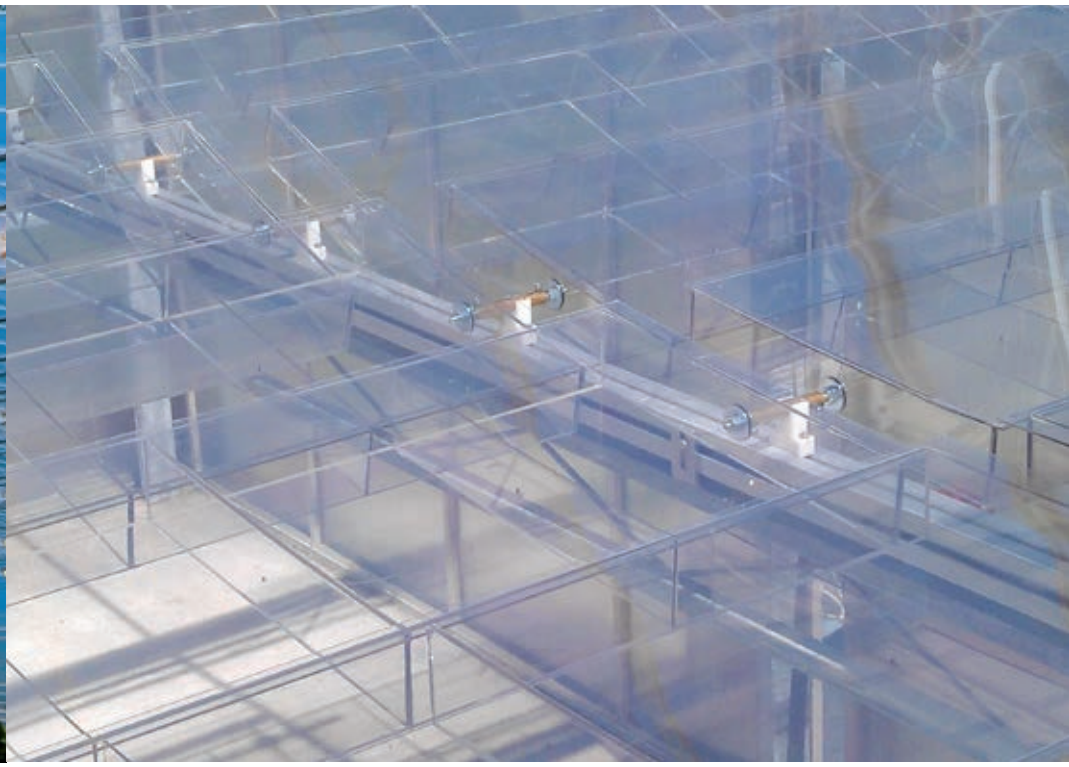
WAGENINGEN UR
For quality of life

ELKAS - Eindrapportage

Elektriciteitsleverende kas fase II

G.L.A.M. Swinkels, H.J.J Janssen, H.F. de Zwart, H.P. van Dorland, B.A.J. van Tuijl, M. Arslan





Productschap Tuinbouw
Kas als Energiebron
Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie

Rapport GTB-1225



Abstract

The consumption of natural gas by the Dutch horticulture is approximately 10% of the total Dutch consumption. The horticultural sector aims that by 2020 the cultivation of new greenhouses and climate will be economically viable. The Product Board for Horticulture (PT), the Ministry of Economic Affairs, Agriculture and Innovation (EL & I) and LTO Glaskracht work together in the program "Kas Als Energiebron" to realize this ambition in which solar energy is an important transition path.

One way to create a climate neutral greenhouse is the use of a spectrally selective filter for separating near infrared radiation (NIR) from the photosynthetically active radiation (PAR) which can then be converted into electricity and heat. By concentrating sunlight, the solar cell area can be limited and with this the amount of blocked PAR which is a prerequisite for growing greenhouse vegetables under Dutch conditions. In the period 2007 - 2008 the Elkas phase I research project was carried out in which the potentials of this principle were examined. Because the results from phase I gave rise to further research, the project Elkas phase 2 started in 2010. Similar to phase I simulations were performed to achieve an optimal design. The novel concept is based on a concentrator-collector system per span and consists of horizontal rotating lamellae with integrated NIR filter which separate and reflect the NIR radiation on to the CPV module located at the ridge of the greenhouse.

With ray-tracing software, this concept is further optimized for parameters such as number of lamellae, focal length per lamella, light distribution on the CPV module, dimensions and tolerances. The final concept is realized in a 120 m^2 Venlo-type experimental greenhouse. In phase I became clear that regarding PAR transmittance and NIR reflectance the 3M Ebiral performs best as a commercially available NIR filter. However, the reflectivity of this film is limited to about 40% of the NIR radiation.

The manufacture of lamellae proved to be a bottleneck. The transparent 50 cm wide, focusing lamellae must be rigid. Due to the high cost for bending of tempered glass the decision is made to use plastic (PET) as a base material for manufacturing the lamellae. After a series of tests it became clear that a box-structure is required to provide sufficient rigidity. Jansen Thermoforming B.V. has developed a method for lamination of the NIR film on the base material without compromising on the optical properties. Wageningen UR glued the individual components together and created the lamellae. The CPV module consists of four segments, each with 11 cells, wired alternately parallel and serial to cope with the occurring shadow patterns caused by the greenhouse. The module is cooled with water at a temperature between 20 and 30 °C.

During the period June - October 2012 the experimental greenhouse has been in continuous operation without flaws. Based on extrapolation of the measured data a realistic expectation of the produced electricity is 6 to 14 kWh/m^2 per year for Dutch conditions. In Mediterranean areas 10 to 25 kWh/m^2 per year is expected. The corresponding produced heat is 150 to 400 MJ/m^2 per year, dependent on the performance of the NIR filter and the systems accuracy.

An economic survey shows that currently the concept is not economically feasible. The main reason for this is the relatively low efficiency for harvesting the solar energy and the amount of PAR which is blocked by the system. The concept is not expected to be feasible in the (near) future because conventional PV is getting cheaper in relation to concentrated PV (CPV). This applies in particular to Northern Europe where the performance of concentrated CPV is about 30% in relation of conventional PV. In addition, CPV in greenhouses suffer from shading caused by constructional elements and require an alternative electrical wiring.

Another problem is the (series) production of the lamellae. It is very difficult to manufacture high transparent, single-layer lamellae with integrated NIR filter and all the requirements for a solar concentrator, against acceptable costs. The experiment showed that deformation of the lamellae due to deflection seriously affects the focus and hence the electricity production.

Although the working principle of the Elkas phase II has been proved through simulations and experiments, the concept has a low prospect for application in the Dutch greenhouse horticulture.

Apart from the Elkas concept, an improved NIR filter could be valuable for greenhouse vegetables, especially in areas with high solar radiation.

© 2012 Wageningen, Foundation Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) research institute, Wageningen UR Greenhouse Horticulture (Wageningen UR Glastuinbouw).

Inhoudsopgave

	Samenvatting			5
1	Inleiding			7
2	Ontwerp			9
	2.1	Inleiding		9
	2.2	Uitgangspunten		9
		2.2.1	Ray-tracing model	9
		2.2.2	Definities	9
		2.2.3	Jaarrondberekeningen	10
	2.3	Lichtverdeling op PV cellen		11
	2.4	Concepten		12
	2.5	Inleiding		12
	2.6	Concept 1: lamellen onder de zuidzijde van de kap		13
		2.6.1	Uitgangspunten	13
		2.6.2	Optimalisatie lamelbreedte	17
		2.6.2.1	Circulair gepositioneerde lamellen	19
		2.6.2.2	Invloed dakhelling	20
		2.6.2.3	Invloed van roeden en lamelsegmenten	22
	2.7	Parabolische trogcollector		22
	2.8	Concept 3: Venlo type met lamellen op tralieligger		23
		2.8.1	Concept	23
		2.8.2	Generieke focusafstand	25
		2.8.3	Individuele focusafstand	26
		2.8.4	Compensatie slagschaduw	27
		2.8.5	Verticale positie lamellen	29
		2.8.6	Invloed glas	30
		2.8.7	Doorbuiging	30
		2.8.8	Hoeknauwkeurigheid	31
	2.9	Conclusies		31
3	Theoretische prestaties			33
	3.1	Uitgangspunten		33
	3.2	Resultaten		34
		3.2.1	Energieproductie	34
		3.2.2	Hemisferische PAR-transmissie	35
4	Ontwerp en bouw proefkas			37
	4.1	Bouw van de kas		37
	4.2	Lamellen		38
	4.3	Aandrijving		39
	4.4	Meet- en regelsystemen		40
	4.5	CPV-module		41
		4.5.1	Theorie	41
		4.5.2	Implementatie	45
		4.5.3	Besturingssoftware	46
5	Meetresultaten en opbrengstbepalingen			49

	5.1	Opzet	49
	5.2	Focussering	50
	5.3	Thermisch en elektrisch vermogen	51
6	Verklaring verschillen met simulaties		57
	6.1	Randeffecten	57
	6.2	Doorbuiging	57
7	Economische verkenning		61
8	Conclusies		63
	Literatuur		65
	Publiciteit		67

Samenvatting

Het verbruik van aardgas door de Nederlandse glastuinbouw bedraagt ca. 10% van het totale Nederlandse verbruik. De glastuinbouwsector heeft de ambitie dat vanaf 2020 de teelt in nieuwe kassen klimaatneutraal en economisch rendabel zal zijn. Het Productschap Tuinbouw (PT), het ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie (EL&I) en LTO Glaskracht werken samen in het programma Kas als Energiebron om deze ambitie waar te maken. In dit programma zijn een aantal transitiepaden opgesteld om deze ambitie te kunnen verwezenlijken waaronder het transitiepad zonne-energie uit het onderwerp duurzame energiebronnen.

Een manier om een klimaatneutrale kas te realiseren of een bijdrage te leveren hieraan is het gebruiken van een spectraal selectief filter waarmee nabij infrarode straling (NIR) kan worden gescheiden van het groeilicht (PAR) dat vervolgens kan worden omgezet in elektriciteit (hoogwaardige energie) en warmte. Door de concentratie van zonlicht kan het oppervlak aan zonnecellen beperkt blijven en wordt weinig PAR onderschept wat een absolute voorwaarde is voor het telen van glasgroenten onder Nederlandse condities. In de periode 2007 - 2008 is het onderzoeksproject Elkas fase I uitgevoerd waarin de potenties van dit principe onderzocht zijn. Omdat de resultaten uit fase I aanleiding gaven tot verder onderzoek is in 2010 het project Elkas fase 2 gestart. Evenals in fase I zijn ook voor fase II simulaties uitgevoerd om tot een optimaal ontwerp te komen. Hierbij is de bestaande proefkas met een asymmetrisch gebogen dek als uitgangpunt genomen. Gaandeweg het project zijn verschillende alternatieven onder de loep genomen en is dit idee uiteindelijk verlaten omdat het meest perspectiefvolle concept geïntegreerd kan worden in standaard Venlo kastype met minimale aanpassing. Dit concept gaat uit van een concentrator-collector systeem per kap en bestaat uit horizontale draaibare lamellen met NIR filter die de gereflecteerde NIR straling op de CPV-module concentreren die in de nok van de kas geïntegreerd is. Na een eenmalige voorinstelling kan de zon gevolgd worden met dezelfde hoekverstelling voor alle lamellen. Hierdoor kunnen in principe alle lamellen met één motor aangestuurd worden.

Met ray-tracing software is dit concept verder geoptimaliseerd waarbij gekeken is naar het aantal lamellen, de focusafstand per lamel, de lichtverdeling op de CPV-module, afmetingen en toleranties. Het eindconcept is gerealiseerd in een 120 m^2 proefkas met Venlo kasdek en een verlaagde tralie. Hierop zijn 8 stuks 50 cm brede focusserende lamellen gemonteerd op 1.25 m onder de goot. Om de fabricagekosten te beperken is gekozen voor lamellen met gelijke focusafstand van 2.75 m. Direct onder de nok hangt de watergekoelde CPV-module met een effectieve cel breedte van 35 mm. Uit fase I is eerder gebleken dat qua lichtdoorlatendheid in het PAR-gebied en reflectie in het NIR-gebied de 3M Ebiral de beste commercieel verkrijgbare NIR filter is. De reflectie van deze folie is echter beperkt ca. 40% van de NIR straling.

De fabricage van lamellen bleek een knelpunt. De transparante 50 cm brede, focusserende lamellen moeten vormvast en torsie stijf zijn. Door de hoge kosten voor het buigen van glas is besloten de lamellen uit kunststof te vervaardigen. Na een serie tests is werd duidelijk dat een box-constructie nodig was om voldoende stijfheid te creëren. Jansen Thermoforming B.V. heeft een methode ontwikkeld om de NIR folie op het basismateriaal PET aan te brengen waarbij de optische eigenschappen intact blijven en heeft de losse componenten aangeleverd waarna deze door Wageningen UR tot lamellen verlijmd zijn.
De CPV-module bestaat uit vier segmenten met elk 11 cellen die afwisselend parallel en in serie bedraad zijn zo slim mogelijk om te gaan met de optredende slagschaduw ten gevolge van de kasconstructie. Het koelsysteem bestaat uit een koelbuis met een watertemperatuur tussen de 20 en 30 °C.

Gedurende de periode juli t/m sept 2012 is een proefkas het werkingsprincipe aangetoond. Het systeem is over de periode juni t/m oktober 2012 vrijwel continu operationeel geweest. Op basis van extrapolatie van de gemeten rendementen ligt een reële verwachting van de elektriciteitsproductie ligt tussen de 6 en 14 kWh/m2 per jaar voor Nederlandse condities. Met dezelfde kas kan in Mediterrane gebieden 10 tot 25 kWh/m2 per jaar geproduceerd worden. De verwachte warmteoogst ligt dan tussen de 150 en 400 MJ/m2 per jaar. Dit komt overeen met 4.7 en 12.6 m3/m2 per jaar a.e.

Uit de economische verkenning blijkt dat het concept momenteel niet economisch rendabel is. De belangrijkste redenen hiervoor is het beperkte rendement voor het omzetten van zonne-energie in elektriciteit en warmte en het verlies aan PAR

dat het systeem tot gevolg heeft. De verwachting is dat het concept in de (nabije) toekomst wel rendabel zal worden omdat PV steeds goedkoper wordt in verhouding tot geconcentreerde PV (CPV). Dit geld met name voor Noord Europa waar met geconcentreerde CPV maximaal ca. 30% van de opbrengst gehaald word van niet-geconcentreerde PV. Daar komt bij dat CPV in kassen te lijden heeft van beschaduwing van de PV-cellen waardoor een alternatieve elektrische schakeling de productie van CPV-modules relatief duur maakt.
Een ander knelpunt is de (serie)productie van lamellen. Het is vrijwel onmogelijk gebleken om tegen acceptabele kosten een hoog transparante enkel laags lamel met geïntegreerde NIR filter te vervaardigen die met voldoende rendement als concentrator kan fungeren. Tijdens de praktijkproef is gebleken dat vervorming ten gevolge van doorbuiging ernstig afbreuk doet aan de focussering en daarmee de elektriciteitsproductie.

Alhoewel het werkingsprincipe van de Elkas fase II middels simulaties en een praktijkexperiment voldoende zijn aangetoond biedt het concept weinig perspectief voor toepassing in de Nederlandse glastuinbouw.
Los van het Elkas principe kan een verbeterd NIR filter waardevol zijn voor glasgroenten, zeker in gebieden met hoge stralingsintensiteit.

1 Inleiding

Het verbruik van aardgas door de Nederlandse glastuinbouw bedraagt ca. 10% van het totale Nederlandse verbruik. Al vanaf de jaren '90 zijn er door sector en overheid afspraken gemaakt om het energiegebruik fors te verminderen. Werd in het verleden het energiegebruik uitgedrukt in termen van energie-efficiëntie, tegenwoordig is het vooral het absolute energiegebruik belangrijk en daarbij de reductie van de CO_2-emissie. De glastuinbouwsector heeft de ambitie dat vanaf 2020 de teelt in nieuwe kassen klimaatneutraal en economisch rendabel zal zijn. Het Productschap Tuinbouw (PT), het ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie (EL&I) en LTO Glaskracht werken samen in het programma Kas als Energiebron om deze ambitie waar te maken. In dit programma zijn een aantal transitiepaden opgesteld om deze ambitie te kunnen verwezenlijken waaronder het transitiepad zonne-energie uit het onderwerp duurzame energiebronnen.

In gangbare tuinbouwkassen wordt de beschikbare zonnewarmte nu slecht benut doordat een deel van het jaar te veel zonnewarmte wordt ingestraald en dit teveel door ventilatie naar de omgeving wordt afgevoerd. Deze energiehoeveelheid kan voldoende zijn voor de verwarming van de kas, maar de periode van aanbod komt niet overeen met de vraag naar energie. Het zonnespectrum bestaat uit verschillende golflengten en kan energetisch grofweg in twee gelijke delen verdeeld worden: zichtbaar licht en nabij infrarood licht (NIR). Voor planten geldt dat alleen het zichtbare gedeelte van het zonlicht, ofwel photosynthetically active radiation (PAR), van direct belang is voor de groei. Het nabij infrarode deel van de zonnestraling is gedurende een groot deel van de zomer niet gewenst terwijl het zichtbare licht van grote waarde is. Er zijn verschillende technieken waarmee de overtollige warmte via een warmtewisselaar uit de kaslucht onttrokken kan worden. Groot nadeel van deze technieken is het over het algemeen laagwaardige energieniveau van de warmte die geoogst kan worden. Een systeem waarbij de onttrokken overtollige energie direct omgezet wordt in hoogwaardige energie verdient de voorkeur.

Als de NIR straling geblokkeerd zou kunnen worden wordt de warmtebelasting van de kas verlaagd zodat deze meer gesloten kan blijven. Dit biedt allerlei voordelen waarvan een verminderde koellast en/of ventilatie de belangrijkste is. Als de geblokkeerde NIR straling benut kan worden voor hoogwaardige energieopwekking, snijdt het mes aan twee kanten. De elektriciteit leverende kas (Elkas) is op dit principe gebaseerd en zet overtollige energie in de vorm van NIR straling direct om in hoogwaardige elektrische energie. De in het proces vrijkomende warmte kan, op een vergelijkbare manier als in bestaande (semi)gesloten kassystemen, worden opgeslagen voor benutting in het stookseizoen.

In de periode 2007 - 2008 is het onderzoeksproject Elkas Fase I uitgevoerd waarin de potenties van dit principe onderzocht zijn. Hierbij zijn een aantal mogelijke concepten onderzocht en is van het beste concept uiteindelijk een proefkas gebouwd waarin gedurende de zomer van 2008 metingen zijn uitgevoerd. Het concept uit Elkas fase 1 bestaat uit een concentrator die het inkomende zonlicht selectief reflecteert en alleen de NIR straling focusseert op een collector bestaande uit een array van zonnecellen, de zgn. CPV-module. De concentrator wordt gevormd door een asymmetrisch kasdek waarvan de lange Zuidzijde bestaat uit gebogen glas met geïntegreerde NIR filter bestaande uit spectraal selectieve folie. Door de concentratie van zonlicht kan het oppervlak van de collector beperkt blijven en wordt weinig zichtbare straling (PAR) onderschept wat een absolute voorwaarde is voor de slagingskans van het concept. De CPV-module wordt gekoeld zodat ook laagwaardige thermische energie beschikbaar komt om de warmtevraag in de winter energiezuinig te dekken.

Omdat de resultaten uit Elkas fase I aanleiding gaven tot verder onderzoek is in 2010 het project Elkas fase 2 gestart waarvan dit eindrapport het resultaat is. In dit rapport wordt beschreven hoe de knelpunten uit fase I zijn opgelost, welke keuzes zijn gemaakt om tot een nieuw concept te komen en worden de resultaten gepresenteerd van de metingen die gedurende de zomer van 2012 in de nieuw gebouwde proefkas hebben plaatsgevonden.

2 Ontwerp

2.1 Inleiding

Evenals in project Elkas fase I zijn voor fase II simulaties uitgevoerd om tot een optimaal ontwerp te komen. Bij de start van dit werkpakket is de bestaande proefkas als uitgangpunt genomen. Dit was de proefkas uit fase I met het gebogen glas en de verschillende dakhellingen voor de Noord- en Zuidzijde van het kasdek. Gaandeweg het project is dit idee verlaten en is besloten om een nieuwe kas te bouwen met een standaard Venlo kasdek. In de volgende paragrafen zijn de verschillende ontwerpstappen beschreven die hieraan ten grondslag liggen.

2.2 Uitgangspunten

2.2.1 Ray-tracing model

Het simulatiemodel Raypro berekent de optische eigenschappen van een object in een 3D omgeving. Het model is gebaseerd op ray-tracing, een methode waarmee een lichtstraal vanaf een lichtbron door het object gevolgd wordt. De geometrie van het object wordt vertaald naar een verzameling vlakken in een 3D omgeving. Licht wordt gemodelleerd als een groot aantal lichtstralen. De interactie van de lichtstraal met het object wordt bepaald op basis van optische eigenschappen van het materiaal en optische wetten (Snellius, Fresnel). Zo wordt rekening gehouden met de lichtbreking, -absorptie en doorlatendheid van het object wanneer een lichtstraal een object raakt. Afzonderlijke lichtstralen worden, op basis van hun berekende hoek en intensiteit, uitputtend door het object heen gevolgd totdat de intensiteit onder een bepaalde drempelwaarde komt. Zo kan de lichtstraal na opdeling in allemaal deel-straaltjes worden geïnterpreteerd als reflectie, transmissie of absorptie. Ray-tracing geeft een zeer realistische nabootsing van de werkelijkheid. Het meenemen van onderlinge invloeden van objecten, vaak een probleem bij niet op ray-tracing gebaseerde lichtberekeningsmodellen, gaat vanzelf. Dit maakt Raypro bijzonder geschikt voor het berekenen van de lichttransmissie van o.a. kasdekken of kasdekmaterialen, voor zowel direct als diffuus licht.

In Raypro kan een object worden gedefinieerd als oneindig of als eindig. In het eerste geval bestaat een object uit een aantal identieke vormen en wordt de kleinste vorm bepaald die niet repeterend is. Deze wordt als uitgangspunt genomen voor de berekeningen en wordt in een assenstelsel geplaatst dat begrensd wordt door 6 grensvlakken, 2 horizontale (bodem- en topvlak) en 4 verticale (zijvlakken), tezamen een eenheid cel vormend. Om de oneindigheid van het object te simuleren worden de uit de cel tredende lichtstralen opnieuw ingebracht. Bij een oneindig object geldende de resulterende transmissie, absorptie etc. altijd als factor ten opzichte van het invallend licht per m^2 grondoppervlak. Bij een eindig object wordt door de gebruiker zelf een referentievlak gekozen.

Het model Raypro is in diverse onderzoeken gevalideerd (Swinkels, 2001).

2.2.2 Definities

Bij de berekeningen worden onderstaande efficiëntie gehanteerd:

PV-efficiëntie [%]
De efficiëntie van PV-cellen in het omzetten van loodrecht invallend zonlicht in elektriciteit. Bij andere hoeken dan loodrecht zal de PV-efficiëntie lager zijn.

Concentratiefactor [-]
Het relatieve oppervlak van de CPV-module per eenheid vloeroppervlak. Dit geeft aan hoe sterk het licht geconcentreerd wordt.

Concentratie-efficiëntie [%]
De hoeveelheid zonlicht (aantal fotonen) op de PV-zijde van de collector als percentage van de totale inkomende hoeveelheid zonlicht, per oppervlakte eenheid van de kas.

Gewogen concentratie-efficiëntie [%]
De concentratie-efficiëntie gewogen naar de momentane maximale straling ten opzichte van de gemiddelde straling voor die dag.

Systeem-efficiëntie [%]
Het elektrisch vermogen per oppervlakte-eenheid kas (W/m^2) dat door de collector opgewekt wordt als percentage van door totale inkomende NIR-straling (W/m^2) aan zonlicht. Hierin is de gereflecteerde UV-VIS niet meegenomen, maar wel met alle andere geometrische beperkingen.

Elektriciteitsopbrengst [kWh/jaar]
Het jaartotaal aan opgewekte elektriciteit uitgaande van een bepaald PV-rendement waarbij wel geen rekening gehouden is met rendementsverliezen ten gevolge van niet homogene belichting (schaduwplekken) van de collector.

2.2.3 Jaarrondberekeningen

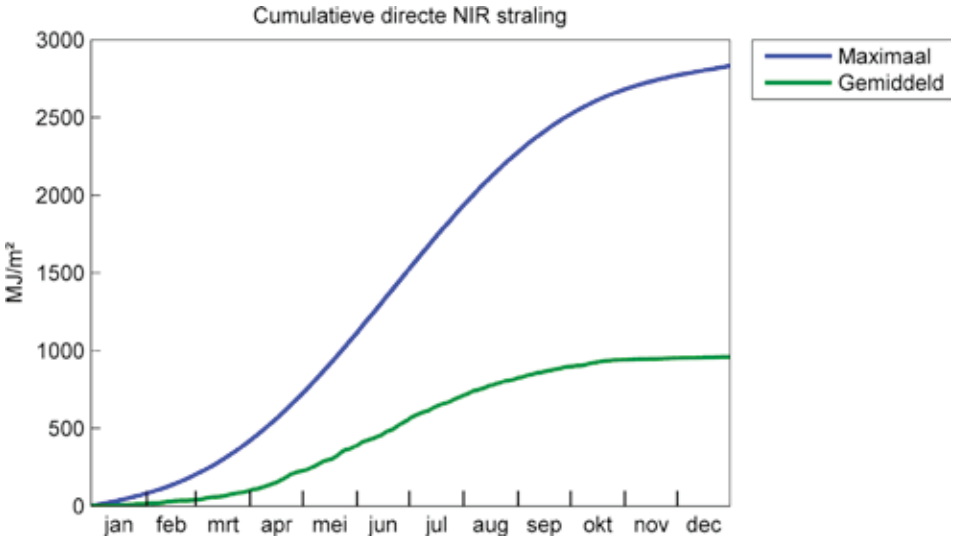
De mate van concentratie en de daaraan gekoppelde hoeveelheid geproduceerde elektriciteit is afhankelijk van de draaihoek van de lamellen en de positie van de zon. Om de jaarlijkse opbrengst van het systeem te kunnen bepalen moet voor een groot aantal tijdsintervallen gedurende het jaar de zonnestand bepaald worden en de daarbij behorende efficiëntie van het systeem. Deze efficiënties worden van te voren uitgerekend voor alle mogelijke combinaties van azimut en elevatie en in een tabel opgeslagen. De efficiënties worden vervolgens aan de hoeveelheid direct licht, die geldt voor dat tijdsinterval, gekoppeld waardoor een opbrengst per interval uitgerekend kan worden. Door sommatie van de opbrengsten kan een jaarrond opbrengst berekend worden.

De stralingsgegevens zijn gebaseerd op het SEL-jaar, een soort 'gemiddeld' klimaatjaar met alle kenmerken van het weer gedurende het jaar. Het SEL-jaar is samengesteld uit de meest gemiddelde maanden van KNMI-data (De Bilt), uit een periode van 10 jaar. Door gebruik te maken van dit selectiejaar kunnen resultaten van berekeningen beter met elkaar worden vergeleken en kunnen de uitkomsten beter over een langere termijn worden beschouwd.

De procedure voor de uurlijkse opbrengst is als volgt:
- Bepaling van de stand van de zon (azimut en elevatie).
- Bepaling van de hoeveelheid directe NIR-straling.
- Op basis van de zonnestand worden de bijbehorende efficiëntie uit een vooraf geproduceerde tabel geïnterpoleerd.
- De efficiëntie wordt vermenigvuldigd met de hoeveelheid directe NIR. Dit levert een hoeveelheid geabsorbeerde NIR op.
- Afhankelijk van de PV-configuratie wordt de elektriciteit begrensd door de laagste NIR-intensiteit op het paneel.
- De hoeveelheid geabsorbeerde NIR straling wordt vermenigvuldigd met het bijbehorende fotovoltaisch NIR-rendement wat de hoeveelheid opgewekte elektriciteit per m^2 vloeroppervlak oplevert.

Verder geldt:
- Simulaties zijn niet spectraal uitgevoerd
- Het rendement van de zonnecellen is 15% van de NIR-straling.
- De hoeveelheid NIR in globale straling wordt gesteld op 50%.
- De maximale directe globale straling is volgens:

  $$MaxNIR = 0.5 \times \max(0, \text{Sin(elevation)} \times 1200 \times 0.73)\ [W/m^2]$$



Figuur 1. Hoeveelheid directe NIR straling voor een gemiddeld jaar.

Bij de simulaties ten behoeve van het bepalen van het optimale ontwerp, waarvan de resultaten in dit hoofdstuk gepresenteerd zijn, zijn geen spectrale eigenschappen meegenomen. Ook zijn niet altijd dezelfde uitgangspunten genomen doordat deze berekeningen gedurende een lange doorlooptijd zijn gemaakt, waar er bij toenemende detaillering enige veranderingen moesten worden doorgevoerd in de wijze waarop de ontwerpoptimalisatie werd uitgevoerd. Hierdoor moeten de uitkomsten vooral indicatief en gezien worden. In hoofdstuk 3 is het definitieve ontwerp echter wel spectraal doorgerekend waardoor de uitkomsten een stuk realistischer zijn en dichter bij de gemeten waarden liggen.

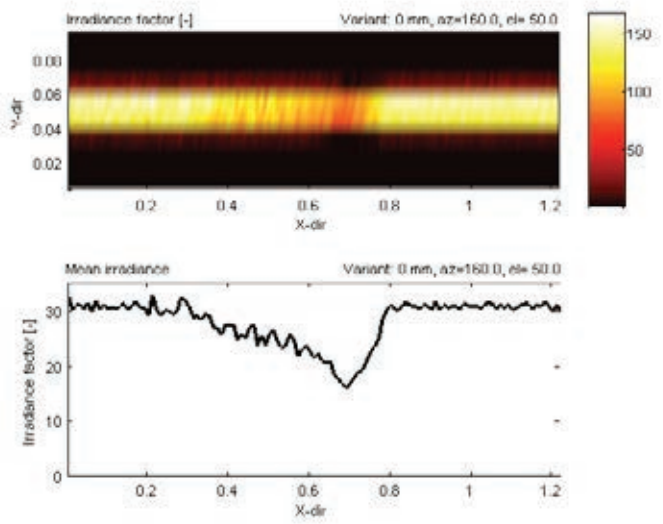
2.3 Lichtverdeling op PV cellen

Bij concentratie van direct zonlicht in één dimensie, zoals bij een lamellensysteem het geval is, zullen onregelmatigheden in de gereflecteerde lichtbundel zorgen voor onregelmatigheden in de belichting van de collector (schaduwplekken, schaduwlijnen). In het geval van serieschakeling van PV-cellen zal hierdoor de stroomopbrengst begrensd worden door de PV-cel met de laagste lichtintensiteit.

De onregelmatigheden in lichtverdeling kunnen een aantal oorzaken hebben:

- Doordat een lamel niet uit één stuk kan bestaan maar uit een aantal losse elementen met een zekere tussenruimte (o.a. voor ondersteuning en ophanging) zal tussen de lamel-elementen het zonlicht niet gereflecteerd worden wat een schaduwband zal geven op de collector.
- Afhankelijk van de kasconstructie zullen zich constructie-elementen boven en/of tussen de lamellen bevinden die het licht blokkeren. De meest voor de hand liggende elementen zijn de glasroeden. Het licht kan op twee manieren geblokkeerd worden:
  - blokkeren van het inkomende zonlicht
  - blokkeren van het gereflecteerde zonlicht.

  De mate van blokkering is afhankelijk van de afmetingen van het constructie-element, de verhouding tussen hoogte en breedte van het element en de zonnestand. Zo zal een smalle hoge roede bij een zuidelijke zonnestand nauwelijks schaduw vormen maar bij een oostelijke of westelijke positie het zonlicht sterk blokkeren.



Figuur 2. Voorbeeld van een schaduwbaan op de PV-module, veroorzaakt door de roede

2.4 Concepten

2.5 Inleiding

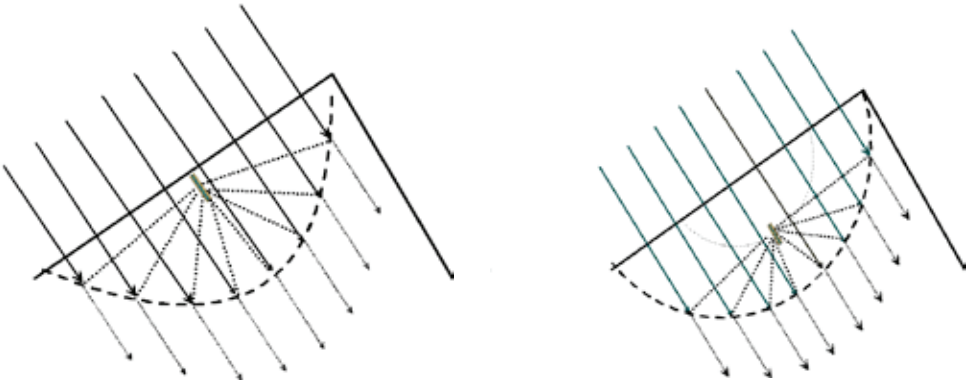
Het basisprincipe van de Elkas bestaat uit het concentreren van directe NIR-straling op een CPV-module. In fase I van het Elkas project is gekozen voor een gebogen kasdek als concentrator. Gedurende de uitvoer van deze fase, en dan met name de praktijktest, zijn echter een aantal knelpunten van deze wijze voor concentratie aan het licht gekomen:

- Hoge kosten voor gebogen (gehard) glas
- Hoge kosten voor externe CPV-module
- Hoge kosten voor tracing
- Permanent NIR-filter
- Vervuiling NIR-filter

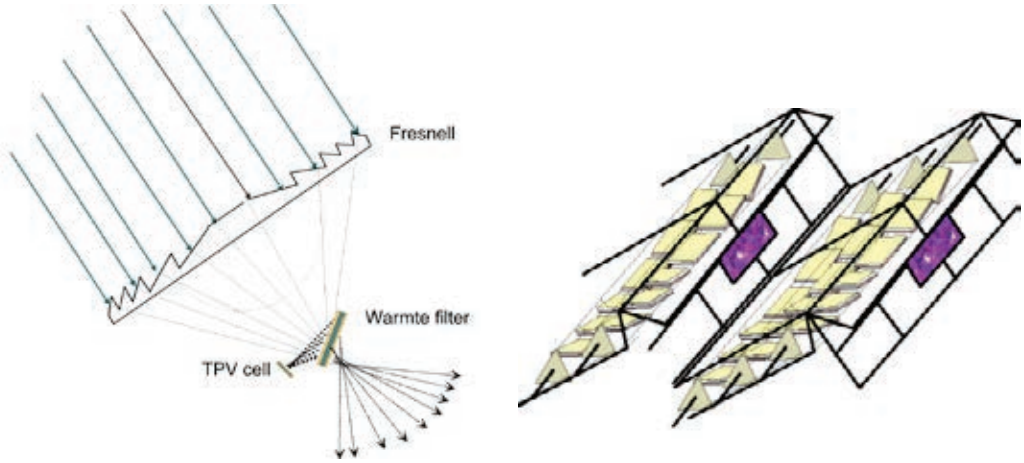
Aan het einde van fase I zijn een aantal mogelijke oplossingen voor deze problemen bedacht. Voor het concentreren van licht zijn een aantal alternatieven voor het gebogen kasdek onder de loep genomen waaronder:

- Paraboolreflector
- Cirkelsegmentreflector
- Opblaassystemen met folies (1D hor. of vert.; 2D zeshoeken)
- Fresnelkas systeem met filter
- Vlakke spiegels spiegels

In onderstaande figuren zijn een aantal van deze alternatieve oplossingen schematisch weergegeven.



Figuur 3. Paraboolreflector (links) en cirkelsegmentreflector (rechts) onder de zuidzijde van het zaagtand kasdek.



Figuur 4. Fresnel lens met warmtefilter in het brandpunt (links) en een concentrator bestaande uit een aantal afzonderlijke vlakke spiegels die naar een gezamenlijke focus gericht zijn (rechts)

Bij het beoordelen van de mogelijke alternatieven is gekeken naar criteria als de verwachte kosten, complexiteit, rendement, verlies van PAR en acceptatie door telers. Hierbij zijn oplossingen met opblaassystemen afgevallen door de hoge complexiteit, lage rendement en onderhoudbaarheid. Ook het gebruik van (Fresnel)lenzen heeft nadelen zoals lichtverlies en hoge productiekosten. Uiteindelijk is voor het concept met draaibare lamellen gekozen als meest perspectiefvol alternatief voor het gebogen kasdek. Dit concept bestaat uit een groep lamellen in gootrichting die onder een bepaalde individuele hoek, per kap als concentrator fungeren. De CPV-module wordt dan statisch opgehangen.
Uitgaande van dit concept zijn verschillende varianten mogelijk waarvan een aantal met simulatiesoftware doorgerekend en geoptimaliseerd zijn.

2.6 Concept 1: lamellen onder de zuidzijde van de kap

2.6.1 Uitgangspunten

Bij dit concept zijn de lamellen direct onder de ruiten aan de zuidzijde van de kap gemonteerd en bevindt de collector zich ter plaatse van de nok, aan de buitenkant van het dek.

Als optimalisatiedoel is de jaarrond elektriciteitsproductie gekozen. Op basis van de geografische ligging van de kas zijn de belangrijkste te optimaliseren parameters:

- Kapbreedte
- Dakhelling
- Aantal lamellen
- Breedte lamellen
- Positie lamellen
- Oppervlakte lamellen
- Reflectiewaarde van de lamellen
- Breedte collector
- Locatie collector
- Hoek collector
- Eventueel gebruik van extra concentrator(en)
- Afmetingen roede
- Afmetingen nok
- Afmetingen goot

In principe moeten alle bovenstaande parameters meegenomen worden in een optimalisatie. Voor de meeste parameters is echter uitgegaan van een vaste waarde. De redenen hiervoor zijn:

- Het beperken van het aantal vrijheidsgraden om daarmee de complexiteit en dus de rekentijd te beperken.
- Door sterkte-eisen en industrienormen zijn de keuzes van een aantal parameters beperkt.
- De slagingskans van het systeem hangt voor een groot deel af van de inpassing in een standaard Venlo kas en het daarbij behorende teeltsysteem.

In onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de parameters met vaste waarde en de daarbij behorende argumentatie.

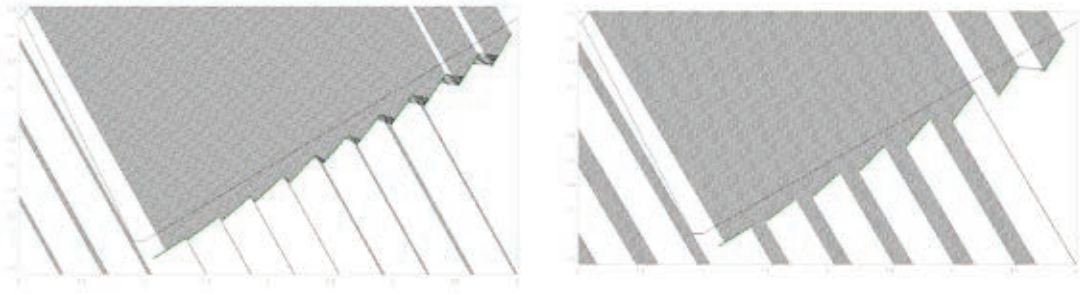
Tabel 1. Parameters van de Elkas die niet geoptimaliseerd zijn.

Parameter	Waarde	
Kapbreedte	4 m	Conform proefkas uit fase 1
Dakhelling lamellenzijde	30°	Conform proefkas uit fase 1
Dakhelling ventilatiezijde	±60°	Conform proefkas uit fase 1
Transmissie glas	100%	Invloed op opbrengst nog te onderzoeken, voorlopige schatting 10 - 15%
Breedte gootprofiel	80 mm	Conform proefkas uit fase 1
Breedte nokprofiel	30 mm	Conform proefkas uit fase 1
Rotatiehoek collector	55° met horizontaal	Schatting
Breedte collector	100 mm	Aanname (alleen voor concentrerende lamellen)
PV-rendement	15%	Aanname

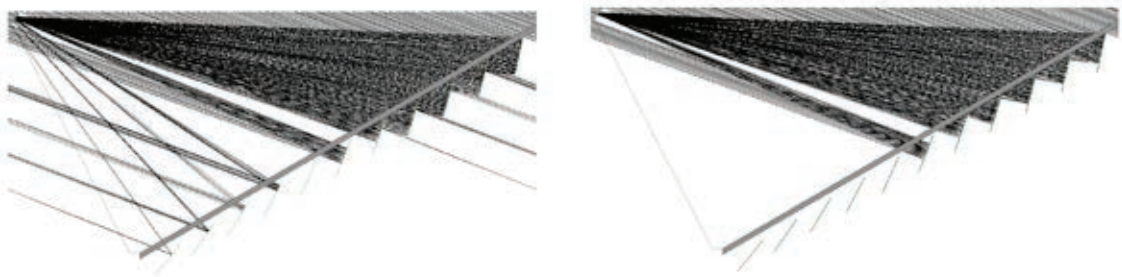
Verder gelden nog de volgende aannames:

- In de optimalisaties is de lichttransmissie van het kasdek is buiten beschouwing gelaten. De invloed hiervan is in een later stadium onderzocht.
- De lamellen zijn 100% speculair reflecterend voor NIR straling.
- De collector is 100% absorberend en er wordt dus geen rekening gehouden met een invalshoekafhankelijke reflectie op de collector.
- De constructie (nok, goot, roeden) is 100% absorberend.

- De hoeveelheid tussenruimte tussen de lamellen bepaalt hoeveel licht maximaal gefocusseerd kan worden. Bij een toenemende tussenruimte zijn minder lamellen nodig maar wordt de maximale onderschepping kleiner (Figuur 5.). Bij de simulaties is uitgegaan van geen tussenruimtes zijn tussen lamellen, met andere woorden, theoretisch kunnen de lamellen als een (energie)scherm functioneren. Bij lamellen enkel onder de zuidzijde van de kap is deze functionaliteit echter niet relevant.
- Interacties tussen lamellen en kappen worden niet meegenomen. In de modelsimulaties kan dit optreden maar in de praktijk zou dit betekenen dat de onderzijde van de lamel dezelfde reflecterende eigenschappen heeft als de bovenzijde. Ook zijn dan onwaarschijnlijk hoge nauwkeurigheden vereist omdat het licht 3 keer door een lamel gereflecteerd wordt alvorens het op de collector terecht komt (Figuur 6.).

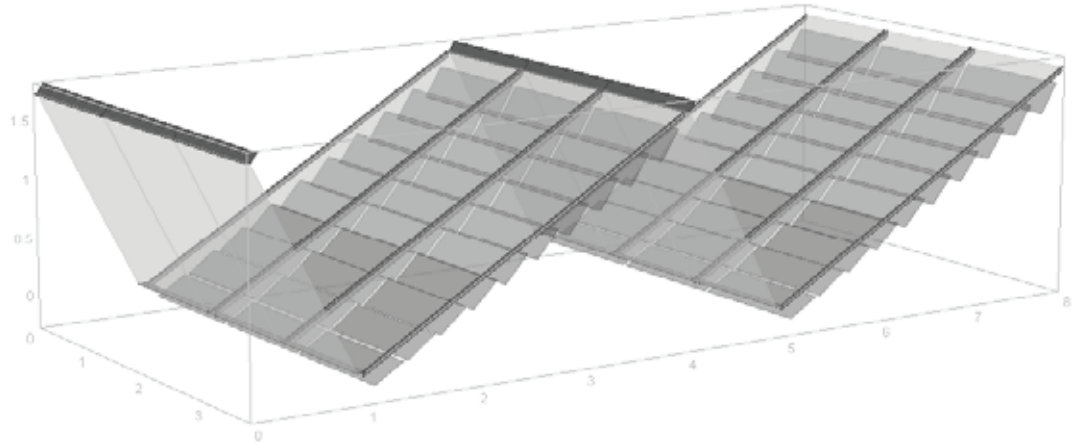


Figuur 5. Lamellen verder uit elkaar plaatsen verkleint het benodigd aantal lamellen (en NIR-filter) maar verlaagt daarmee tevens het totale onderscheppende oppervlak en daarmee de efficiëntie.

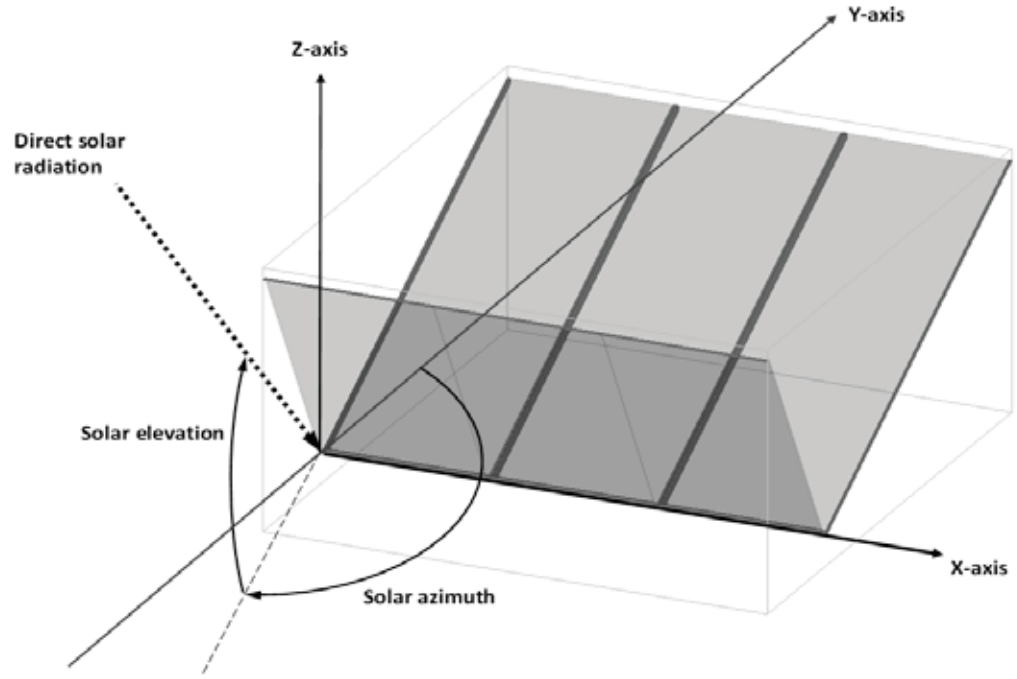


Figuur 6. Interacties tussen lamellen en kappen (links) worden niet meegenomen in de simulaties bij het bepalend van de prestaties (rechts)

Op basis van de uitgangspunten in Tabel 1. is een gedetailleerd model gecreëerd ten behoeve van de ray-tracing simulaties. In onderstaande figuren is dit model weergegeven in het 3D coördinatenstelsel.



Figuur 7. Model van de Elkas bestaande uit 2 kappen en 3 ruiten, zoals dat gebruikt is in het ray-tracing model. Door symmetrie in zowel kap- als gootrichting volstaat 1 kap en 1 ruit bij het simuleren.



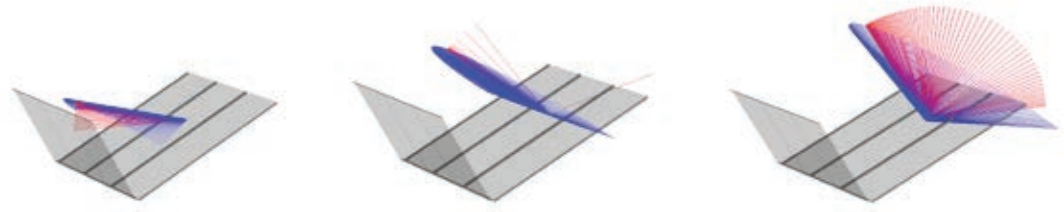
Figuur 8. Coördinatenstelsel dat gehanteerd is bij het simuleren. De zon draait vanaf noordoost met oplopende azimut via het zuiden naar noordwest.

Bij een aantal optimalisaties zijn het aantal lamellen en de lamelbreedte variabel. Uitgangspunt hierbij is dat het totale oppervlak aan lamellen gelijk blijft, dus bij smallere lamellen neemt het aantal lamellen toe. Omdat uitgegaan wordt van hele lamellen is de lamelbreedte gerelateerd aan het aantal. Ook is de afstand tussen lamel en ruit constant gehouden wat betekent dat het draaipunt bij bredere lamellen verder van het glas ligt dan bij smalle lamellen (zie onderstaande figuur).



Figuur 9. Het draaipunt van brede lamellen (links) bevindt zich op een grotere afstand van de ruit dan het draaipunt van smalle lamellen. Door randeffecten kan dit de concentratie-efficiëntie beïnvloeden.

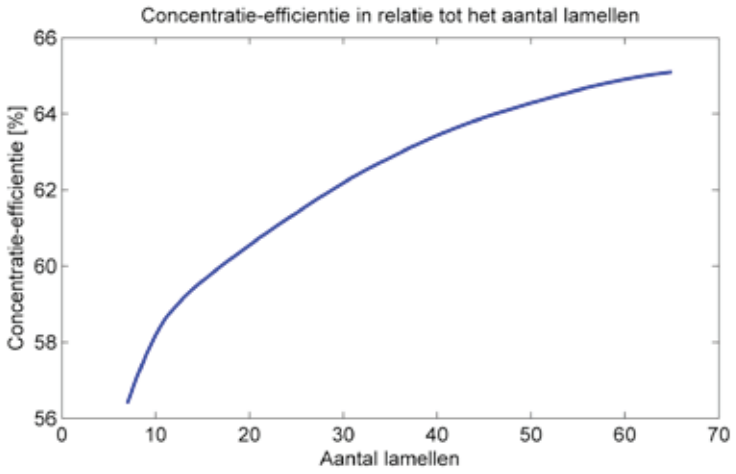
In onderstaande figuren is de baan van de zon weergegeven voor een winter-, voorjaars- en zomerdag. Omdat de Elkas optisch symmetrisch is in de gootrichting en het licht op een focuslijn in plaats van een focuspunt geconcentreerd wordt, speelt in de simulaties de elevatie die geprojecteerd is op het verticale YZ-vlak een belangrijke rol. Het systeem moet in staat zijn het bereik van deze geprojecteerde elevatie te volgens. Uit de figuren blijkt dat de geprojecteerde elevatie een veel groter bereik heeft dan de normale elevatie.



Figuur 10. Baan van de zon met geprojecteerde elevatie op 21 december (links), 21 maart (midden) en 21 juni (rechts). De normale elevatie is de hoek tussen de blauwe lijnen en het horizontale vlak. De geprojecteerde elevatie (rood) heeft een groter bereik dan de normale elevatie.

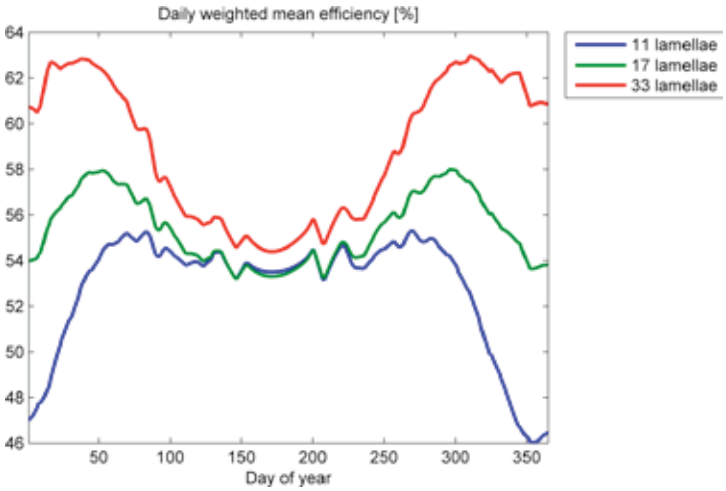
2.6.2 Optimalisatie lamelbreedte

Voor vlakke lamellen geldt dat de collector minstens even breed moet zijn als de lamelbreedte. De hoeveelheid licht die door de collector onderschept wordt is daarmee rechtstreeks gekoppeld aan de lamelbreedte. In Figuur 11. is de jaarrond concentratie-efficiëntie weergegeven in relatie tot het aantal lamellen. Dit is de jaarlijkse hoeveelheid NIR-straling die door de collector wordt geabsorbeerd, gedeeld door het jaarlijkse totaal aan inkomende NIR-straling. De grafiek laat zien dat de efficiëntie asymptotisch oploopt met het aantal lamellen. De verklaring hiervoor tweeledig. Enerzijds nemen de randverliezen af bij smallere lamellen, anderzijds onderschept een smallere CPV-module een kleiner deel van het inkomende licht.

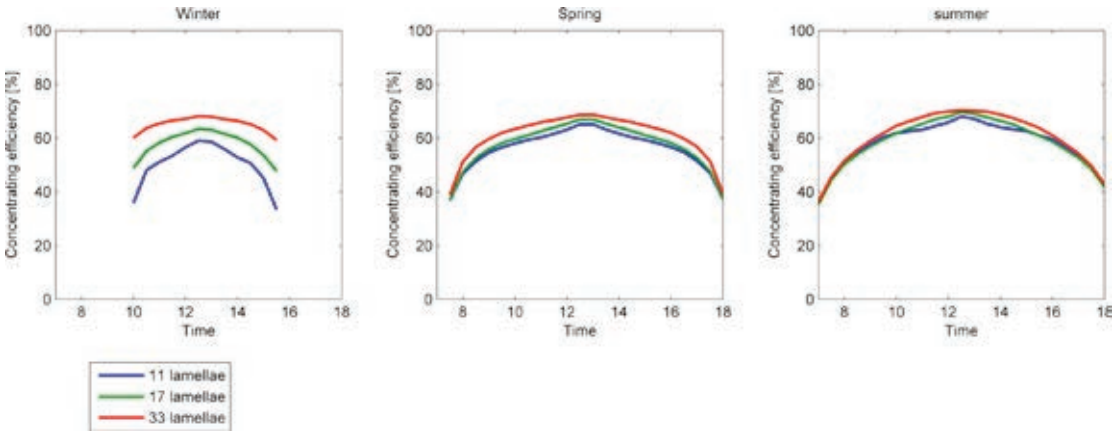


Figuur 11. Jaarrond concentratie-efficiëntie in relatie tot het aantal lamellen. De efficiëntie loopt asymptotisch op met het aantal lamellen. Dit wordt veroorzaakt doordat het onderscheppende oppervlak van de CPV-module steeds kleiner wordt.

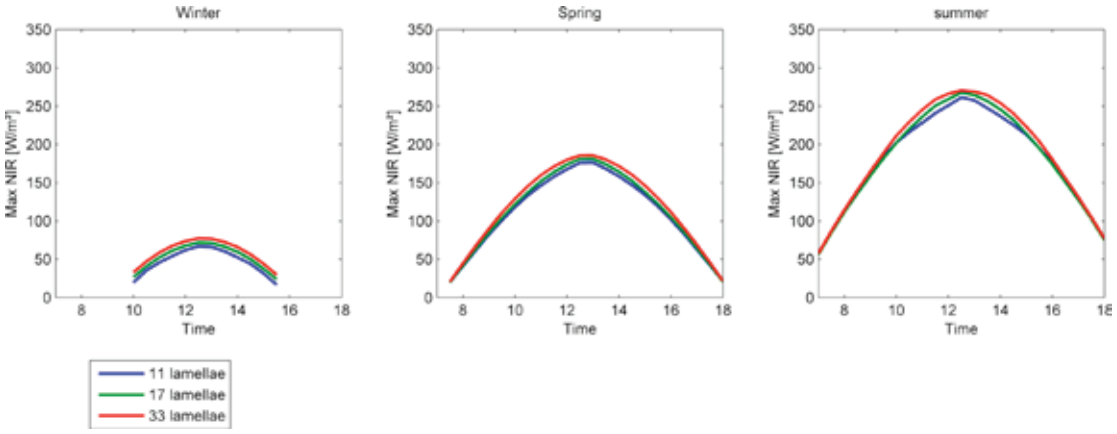
Voor een nadere analyse zijn grafieken van etmaalverlopen voor de verschillende seizoenen en jaarrond etmaalgemiddelden gemaakt voor de theoretisch maximale NIR intensiteit. De trend die de grafieken laten zien is dat gedurende de zomerperiode de lamelbreedte een beperkte invloed heeft op de efficiëntie. Gedurende de winter is dit effect veel groter doordat de zon lager staat en het licht onderscheppende oppervlak van de (verticale) collector toeneemt.



Figuur 12. Etmaalgemiddelde gewogen concentratie-efficiëntie voor verschillende aantallen lamellen. Door een grotere de lichtonderschepping van de collector bij lage zonnestanden zijn de verschillen in de winterperiode het grootst.



Figuur 13. Concentratie-efficiëntie voor een winter-, voorjaars- en zomerdag bij verschillende aantallen lamellen. Deze is tamelijk seizoens-onafhankelijk.



Figuur 14. Maximaal NIR vermogen op de collector voor een winter-, voorjaars- en zomerdag bij verschillende aantallen lamellen

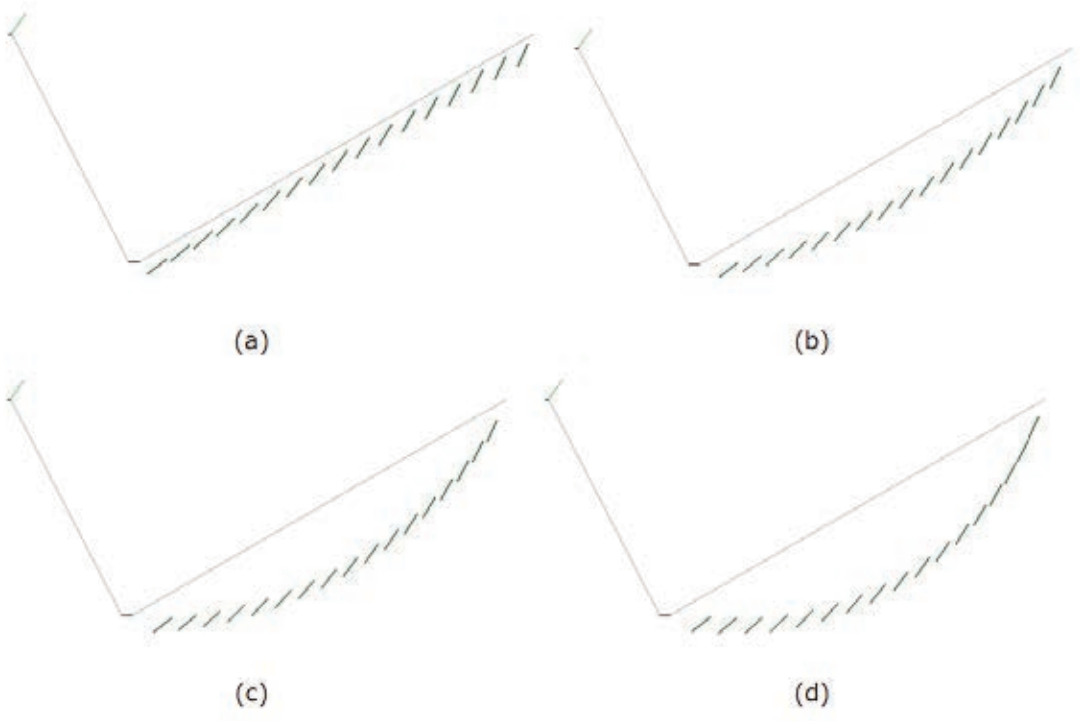
In onderstaande tabel zijn de jaarrondprestaties van een concentratiesysteem met vlakke lamellen weergegeven voor verschillend aantal lamellen. De conclusie is dat een systeem met vlakke lamellen onder de zuidzijde van het dek gebaat is bij een groot aantal smalle lamellen. De uitvoering hangt echter af van de praktische uitvoerbaarheid en kosten.

Tabel 2. Jaarrond prestaties als functie van het aantal vlakke lamellen. De productie loopt asymptotisch op met het aantal lamellen.

Aantal lamellen	NIR coll. [MJ]	Efficiency [%]	Elek prod [kWh]
7	525	56.4	21.9
11	545	58.6	22.7
14	553	59.4	23.0
17	558	60.0	23.3
25	571	61.4	23.8
33	582	62.6	24.2
45	595	63.9	24.8
65	606	65.1	25.2

2.6.2.1 Circulair gepositioneerde lamellen

Een concentrator bestaande uit lamellen is in feite een soort van Fresnellens[1]. Ook treden vergelijkbare verliezen op door onderlinge interactie tussen de lamellen, vergelijkbaar met de verliezen bij de randen van de groeven in een fresnellens. Een manier dit verlies te beperken is om de lamellen niet in een rechte lijn te plaatsen maar in een cirkelvorm. Dit is vergelijkbaar met een bolle lens ten opzichte van een Fresnellens.
Om dit effect te bepalen is voor verschillende krommingen de jaarrond prestatie bepaald. De kromming wordt uitgedrukt in de 'vormfactor'. Dit is de verhouding tussen de kromtestraal en de breedte van de concentrator. De breedte is de afstand van goot tot nok, dus de lengte van de ruit aan de zuidzijde van de kap.



Figuur 15. Lamellen in een boog geplaatst met diverse krommingen, uitgedrukt in de vormfactor: in lijn (a), 1.5 (b), 1.0 (c) en 0.75 (d)

In onderstaande tabel zijn de jaarrond prestaties weergegeven als functie van de vormfactor.

Tabel 3. Jaarrond prestaties voor verschillende krommingen

Vormfactor	NIR coll [MJ]	Efficiency [%]	Elek prod [kWh]
in lijn	558	60.0	23.3
0.75	633	68.1	26.4
1.00	630	67.7	26.2
1.50*)	607	65.3	25.3
2.00	595	64.0	24.8

*) Analoog aan gerealiseerde ELKAS uit fase I

1 Een Fresnellens is een in ringen of schillen opgedeelde lens. De dikte van de ringen is steeds ongeveer gelijk, zodat de lens bij benadering vlak is. Het grote voordeel ervan is een vermindering van materiaal, wat bij de sterk gebolde glazen uitvoering leidt tot een niet geringe gewichtsbesparing. Een nadeel is vervorming van het beeld en diffractie langs de randen van de groeven.

Uit de berekeningen blijkt dat het plaatsen van de lamellen in een cirkelvorm tot 14% meer elektriciteitsopbrengst geeft in vergelijking met lamellen in een rechte lijn.

2.6.2.2 Invloed dakhelling

Bij een optimalisatie van de dakhelling spelen een aantal zaken waarvan er twee nader geanalyseerd zijn. Allereerst is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de invloed van de dakhelling van de zuidzijde (lamellenzijde) van het dek. Dit is gedaan bij een vaste kapbreedte en een vaste oppervlaktefractie aan lamellen (per m² kasoppervlak). Bij een veranderende dakhelling verandert hierdoor de nokhoogte.

Een andere effect is het opbrengstverlies dat optreedt doordat op de noordzijde van het dek geen lamellen gemonteerd zijn waardoor bij geprojecteerde elevaties groter dan 60° het licht niet gereflecteerd wordt. Om het effect hiervan te bepalen zijn berekeningen gedaan aan een variant met een puur zaagtand-dak. Hierbij zijn de dakhelling van de zonzijde en de lamelbreedte praktisch gelijk gehouden. Dit heeft tot gevolg dat de nok 498 mm hoger is en het aantal lamellen met 5 opgehoogd is.

Dakhelling
Bij constante oppervlaktefracties van CPV-module en lamellen is een gevoeligheidsanalyse van de dakhelling aan de zuidzijde uitgevoerd. Dit is gedaan voor vlakke lamellen met een lamel- en collectorbreedte van 100 mm.

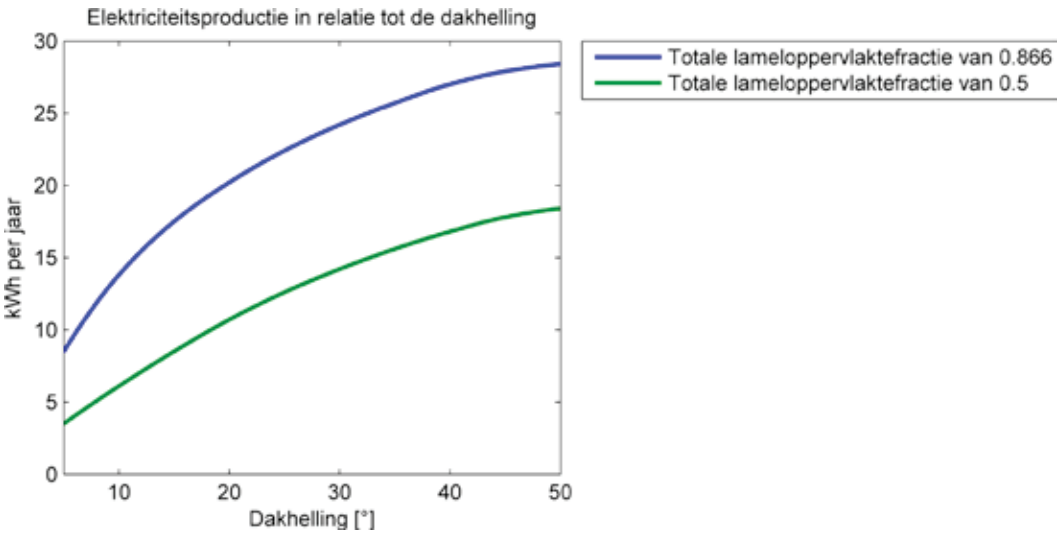


Figuur 16. Zuidzijde dakhellingen van 50° (links) en 20° (rechts) bij een lamelbreedte van 100 mm en een oppervlaktefractie van 0.866 (Analoog aan gerealiseerde Elkas uit fase I)



Figuur 17. Zuidzijde dakhelling van 50 (links) en 20 graden bij een lamelbreedte van 100 mm en een oppervlaktefractie van 0.5.

In de onderstaande Figuur is de jaarlijkse elektriciteitsproductie als functie van de dakhelling weergegeven voor twee lamel-oppervlaktefracties. Het blijkt dat door het vergroten van de dakhellingen de productie sterk toeneemt. Dit is te verklaren door het feit dat bij een toenemende dakhelling de positie van de CPV-module gunstiger wordt voor focussering.



Figuur 18. Jaarlijkse elektriciteitsopbrengst in relatie tot de dakhelling bij collectorbreedte en lamelbreedte van 100 mm en een totale lameloppervlaktefractie van 0.866 (proefkas Elkas I) en 0.5

Pure zaagtand

De noordruit van het kasdek draagt niet bij aan de concentratie. Het lichtonderscheppende oppervlak van de noordruit is afhankelijk van de dakhelling van de noordzijde van de kap en hoe groter dit oppervlak, hoe minder licht geconcentreerd kan worden. Jaarrond simulaties zijn uitgevoerd om het verschil tussen de gerealiseerde Elkas uit fase I (30° zuid, 60° noord) en een vergelijkbare zaagtand (30° zuid, 90° noord) te bepalen. Hierbij is de kapbreedte gelijk gehouden waardoor de nok bij een zaagtand wat hoger komt te liggen.



Figuur 19. Zaagtand-dak (rechts) in vergelijking met de Elkas uit fase I (links), bij een kapbreedte van 4 m. Beide hebben een dakhelling van de zonzijde van 30 en een lamelbreedte van 193 mm. Bij een gelijke kapbreedte heeft het zaagtand-dak een nok die 498 mm hoger ligt.

In onderstaande tabel zijn de resultaten van de simulaties weergegeven. Uit de resultaten blijkt dat het vergroten van de dakhelling aan de schaduwzijde van 60° naar 90° een beperkte jaarrond opbrengstverhoging van ± 5% oplevert.

Tabel 4. Vergelijking tussen de gerealiseerde Elkas uit fase I en een zaagtand

	NIR coll [MJ]	Efficiency [%]	Elek prod [kWh]
Referentie (60°)	582	62.6	24.2
Zaagtand (90°)	612	65.9	25.5

2.6.2.3 Invloed van roeden en lamelsegmenten

Glasroeden hebben een negatieve invloed op de werking van het concentratiesysteem. Roeden blokkeren het inkomen de zonlicht en bij een CPV-module die buiten de kas tevens de gereflecteerde straling. Een vergelijkbaar verlies treedt op als de lamellen niet aaneengesloten zijn in de gootrichting van de kas. In de praktijk zal dit vrijwel onoverkomelijk zijn omdat de lamellen opgehangen en aangedreven moeten worden. Ter plaatste van de ophanging kan het licht niet gereflecteerd worden.

Om de invloed van roeden te bepalen zijn voor 3 lamelbreedtes de prestaties uitgerekend in het geval van met en zonder roeden, dit op basis van 8 × 4 (H × B) roeden bij een glasmaat van 1.25 m.

Tabel 5. Jaarrond prestaties op basis van vlakke lamellen met en zonder roeden bij een 8 × 4 (H × B) roede.

Aantal lamellen	NIR coll. [MJ]	Elek prod zonder roeden [kWh]	Elek prod met roeden[kWh]	Verschil [%]
11	633	26.4	22.7	-16.2
17	642	26.7	23.2	-15.1
33	649	27.0	24.2	-11.6

Het effect ten gevolge van roeden neemt af met een toenemend aantal lamellen. Dit komt omdat bij een toenemend aantal lamellen de lamellen dichter tegen de ruit gemonteerd zitten.

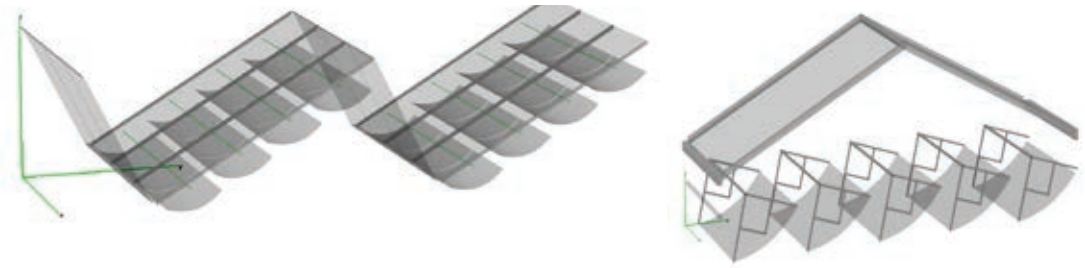
2.7 Parabolische trogcollector

In deze paragraaf zijn de prestaties onderzocht van een parabolische trogcollector in de kas. Met een parabool kan bij loodrechte inval een hoger concentratiefactor worden bereikt. Om deze reden worden parabolische trogcollectoren veelvuldig gebruikt in grootschalige solar projecten. Voorwaarde is echter dat de collector op elke moment loodrecht op de zon gericht moet zijn omdat de concentratie-efficiëntie bij niet-loodrechte inval sterk afneemt.
Bij gebruik van een parabolische trogcollector in kassen is ook een CPV-module per trog nodig: meerdere troggen op dezelfde CPV-module richten is fysisch onmogelijk. Omdat vanwege de beperkte (verticale) ruimte in de kas meerdere troggen per kap nodig zijn zullen ook meerdere CPV-modules per kap nodig zijn. Om de potenties van een dergelijk systeem te onderzoeken zijn voor twee varianten zijn simulaties uitgevoerd:

- trogcollectoren van 4 × 80 cm breed onder de ruit aan zuidzijde (Figuur 20. links)
- trogcollectoren van 5 × 80 cm breed over de gehele breedte van de kap (Figuur 20. rechts)

Verder zijn de volgende uitgangspunten genomen:

Kapbreedte	4 m
Aantal troggen	5
Trogbreedte	800 mm
Collectorbreedte	20 mm
Concentratiefactor	40
Focusafstand	485 mm



Figuur 20. Model van de Elkas met parabolische trogcollectoren opgehangen onder de zuidruit (links) en horizontaal over de volledige breedte van de kap (rechts)

In onderstaande tabel zijn de resultaten weergegeven. Hieruit blijkt dat de variant met trogcollectoren over de gehele breedte van de kap aanzienlijk beter presteert dan een systeem met lamellen die naar één CPV-module toe focusseren. Uit een nader onderzoek naar de praktische uitvoering van een dergelijk systeem is echter gebleken dat de geschatte kosten zodanig hoog zijn dat het systeem bij voorbaat onrendabel zal zijn. Voornaamste redenen zij de hoge kosten voor het buigen en lamineren van glas, wat nodig is om de benodigde concentratiefactor te halen, de relatief zware constructie die met glas gepaard gaat en het feit dat meerdere CPV-modules per kap nodig zijn. Om deze redenen is besloten dit concept te verlaten.

Tabel 6. Prestaties van parabolische trogcollectoren

	NIR coll [MJ]	Efficiency [%]	Elek prod [kWh]
Onder de Zuid-ruit	586	63.0	24.4
Horizontaal over de hele kapbreedte	773	83.1	32.2

2.8 Concept 3: Venlo type met lamellen op tralieligger

2.8.1 Concept

In hoofdstuk 2.6 is uitgegaan van een CPV-module die aan de buitenkant van de kas tegen de nok geplaatst is. Dit heeft als voordeel dat het gereflecteerde licht onder een relatief gunstige hoek op de CPV-module valt en dat deze (nagenoeg) verticaal staat waardoor de lichtonderschepping beperkt blijft. Een groot nadeel is echter dat het licht 2 keer het dek moet passeren alvorens de CPV-module te bereiken. Door de lamellen op een bepaalde verticale afstand van de goot horizontaal over de gehele breedte van de kap te monteren kan de CPV-module in de kas blijven, namelijk onderaan tegen, of geïntegreerd in de nok. Het benutten van de gehele kapbreedte heeft als extra voordelen dat het effectieve oppervlak hoger is ten opzichte van het systeem uit paragraaf 2.6 en een eventuele energieschermfunctie van de lamellen. In onderstaande Figuur is een mogelijk uitvoering van een dergelijk systeem weergegeven.



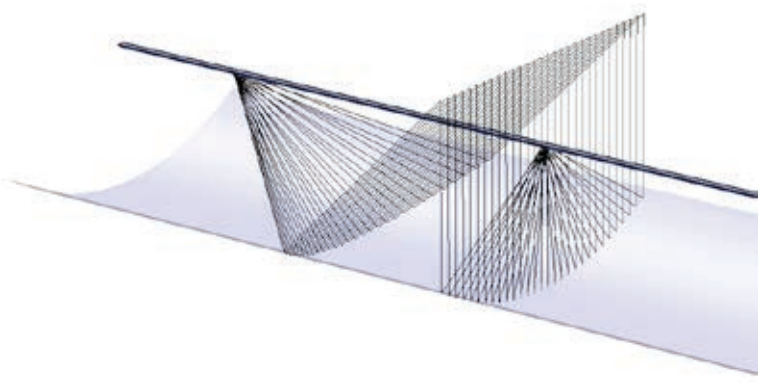
Figuur 21. Elkas met horizontale lamellen over de gehele kapbreedte en een CPV-module onder of geïntegreerd in de nok. Om een gunstige hoek te creëren tussen de lamellen en de CPV-module is een zekere ruimte tussen de lamellen en de goot nodig.

Omdat de CPV-module horizontaal ligt en daardoor veel licht zal onderscheppen, zal de breedte van de CPV-module beperkt moeten blijven. Als uitgangspunt wordt genomen dat de lichtonderschepping niet groter mag zijn dan 1% wat betekent dat bij een kapbreedte van 4 meter de CPV-module niet breder dan 4 cm mag zijn. Bij lamelbreedtes groter dan 4 cm betekent dit dat de lamellen het licht individueel zullen moeten concentreren en als trog uitgevoerd moeten worden. Omdat de invalhoek met de zon sterk varieert kan geen paraboolvorm gebruikt worden. Een goed alternatief hiervoor is een cirkelvorm die bij niet-loodrechte invalshoeken veel beter presteert dan de parabool.

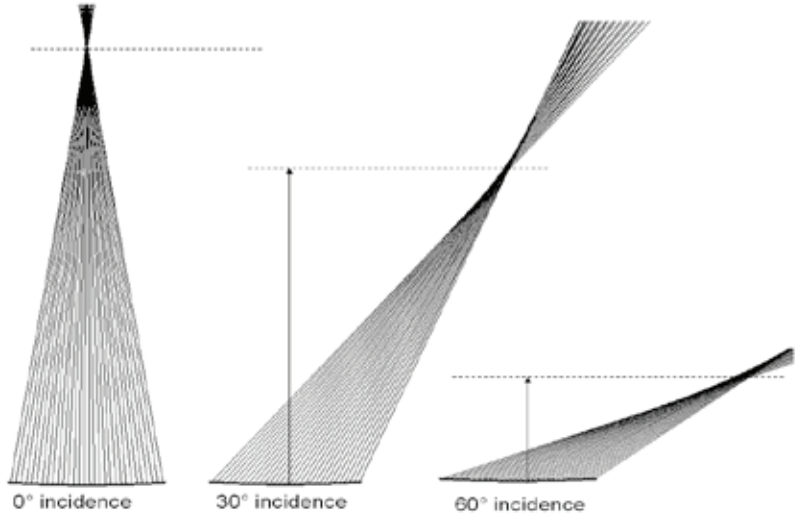
De concentratie-efficiëntie van een cirkelvormige trogcollector is afhankelijk van de kromtestraal en invalshoek van het zonlicht op de lamel. De invalshoek kan ontleed worden in 2 hoeken:

- in de breedterichting van de lamel
- in de lengterichting van de lamel.

Bij invalshoeken in de lengterichting van de trog blijft de focussering voor zowel een cirkelvormige als paraboolvormige trog intact (Figuur 22.). Bij invalshoeken in de breedterichting verliest een parabool zijn focusserende werking al snel bij niet-loodrechte inval. Bij een cirkelvorm daarentegen blijft de focus relatief goed intact zolang de focusafstand relatief groot blijft (Figuur 23.).



Figuur 22. Bij niet-loodrechte inval in de lengterichting van de lamel geldt blijft de focusserende werking van zowel een parabolische trog al cirkelvormige trog intact.

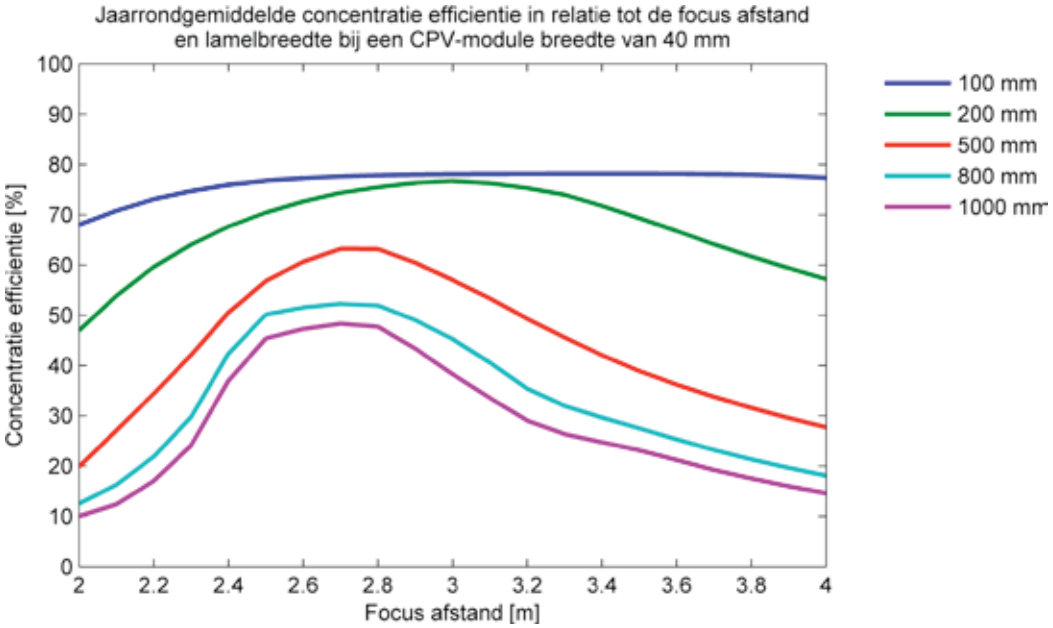


Figuur 23. Bij niet-loodrechte inval in de breedterichting van de lamel neemt de focuslengte af met de hoek van inval.

Terwijl de focus redelijk intact blijft verandert echter de focuslengte echter wel bij invalshoeken in breedterichting. In het geval van een Elkas met lamellen zou dit betekenen dat de focusafstand van elke lamel bij iedere zonnestand aangepast zou moeten worden. Gezien de hoge kosten per lamel is dit niet praktisch. Uitgangspunt bij een systeem met individueel focusserende lamellen is een vooraf bepaalde optimale focusafstand per lamel, of een optimale generieke focusafstand waarbij alle lamellen dezelfde focusafstand hebben. In de volgende paragrafen wordt een nadere analyse gedaan naar beide concepten.

2.8.2 Generieke focusafstand

In onderstaande Figuur is de concentratie-efficiëntie in relatie tot de generieke focusafstand weergegeven. De berekeningen zijn gedaan op basis van een CPV-module van 40 mm en voor verschillende lamelbreedtes. De invloed van roeden is niet meegenomen.



Figuur 24. Jaarrond gemiddelde concentratie efficiëntie in relatie tot de generieke focusafstand bij 100, 200, 500, 800 en 1000 mm lamelbreedte. Bij 500 mm brede lamellen ligt het optimum rond de 2.75 m.

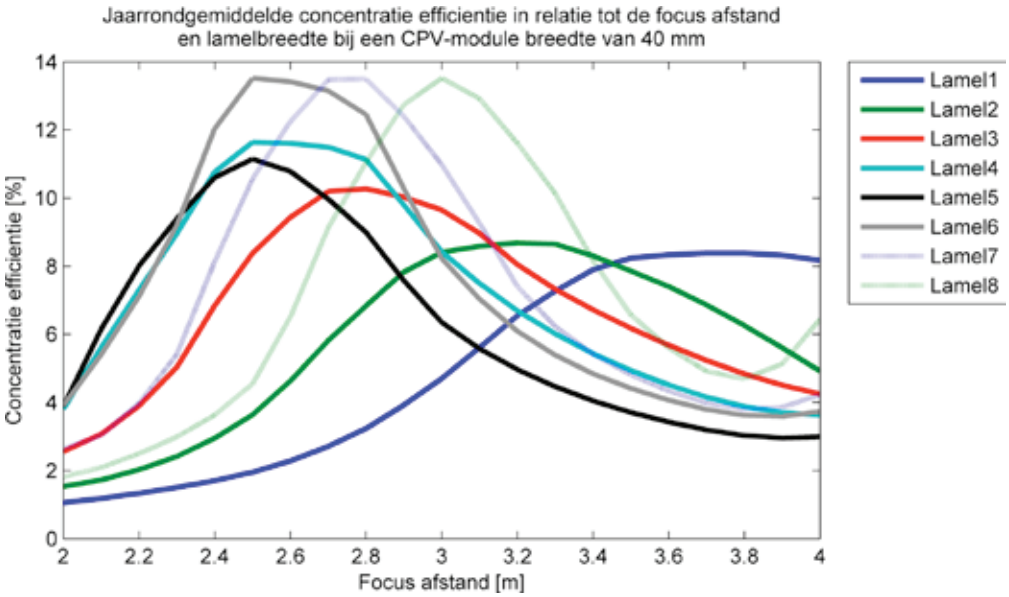
Uit bovenstaande Figuur blijkt de optimale generieke focusafstand tussen de 2.5 en 3.0 m te liggen.

2.8.3 Individuele focusafstand

Omdat de afstand tot de CPV-module en ook de hoek ten opzichte van de zon voor elke lamel verschilt is onderzocht wat het verschil is tussen een systeem waarbij elke lamel een individuele optimale focusafstand heeft en een systeem waarbij de lamellen één generieke optimale focusafstand hebben. Uitgangspunten voor deze berekeningen zijn:

- Invloeden van nok, goot en ruiten zijn meegenomen
- De invloed van roeden is niet meegenomen
- De lamellen zijn ononderbroken (vakmaat = lamelbreedte)
- De invloed van schaduwlijnen op de collector is niet meegenomen

In onderstaande figuren is de relatie weergegeven tussen de concentratie efficiëntie en de individuele en generieke focusafstand voor verschillende lamelbreedtes en CPV-module breedte.



Figuur 25. Concentratie-efficiëntie per lamel van een systeem met 8 lamellen van 500 mm breed in relatie tot de individuele focusafstand. De lamellen zijn genummerd van zuid naar noord.

In onderstaande tabel is de optimale focusafstand samengevat.

Tabel 7. Optimale individuele en generieke focusafstand en kromtestraal bij 8 x 500 mm lamellen. De focusafstand van een cirkelvormige concentrator is de helft van de kromtestraal.

Lamel	Optimale focusafstand [m]	Kromtestraal [m]	Efficiency [%]	Productie [kWh/m^2]
Lamel 1	3.75	7.50		
Lamel 2	3.25	6.50		
Lamel 3	2.75	5.50		
Lamel 4	2.50	5.00		
Lamel 5	2.50	5.00		
Lamel 6	2.50	5.00		
Lamel 7	2.75	5.50		
Lamel 8	3.00	6.00		
Individueel			71.0	27.5
Generiek	2.75	5.50	52.3	20.3

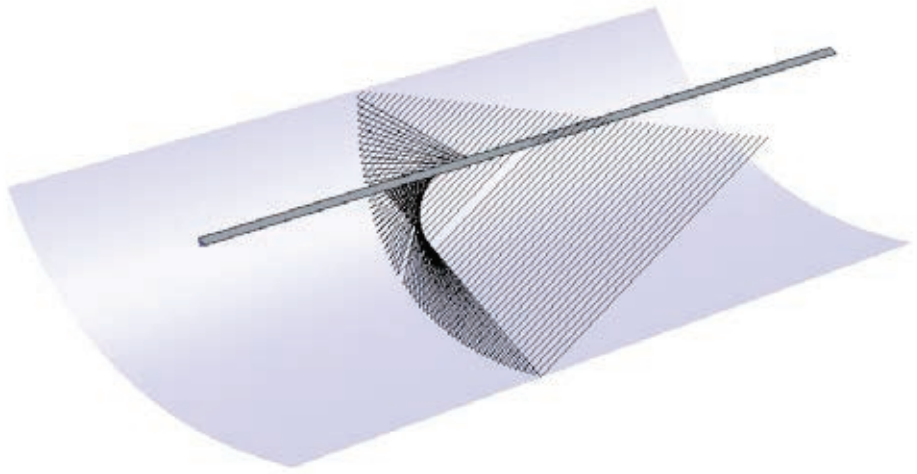
Op basis van bovenstaande tabel kan geconcludeerd worden dat er een aanzienlijk verschil van ca. 35% zit tussen een systeem met individuele focusafstanden en een generieke focus. desondanks kleven er grote nadelen aan een individuele focus. De belangrijkste nadelen zijn naar verwachting een significant duurdere productie van de lamellen, dit omdat er 4 mallen gemaakt moeten worden in plaats van 1 mal. Daarnaast moeten voor de montage, ophanging en aandrijving veel onderdelen in 8 verschillende varianten uitgevoerd worden. Ook zal naar verwachting het transport, de montage en laminatie ingewikkelder en duurder zijn.

2.8.4 Compensatie slagschaduw

Een niet-homogene lichtverdeling, ofwel slagschaduw op de collector, kan de elektriciteitsopbrengst aanzienlijk verlagen. De twee belangrijkste oorzaken hiervan zijn:

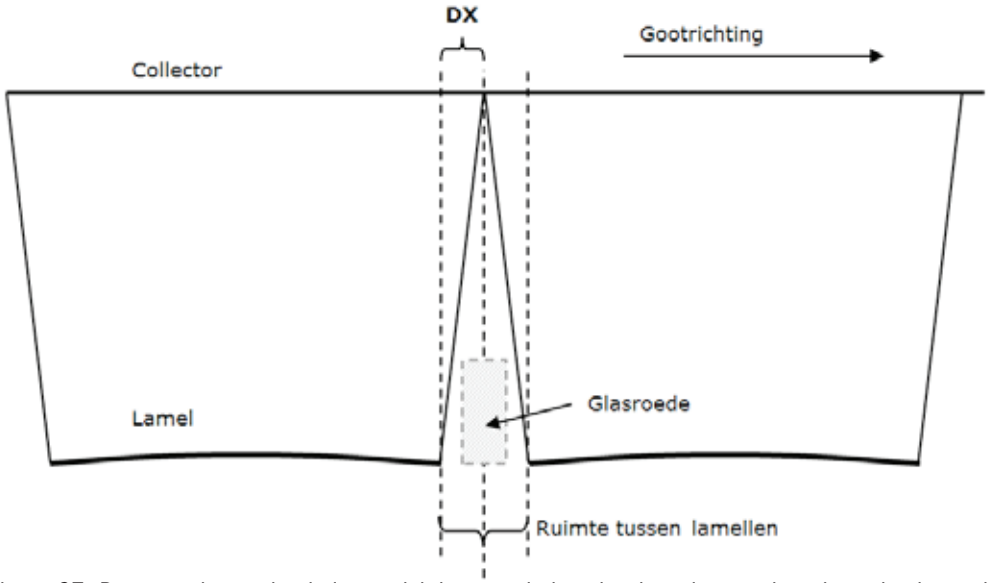
- De glasroeden die het licht blokkeren
- Lamellen opgedeeld in secties (t.b.v. montage en aandrijving)

Slagschaduw wordt deels al gecompenseerd door het gebruik van een trogvorm voor de lamellen. Bij niet-loodrechte inval leggen zowel in lengte- als in breedterichting van de lamel de lichtstralen elk een verschillende afstand af tot de collector. Hierdoor komen deze niet in één punt maar verspreidt over een lijn op de collector terecht (Figuur 26.). Dit effect treedt per lamel op en wordt versterkt bij het gebruik van meerder lamellen.



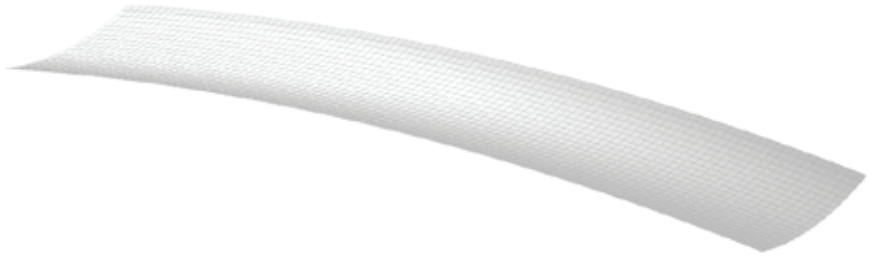
Figuur 26. Bij niet loodrechte inval op de lamel leggen de lichtstralen elk een andere afstand tot de collector af waardoor het gereflecteerde licht niet in een punt maar in een lijn op de collector valt.

Dit effect is maximaal aan de randen van de dag maar neemt sterk af rond het middaguur wanneer er sprake is van loodrechte inval in de lengterichting. Een mogelijke alternatieve oplossing ter voorkoming van slagschaduw veroorzaakt is door de lamellen van een structuur te voorzien of te buigen waardoor de gereflecteerde lichtbundel in geringe mate divergent wordt en hierdoor de schaduwband compenseert. In onderstaande Figuur is dit geïllustreerd. Door de kromming van de lamel verandert de divergentie en daarmee de breedte van de strook DX die bij een vlakke lamel niet belicht zou worden.



Figuur 27. Door een kromming in lengterichting van de lamel te introduceren kan de projectie op de collector verbreedt worden waardoor schaduwbanden worden gecompenseerd.

Bij focusserende lamellen moet de kromming in de breedterichting van de lamel, die nodig is om het licht te focussering, gecombineerd worden met een kromming in de lengterichting van de lamel om het licht te divergeren. De lamel heeft dan een virtuele focus die onder de lamel ligt, de divergente focus genoemd. Dit resulteert in een lamel die de vorm heeft van een zadel.

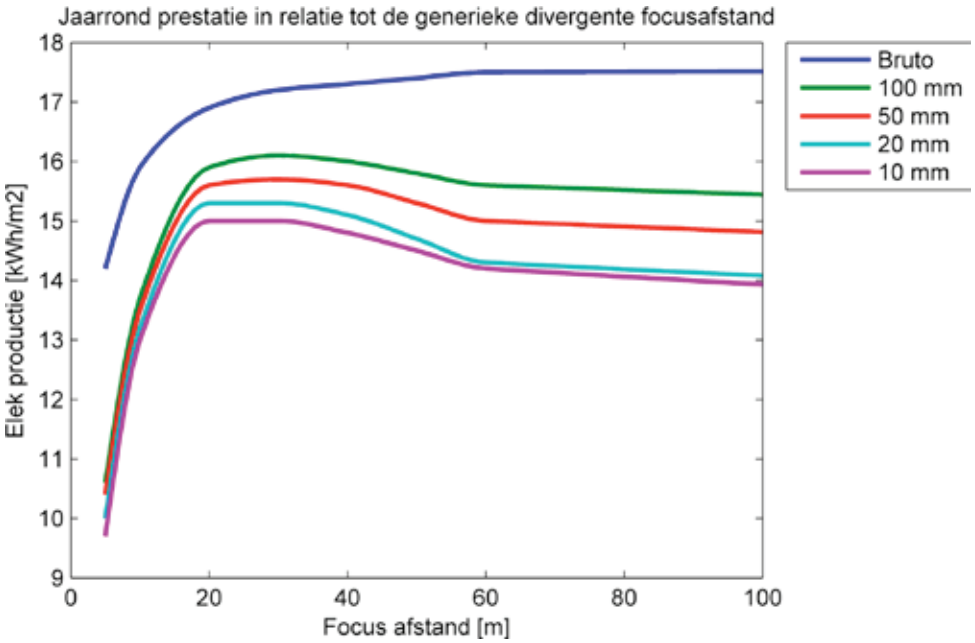


Figuur 28. Een zadelvorminge lamel met het doel om te focusseren naar een focuslijn (convergente focus) en tegelijkertijd te divergeren over de lengte van de CPV-module (divergente focus). N.b. de kromming in de Figuur is sterk overdreven.

De kromming die nodig is voor divergentie (divergente focus) heeft invloed op de concentrerende werking van de lamel (convergente focus). Om deze invloed te onderzoeken zijn voor verschillende generieke virtuele focusafstanden de jaarrond prestaties bepaald. Verder gelden de volgende uitgangspunten:

- 17 lamellen met een breedte van 193 mm.
- Generieke optimale convergente focus van 3.5 m

In onderstaande Figuur is de jaarrond prestatie in relatie tot de generieke divergente focusafstand en pv-cel breedte weergegeven. Uitgangspunt hierbij is dat het rendement van de gehele CPV-CPV-module, bestaande uit 11 cellen, bepaald wordt door de zwakste cel die het minste licht ontvangt. Bij de bruto opbrengst is dit effect niet meegenomen. Uit de grafiek blijkt dat bij toenemende spreiding van het licht (kleinere divergente focusafstand) de concentratie-efficiëntie afneemt. Uit de Figuur blijkt dat de optimale generieke divergente focusafstand rond de 30 m ligt.



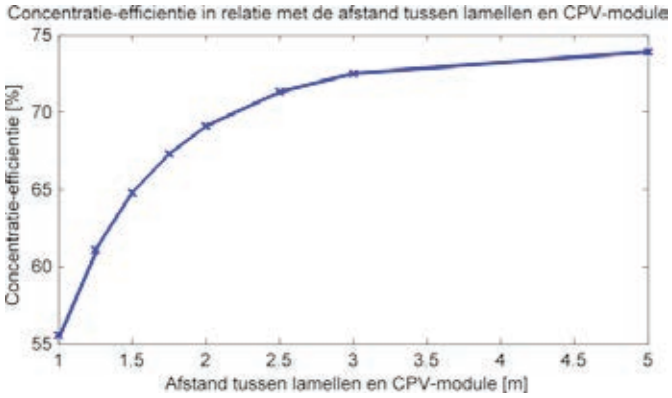
Figuur 29. Jaarrond prestatie in relatie tot de generieke divergente focusafstand en PV cel breedte voor 17 lamellen met een lamelbreedte van 192 mm, inclusief 4 × 8 cm roeden en een generieke convergente focusafstand van 3.5 m. het rendement van de gehele CPV-module, bestaande uit 11 cellen, wordt bepaald door de zwakste cel die het minste licht ontvangt. Bij de bruto opbrengst is dit effect niet meegenomen.

2.8.5 Verticale positie lamellen

Het concept met de lamellen op de tralieligger vereist een zekere afstand tussen de lamellen en de CPV-module. Een relatief kleine afstand betekent kleine focusafstanden van de lamellen (generiek of individueel) en tevens een kleine focusafstand van het hele systeem. Hierdoor neemt het Fresnellverlies toe dat beschreven is in paragraaf 2.6.2.1. Hoe groter de afstand echter is, hoe hoger de kas zal moeten zijn. Om een indruk te krijgen van de prestatie als functie van deze afstand zijn simulaties uitgevoerd op basis van de volgende uitgangspunten:

- Geen constructie
- Vakmaat 5 m, kapbreedte 4 m
- 80 lamellen van 50 mm breed, niet focusserend
- 50 mm collector

In onderstaande Figuur zijn de resultaten weergegeven. Het blijkt dat bij afstanden groter dan 2 m de efficiëntie minder sterk oploopt. Dit betekent dat bij Venlo type dakhellingen de lamellen minimaal 1.30 m onder de goot geplaatst moeten worden.



Figuur 30. Relatie tussen afstand tot de collector en de jaarrond concentratie-efficiëntie.

2.8.6 Invloed glas

De hoeveelheid beschikbaar zonlicht voor concentratie wordt mede bepaald door de transmissiewaarde van het kasdek. Om dit verlies te bepalen zijn simulaties uitgevoerd voor een systeem zonder glas en met AR gecoat glas (96%). De resultaten zijn weergegeven in onderstaande tabel

Tabel 8. De invloed glas op de jaarrond prestatie

	NIR coll. [MJ]	Efficiency [%]	Elek prod [kWh]
Zonder glas	572	61.6	23.9
AR-glas	486	52.2	20.2
Verlies [%]	15.0	15.3	15.5

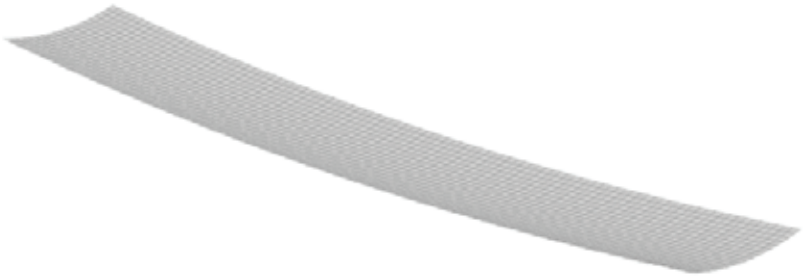
Het toepassen van hoog transparant glas zorgt desondanks voor een jaarrond verlies van ca. 15%.

2.8.7 Doorbuiging

Doorbuiging van de lamellen ten gevolge van de zwaartekracht heeft invloed op de vorm van de lamellen en daarmee de concentratie. De gevolgen van doorbuiging zijn tweeledig. Door doorbuiging zal bij bepaalde invalshoeken het gereflecteerde licht naast de collector vallen. Daarnaast zal een focusserende werking optreden die tegenovergesteld is aan de eerder beschreven divergerende werking, welke het licht naar het midden van de collector toe centreert waardoor aan weerszijden schaduwbanden ontstaan.

In deze paragraaf zijn de gevolgen van doorbuiging op de prestaties van het systeem gepresenteerd op basis van de volgend uitgangspunten:

- 17 lamellen met een lamelbreedte van 193 mm.
- De lamellen hebben een generieke focus van 3.5 m voor concentratie.
- De invloed van roeden is meegenomen.
- De doorbuiging is maximaal bij een hoek van 0 ° (lamel ligt horizontaal) en wordt naar nul afgebouwd bij een verticale stand.
- De doorbuiging is gemodelleerd als een omgekeerde zadelvorm. Dit is mogelijk niet de werkelijke vorm die ontstaat bij doorbuiging.



Figuur 31. Een horizontaal opgehangen lamel is onderhevig aan doorbuiging. De mate van doorbuiging hang af van vele parameters waaronder de lengte, vorm, het gewicht en de en stijfheid van de lamel.

In onderstaande tabel zijn de jaarrond prestaties van het systeem weergegeven in relatie tot de doorbuiging. Uit de resultaten blijkt het verlies aanvaardbaar tot ca. 20 mm doorbuiging. Prestaties bij verschillende mate van doorbuiging. en breedte van de serie geschakelde PV cellen.

Doorbuiging [mm]	NIR coll. [MJ]	Efficiency [%]	Elek prod [kWh]
0	427	64.3	17.8
2	425	64.0	17.7
5	419	63.1	17.5
10	410	61.7	17.1
20	391	58.8	16.3

2.8.8 Hoeknauwkeurigheid

Bij lamellen met hoek-voorinstelling en aansturing met één motor is de meest kritische factor de nauwkeurigheid waarmee het vaste onderlinge hoekverschil (de voorinstelling) gehandhaafd blijft.

In deze paragraaf zijn de gevolgen van doorbuiging op de prestaties van het systeem gepresenteerd voor verschillende hoeknauwkeurigheden.
Verder gelden de volgende uitgangspunten:

- 17 lamellen met 193 mm breedte
- De lamellen hebben een generieke focus van 3.5 m voor concentratie.
- De lamellen hebben een generieke virtuele focus van 30 m voor divergentie.
- De invloed van roeden is meegenomen.
- De invloed van ruiten is meegenomen.

Uit de tabel blijkt dat de hoeknauwkeurigheid < 0.1° moet liggen wil de efficiency niet beneden de ±2% verlies uitkomen.

Tabel 9. Jaarrond prestaties bij verschillende hoeknauwkeurigheden

Offset [°]	NIR coll. [MJ]	Efficiency [%]	Elek prod [kWh]
0.0	417	62.8	17.4
-0.1	416	62.6	17.3
0.1	413	62.2	17.2
-0.2	405	61.0	16.9
0.2	400	60.2	16.7
-0.5	170	25.5	7.1
0.5	205	31.0	8.6

2.9 Conclusies

Van de onderzochte concepten is het concept 3, het Venlo type met lamellen op tralieligger, de meest perspectiefvolle. Dit is vooral omdat in dat geval de ophanging en besturing van de lamellen goed aansluit bij de gebruikelijke kassenbouw. Door de beperkte breedte van de CPV-module zijn vlakke lamellen echter niet realistisch. Bij een CPV-module van 4 cm zouden dan 100 lamellen nodig zijn bij een kapbreedte van 4 m en bovendien zullen vlakke lamellen gemakkelijk doorbuigen. Voor het eindconcept is daarom gekozen voor 50 cm brede focusserende lamellen op 1.25 m afstand van de goot. Dit betekent dat per kap in tralierichting 8 lamellen naast elkaar geplaatst worden zonder (wezenlijke) tussenruimte. Hierdoor kan altijd het volledige invallende licht benut worden en wordt de warmtelast van de kas maximaal beperkt.
Uitgangspunt bij de CPV-module is een netto cel breedte van 40 mm waardoor de concentratiefactor van de lamellen minimaal 12.5 moet zijn om al het licht op de CPV-module te focusseren.

Op basis hiervan is een proefkas gebouwd die bestaat uit een 3 kaps Venlo kas met gootrichting O-W en verlaagde tralie op 1.25 m van de goot. De lamellen liggen gelijk met de bovenkant van de tralie en de collector hangt onder de nok.

De kas heeft een oppervlak van 120 m^2 (2 vakken × 5 m, 3 kappen × 4 m). De maximale afstand tussen de lamellen en de CPV-module is 2.47 m. De kas heeft in de gevels een diffuse meerlaags kanaalplaat en als dekmateriaal 4 mm 90+ tuinbouwglas.

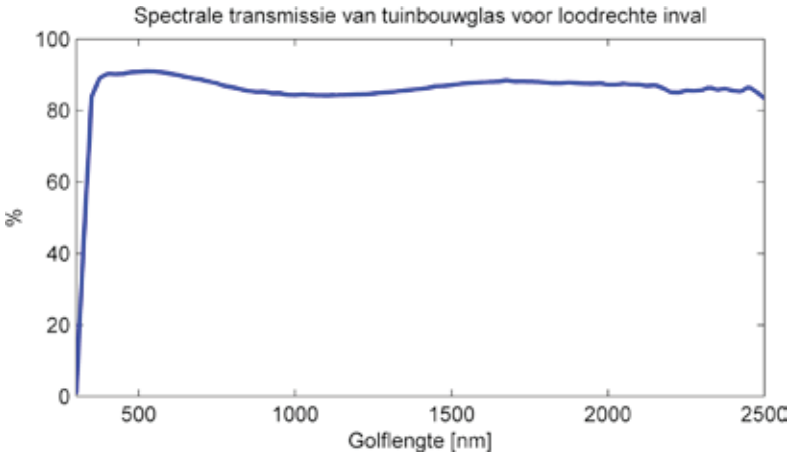
3 Theoretische prestaties

3.1 Uitgangspunten

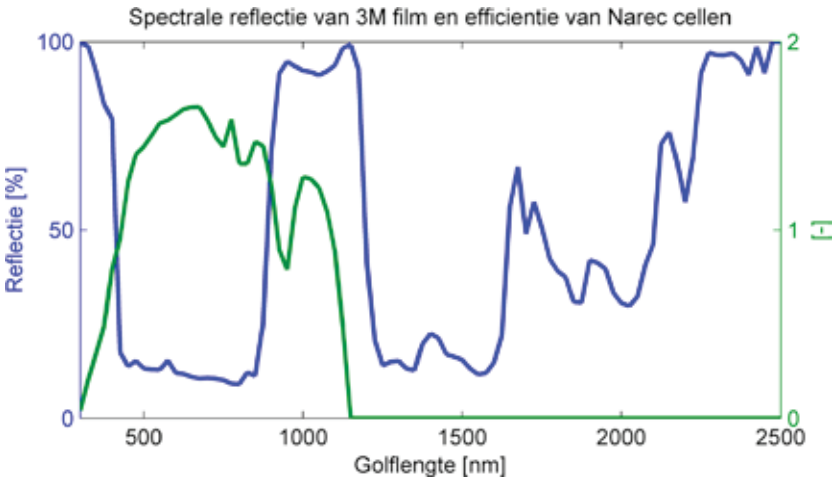
Alle simulaties uit hoofdstuk 2 zijn uitgevoerd met het ray-tracing model Raypro, ontwikkeld door Wageningen UR Glastuinbouw. Gedurende het project heeft dit model een upgrade ondergaan waardoor spectrale simulaties tot de mogelijkheden behoorden. Bij de berekening van de prestaties van het eindconcept is gebruik gemaakt van deze upgrade waardoor de spectrale reflectie van de gebruikte NIR filter, de spectrale gevoeligheid van de CPV-module en de spectrale transmissie van het gebruikte tuinbouwglas meegenomen zijn in de berekeningen.

Uit Elkas fase I (Sonneveld, 2009) is naar voren gekomen dat qua lichtdoorlatendheid in het PAR-gebied het beste commercieel verkrijgbare NIR filter de 3M Ebiral film is met een PAR-transmissie van 85.3%. De reflectie van deze folie is echter beperkt tot een gebied van 850-1200 nm (circa 40% van het NIR). Met deze film zijn ook de theoretische prestaties bepaald.

In de onderstaande figuren is de spectrale informatie van glas, NIR filter en PV-cellen weergegeven.



Figuur 32. Spectrale transmissie van tuinbouwglas voor loodrechte inval. De transmissie volgens NEN2675 is 90.2%.



Figuur 33. Spectrale reflectie van de 3M film (blauw) en de efficiëntie van de gebruikte Narec PV-cellen (groen). De folie reflecteert 55% van het UV, 13% van de PAR en 51% van de NIR.

Uit Figuur 33. blijkt duidelijk dat de spectrale efficiëntie van de Narec cellen slecht matcht met de spectrale reflectie van de 3M film. Alleen in het gebied van 900 tot 1150 nm is de match goed. De keuze voor de gebruikte materialen en folie is

echter goed te beargumenteren. Voor de folie is gebleken dat er vooralsnog geen alternatieven zijn met een acceptabele PAR transmissie. Wat betreft de PV-cellen bleek dat speciale NIR-cellen geen beter resultaat geven dan gangbare cellen. Dit komt voor een groot deel doordat de folie ook een gedeelte van het zichtbaar licht reflecteert, een gebied waarin de Narec cel juist goed werkt.

De aanpak voor het bepalen van de jaarrond opbrengst is in principe gelijk aan de aanpak beschreven in paragraaf 2.2 met het verschil dat deze berekeningen spectraal uitgevoerd zijn. Omdat niet alle componenten van het Elkas-concept uitontwikkeld zijn, met als belangrijkste component de NIR-filter, zijn voor 3 varianten zijn de theoretische jaarrondprestaties bepaald:

- (1) Elkas op praktijkschaal met een ideaal NIR-filter.
  De gemodelleerde kas is oneindig groot zodat er geen randeffecten optreden. Het NIR-filter reflecteert 8% van het UV-PAR (300 - 700 nm) en 100% van de NIR (700 - 2500 nm).

- (2) Elkas op praktijkschaal met een reëel NIR-filter (3M)
  De gemodelleerde kas is oneindig groot zodat er geen randeffecten optreden. Het filter is de 3M film en dit reflecteert 55% van het UV, 13% van de PAR en 51% van de NIR.

- (3) De proefkas zoals gebouwd in Wageningen
  De kas is gemodelleerd naar de proefkas die in Wageningen gebouwd is, inclusief constructie-elementen en randeffecten. Het filter is de 3M film en deze reflecteert 55% van het UV, 13% van de PAR en 51% van de NIR.

Verder gelden de volgende aannames:
- Het rendement van de Narec cellen is in het project Daglichtkas bepaald en is gemiddeld 12% van de globale straling
- Voor gemiddelde directe straling zijn de meetwaarden van het meteo station in Wageningen van de jaren 2008, 2009 en 2010 gebruikt. Dit station heeft een nauwkeurige meetopstelling voor het meten van directe straling.

3.2 Resultaten

3.2.1 Energieproductie

Uitgaande van bovenstaande zijn simulaties uitgevoerd voor de drie varianten en voor twee locaties namelijk Nederland en het gebied rond de middellandse zee. De resultaten zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 10. Theoretische prestaties voor een Mediterraans en Nederlands klimaat

	Mediterraan [MJ]		Nederland [MJ]	
Variant	Warmte [MJ]	Elek. [kWh]	Warmte [MJ]	Elek. [kWh]
(1) Praktijkschaal, ideaal NIR filter	854	27.9	493	16.1
(2) Praktijkschaal, reëel NIR filter	549	19.6	306	11.0
(3) Proefkas, reëel NIR filter	296	10.6	168	6.1

De Elkas op praktijkschaal (>1 ha) met een ideaal NIR-filter zou theoretisch ca. 16 kWh elektriciteit produceren in Nederland (52° lat) en bijna het dubbele in een Mediterrane regio zoals Zuid Spanje (35 - 40° lat). Het verschil met Zuid Spanje wordt veroorzaakt doordat daar de straling veel vaker direct is, een hogere intensiteit heeft en een gunstigere hoek van inval op de lamellen waardoor de concentratie beter is.

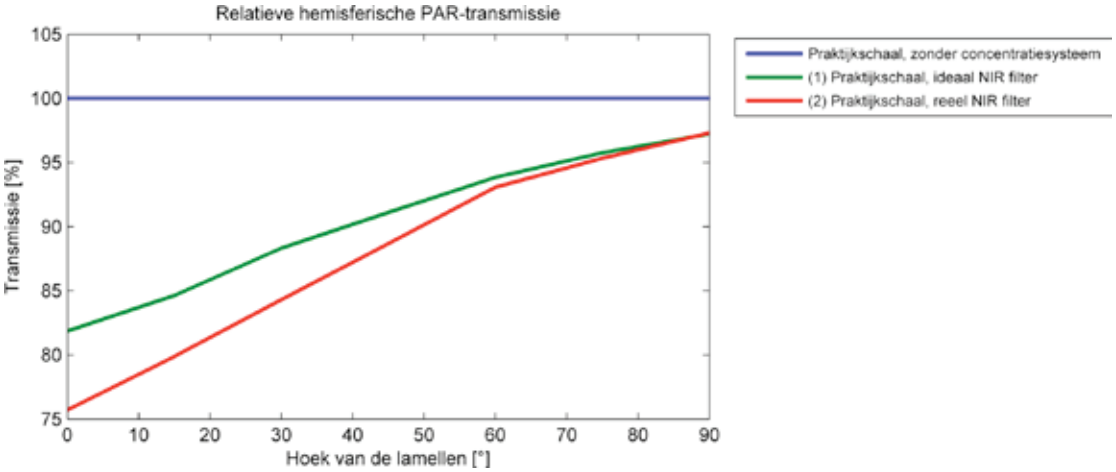
In hoofdstuk 5 worden deze theoretische prestaties vergeleken met de gerealiseerde prestaties.

3.2.2 Hemisferische PAR-transmissie

Vooral voor glasgroenten is erg belangrijk. Het concentratiesysteem en CPV-module mag niet of nauwelijks afbreuk doen aan de hoeveelheid PAR op gewasniveau. Dit kan door de lamellen gedurende lichtarme of bewolkte perioden zoveel mogelijk in een verticale stand te zetten (vaanstand) waardoor de onderschepping van de lamellen minimaal. Om dit te kwantificeren is de hemisferische PAR-transmissie berekend voor verschillende standen van de lamellen en in vergelijking met een dezelfde kas zonder concentratie-systeem. De volgende aannames zijn gedaan:

- 8 x 500 mm brede enkellaags focusserende lamellen
- Nok, roeden, goot zijn 100% licht absorberend
- 80 × 80 mm CPV-module direct onder de nok
- Alle lamellen hebben steeds dezelfde stand
- Een ideale NIR filter heeft 8% loodrechte reflectie voor PAR en 100% voor NIR.
- Het reële NIR filter heeft de eigenschappen van de 3M film.

In onderstaande Figuur is de berekende hemisferische PAR-transmissie weergegeven ten opzichte van de kas zonder concentratie-systeem. Het blijkt dat het PAR-verlies beperkt kan worden tot ca. 3% bij lamellen in de vaanstand. Bij een werkend systeem is het verlies maximaal ca. 25% bij het NIR-filter van 3M.

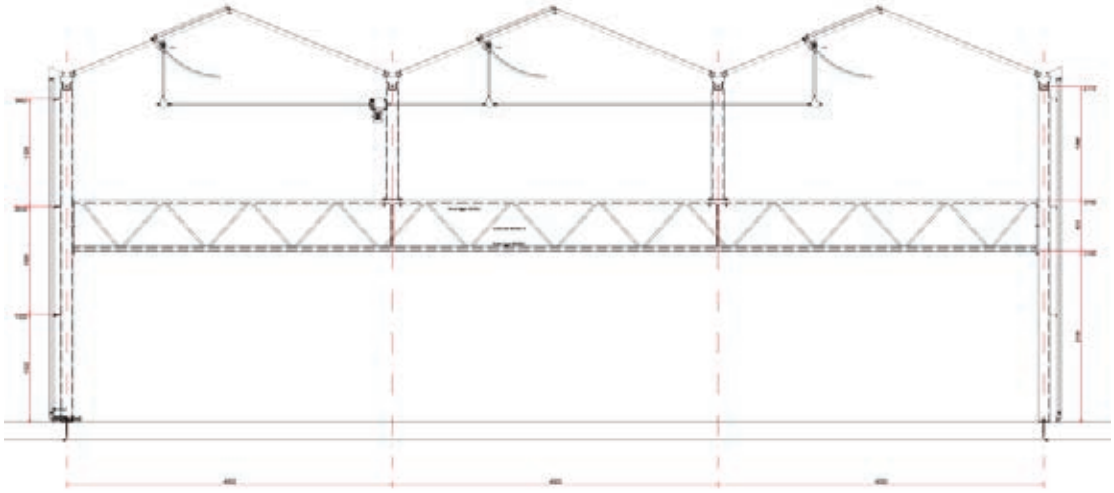


Figuur 34. berekende relatieve hemisferische PAR-transmissie als functie van de hoek van de lamellen. Bij een hoek van 0° staan de lamellen horizontaal, bij 90° verticaal.

4 Ontwerp en bouw proefkas

4.1 Bouw van de kas

Gaandeweg het project is besloten niet verder te gaan met de bestaande Elkas uit fase I en is begonnen met de sloop waarna op dezelfde locatie de Elkas fase II gebouwd is. De kas is wederom gebouwd door Bosman BV uit Aalsmeer en is een 'standaard' Venlo kas bestaande uit 3 kappen van 4.00 m breed en 2 vakken van 5 m. Het totale vloeroppervlak is 120 m^2, de goothoogte is 4.11 m, de dakhelling is 25. De bovenkant van de tralie ligt op 1.25 m onder de bovenkant van de goot. Het dek bestaat uit 4 mm gehard 90+ float glas met AR coating en ruiten van 1.246 m breed. De gevels zijn voorzien van een Bosman aluminium gevelsysteem met daarin 16 mm dik polycarbonaat beplating. De gevelplaten zijn volledig diffuus. In elke kap bevinden zich luchtramen op het zuiden. De vloer bestaat uit beton. De kas heeft 2 extra hulptralies waardoor de maximale overspanning van één lamel beperkt wordt tot 2.50 m. De kas heeft een kleine offset van 7.3° ten opzichte van het zuiden in oostelijke richting.



Figuur 35. Bouwtekening van de Elkas fase II

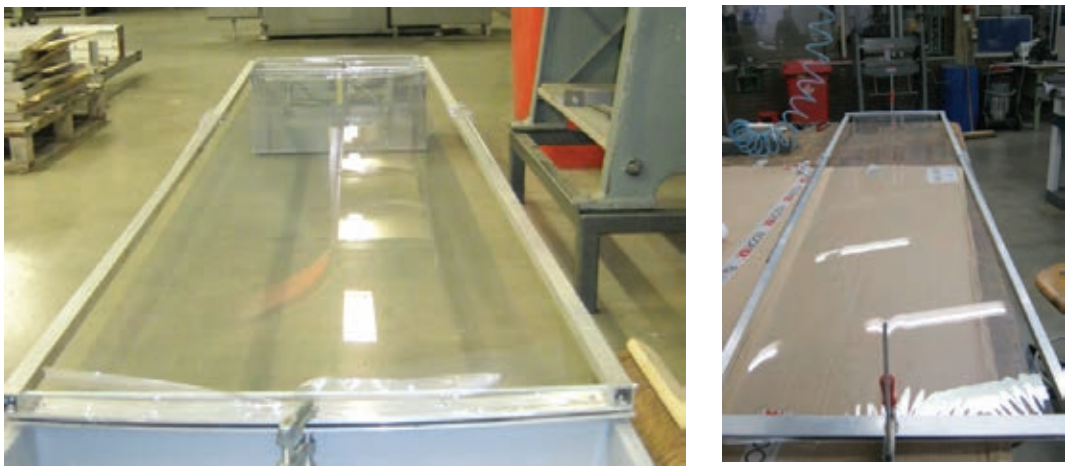


Figuur 36. Foto van de Elkas II. De kas is gebaseerd op een standaard Venlo kastype.

4.2 Lamellen

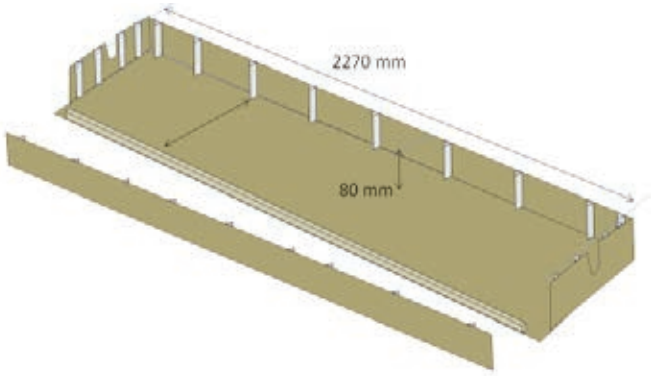
Het resultaat van het ontwerpproces is een transparante 50 cm brede focusserende lamel met een focusafstand van 2.75 m. De lamel moet vormvast zijn en mag slechts minimaal doorbuigen, zowel over de breedte als over de lengte. Vanwege de aandrijving moet de lamel voldoende torsie stijf zijn om grote lengtes door één motor te laten aandrijven. In de proefkas betekent dit dat de motoren op de middentralie gemonteerd zijn en aan weerszijden 5 m lamel aangedreven wordt.

Vanwege de goede eigenschappen op het gebied van stijfheid, slijtage en lichttransmissie is glas in principe het meest geschikte basismateriaal voor het fabriceren van de lamellen. In fase I van het project is echter duidelijk geworden dat er hoge kosten zitten aan het buigen van glas. Om deze reden is gezocht naar alternatieven voor glas. Een mogelijke oplossing was het opspannen van de NIR-folie in de juiste vorm. Hiervoor zijn enkele tests uitgevoerd met een aluminium frame. Bij een zorgvuldige opspanning in het lab bleek de lamel bleek redelijk te focusseren. Het bleek echter zeer moeilijk om de folie zodanig in te klemmen dat de vorm behouden bleef. Kleine verstoringen en bewegingen deden de focus volledig teniet. Het opspannen van folie bleek daarom niet haalbaar.



Figuur 37. Experimenten waarbij de NIR-folie gebogen opgespannen is in een metalen frame.

Hierna is besloten de lamellen uit harde kunststof te vervaardigen. In de ontwerpfase fase II is gezocht naar bedrijven die in staat zijn plastic vormen te fabriceren. In eerste instantie is hiervoor Eiso Bergsma te Amsterdam benaderd, een bedrijf gespecialiseerd in kunststof producten. Dit bedrijf heeft proeven uitgevoerd met het buigen en vouwen van PMMA platen tot lamellen. De platen waren vooraf reeds voorzien van de NIR-folie. De proefexemplaren voldeden echter niet aan de specificaties, zowel qua vorm als qua stijfheid. De lamel had een krommingsstraal die sterk varieerde over het de lengte van de lamel en de lamel boog sterk door. Ook ontstonden er bij het verwarmen veel gasbellen onder het NIR-folie, het gevolg van verschillende uitzettingscoëfficiënten van PMMA en PET (basismateriaal van de NIR-folie). Gezien de beperkte mogelijkheden van Eiso Bergsma om dit te verbeteren is in overleg besloten dit traject te stoppen.
Hierna is contact gelegd met Jansen Thermoforming B.V. te Nijverdal, een bedrijf gespecialiseerd in vacuumvormen. In de december 2011 zijn door dit bedrijf diverse proeven uitgevoerd met het aanbrengen van de folie op het basismateriaal PET. Hierbij is een speciale techniek gebruikt waarbij de folie zonder lijm aangebracht kan worden op het materiaal. Optische metingen in het optisch lab van Wageningen UR hebben aangetoond dat dit proces nauwelijks afbreuk doet aan de spectraal selectieve eigenschappen van de folie. Ten aanzien van de stijfheid van de lamel is vast komen te staan dat een enkele laag kunststof niet vormvast genoeg is. Ook omgezette randen zorgen voor (veel) te weinig stijfheid, zeker ten aanzien van de torsie. Na diverse proeven is uiteindelijk besloten om de lamellen als box-constructie uit te voeren. Alleen op die manier kan voldoende stijfheid worden verkregen. Hierdoor moesten de lamellen voor de proefkas allemaal handmatig in elkaar gelijmd worden uit afzonderlijke PET componenten die door Jansen Thermoforming B.V. zijn aangeleverd. Hiervoor zijn door Wageningen UR allerlei hulpstukken ontwikkeld zoals een betonplex mal en lijmapparatuur. Ondanks het vele handwerk is hierdoor het werk relatief beperkt gebleven. Het resultaat was 32 stuks lamellen met een enorme stijfheid, zowel in torsie als doorbuiging.



Figuur 38. Speciaal voor het lijmen ontwikkelde mal

Het produceren en monteren van de lamellen is in 2 fases uitgevoerd. De eerste serie van 16 lamellen zijn uitgevoerd met 3 tussenschotten per 2.20 m lamel. Na montage en test in de kas bleek te toplaag met de NIR-filter door te buigen tussen de tussenschotten. Om deze reden is besloten de 2e serie lamellen met het dubbele aantal tussenschotten uit te voeren. Bij deze lamellen was echter nog steeds sprake van doorbuiging, zij het in veel mindere mate.

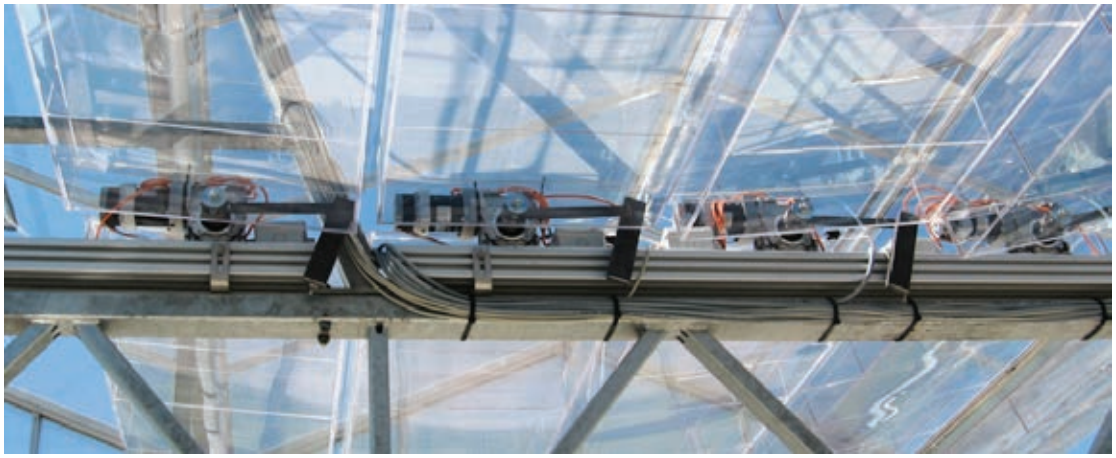


Figuur 39. Montage van de lamellen in de proefkas.

4.3 Aandrijving

Het basisconcept van lamellen gaat uit van het feit dat voor focussering de relatieve hoekverstelling van alle lamellen gelijk blijft. Met andere woorden, eenmaal afgesteld kan de zon gevolgd worden door alle lamellen met dezelfde hoek te verdraaien, wat impliceert dat in principe één motor volstaat voor de hele kas. Om een aantal redenen is gekozen om voor de proefkas alle lamellen afzonderlijk aan te sturen met één motor per lamel. Op deze manier kan de individuele bijdrage van elk van de lamellen bepaald worden en hiermee maximaal gefocusseerd worden.
De motoren zijn gemonteerd op de middelste tralieligger. Aan weerszijden motor zijn lamellen gemonteerd opgedeeld in 2 secties van 2.50 m. De motoren zijn voorzien van een home-sensor waardoor na een homing procedure altijd de absolute positie bekend is.

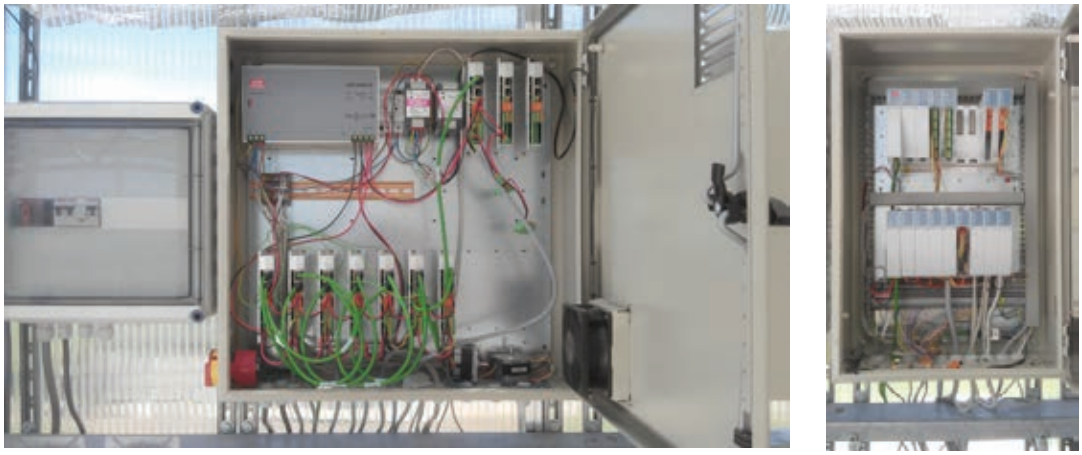
De lamelsecties zijn onderling doorverbonden met assen op kunststof glijlagers. Ook bleken de geleverde motorvertragingen nog teveel speling te hebben. Dit is opgelost door aan elke motoras een contragewicht te monteren dat ervoor zorgt dat



Figuur 40. Aandrijving van de lamellen met één elektromotor per lamel en contragewicht om de speling op de overbrenging op te heffen

4.4 Meet- en regelsystemen

Voor het aansturen van de motoren is gekozen voor SigmaControl, dealer van Sigmatek, een veelgebruikte oplossing in de industriële automatisering. Het systeem bestaat uit een netwerk waarin o.a. de motorsturingen, PLC's en I/O modules zijn opgenomen voor het meten van de diverse signalen. Door middel van softwaredrivers kan het systeem relatief eenvoudig worden aangestuurd vanuit de door Wageningen UR ontwikkelde besturingssoftware.



Figuur 41. Hardware voor het meten en aansturen van de lamellen, gemonteerd in de Elkas



Figuur 42. Diffuse stralingsmeter

Met het I/O-systeem zijn de volgende grootheden gemeten:

- Directe zonnestraling (continu)
- Diffuse zonnestraling (continu)
- Korstluitstroom van de totale module en de individuele cellen (44x) (continu)
- In- en uitgaande temperatuur en debiet van het koelwater (continu)
- Lichtverdeling op de collector door middel van een diode-array (continu)

De geregistreerde data zijn voor de maanden juli t/m oktober op 30 seconden basis opgeslagen.

4.5 CPV-module

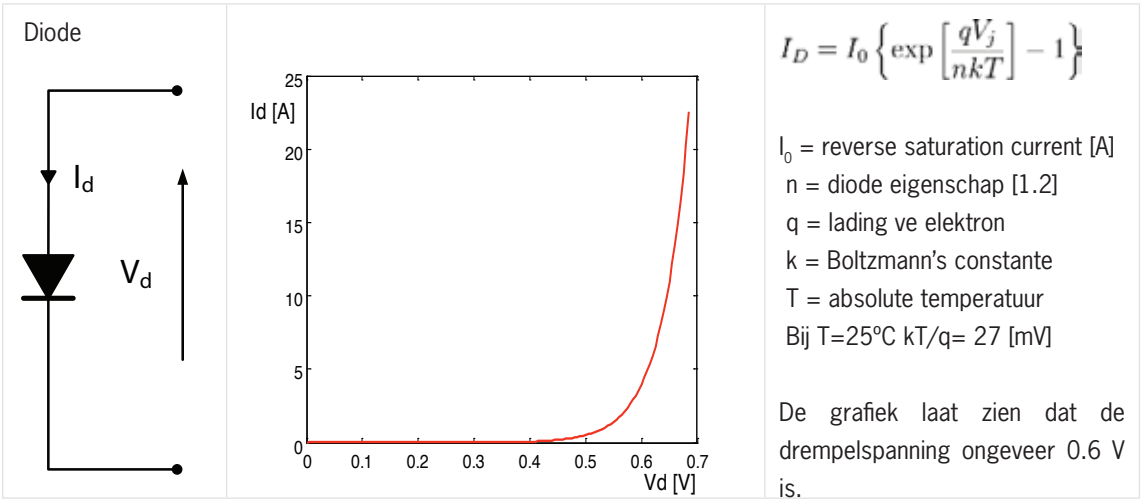
4.5.1 Theorie

Enkele basis principes van PV cellen

Zonnecellen zijn meestal gemaakt van silicium. Dit silicium bestaat uit twee lagen. Onder invloed van licht gaat er tussen de twee lagen een elektrische stroom lopen. Daarom heten zonnecellen ook wel fotovoltaïsche cellen (Grieks photos: licht, en volt naar de eenheid van elektrische spanning. Afgekort wordt gesproken van PV-systemen. Een PV-cel is in feite een diode die geoptimaliseerd is om licht op te vangen en om te zetten in een elektrische stroom. (vrij naar Wikipedia en PVEDUCATION.ORG).

Werking van de Si diode.

Een diode bestaat uit twee lagen silicium waaraan een aparte stof is toegevoegd, vaak fosfor en boor waardoor het zgn. P- en N-silicium wordt gevormd. Fosfor is een donor van elektronen en boor een acceptor. Een elektron heeft een negatieve lading, aan de plaats waar een elektron heeft gezeten een zgn. gat wordt een positieve lading toegekend. Geleiding ontstaat nu door het verplaatsen van elektronen en gaten. Door de twee lagen in elkaar te laten overgaan, ontstaat er een zogenaamde PN-overgang. In de grenslaag zullen elektronen uit het N-silicium door de altijd aanwezige thermische beweging in het P-silicium terechtkomen, waar ze meteen in gaten worden gebonden. Het gevolg is dat er een zone zonder vrije ladingsdragers ontstaat, de *uitputtingszone*. Een laagje N-silicium blijft met een tekort aan elektronen achter, dus positief geladen, en het aangrenzende laagje P-silicium heeft extra elektronen en is dus negatief geladen. Er zijn geen elektronen meer die van hun plaats willen, de PN-overgang geleidt niet. Leggen we een externe spanning aan tussen het N- en P-silicium, dan zal, afhankelijk van de polariteit, de *uitputtingszone* vergroot worden (dus geen stroom doorlaten), of zullen de elektronen teruggedreven worden, zodat na overwinnen van een zekere drempelspanning geleiding optreedt. De PN-overgang is dus in de ene richting geleidend en in de andere niet: een zgn. diode een halfgeleider. Bij een aangelegde spanning boven de drempelspanning neemt de geleiding zeer sterk (exponentieel) toe, de diode gaat volledig in geleiding, weergegeven in Symbool en overdrachtskarakteristiek met bijbehorende formule van een diode. Bij een spanning in de omgekeerde richting gaat slechts een zeer kleine stroom lopen, de sperstroom. Het symbool van een diode is een pijl die de richting van de geleiding aangeeft.

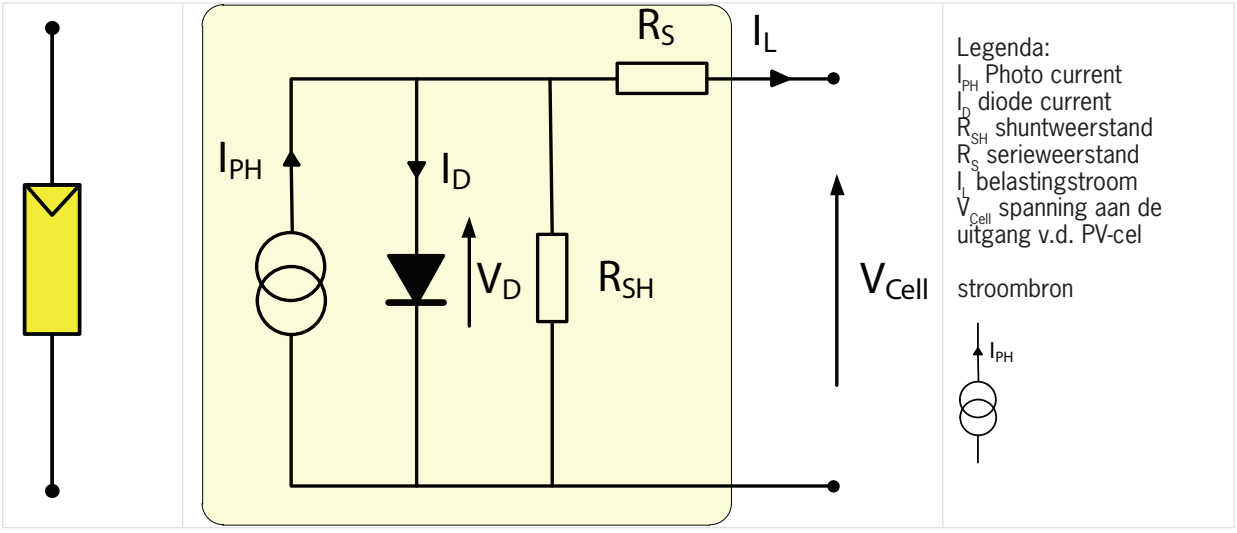


Figuur 43. Symbool en overdrachtskarakteristiek met bijbehorende formule van een diode

Een diode heeft intern basismateriaal, overgangen en aansluitdraden die een weerstand vormen, deze worden weergegeven als één enkele serieweerstand R_S. Intern lekt ook een deel van de lading weg, dit wordt weergegeven als één enkele parallel- of shuntweerstand R_{SH} (Figuur 43.).

Werking van de fotovoltaische cel

De geleiding in een PN-overgang kan ook door invallend licht (fotonen) veroorzaakt worden. Een foton met voldoende energie kan een elektron uit de buitenste baan schieten zodat deze vrij kan bewegen, er ontstaat weer een gaten- en elektronenstroom. Omdat elk foton met voldoende energie telkens één elektron vrijmaakt is de elektrische stroom die ontstaat evenredig met de hoeveelheid invallend licht, de elektrische stroom is evenredig met de lichtstroom. Een deel van de elektronen valt echter weer terug, de verhouding tussen fotonen en elektronen wordt de Quantum Efficiency genoemd, in het ideale geval is QE=1. Een PV-cel kunnen we dus opgebouwd denken uit een lichtafhankelijke stroombron I_{PH} parallel aan een diode (Figuur 44.).



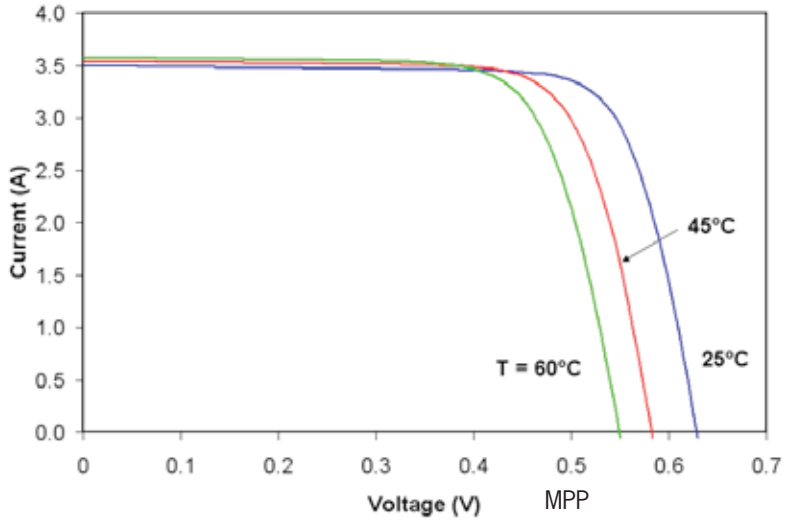
Figuur 44. Symbool en vereenvoudigd vervangschema van een PV-cel

Als een PV-cel onbelast is zal de volledige stroom I_{PH} door de diode lopen (I_L=0), alle opgewekte energie wordt weer in de diode gedissipeerd. De open cel spanning V_{OC} over de aansluiting van de PV-cel wordt dan gelijk aan V_D en zal iets hoger dan de drempelspanning worden. Bij kortsluiting wordt de stroom $I_L=I_{SC}$ (Short Circuit), deze stroom zal vrijwel gelijk zijn aan IPH en dus evenredig met het vallend licht. $I_{SC}\approx I_{PH}$::Illuminatie. De kortsluitstroom geeft een goede indicatie over de kwaliteit van de PV-cellen, de mate van het invangen van het licht respectievelijk focussering.

Een PV-cel is geoptimaliseerd om licht in te vangen, en heeft dus een groot vlak oppervlak. De lading die over het gehele oppervlak wordt opgewekt wordt via dunne geleidende banen naar de zijkanten afgevoerd. Al deze banen hebben een niet te verwaarlozen weerstand die over het gehele oppervlak verdeeld zit. Een PV-cel wordt daarom vaak gemodelleerd als een grote groep diodes die via een netwerk van weerstanden zijn gekoppeld.

Het maximaal afgegeven vermogen van een PV-cel.

Om het maximaal afgegeven vermogen van een PV-cel te bepalen wordt de cel belicht met een standaard intensiteit van 100 mW/cm^2 (1000 W/m^2 1Sun). De standaard temperatuur is 25ºC maar vaak ook 300ºK (27 °C). De cel wordt vervolgens belast met een weerstand die varieert van oneindig tot 0Ω, resp. van open circuit tot kortsluitsluiting. Al deze meetwaarden vormen de IV-karakteristiek, zie Figuur 45, blauwe curve. In elk punt kan het vermogen berekend worden met P=U*I, bij open circuit geldt I=0 dus P=U*I=0, bij kortsluiting geldt U=0 dus P=0. Ergens daar tussen in ligt het punt waar het product U*I maximaal is, dit punt van maximum vermogen heet MPP (maximum power point). Dit is de rechthoek onder de IV curve waarvan het oppervlak maximaal is.



$P_{MPP}=V_{OC} * I_{SC} * FF$

MPP = max. power point
V_{OC} = open cel spanning
I_{SC} = kortsluitstroom
FF = Fill Factor [0.6…0.8]
Temp. coefficient= -2.2 mV/ºC

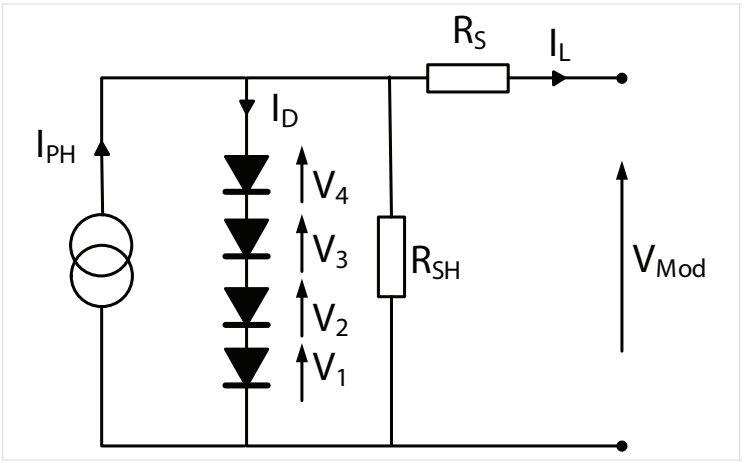
bron: pveducation.org

Figuur 45. Voorbeeld van IV curven met Max. Power Point en temperatuurafhankelijkheid.

De spanning van een PV-cel verandert met -2.2 mV/ °C, de IV-curve loopt naar links bij stijgende temperatuur. De maximale stroom daarentegen stijgt maar heel weinig, het vermogen zal bij toenemende temperatuur dus afnemen. B.v. bij een stijging van 20ºC zal de spanning 44mV zakken, op een V_{MPP} van 550mV, dit geeft vermogensverlies van ≈8% (Figuur 45.). De overgang van blauwe naar de rode curve. Bij een collector waarbij de elektrische energie en thermische energie gecombineerd worden een zgn. CPVT werkt dit tegenstrijdig, de collector kan alleen voor een van beide geoptimaliseerd worden.

Serie schakeling van PV-cellen.

Als PV-cellen in serie worden geschakeld dan worden de stroombronnen in serie geschakeld, de uiteindelijke ketenstroom wordt dan gelijk aan de zwakste stroombron in de keten. De totale ketenspanning wordt gelijk aan de som van alle spanningen. Het vervangschema wordt weergegeven in Figuur 46. Een grote spreiding in de stroom I_{PH} zal het rendement van de totale keten dus verlagen.



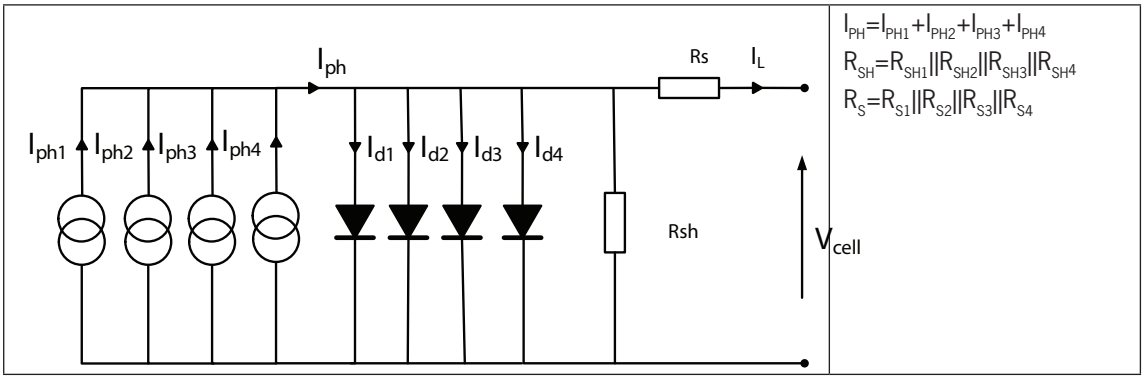
Ketenstroom:
$I_{PH}=\min(I_{PH1},I_{PH2},I_{PH3},I_{PH4})$

Totale spanning:
$V_{Mod}=V_1+V_2+V_3+V_4$

R_S en R_{SH} van de module is ≈4* de waarde die een enkele diode heeft.

Figuur 46. Vervangschema van een module van 4 in serie geschakelde PV-cellen.

Het parallel schakelen van PV-cellen.

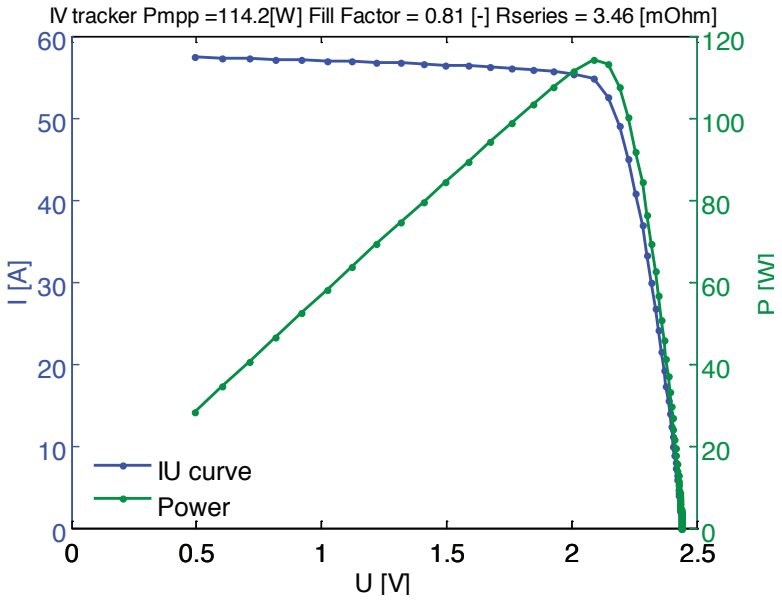


Figuur 47. Parallel schakeling van cellen

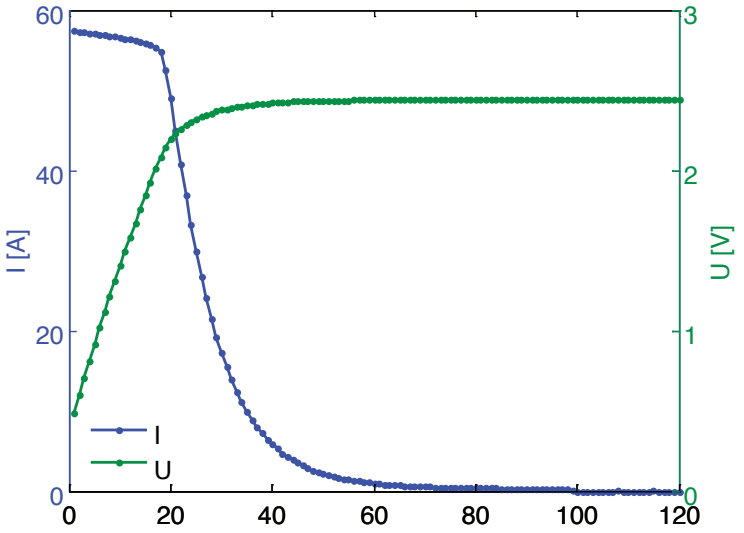
Het gecombineerd parallel en in serie schakelen van PV-cellen.
In het project "Daglichtkas" is de invloed van de aansluitdraden berekend op basis hiervan is besloten dat elke PV-cel via een koperader van 6 mm2 wordt aangesloten.

De resultaten van de samengestelde PV-module van Elkas II.
De totale PV-module in de lamellenkas bestaat uit 4 in serie geschakelde modules die elk weer bestaan uit 11 PV-cellen in parallel. De totale spanning wordt dan 4x de spanning van 1 PV-cel en de stroom wordt 11x de stroom van 1 PV-cel. Voor deze lage spanning (VOC=2.4V) en hoge stromen (ISC =90A) zijn geen commerciële inverters beschikbaar om het vermogen aan het net te leveren. Er is besloten om het vermogen te berekenen op basis van P=VOC * ISC * FF. De VOC en ISC kunnen permanent gemeten worden maar de fill factor(FF) is niet exact bekend. De fill factor kon echter wel goed ingeschat worden door bestudering van de IV-karakteristiek van de collector. De geleverde energie kan berekend worden door het vermogen over de tijd te integreren.

Voor het bepalen van de fill factor is in eigen beheer een IV-tracker, speciaal voor deze specifieke omstandigheden (lage spanning en grote stroom), ontwikkeld. Het resultaat van de meting wordt weergegeven in Figuur 49
Het vermogen is in elk punt berekend met P=V*I, het maximum vermogen P_{MPP} is de top van de groene curve in Figuur 48. Het resultaat van de berekening FF=0.81 is gunstiger dan op basis van de fabrieksgegevens verwacht mocht worden. Mogelijk oorzaken zijn: hoger PV rendement door geconcentreerd invallend licht en lagere module temperatuur door koeling, maar ook meetfouten.



Figuur 48. IV-curve van de CPV- module.



Figuur 49. I en U als functie van het vermogen

4.5.2 Implementatie

Vier stuks CPV-modules met elk 11 cellen zijn afwisselend parallel en in serie bedraad om zo slim mogelijk om te gaan met de optredende schaduw op de cellen. De module is voorzien van arrays met lichtgevoelige diodes, grotendeels analoog aan de uitvoering in het project Daglichtkas, om de lichtverdeling op de collector te kunnen bepalen. Daarnaast is extra bedrading toegevoegd om van de middelste 2 modules de stroomsterktes van alle 22 cellen afzonderlijk te kunnen meten. Het koelsysteem voor de CPV-module bestaat uit een koelbuis met een watertemperatuur tussen de 20 en 30 °C.



Figuur 50. Bedrading van de CPV-modules door Wageningen UR Glastuinbouw



Figuur 51. Installatie van de CPV-module in de Elkas. Door middel van spanbanden wordt de CPV-module richting de onderkant van de nok getrokken.

4.5.3 Besturingssoftware

De software voor postitieregeling van de lamellen en het registreren van meetdata is door Wageningen UR Glastuinbouw ontwikkeld en communiceert met het SigmaControl I/O-systeem.



Figuur 52. Screenshot van de besturingssoftware ontwikkeld door Wageningen UR

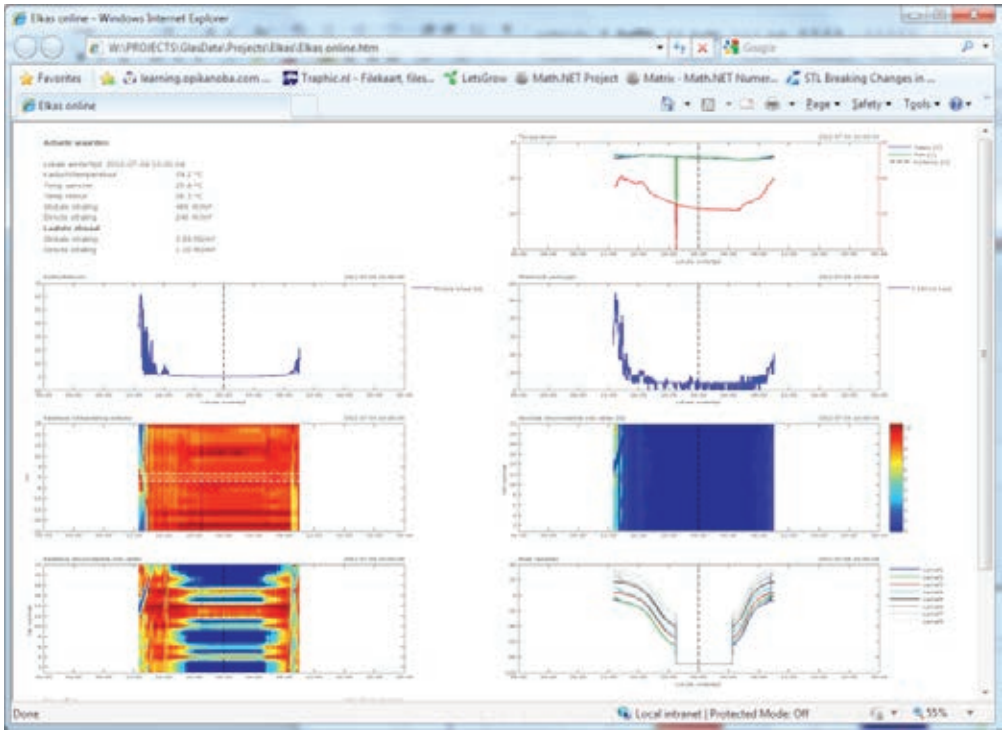
Het bijsturen van de lamellen gebeurt continu tussen zonsopkomst en zonsondergang met een interval van 60 sec. De procedure is als volgt:

- Bepaling zonnestand op basis van de actuele tijd
- Bepaling stand van elke lamel op basis van de plaats van de lamel ten opzichte van de CPV-module en de zonnestand
- Aansturen van de motoren naar de juiste positie

Daarnaast worden om de 10 minuten de berekende posities “gefinetuned” door per lamel de optimale positie te bepalen op basis van de gemeten korstsluitstroom. De procedure is als volgt:

- Update op basis van positieberekening wordt uitgevoerd
- Alle lamellen worden 3° uit de focus gedraaid
- Per lamel wordt de lamel over een bereik van 6° (-3° tot +3°) gedraaid terwijl simultaan de voor de directe straling gecorrigeerde korstluitstroom gemeten wordt
- Als geen duidelijk optimum gevonden wordt, wordt de eerder berekende theoretische waarde als optimum genomen
- Alle lamellen worden naar de gevonden optimale hoek gedraaid
- De Sun tracking verloopt verder vanuit deze, mogelijke iets aangepaste positie

Om de Elkas te monitoren is software ontwikkeld die meerdere keren per uur het bestand met geregistreerde data uitleest, analyses uitvoert en grafieken produceert. De output kan door middel van een html-viewer (Elkas online) in een internet browser op afstand bekeken worden.



Figuur 53. ELKAS online is vanuit de internet browser te openen

5 Meetresultaten en opbrengstbepalingen

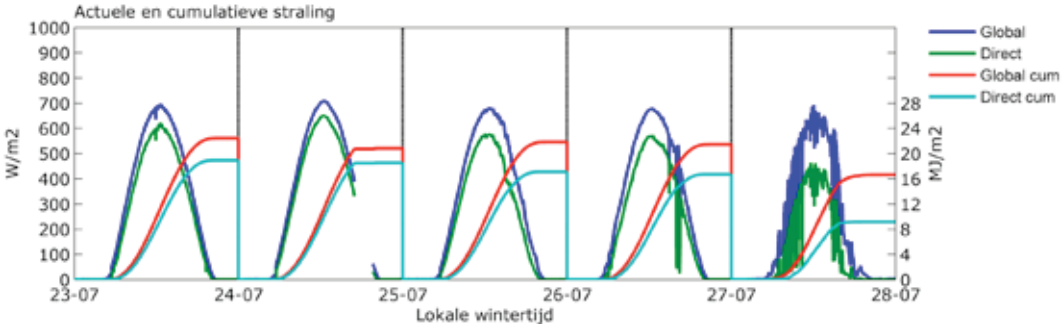
5.1 Opzet

In het voorjaar 2012 is begonnen met de installatie van de Elkas waardoor deze begin juni 2012 gebruiksklaar was. De kas is vervolgens over de periode juni t/m oktober 2012 vrijwel continu operationeel geweest.

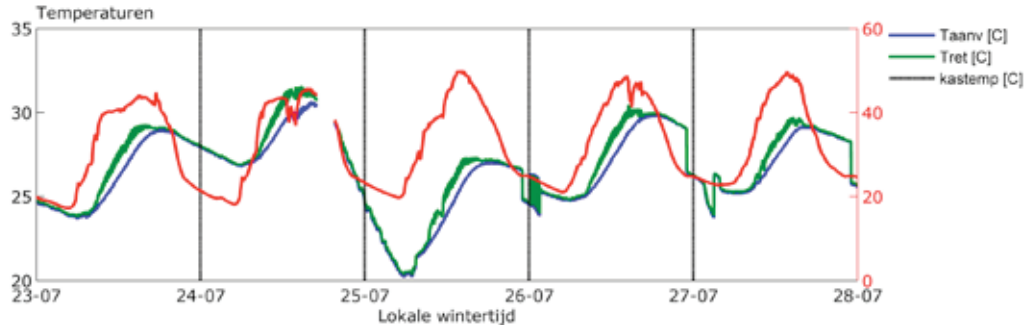
De volgende zaken zijn gemeten en geregistreerd:

- directe zonnestraling (continu)
- Maximum power point (MPP) van de CPV cellen (eenmalig)
- Korstluitstroom van de totale module en de individuele cellen (44x) (continu)
- In- en uitgaande temperatuur en debiet van het koelwater (continu)
- Lichtverdeling op de collector (continu)

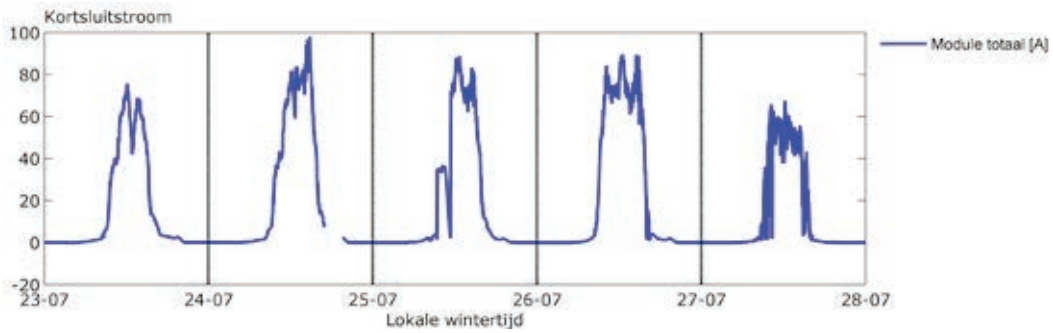
In onderstaande figuren is een overzicht gegeven van de belangrijkste geregistreerde data in de relatief stralingsrijke periode van 23 t/m 27 juli 2012.



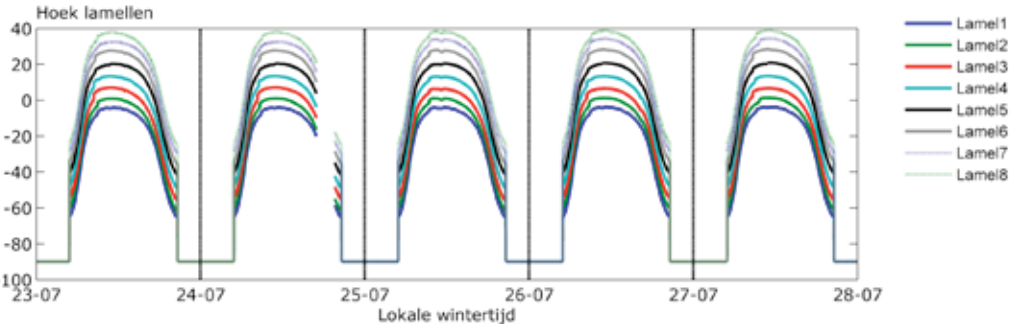
Figuur 54. Gemeten directe straling gedurende de periode 23 t/m 27 juli



Figuur 55. Aanvoer-, retour- en kasluchttemperatuur gedurende de periode 23 t/m 27 juli



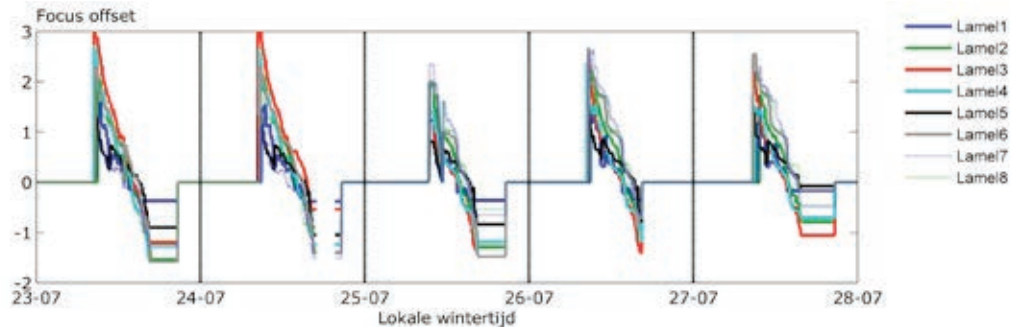
Figuur 56. Gemeten kortsluitstroom van de totale CPV-module gedurende de periode 23 t/m 27 juli



Figuur 57. Gerealiseerde positie van de lamellen gedurende de periode 23 t/m 27 juli

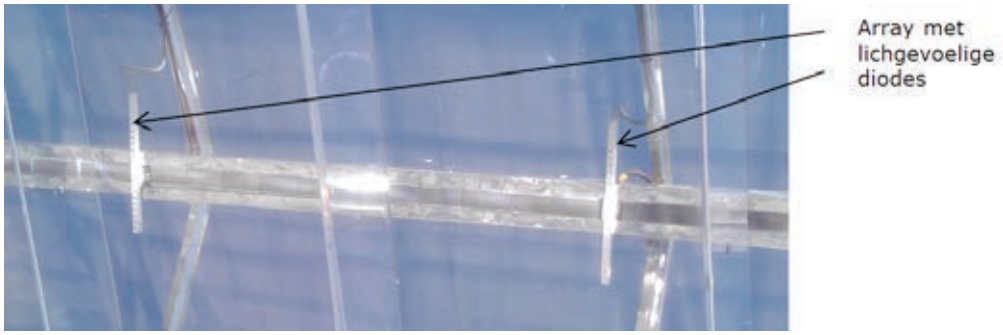
5.2 Focussering

Gedurende de hele meetperiode zijn de lamellen bij voldoende directe straling elke 10 minuten ge-finetuned. Dit houdt in dat op basis van de gemeten stroomsterkte van de gehele CPV-module elke lamel in de optimale positie gezet wordt. In onderstaande Figuur is voor de directe stralingsrijke periode van 23 t/m 27 juli de gevonden offset ten opzichte van de berekende positie weergegeven. Uit de Figuur blijkt dat rond het middaguur de berekende positie binnen 1 graad van de gevonden optimale positie ligt. Aan de randen van de dag wordt het verschil groter waarvoor een mogelijk verklaring ligt in het feit dat dan de lichtintensiteit lager is, de focussering slechter en veel randeffecten optreden.



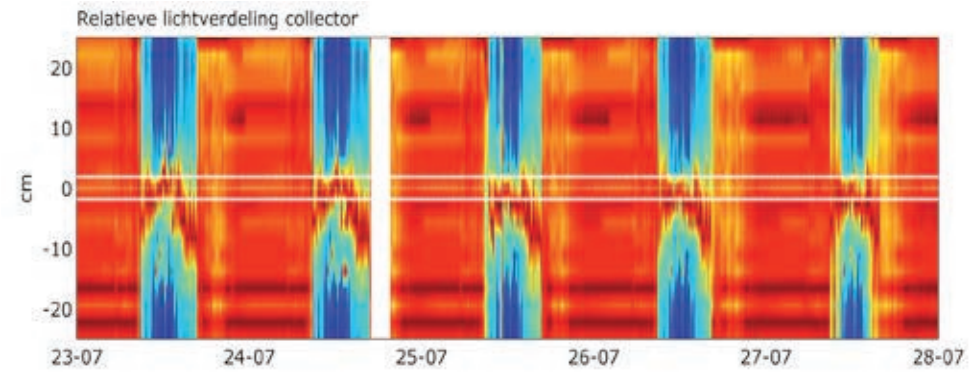
Figuur 58. Door fine tuning gevonden verschil in graden, tussen de optimale en berekende positie. Rondom het middaguur wijkt de berekende positie minder dan 1 graad af van de optimale positie.

Met een array van lichtgevoelige diodes is gedurende de meetperiode de lichtverdeling op de CPV-module gemeten (Figuur 59.). Hoewel deze verdeling niet helemaal overeenkomt met de werkelijke verdeling op de cellen (diodes zitten ca. 3-4 cm lager dan de cellen) geeft dit een goede indicatie over de focussering.



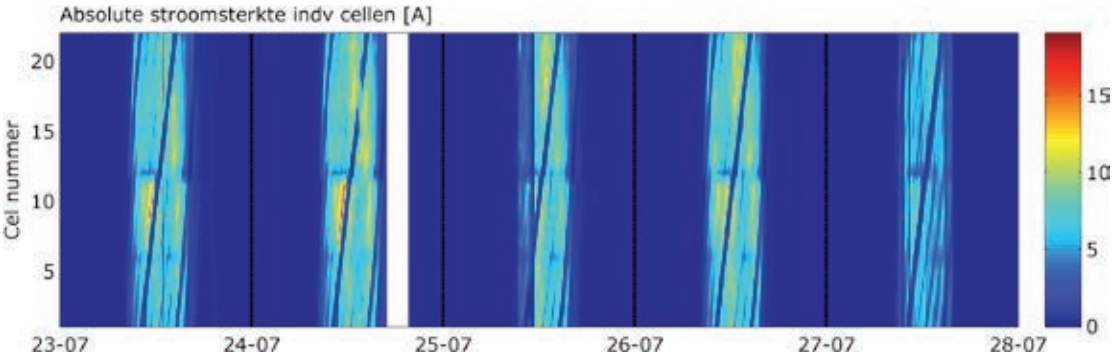
Figuur 59. CPV-module diode-arrays voor het meten van de lichtverdeling dwars op de collector. Door de diode-arrays in 2-voud uit te voerden kan tijdelijke beschaduwing ten gevolge van constructie voorkomen worden.

Met deze diode-arrays is de lichtverdeling over de breedte van de cellen (y-as) in de tijd zichtbaar gemaakt. In Figuur 60. is voor de periode 23 t/m 27 juli met veel directe straling de lichtverdeling in de tijd weergegeven.



Figuur 60. Relatieve lichtverdeling over de CPV-module in de tijd waarbij duidelijk te zien is dat de focus niet op het midden van de 4 cm brede module ligt.

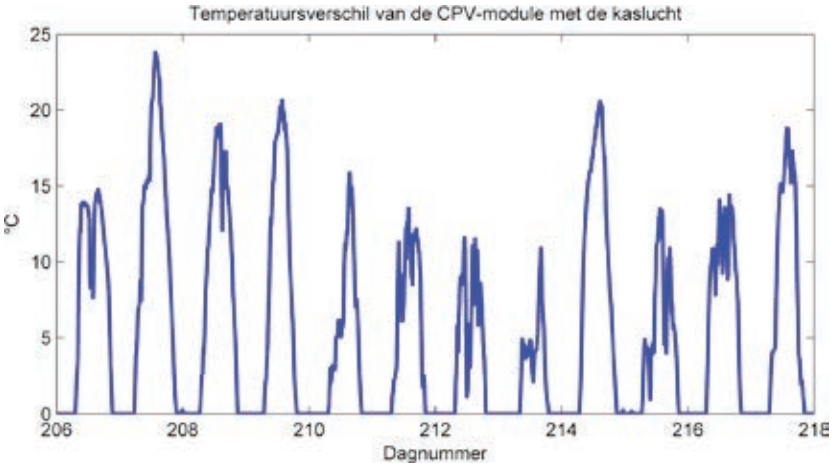
De CPV-module is zodanig bedraad dat de individuele stroomsterkte van de binnenste 2 × 11 cellen kan worden gemeten. In onderstaande Figuur is deze stroomsterkte per cel in de tijd weergegeven waarbij een beeld ontstaat van de lichtverdeling over de lengte van de CPV-module (y-as). In de figuren zijn een aantal dagelijks terugkerende diagonale lijnen te zien die veroorzaakt worden door onderdelen van de kasconstructie in tralie-richting of door onregelmatigheden in de lengterichting van de lamellen zoals de motoren. De breedste band is het gevolg van de tralieligger met daarop de motoren voor aandrijving.



Figuur 61. Voorbeeld dichtverdeling over de collectorlengte. Duidelijk te zijn is de dagelijkse schaduwlijn die veroorzaakt wordt door de tralieligger met daarop de motoren.

5.3 Thermisch en elektrisch vermogen

Gedurende de meetperiode zijn voortdurend het elektrisch en thermisch vermogen gemeten en berekend. Het thermisch vermogen is berekend door het temperatuurverschil over de CPV-module te vermenigvuldigen met het waterdebiet minus de opwarming ten gevolge van het temperatuurverschil met de kaslucht. Deze tweede term levert een behoorlijke bijdrage aan de warmteoogst van de CPV-module. Door het ontbreken van het koelende effect van gewasverdamping en beperkte ventilatiemogelijkheden van de kas is de temperatuur namelijk relatief hoog opgenomen. In de onderstaande Figuur is voor de periode rond 1 augustus het temperatuurverschil weergegeven.



Figuur 62. Temperatuurschil van de CPV-module met de kaslucht op momenten dat er elektriciteit wordt geproduceerd. De warmteoogst ten gevolge van de relatief warme kaslucht is in de simulaties niet meegenomen.

Een goede schatting van de convectieve bijdrage aan de warmteoogst kan gemaakt worden door de warteuitwisselingscoëfficiënt van ca. 2 W/m^2/K van een verwarmingsbuis als uitgangspunt te nemen. De convectieve warmte kan dan berekend worden volgens:

$$Pconv = \frac{2 \times dT}{4} \quad [W/m^2]$$

Met een warteuitwisselingscoëfficiënt van 2 W/m^2/K en een kapbreedte van 4 m.
De netto warmteoogst kan vervolgens berekend worden door:

$$dT = Tuit - Tin \quad [°C]$$

$$Pth = dT \times debiet \times \frac{warmtecap}{20} - Pconv \quad [W/m^2]$$

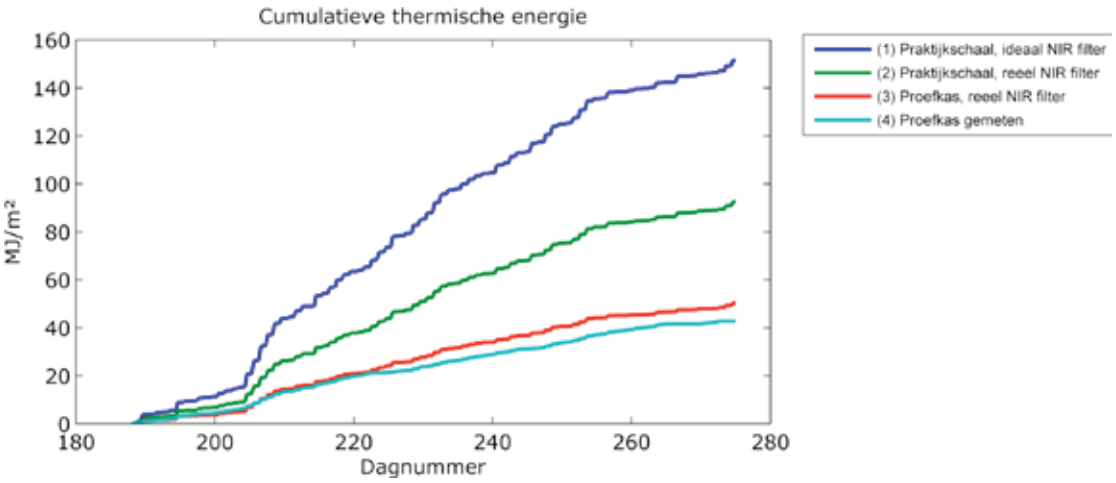
Met een debiet van 0.2 liter/s, een warmtecapaciteit van 4.179e6 J/m^3/K en een CPV-module die 20 m^2 kasvloer bestrijkt.

Het elektrisch vermogen is bepaald door de gemeten korstluitstroom te vermenigvuldigen met de gemeten fill factor volgens:

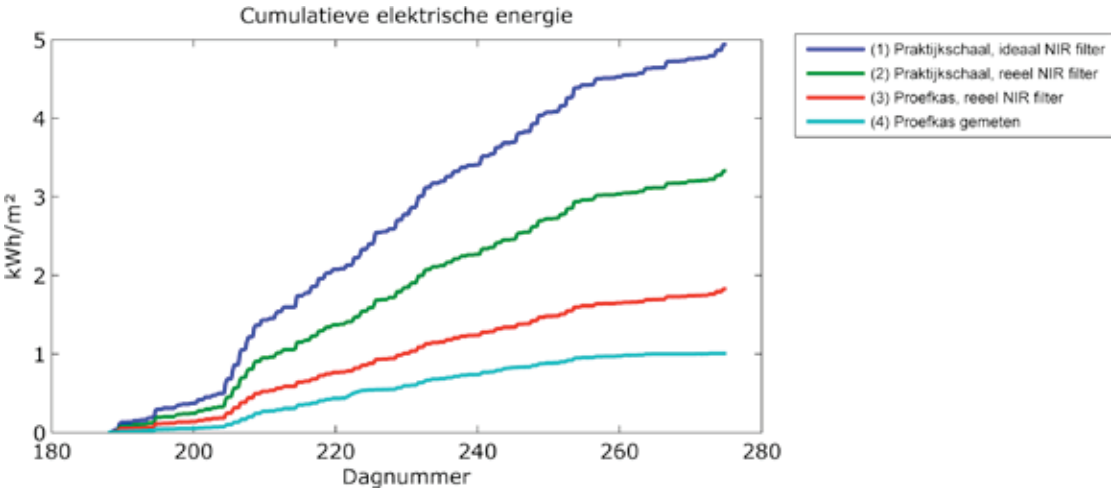
$$Pel = \frac{U \times I}{1.25} \times \frac{0.7}{4} \quad [W/m^2]$$

Met een celspanning van 0.6V, een CPV-module lengte van 1.25, een kapbreedte van 4 m en een fill-factor van 0.7.

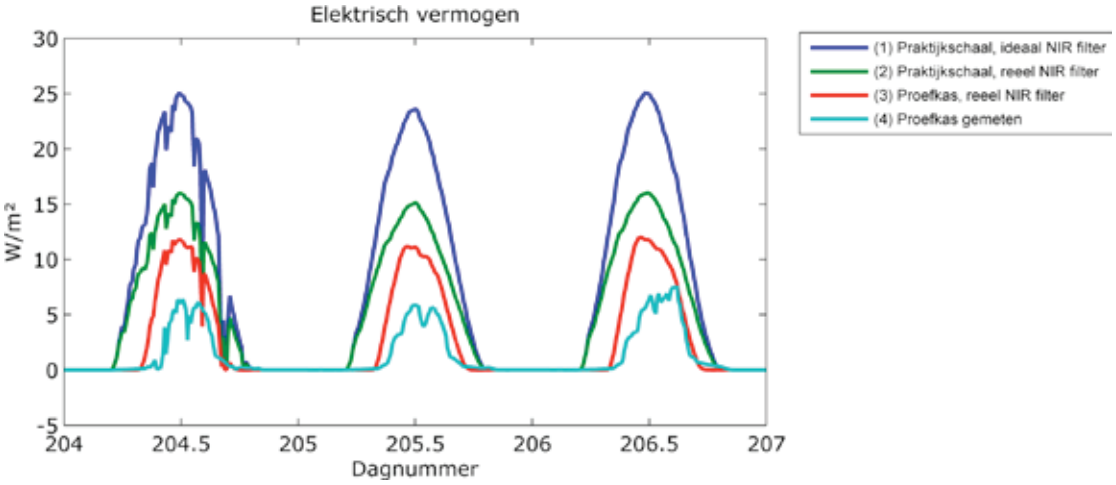
Op basis van de metingen en combinatie met bovenstaande formules zijn de geoogste warmte en opgewekte elektriciteit bepaald voor de meetperiode van 6 juli t/m 1 oktober 2012. Om een vergelijking te kunnen maken met de simulaties is voor dezelfde meetperiode en op basis van de zelfde gemeten straling de opbrengst bepaald voor de varianten uit hoofdstuk 3.1, namelijk de praktijkschaal met een ideaal NIR-filter, praktijkschaal met het 3M NIR-filter en de proefkas in Wageningen. In onderstaande figuren zijn de resultaten telkens in één grafiek weergegeven.



Figuur 63. Cumulatieve thermische energie die over de meetperiode verzameld is.



Figuur 64. Cumulatieve elektrische energie die over de meetperiode verzameld is.



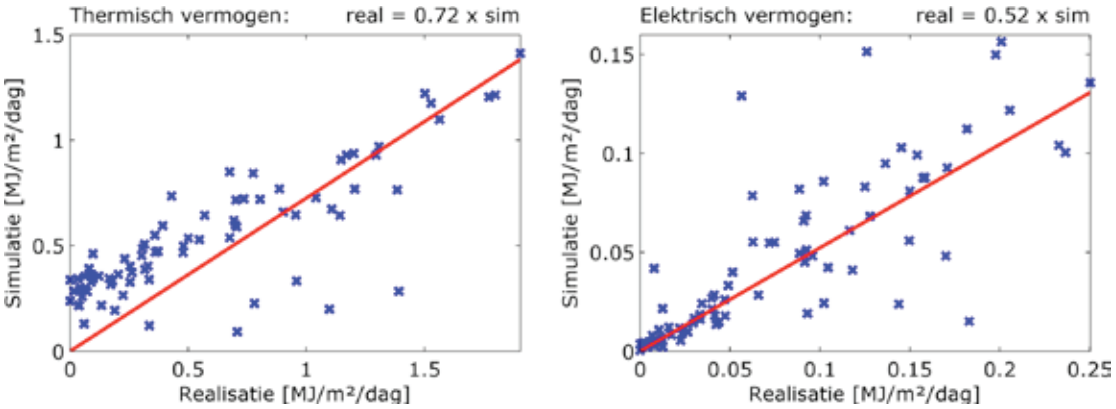
Figuur 65. 3-daags etmaalverloop van het elektrisch vermogen voor de proefkas naast de theoretisch berekende waarden voor 3 varianten.

De totale warmte- en elektriciteitsproductie over de meetperiode bedraagt 42.2 MJ/m^2 en 1.0 kWh/m^2 respectievelijk (Tabel 11.). Dit betekent dat 84% van de theoretische warmteproductie en 56% van de theoretische elektriciteitsproductie in de proefkas gerealiseerd is. Dit is in feite de prestatie van het systeem in verhouding tot het theoretisch maximaal haalbare voor de specifieke uitvoeringsvorm, inclusief de randeffecten die daar bij horen.

Tabel 11. Berekende en gemeten totale warmte-oogst en elektriciteitsproductie over de meetperiode van 6 juli t/m 1 oktober 2012.

	Warmte [MJ/m^2]	Elektriciteit [kWh/m^2]
Proefkas gesimuleerd	50.3	1.8
Proefkas gemeten	42.2	1.0

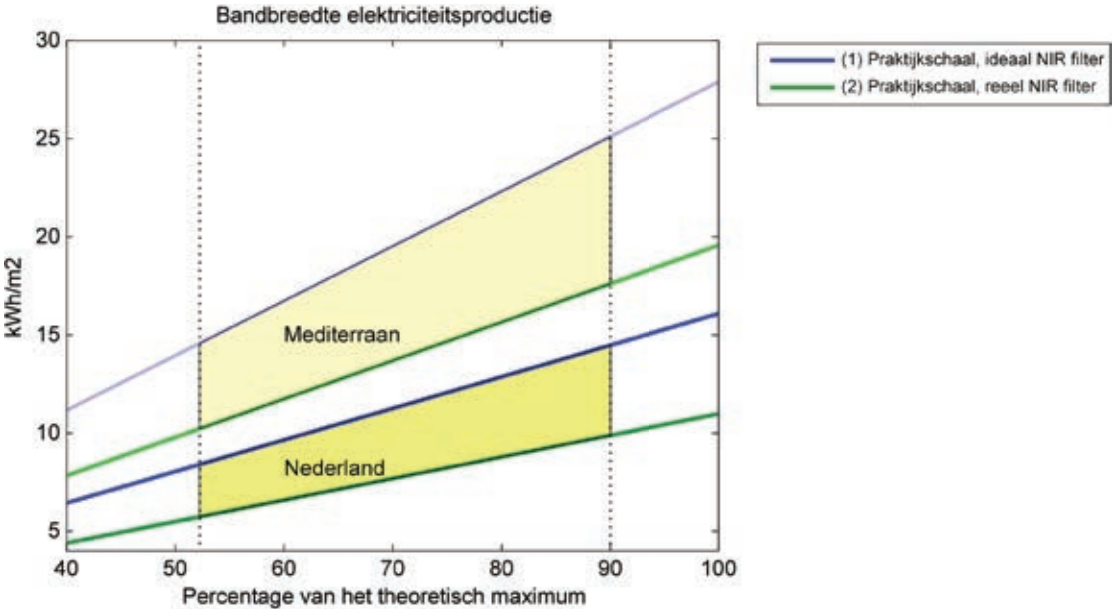
De prestaties ten opzichte van het maximaal haalbare kunnen ook bepaald worden door de correlatie te bepalen tussen momentane metingen en berekeningen (Figuur 66.). Dit levert een percentages van 72% thermisch en 52% elektrisch op die goed overeenkomen met de uit de totalen bepaalde percentages.



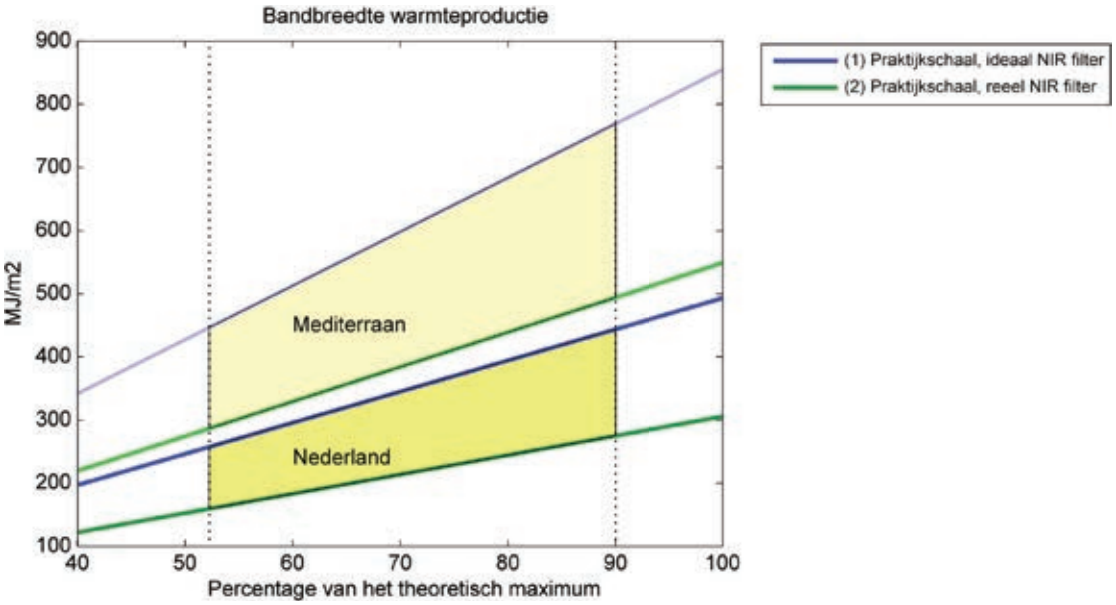
Figuur 66. Correlatie tussen momentaan gemeten en berekende thermische en elektrische vermogens.

Op basis van bovenstaande kan een inschatting worden gemaakt van in hoeverre de problemen die in de praktijkproef zijn opgetreden in de toekomst kunnen worden opgelost. In de onderstaande Figuur is de verwachte bandbreedte weergegeven waarbinnen de elektriciteitsproductie zal liggen. De bandbreedte wordt bepaald door de kwaliteit van het NIR filter en in hoeverre de in dit project behaalde resultaten nog verbeterd kunnen worden.

Een reële verwachting is tussen de 6 en 14 kWh/m^2 per jaar aan geoogste elektriciteit in Nederland. Met dezelfde kas kan in Mediterrane landen dan 10 tot 25 kWh/m^2 per jaar gerealiseerd worden.
De overeenkomstige verwachte warmteoogst ligt dan tussen de 150 en 400 MJ/m^2 per jaar. Dit komt overeen met 4.7 en 12.6 m^3/m^2 per jaar a.e.



Figuur 67. Bandbreedte waarbinnen de elektriciteitsproductie van de Elkas voor Nederland en een Mediterraan klimaat zal liggen. De bandbreedte wordt bepaald door de kwaliteit van het NIR filter (reëel, ideaal) en in hoeverre de in dit project behaalde resultaten nog verbeterd kunnen worden (nu 53% en geschat op maximaal 90% van het theoretische maximum).



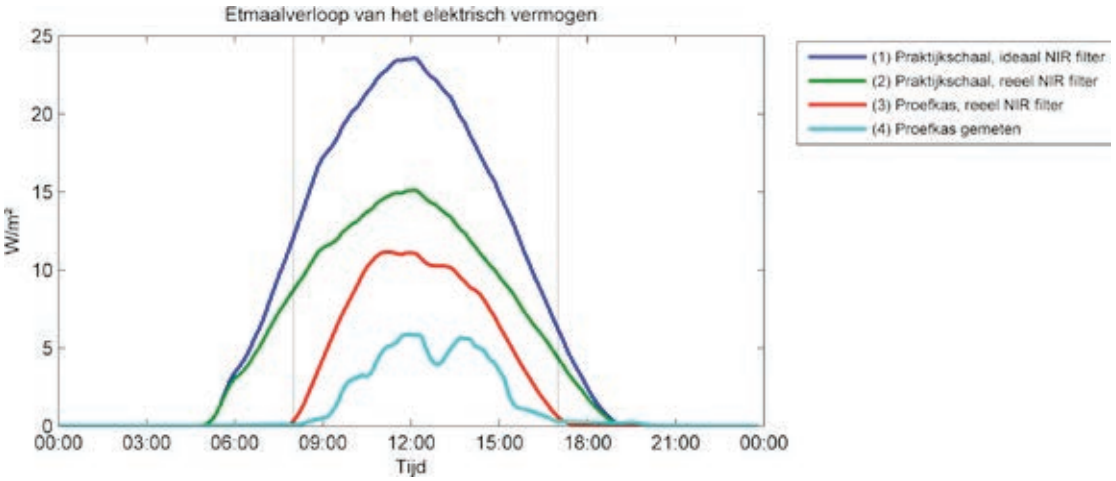
Figuur 68. Bandbreedte waarbinnen de warmteproductie van de Elkas voor Nederland en een Mediterraan klimaat zal liggen.

6 Verklaring verschillen met simulaties

6.1 Randeffecten

Uit de berekende prestaties in Tabel 10. blijkt dat er een groot verschil zit tussen de proefkas en een full-scale kas. Dit verschil kan deels verklaard worden door de randeffecten die optreden bij de proefkas. Ten eerste is deze aan Oost- en Westzijde voorzien van dubbelwandige kunststof kanaalplaten die het licht diffuus verstrooien waardoor er geen of slechts gedeeltelijke focussering zolang de zon door de zijgevels de kas binnenkomt. Ten tweede zorgt de beperkte schaal er sowieso al voor dat relatief veel van het gereflecteerde licht aan de randen van de dag naast de CPV-module valt. Dit randeffect is inherent aan het systeem maar zal bij grote kassen erg klein zijn. In de proefkas is dit deels ondervangen door de CPV-module de halve lengte van de lamellen te geven. Dit is echter niet genoeg om het randeffect volledig op te heffen en gecombineerd met de diffuse gevel begint de proefkas later op de dag en stopt eerder met het produceren van energie ten opzichte van een kas op praktijkschaal.

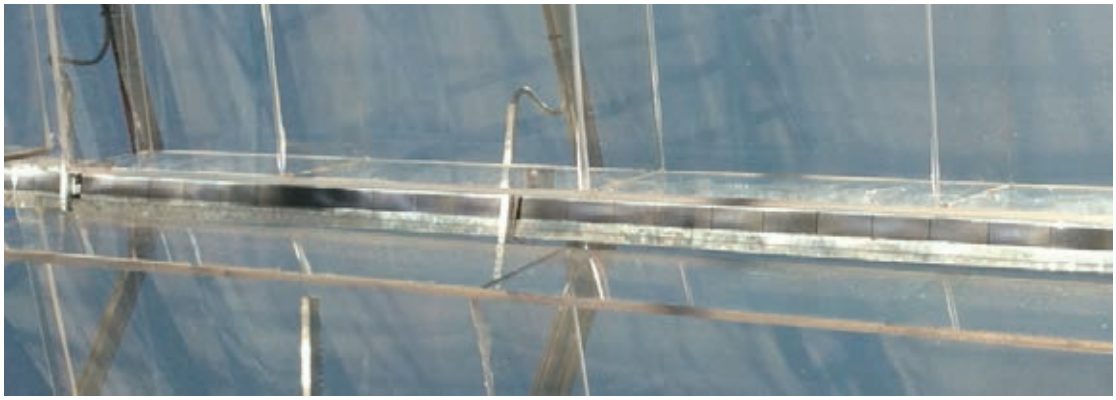
In onderstaande Figuur is een etmaalverloop van de berekende en gemeten elektriciteitsproductie weergegeven. Hierin is duidelijk te zien is dat de proefkas zowel in de simulaties als metingen later begint en eerder stopt.



Figuur 69. Etmaalverloop van het elektrisch vermogen voor de vier varianten waarbij duidelijk te zien is dat de proefkas later begint en eerder stopt met produceren ten opzichte van een kas op praktijkschaal. Dit komt omdat de zijgevels aan Oost- en Westzijde bestaan uit dubbelwandige kunststof platen die het licht volledig verstrooien.

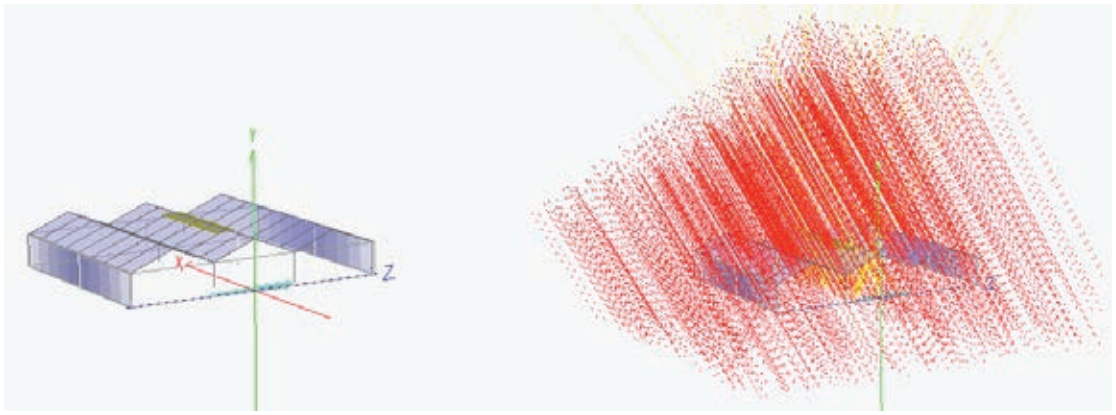
6.2 Doorbuiging

Ondanks de box-constructie van de lamellen bleek de toplaag met NIR-filter door te buigen. De verticale afstand van doorbuigen bleek op warme dagen, en afhankelijk van de hoek van de lamel tussen de 5 en 10 mm te liggen. Hierdoor werd de focus ernstig verstoord (Figuur 70.).

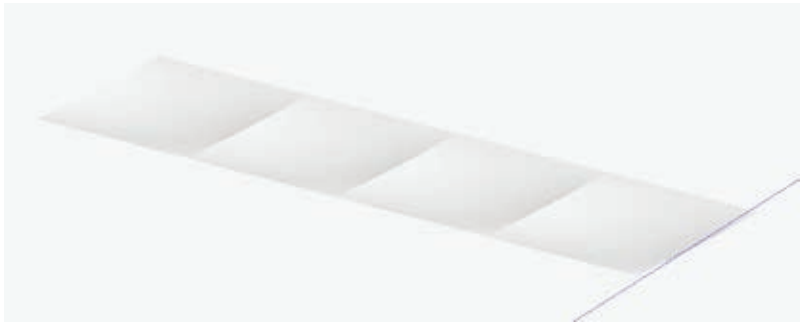


Figuur 70. Foto van de lichtverdeling op de collector waarbij duidelijk een inhomogeniteit te zien is die o.a. veroorzaakt wordt door doorbuiging van de reflectorzijde van de lamel.

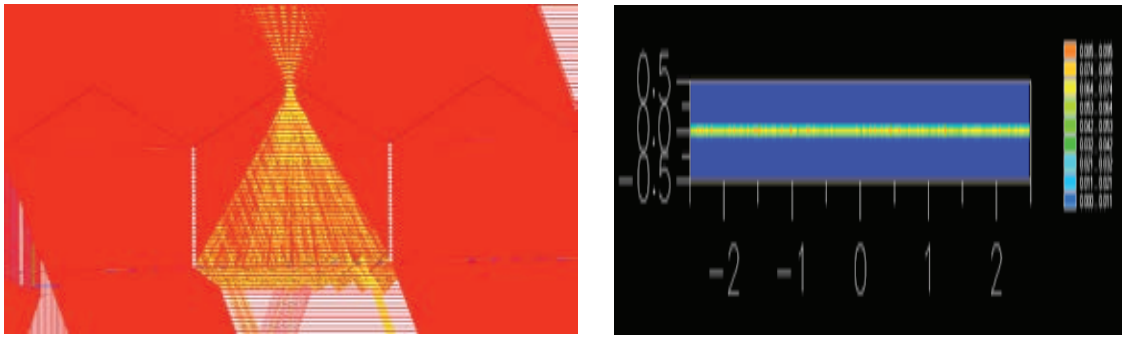
Om het effect van doorbuiging te bepalen zijn simulaties uitgevoerd met het professionele ray-tracing pakket FRED, ontwikkeld door Photo Engineering. In onderstaande figuren zijn de resultaten van deze simulaties weergegeven.



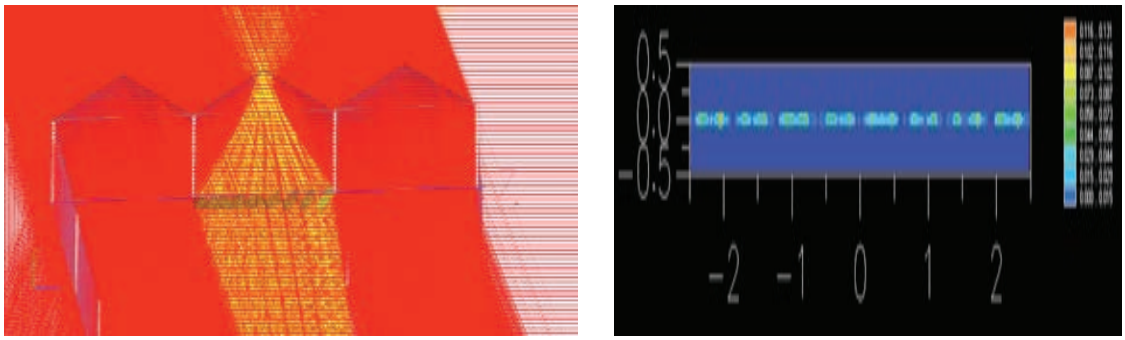
Figuur 71. Elkas gemodelleerd in FRED waarbij het direct licht invalt onder een azimut van 180° (zuiden) en een elevatie van 60° (middaguur juni).



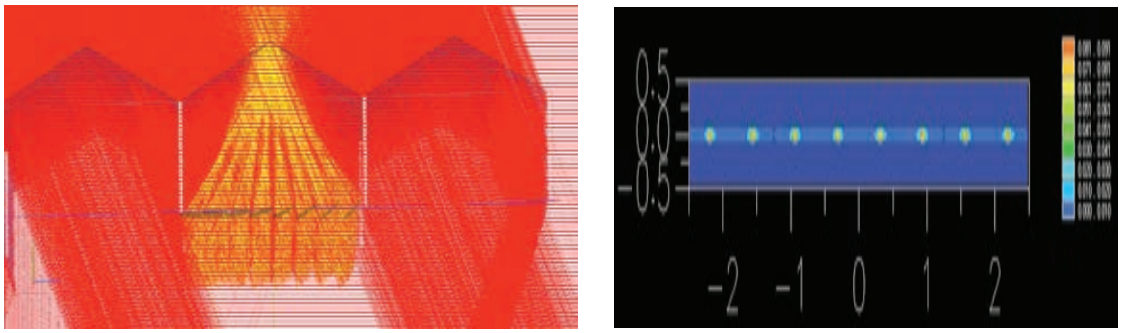
Figuur 72. Model van het toppaneel van een lamel die door middel van 3 tussenschotten opgedeeld is in3 segmenten. De doorbuiging is het grootst in het midden van de segmenten.



Figuur 73. Zijaanzicht van de stralengang (links) bij een azimut van 180° en elevatie van 60° en de lichtverdeling op de module (rechts) bij niet doorbuigende lamellen. De simulaties zijn uitgevoerd zonder constructie-elementen zodat de CPV-module egaal belicht wordt.



Figuur 74. Zijaanzicht van de stralengang (links) bij een azimut van 180° en elevatie van 60° en de lichtverdeling op de module (rechts) bij maximaal 5 mm doorbuiging. Een gedeelte van het licht valt naast de CPV-module waardoor deze onregelmatig belicht wordt en de opbrengst daalt met ca. 54% ten opzichte van een niet doorgebogen lamel.



Figuur 75. Zaanzicht van de stralengang (links) bij een azimut van 180° en elevatie van 60° en de lichtverdeling op de module (rechts) bij maximaal 10 mm doorbuiging. Een groot deel van het licht valt naast de CPV-module waardoor deze onregelmatig belicht wordt en de opbrengst sterk daalt met ca. 81% ten opzichte van een niet doorgebogen lamel.

In onderstaande tabel is voor de situatie bij maximale concentratie (zomerdag rond het middaguur, azimut van 180° en elevatie van 60°) de lichtsterkte op de CPV-module weergegeven bij verschillende mate van doorbuiging. Berekend lichtverlies op de CPV-module ten gevolge van doorbuiging

Tabel 12. Lichtsterkte op de CPV-module bij maximale concentratie (zomerdag rond het middaguur, azimut van 180° en elevatie van 60°)

	Lichtsterkte op de CPV-module
Geen doorbuiging	100%
Maximaal 5 mm doorbuiging	46% (-54)
Maximaal 10 mm doorbuiging	19% (-81)

Het is duidelijk dat doorbuiging de concentratie sterk beïnvloedt. In hoeverre dit op de jaarrond prestaties doorwerkt is afhankelijk van de werkelijke doorbuiging op elk moment welke weer afhankelijk is van o.a. de hoek van de lamel en de kasluchttemperatuur. De doorbuiging zal het grootst zijn bij een lamel die horizontaal staat. Bij hoge kasluchttemperatuur zal het materiaal weker worden waardoor de stijfheid afneemt.
Hierdoor is het moeilijk het jaarrond effect van doorbuiging te kwantificeren maar zeker is dat dit een aanzienlijk deel van het verschil tussen simulaties en metingen heeft veroorzaakt.

7 Economische verkenning

De Elkas is een zeer innovatief concept waarvan veel componenten nog niet uitontwikkeld zijn, zeker niet voor commerciële toepassing op praktijkschaal. Dit zijn met name de spectraal reflecterende NIR filter, de lamellen, het systeem voor bevestiging en aandrijving van de lamellen en de CPV-module.

De reële verwachte elektriciteitsproductie ligt onder Nederlandse condities tussen de 6 en 14 kWh/m^2 per jaar aan geoogste elektriciteit. Dit is beduidend minder dan de 16 kWh/m^2 die in fase II bepaald is. Een eenduidige verklaring kan hiervoor niet worden gegeven maar het is duidelijk dat het doortrekken van de resultaten van enkele dagen in fase I naar een jaarrondsituatie niet eenvoudig is waarbij rekening moet worden gehouden met zaken zoals niet-lineariteiten in rendementen. Daarnaast kent het concept uit fase I vele nadelen maar doet het qua energetisch rendement niet onder voor het concept uit fase II. Er kan gesteld worden dat de metingen uit fase II een veel beter beeld geven van de werkelijk te verwachten elektriciteitsproductie dan de metingen uit fase I waarbij de prestaties op enkele dagen wellicht te positief ingeschat zijn en niet representatief zijn voor de voor de rest van het jaar.

Met de opgewekte elektriciteit kan het eigen gebruik verminderd worden en de rest wordt teruggeleverd aan het openbare elektriciteitsnet. De uitgespaarde gaskosten liggen tussen 4.7 en 12.6 m^3/m^2 per jaar a.e. Daarnaast zijn er verliezen zoals verminderde PAR-transmissie en een geringe verminderde ventilatie ten gevolge van het NIR-filter.

Op basis bovenstaande kan voor het meest positieve scenario een inschatting worden gemaakt van de investeringsruimte. Hierbij gelden de volgende aannames:

- Voor de uitgespaarde inkoop en teruglevering aan het openbare net wordt met dezelfde prijs gerekend van 0,10 €/kWh.
- Voor de gasprijs wordt 0,30 €/m^3 aangenomen
- De jaarlijkse omzet voor groentegewassen ligt tussen 50 en 80 €/m2 per jaar
- Voor het verlies van PAR wordt het minimale vaste verlies van 3% aangenomen waarbij de lamellen in de vaanstand staan. Het werkelijk verlies zal veel hoger liggen.
- Het productieverlies ten gevolge van PAR verlies is bepaald op basis van de vuistregel dat 1% lichtverlies gelijk is aan 1% productieverlies.
- Het effect van de NIR-filter op het kasklimaat wordt verwaarloosd.
- De terugverdientijd is maximaal 10 jaar

In onderstaande tabel is de investeringsruimte berekend bij een terugverdientijd van maximaal 10 jaar. In het meest optimistische scenario ligt de totale investeringsruimte rond de 28 €/m^2. Hiervan moeten o.a. de lamellen, NIR-filter, de ophanging en aandrijving van de lamellen, de CPV-module, omvormers, elektro en software van betaald worden. Alleen voor de omvormers is een redelijke betrouwbare inschatting te maken van de kosten, namelijk 1,80 €/Wpiek (Folkerts, 2012). Bij een piekvermogen van ca. 15 W/m^2 komt dit neer op 27 €/m^2 waardoor de investeringsruimte alleen voor omvormers al onvoldoende is.

Tabel 13. Berekening van de investeringsruimte bij een terugverdientijd van 10 jaar

	Minimaal (€/m^2/jaar)	Maximaal (€/m^2/jaar)
Elektriciteit	+0,60	+1,40
Gas	+1,40	+3,80
Productie	-1,50	-2,40
Saldo	0,50	2,80
Investeringsruimte	5,00	28,00

8 Conclusies

Het principe van de Elkas bestaat uit het reflecteren en concentreren van NIR straling door middel van een NIR selectief filter zonder afbreuk te doen aan de lichttransmissie voor PAR. Gedurende de periode juli t/m sept 2012 is een proefkas het werkingsprincipe aangetoond. Een reële verwachting van de elektriciteitsproductie ligt tussen de 6 en 14 kWh/m^2 per jaar aan voor Nederland. Met dezelfde kas kan in Mediterrane landen 10 tot 25 kWh/m^2 per jaar geproduceerd worden. De verwachte warmteoogst ligt dan tussen de 150 en 400 MJ/m^2 per jaar. Dit komt overeen met 4.7 en 12.6 m^3/m^2 per jaar a.e.

Uit de economische verkenning blijkt dat de Elkas momenteel niet economisch rendabel is. De belangrijkste redenen hiervoor zijn de beperkte rendemente voor het omzetten van zonne-energie in elektriciteit en warmte. Gezien de (verwachte) waarde van warmte en elektriciteit is er daardoor maar weinig investeringsruimte. Daar komt bij dat de momenteel beste commercieel verkrijgbare NIR filter (3M) teveel PAR verlies veroorzaakt waardoor er sprake is van een aanzienlijk productieverlies.

Er zijn geen redenen om aan te nemen dat het concept in de nabije toekomst rendabel zal worden. Uitgangspunt van het concentreren van licht is namelijk dat fotovoltaische cellen relatief duur zijn. De trend is dat deze cellen steeds goedkoper worden waardoor concentreren minder aantrekkelijk wordt, zeker in gebieden die relatief weinig licht hebben zoals Nederland. Hier kan met geconcentreerde PV (CPV) maximaal 25 - 35% van de opbrengst gehaald worden vergeleken met niet geconcentreerde PV. Daar komt bij dat CPV in de kas normaal gesproken altijd te maken zal hebben met slagschaduw door de kasconstructie. Bij een standaard serieschakeling zal de totale elektriciteitsproductie afhangen van de zwakste schakel(s). Dit vereist een alternatieve elektrische schakeling van de cellen, die in de proefkas ook is toegepast, waardoor de productie van de CPV-modules waarschijnlijk een dure niche markt zal blijven.

Uitgangpunt van het concept was een enkellaags lamel die hoog transparant is voor PAR en voldoende (torsie)stijf is om onder alle omstandigheden als concentrator te kunnen functioneren. Uit de simulatie is gebleken dan vervorming (doorbuiging) sterk afbreuk doet aan de concentratie-efficiëntie. Het is echter vrijwel onmogelijk gebleken om tegen acceptabele kosten een enkellaags lamel te ontwerpen en produceren (inclusief aanbrengen van de NIR filter) die aan de vereiste specificaties voldoet. Uiteindelijk is voor een dubbelwandige boxconstructie gekozen, gemaakt uit het basismateriaal PET. Tijdens de praktijkproef is echter gebleken dat ook hier vervorming/doorbuiging optrad wat afbreuk gedaan heeft aan de gemeten productie.

De beste commercieel verkrijgbare NIR filter, qua lichtdoorlatendheid in het PAR-gebied, is de 3M Ebiral film met een PAR-transmissie van 85.3%. Helaas is de reflectie van deze folie beperkt tot ca. 40% van het NIR waardoor er veel ruimte is voor verbeteringen. Los van het Elkas concept kan een verbeterd NIR filter waardevol zijn voor glasgroenten, zeker in gebieden met hoge stralingsintensiteit.

Samengevat zijn de belangrijkste conclusies:

- De werkingsprincipe van de Elkas is aangetoond. Het concept is realiseerbaar met bestaande materialen en componenten en levert naar verwachting tussen de 6 en 14 kWh/m^2 per jaar voor Nederland en 10 tot 25 kWh/m^2 per jaar in Mediterrane landen. De verwachte warmteoogst ligt tussen de 150 en 400 MJ/m^2 per jaar, overeenkomend met 4.7 en 12.6 m^3/m^2 per jaar a.e.
- Met de gebruikte materialen en technieken is de Elkas niet economisch rendabel en een verbetering op de lange termijn wordt niet verwacht.
- Het is niet aannemelijk dat een ideaal NIR filter en een sterk verbeterde concentratie het concept rendabel maakt in de nabije toekomst.
- De ontwikkeling van een verbeterd en goedkoper NIR filter kan waardevol zijn.

Literatuur

G.L.A.M. Swinkels, P.J. Sonneveld, G.P.A.Bot, Improvement of Greenhouse Insulation with Restricted Transmission Loss through Zigzag Covering Material, Journal of Agricultural Engineering Research, 79, No. 1, May 2001, p.91-97.

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

Folkerts, F. 2012.
Solar Energy Application Center (www.seac.com). Presentatie Bleiswijk.

Publiciteit

Vakblad

Swinkels, G.L.A.M. (2012) 'Elkas is in Nederland niet rendabel'. Vakblad voor de Bloemisterij, Vol. 67, No. 28, p.24-25. ISSN 0042-2223.

Congressen

Swinkels, G.L.A.M. (2010). Greenhouse with a CPV system based on NIR reflecting lamellae: Optimizing of Optics. AgEng, Clermont-Ferrand 2010.

Wetenschappelijk

Sonneveld P.J., Swinkels G.L.A.M., Bot G.P.A., lamand G. Feasibility study for combining cooling and high grade energy production in a solar greenhouse. Biosystems engineering 105 (2010) 51- 58

Sonneveld, P.J., Swinkels, G.L.A.M., Tuijl, B.A.J. van, Janssen, H.J.J. (2012) Design of a NIR-concentrator system integrated in a greenhouse. Acta Horticulturae, vol.I - p. 523 - 529. - Proceedings of the International Symposium on Advanced Technologies and Management towards Sustainable Greenhouse Ecosystems Greensys2011

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Postbus 644, 6700 AP Wageningen
Tel. : +31 317 - 48 60 01
Fax : +31 317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl



Productschap Tuinbouw
Kas als Energiebron
Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie

Projectnummer: 3242087500

