder productie? Hoeveel? Leidt schermen tot een langer vitale teelt in herfst? Heeft dit teeltconcept economische voordelen voor een teler?);
  - o Technische haalbaarheid: ontwikkelen technisch haalbaar concept met PV schermen

#### Aanbevelingen voor **kennisoverdracht**:

- Kennismiddag zonne-energie speciaal voor telers om uitkomsten studie onder de aandacht te brengen, bij voorkeur koppelen aan Energie2020 in 2012
- Kennismiddag voor toeleveranciers (installateurs, kassenbouwers etc.) en tuinders, discussie over technieken die op korte/middellange perspectief hebben, identificatie aanvullende ideeën en kennisbehoefte, kan ook gekoppeld aan tuinbouwrelatiedagen

#### Aanbevelingen voor **beleid**:

- Nagaan of beschouwde zonne-energietechnieken ander beleid en/of stimuleringsmaatregelen van overheid, sector en/of bedrijfsleven nodig heeft om de toepassing dichterbij te brengen
- Waterschappen en Hoogheemraadschappen: Praktijkpilot en monitoren casus a (Bedrijf met warmteonttrekking aan oppervlaktewater): vinden testlocatie; ontwerp technisch layout; realisatie; monitoren energiestromen en temperaturen omliggend oppervlaktewater met als doel probleem blauwalgen in oppervlaktewater terug te dringen en daarmee de volksgezondheid te bevorderen.
- Provincies en gemeenten: Bij ontwikkeling nieuwe tuinbouwgebieden de mogelijkheden van duurzame pilotbedrijven (casus a Bedrijf met warmteonttrekking aan oppervlaktewater; casus b Bedrijf met thermische collectoren buiten de kas; casus e Demonstratieproject PV-cellen op (alle) omliggende oppervlakken) meenemen.

## 9 Samenvatting

In het jaarplan Kas als Energiebron wordt aangegeven in 2011 een strategische verkenning uit te voeren naar de mogelijkheden van benutting van warmte uit zonne-energie voor de glastuinbouw in 2020. Naast de ambitie om in 2020 in nieuw te bouwen kassen klimaatneutraal te telen bestaat de ambitie om een aandeel van 20% duurzame energie in te zetten in 2020. Naast aardwarmte en bio-energie is een flinke bijdrage vanuit zonne-energie nodig om deze ambitie te verwezenlijken. Er is dus behoefte aan een verzameling van nieuwe ideeën en een overzicht van de potenties en nieuwe (deel)voorzieningen die nodig zijn om deze bijdrage uit zonne-energie te kunnen verwezenlijken.

Zonlicht is een praktisch onbeperkte bron van stralingsenergie. In de tuinbouw wordt volop van deze energie van de zon gebruik gemaakt door met dit licht gewassen te laten groeien en het resultaat daarvan te verkopen. Binnen de tuinbouw staat **zonlicht voor plantengroei** daardoor in competitie met zonlicht voor andere toepassingen. Benutting van zonne-energie in de tuinbouw voor de **opwekking van duurzame energie kan alleen uit overtollig zonlicht**, of uit de restproducten van de energie uit dit zonlicht plaatsvinden, nadat het door de plant voor de groei is gebruikt. De technische en economische mogelijkheden voor het benutten van zonne-energie in de glastuinbouw worden in dit rapport beschreven. Tevens worden de potentiële energetische bijdrages voor de glastuinbouwsector voor het benutten van zonnewarmte of conversie naar elektriciteit geschetst. Een aantal concrete casussen op bedrijfsniveau worden berekend.

Samenvattend kan worden gesteld dat het met huidige technologieën mogelijk is om de behoefte van de glastuinbouwsector aan **warmte** voor ongeveer **50% te dekken uit zonne-energie**.

Daarnaast is het technisch goed mogelijk om **25%** van de huidige behoefte aan **elektriciteit te dekken uit zonne-energie**. Economisch gezien zijn de terugverdientijden voor deze opties veel te lang. Daarnaast zal de elektriciteitsvraag van glastuinbouwbedrijven in de toekomst verder stijgen, zodat een dekking van **50% in de toekomst maximaal** haalbaar lijkt, ook wordt er rekening gehouden met een hoger rendement van toekomstige technieken. Deze getallen gelden op sector niveau. Een dekking van het elektriciteitsverbruik van belichtende bedrijven door zonne-energie zal op bedrijfsniveau nooit op eigen erf mogelijk zijn.

Deze studie is gefinancierd door het ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovaties en het Productschap Tuinbouw.



## 10 Summary

In the yearly program of “Kas als Energiebron” 2011 it is stated to carry out a strategic research on the possibilities of using solar energy for greenhouse production in 2020. The ambitions are to build all new greenhouses in 2020 in a climate neutral way and to use 20% of sustainable energy. Next to geothermal heat and biofuels a large contribution from solar energy is necessary in order to fulfil these ambitions. Therefore new ideas to use solar energy in greenhouse production have to be collected. The energetic and economic potentials of the use of new technologies in greenhouses have to be estimated.

Solar radiation is an almost infinite source of energy. In greenhouse horticulture already a large amount of sun light is used by growing crops and selling the produces. **Sun light for crop production** competes with using the same solar energy for other purposes. Using sun light as an additional sustainable energy source in greenhouses is therefore only possible by **using redundant solar energy**, after it has been used by the crops for growth and development. The technical and economical possibilities for using solar energy in greenhouse horticulture are described in this report. Next to that the potential energetic contributions of solar heat or solar electricity in Dutch greenhouse horticulture are described. A number of specific cases of using solar energy on company level are calculated.

In summary it can be concluded that with today's technologies it is possible to cover about **50% of the heating demand** of Dutch greenhouses by solar energy.

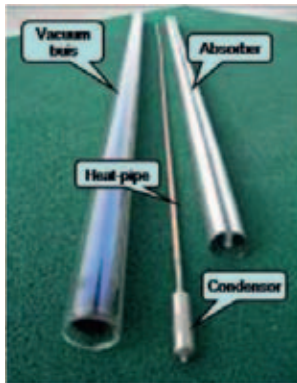
Next to that it is technically possible to cover **25% of the electricity demand** by converting solar energy to solar electricity. Economically speaking the payback period of those options are still too long. Additionally the need for electricity of Dutch greenhouses is expected to increase in the future, so that even with higher efficiencies of new technologies it is realistic to estimate that a maximum of **50% of the electricity demand** could be covered by solar energy **in the future**. These numbers are valid on total Dutch greenhouse sector level. Covering the electricity need of individual companies with artificial lighting will never be possible by solar energy on their own ground.

This study is financed by the Ministry of Economic Affairs, Agriculture and Innovations and the Dutch Productboard of Horticulture.



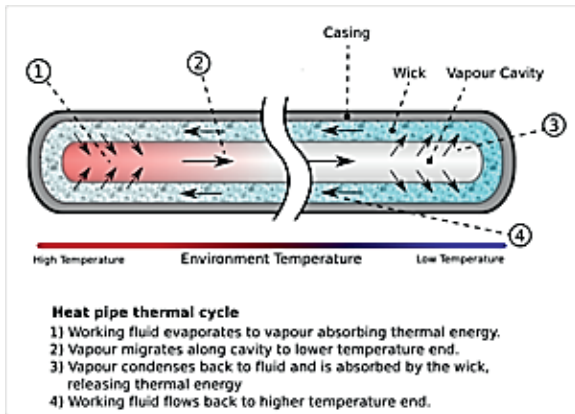


# Bijlage I Technische beschrijving verschillende typen zonnecollectoren

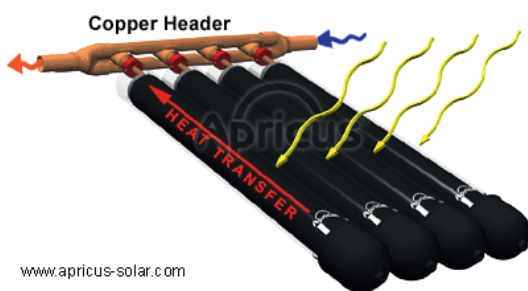


**De vacuüm buis collector**  
**Werkingsprincipe (bron: Agentschap NL)**

Zonlicht gaat door de dubbelwandige vacuüm buis en verwarmt de absorber. Door warmtegeleiding wordt de heatpipe (dunne gedeelte) warm. Het water in de heatpipe verdampt en stijgt op naar de condensor. De waterdamp condenseert in de condensor en geeft de condensatie energie af aan het manifold. Het water loopt terug in de heat-pipe en het proces begint opnieuw. De dubbelwandige vacuüm buis zorgt voor goede thermische isolatie.



*Heat-pipe met absorber en condensor.*



*Gedeelte van manifold.*

*Meerdere vacuüm buizen gekoppeld aan manifold.*



*Opstelling met vacuüm buizen.*

## De werking van een heat pipe (bron: Wikipedia)

In een heat pipe zit een medium dat warmte overdraagt. Het medium verdampt op het moment dat het in contact komt met het warme oppervlak. De warmte die hierbij wordt opgenomen is gelijk aan de verdampingswarmte plus de soortelijke warmte maal de temperatuurstijging (hoewel dit tweede deel meestal een relatief kleine component is vanwege de grote verdampingswarmte en het relatief kleine temperatuurverschil).

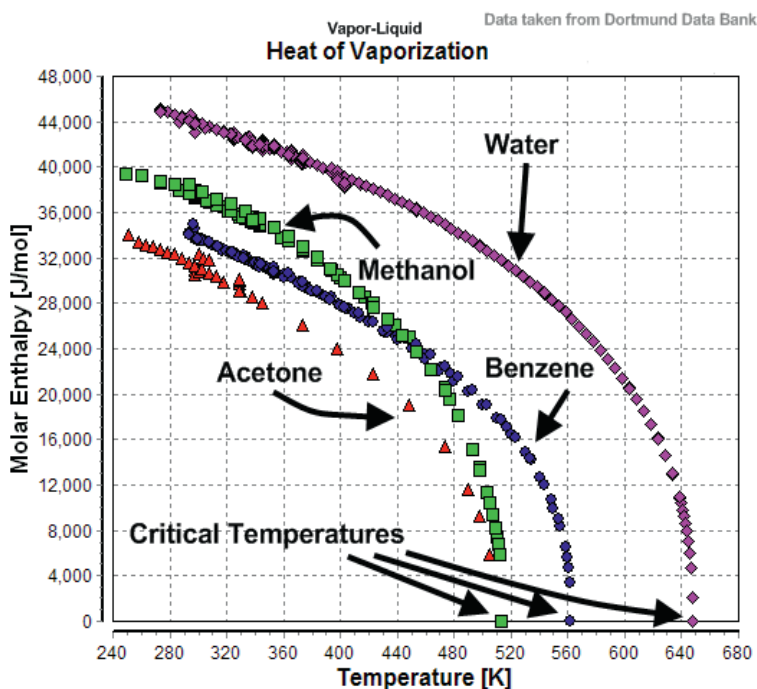
Aan de koude kant condenseert de damp weer, waarbij de opgenomen warmte vrijkomt.

Door het condenseren enerzijds en het verdampen anderzijds ontstaat er een drukverschil, dat ervoor zorgt dat het gas gaat stromen en het eigenlijke warmtetransport plaatsvindt.

Om het gecondenseerde vocht terug te krijgen naar de warme kant van de heat pipe, kan er ofwel van zwaartekracht ofwel van een capillair materiaal gebruik worden gemaakt. In het geval van zwaartekracht zal de vloeistof uiteraard naar beneden stromen, maar bij het gebruik van een capillair materiaal kan het condensvocht ook tegen de zwaartekracht in stromen. Hierdoor kunnen dergelijke heatpipes in alle richtingen en met bochten toegepast worden.

## Efficiënte warmteverplaatsing

Het grote voordeel van heat pipes is hun capaciteit om uitzonderlijk efficiënt warmte te verplaatsen. Een heat pipe is een passief apparaat zonder bewegende delen en heeft daardoor een lange levensduur. Daarnaast heeft een heat pipe een extreem goede geleiding, veel beter dan een koperen of zilveren staaf van dezelfde diameter. Er zijn heat pipes die warmte kunnen transporteren met een dichtheid tot 23 kW/cm<sup>2</sup> (warmte uitstraling van de zon ~6 kW/cm<sup>2</sup>). Deze efficiëntie komt doordat het relatief veel energie kost een materiaal van fase te laten veranderen. Deze verdampingswarmte, waarvan de heat pipe gebruik maakt, is gelijk aan de hoeveelheid warmte die vrijkomt bij of nodig is voor de faseovergang van het medium. Bij water, dat veel gebruikt wordt in heat pipes, is de verdampingswarmte 40,65 kJ/mol bij 100 °C, ofwel 2.26 MJ/kg bij 100 °C. Dit is meer dan vijf keer zoveel als de warmte die nodig is om water van 0 °C tot 100 °C te verwarmen ( $= 75,3 \text{ J/(K}\cdot\text{mol)} \times 100 \text{ K} = 7,53 \text{ kJ/mol}$ ).



## Temperatuurbereik

Een van de nadelen van heat pipes is het beperkte temperatuurbereik. Heat pipes werken alleen in het temperatuurbereik waarvoor ze ontworpen zijn. Daarbuiten hebben ze alleen nog de geleiding van het materiaal waarvan ze gemaakt zijn om warmte te verplaatsen. Dit is meestal koper. Koper is weliswaar een goede geleider maar buiten het werkgebied is de geleiding van een heat pipe slechts ongeveer 1/80e van hun capaciteit binnen het werkgebied.

Het functionele temperatuur bereik wordt bepaald door het medium in de heat pipe, alsmede het materiaal waarvan deze gemaakt is. Als de smeltemperatuur van het materiaal waarvan de heat pipe is gemaakt bereikt wordt, dan zal hij kapot gaan, doordat het medium kan ontsnappen. Dit is eigenlijk het geval alleen bij extreme toepassingen, zoals in het hittedek van een ruimtevaartuig.

Een meer reële beperking vormt het vriespunt. Als de warme kant van de heat pipe niet boven het vriespunt van het medium uit komt, dan zal het medium nauwelijks verdampen (sublimatie is mogelijk) waardoor de warmteverplaatsing drastisch afneemt.

Daarnaast is het ook nog mogelijk dat de koude kant van de heat pipe zo warm is dat het medium niet meer condenseert. Dit kan echter opgelost worden door meer medium toe te voegen bij productie; doordat er meer medium verdamppt, stijgt de druk en zal de kooktemperatuur stijgen. Hierdoor komt de temperatuur van de koude kant weer onder het kookpunt te liggen en zal er weer medium condenseren. Hierdoor zal het proces pas zijn maximum werktemperatuur bereiken wanneer al het medium zich in gasfase bevindt, of totdat het kritieke punt van het medium bereikt wordt, waarna er geen faseverandering meer plaatsvindt.

### **Toepassing in zonnecollectoren**

In moderne zonnecollectoren worden vaak heat pipes toegepast. Heat pipes zijn hier ideaal, omdat het hiermee gemakkelijk is de ingestraalde warmte van een groot oppervlak te concentreren op een klein oppervlak waar deze geaccumuleerde warmte kan worden overgedragen aan het te verwarmen water of een ander transportmedium. In vergelijking met andere manieren om dit te bewerkstelligen, zoals een massieve geleider of een leiding met stromend water heeft de heat pipe voordelen. Een heat pipe heeft een veel lagere soortelijke warmte, doordat deze voornamelijk gevuld is met een gas bij lage druk. Slechts een fractie van zijn volume is gevuld met het medium. Daarnaast heeft een heat pipe een veel grotere warmtetransportcapaciteit dan massief koper, maar ook dan een leiding met water. Dit komt doordat alle heat pipes parallel gebruikt kunnen worden, en doordat bij het rondpompen van water alle leidingen in serie staan.



## Bijlage II Technische beschrijving verschillende typen zonnecellen

### Flexibele zonnecellen

Akzo Nobel werkt sinds 1997 en van 2001-2004 samen met Shell Solar en de Universiteiten Utrecht, Delft en Eindhoven, TNO en Instituut te Jülich aan de ontwikkeling van een nieuwe generatie zonnecellen, met als hoofddoel: zonnestroom tegen een economisch concurrerende prijs (vergelijkbaar met consumententarieven).

Onderzoekers Schropp en Bezemer van de sectie grenslaagfysica van het Utrechtse Debye Instituut hebben een techniek ontwikkeld waarmee ook met amorf silicium onder bepaalde voorwaarden goede halfgeleider-eigenschappen kunnen worden bereid. Belangrijk, want in zijn amorfe vorm is silicium tegen betrekkelijk geringe kosten te bereiden.

De siliciumverbinding wordt in gasvorm aangeleverd en wordt in één-en-hetzelfde proces bij een temperatuur van 250 graden ontleed en in een heel dun laagje (een dunne film) op het glas opgedampt. (bron: nieuwsbulletin Universiteit van Utrecht: [www.ublad.uu.nl](http://www.ublad.uu.nl))

De grote sprong voorwaarts is de productiewijze: in plaats dat elk paneel separaat wordt behandeld, wordt een roll-to-roll techniek gebruikt om hele banen te behandelen.

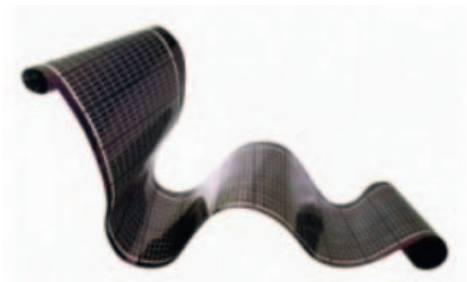
De Helianthos proeffabriek is in 2005 gereedgekomen en heeft op pilotschaal de haalbaarheid van de technologie bewezen. De schatting van de toekomstige prijs voor Helianthos-zonnecellaminaten is €100-150/m<sup>2</sup>.

De opbrengst is 50 kWh m<sup>2</sup> jr<sup>-1</sup> bij een instraling van 1.000 kWh m<sup>2</sup> jr<sup>-1</sup> (instraling in Nederland, oriëntatie op het zuiden, geen beschaduwing). Het elektrisch rendement is dus circa 5%.

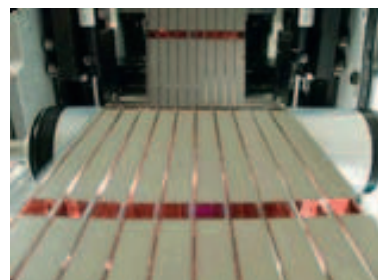
Helianthos ontwikkelt momenteel een tweede generatie zonnecellen. Deze toekomstige technologie is op basis van tandem dunne film silicium. De opbrengst is ca. 80-90 kWh m<sup>2</sup> jr<sup>-1</sup> in Nederland (rendement is 8-9%). Verwacht wordt dat dit niet tot stijging van de verkoopprijs per m<sup>2</sup> zal leiden.



Konarka Technologies, een Amerikaans bedrijf dat in 2001 werd opgericht, heeft in Massachusetts een fabriek geopend om zonnepanelen op plastic te printen. De faciliteit werd overgenomen van Polaroid. De productiefaciliteiten zijn inmiddels geschikt voor de toepassing van roll-to-roll-printtechnieken, waarbij fotonvoltaïsch materiaal volautomatisch op rollen polymeerfilm worden geprint. Na de start in 2001 zal het geruime tijd duren voor de volledige capaciteit van de fabriek kan worden benut voor de productie van de Power Plastic-zonnepanelen.



De firma Powerfilm ([www.powerfilmsolar.com](http://www.powerfilmsolar.com)) levert flexibele zonnepanelen als direct toepasbare producten zonder dat deze aanvullend behoeven te worden gelamineerd. De Uv-bestendige en weersbestendige dunne-film panelen hebben maximale afmetingen van 1,22x15 meter. De grote panelen zijn opgebouwd uit arrays van kleinere cellen, met specificaties tijdens belasting van 15,4 Vpmax en 47,848 W/m<sup>2</sup>. Er zijn een aantal standaard panelen volgens deze specificaties met een breedte van 36,8 cm. De lengte is afhankelijk van het vermogen en bedraagt 58,4 cm voor panelen van 7 W. Voor 14 W geldt een lengte van 106,7 of 154,3 cm en deze bedraagt 202,6 cm voor panelen van 28 W. Amorfe zonnecellen (dunne-film) laden ook in omgevingen met minder licht.



De panelen behoeven geen aangepaste opstelling naar windrichting of hellingshoek. Dit compenseert de enigszins lagere piekvermogens onder ideale omstandigheden (STC-waarden). De panelen zijn gelamineerd met ethyleen-tetrafluorethyleen copolymeer (ETFE) dat zeer goede thermische, mechanische, elektrische en chemische eigenschappen heeft en 95% van het zichtbare licht doorlaat. De gespecificeerde levensduur is meer dan 20 jaar. Op verzoek zijn ook panelen met een bitumineuze lijmlaag aan de achterzijde verkrijgbaar.

## Bijlage III Leveranciers en dienstverleners van systemen voor zonne-energie

Een lijst met in de glastuinbouw bekende leveranciers en installateurs van zonnepanelen is weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 4. Overzicht leveranciers van zonnepanelen geïntegreerd in kassen.

Bedrijf	Product	Website
Lucel BV	Greenstar Solar	<a href="http://www.lucel.nl">www.lucel.nl</a>
Prinsgroep		<a href="http://www.prinsgroup.com">www.prinsgroup.com</a>
Hermanstechniek	Powerglaz	<a href="http://www.hermanstechniek.nl">www.hermanstechniek.nl</a>
Wilk v.d.Zande		<a href="http://www.wvds.nl">www.wvds.nl</a>
Van der Hoeven	NOV-LITE	<a href="http://www.vanderhoeven.nl">www.vanderhoeven.nl</a>
Boal	Lumenex® Solar	<a href="http://www.boal-systemen.nl">www.boal-systemen.nl</a>
Reytec		<a href="http://www.reytecinnovationprojects.nl">www.reytecinnovationprojects.nl</a>
DEC		<a href="http://www.dec-energy.nl">www.dec-energy.nl</a>
VDH Solar Systems	Rotating Solar	<a href="http://www.vdh-solar.com">www.vdh-solar.com</a>
Van der Valk Systems	Solar Tracker® Greenhouse	<a href="http://www.valksolarsystems.nl">www.valksolarsystems.nl</a>
Van der Valk Kleijn kassenbouw	Solar Frame Dek	<a href="http://www.valkkleijn.nl">http://www.valkkleijn.nl</a>

Een algemene lijst met leveranciers/dienstverleners van zonnepanelen komt uit het bestand van de branche organisatie voor zonne-energie "Holland Solar". (<http://www.holandsolar.nl>).





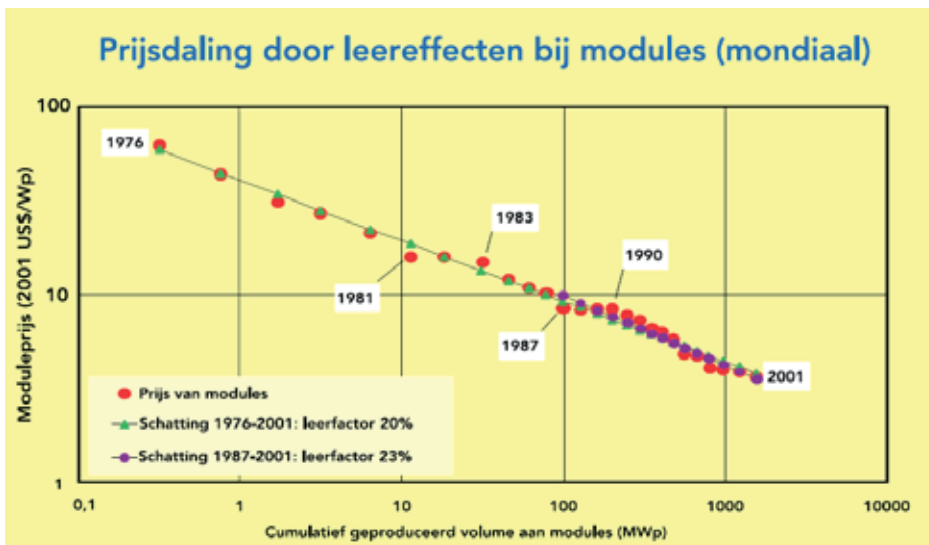




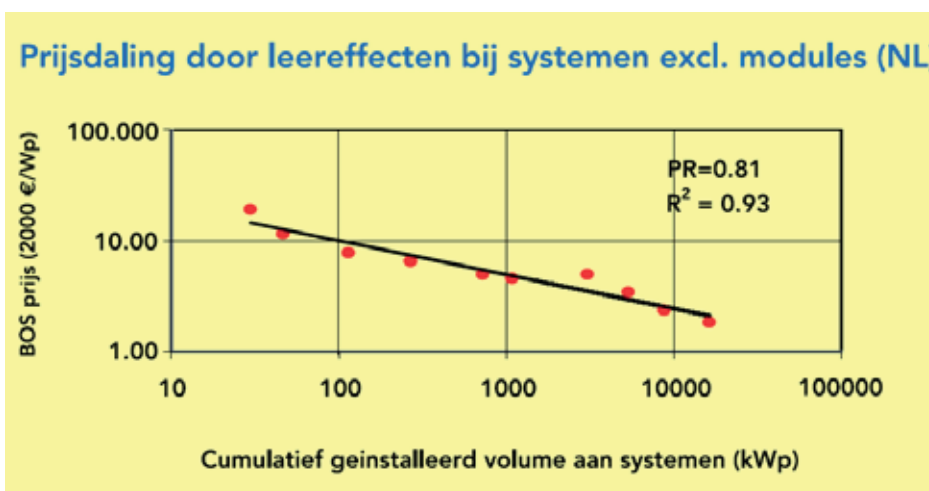


## Bijlage IV Eigen zonne-energie in concurrentie met ingekochte duurzame energie

Holland Solar is de brancheorganisatie van bedrijven die zijn betrokken bij de levering, de installatie en de productie van zonnepanelen in Nederland. De Transitie en Roadmap commissie van Holland Solar (die bestaat uit ECN, Akzo Nobel Chemicals, Philips Lighting, Scheuten Solar Systems, Shell Solar, Siemens Nederland, Holland Solar Energy, Stroomwerk en New-Energy-Works) geeft in haar Roadmap (Transitiepad Zonnestroom, 200519) de prijsontwikkeling aan van zonnepanelen in Nederland. Het overzicht laat zien dat vanaf 1976 de prijs van zonnepanelen met 20% daalt bij elke verdubbeling van de cumulatieve omzet. Vanaf 1987 gaat de ontwikkeling nog sneller met een prijsdaling van 23% bij elke verdubbeling van de omzet. Prijsdalingen vinden niet alleen plaats bij zonnepanelen zelf, maar ook bij de rest van de systeemcomponenten en installaties.

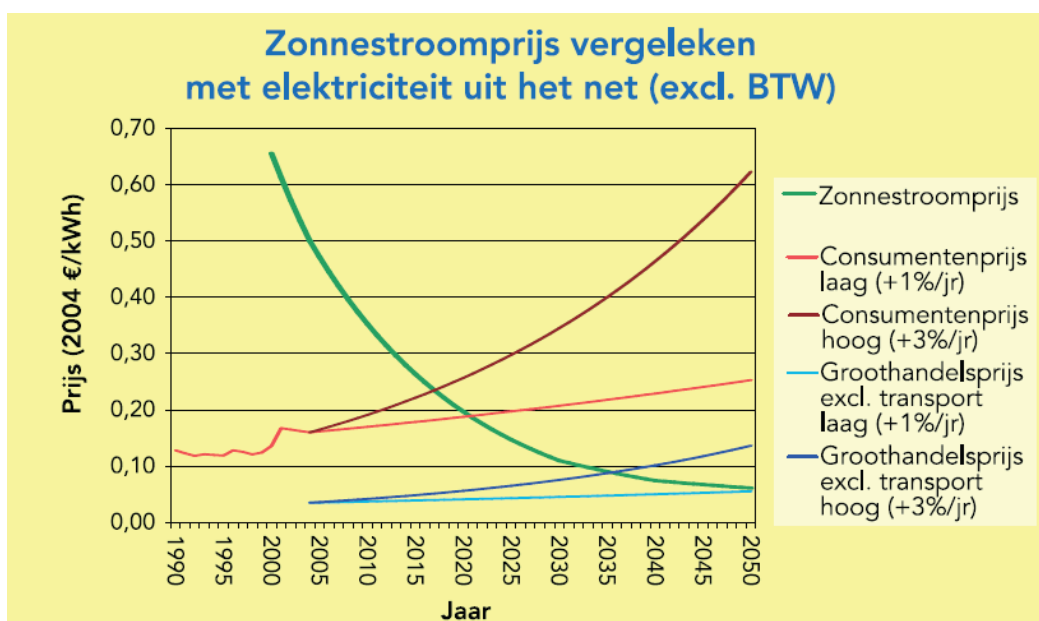


Figuur 42. Prijsdaling van zonnepanelen sinds 1976 (bron Holland Solar 2005).



Figuur 43. Prijsdaling als gevolg van leersystemen (bron Holland Solar, 2005).

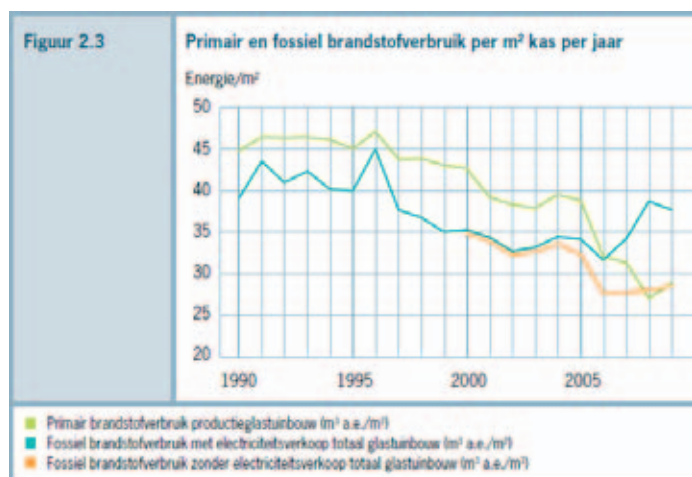
Het rapport geeft aan dat in 2005 zonnestroom in alle gevallen veel duurder is dan elektriciteit uit het openbare net. Voor zonne-energie zullen in de toekomst diverse "break-even points" worden bereikt, waardoor in de bijbehorende marktsegmenten een sprong zal worden gemaakt. Grofweg gaat het daarbij om de opwekkosten van zonne-energie die zich bewegen in de range van piektarieven en consumentenprijzen (incl. belastingen) tot brandstofkosten van grootschalige opwekking. Het buitenland (Japan) claimt inmiddels een eerste break-even te hebben bereikt, wat komt door de hoge, tijdsafhankelijke elektriciteitstarieven en gunstige financieringscondities. In Zuid-Europa zullen er binnen enkele jaren ook break-even points worden bereikt, vooral doordat in die landen de elektriciteitsproductie per eenheid geïnstalleerd vermogen hoog ligt. In de onderstaande figuur is te zien dat in de Nederlandse situatie met de voorspelde kostendaling van zonnestroom en een voorzichtig ingeschatte stijging van het tarief voor kleinverbruikers tussen 2015 en 2020 break-even wordt bereikt. Indien de elektriciteitsprijzen sneller stijgen, zal dit moment uiteraard sneller worden bereikt. Daarna zal zonnestroom in prijs verder dalen om uiteindelijk in het gebied van groothandelsprijzen te komen.



Figuur 44. Prijswontwikkeling zonnestroom (reëel sinds 2001 tot 2005, geprognosticeerd tot 2050) (bron Holland Solar 2005).

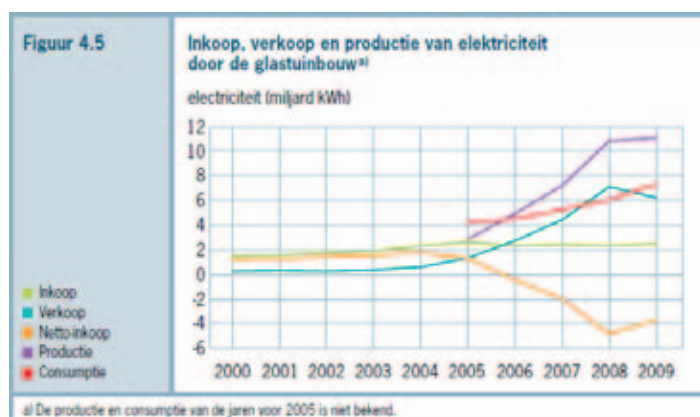
## Bijlage V Energiebehoefte glastuinbouwbedrijven

Het energieverbruik van de glastuinbouw was in 2009 gemiddeld 29 m<sup>3</sup> aardgas equivalente per m<sup>2</sup> kas zonder elektriciteitsverkoop. Een hoger totaal verbruik kan worden geregistreerd met elektriciteitsverkoop. Deze tuinders hebben een hoger energieverbruik voor het opwekken van elektriciteit met hun WKK.



Figuur 45. Energieverbruik van glastuinbouwbedrijven gemiddeld per jaar (bron LEI 2010).

De elektriciteitsconsumptie per glastuinbouwbedrijf neemt jaarlijks toe en bedraagt voor de gehele sector in 2009 ruim 7 miljard kWh<sup>20</sup>. Bij een areaal van 10324 ha glastuinbouw<sup>21</sup> in hetzelfde jaar, bedraagt de gemiddelde elektriciteitsconsumptie 70 kWh/m<sup>2</sup> kas. Het wordt verwacht dat het elektriciteitsverbruik verder stijgt door het intensiveringsproces (belichting, automatisering, mechanisering, koeling etc.) en de sanering van vooral extensievere bedrijven met een laag elektriciteitsverbruik<sup>1</sup>. Vooral het areaal belichtende teelten met een energieverbruik van gemiddeld 200 kWh/m<sup>2</sup> kas neemt verder toe.



Figuur 46. Elektriciteitsverbruik van glastuinbouwbedrijven gemiddeld per jaar (bron LEI 2010).

20 LEI 2010. Energiemonitor van de Nederlandse Glastuinbouw 2009. LEI rapport 2010-091.

21 LEI 2011. Land- en Tuinbouwcijfers 2011. LEI rapport 2011-029.





