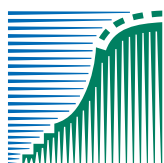


Ontwikkeling van de Elektriciteit Leverende Kas (ELKAS)

Openbare rapportage

Januari 2008

P.J. Sonneveld, G.L.A.M. Swinkels, V. Mohammadkhani, H.J. Holterman,
H.F. de Zwart, G.P.A. Bot, H.J.J. Janssen, B.A.J. van Tuijl & J.B. Campen



**landbouw, natuur en
voedselkwaliteit**

Productschap  **Tuinbouw**
Voor een bloeiende zaak

Rapport 236



Ontwikkeling van de Elektriciteit Leverende Kas (ELKAS)

Openbare rapportage

Januari 2008

P.J. Sonneveld, G.L.A.M. Swinkels, V. Mohammadkhani, H.J. Holterman,
H.F. de Zwart, G.P.A. Bot, H.J.J. Janssen, B.A.J. van Tuijl & J.B. Campen

© 2009 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Wageningen UR Glastuinbouw



Wageningen UR Glastuinbouw

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

Inhoudsopgave

	pagina
Samenvatting	1
1 Inleiding	5
2 Scheiden van NIR van PAR straling	7
2.1 Bestaande folies	7
2.2 Ontwikkeling verbeterde spectraal selectieve folie	8
3 Energie omzettingssystemen	11
3.1 Thermisch omzetting	11
3.2 PV en TPV cellen	14
4 Concentratiesysteem	17
5 Basisontwerp, constructie en besturing.	21
Basisontwerp	21
5.1 Kasdekmetaal Elkas	22
5.2 Ontwerp constructie en aandrijving voor de zonne-collector	22
5.2.1 Draagconstructie	22
5.2.2 Ontwerp van het hef- en aandrijfmechanisme	23
5.3 Berekeningen kasconstructie	24
5.4 Meet- en regelsystemen	25
5.5 Constructie collectorsysteem	25
6 Bouw van de kas	27
7 Meetresultaten en opbrengstbepalingen	29
7.1 Meting van dagopbrengsten	29
7.2 Bepaling van de jaaropbrengsten	34
7.2.1 Stralingsgegevens	34
7.2.2 Elektriciteitsproductie	36
7.2.3 Warmteproductie en afstemming vraag en aanbod	36
8 Inschatting economisch perspectief	39
9 Conclusies	41
10 Knelpunten en aanbevelingen	43
11 Publicaties en promotie gedurende het project	45

Samenvatting

In 2002 hebben sector (Productschap Tuinbouw) en overheid (ministerie van LNV) de beleidsvisie energietransitie vastgesteld met de ambitie dat nieuw te bouwen kassen in 2020 energieneutraal zijn en nagenoeg onafhankelijk van fossiele energie. Daarna is een transitieprogramma opgesteld om deze ambitie te kunnen verwezenlijken. Binnen dit transitieprogramma is het Elkas project uitgevoerd met als doel het potentieel van de kas als energiebron via een speciaal principe tot een ver doorgevoerde uitvoering.

Uitgangspunt van het concept is dat zonne-energie overwegend bestaat uit vrijwel gelijke energiehoeveelheden zichtbaar licht en warmtestraling (nabij infrarode straling: NIR) waarbij voor de gewasproductie vooral de zichtbaar licht component belangrijk is voor de fotosynthese en de productie. Als de NIR kan worden tegengehouden wordt de warmtebelasting van de kas verlaagd zodat deze meer gesloten kan blijven. Als tevens de tegengehouden NIR benut kan worden voor hoogwaardige energieopwekking, snijdt het mes aan twee kanten.

Het principe van de Elkas (Elektriciteit Leverende Kas) is gebaseerd op een NIR reflecterend materiaal dat in de vorm van een holle spiegel is gebogen en waarmee de warmtestraling gefocust worden in een brandpunt. In dit brandpunt wordt een collector geplaatst voor de omzetting van zonnestraling naar elektrische energie.

In dit project is het Elkas principe uitgewerkt tot een werkend prototype waaraan daadwerkelijk elektriciteit- en warmtelevering is gemeten.

Als eerste stap in het ontwerp proces zijn beschikbare materialen op hun toepasbaarheid beoordeeld door het verifiëren van de optische eigenschappen met betrekking tot NIR reflectie en PAR transmissie. Daaruit is geconcludeerd dat de nu beschikbare folies in principe te weinig (< 90%) PAR-licht doorlaten in combinatie met (te) weinig specifieke NIR. Voor een daadwerkelijk optimaal functionerend Elkas principe moeten deze eigenschappen dus verder verbeterd worden. Dit is mogelijk door toepassing van een multilayer folie waarin bij voorkeur twee basis materialen worden toegepast: PC als materiaal met een hoge brekingsindex en THV als materiaal met een lagere brekingsindex. Toepassing hiervan biedt mogelijkheden voor een NIR-reflecterende folie waarbij de NIR reflectie verhoogd kan worden tot 70% en de NIR warmtestraling tot 1800nm wordt gereflecteerd. Voor het aantonen van het werkingsprincipe kan echter wel volstaan worden met het gebruik van een bestaande folie, daarvoor is in het project de folie 3M Ebiral film geselecteerd.

De ELKAS kent naast het spectraal selectieve materiaal waarmee de reflector wordt uitgerust, een tweede hoofdcomponent: het systeem voor omzetting van de opgevangen NIR straling in elektriciteit (collector). Hiervoor zijn 2 hoofdlijnen onderzocht.

- omzetting van licht in warmte, die vervolgens via een thermodynamische kringloop in elektriciteit wordt omgezet
- directe omzetting van licht in elektriciteit met behulp van PhotoVoltaische cellen (PV-cellen).

Toepassing van de thermische omzetting leidt echter tot een zodanig dure installatie dat dit leidt tot onacceptabel hoge kosten per geleverde kWh elektrisch vermogen. De directe omzetting van licht in elektriciteit met behulp van PhotoVoltaische cellen (PV-cellen) blijkt aanzienlijk goedkoper te realiseren. Hiervoor zijn verschillende (T)PV-cellen met elkaar vergeleken (Silicium (Si), Koper-Indium Sulfide (CIS), Germanium (Ge) en Gallium-Antimoon (GaSb)). Vanwege het rendement, de kosten en de beschikbaarheid op grote schaal is voor de realisatie van de prototypekas gekozen voor cellen van NR-cel en Sunpower.

Om de NIR straling te focussen in een brandpunt zijn een aantal verschillende concentratie systemen onderzocht. Na een eerste selectie zijn zeven verschillende typen kas/concentratiesystemen onderzocht op hun belangrijkste eigenschappen van de reflector, het concentratie systeem, standregeling, in combinatie met de belangrijkste voor- en nadelen. Op basis van alle uitgevoerde berekeningen is voor de verdere ontwikkeling gekozen voor een ontwerp met een cirkelvormige holle spiegel geïntegreerd in het kasdek. Dit systeem heeft als voordelen: hoge lichttransmissie,

met bestaande materialen te construeren, relatief goedkoop en goede uitstraling. Vervolgens zijn voor de jaarrond situatie, de optimale dimensies van het kasdek vastgesteld en is voor elke dag van het jaar de baan die de PV-module moet afleggen voor een optimale energieopbrengst bepaald. Door een concentratiefactor van ca 30x is het oppervlak van de zonnecel collector slechts 1/30ste deel van de kasbreedte (12 cm) zodat de lichtonderschepping gering blijft (ca. 3,5%). Hierdoor is de negatieve impact op de totale lichthoeveelheid in de kas beperkt en door het geringe oppervlak van de PV-cellen blijven ook deze kosten op een aanvaardbaar niveau.

Op basis van de eerste ontwerpfase is een basisontwerp opgesteld voor de realisatie van het prototype van 100 m². Dit basisontwerp heeft de volgende kenmerken:

- Een gebogen cirkelvormig kasdek waartegen aan de onderkant een oprolbare folie is aangebracht die het NIR deel van het zonlicht reflecteert (reflector/concentrator). Door de cirkelvorm van het kasdek wordt de NIR gefocusseerd in een lijn (brandpunt).
- Een asymmetrisch kastype om een hoge energie opbrengst en een zo gelijkmatig mogelijke belichting in de teeltruimte te verkrijgen
- In het brandpunt van het cirkelvormige kasdek wordt het licht opgevangen door PV-cellen die het NIR licht omzetten naar een elektrische stroom (collector).
- De draagconstructie voor de PV cellen (de collector) moet het verloop van het focuspunt over de dag heen exact kunnen volgen.
- De collector moet om zijn as kunnen roteren zodat de PV cellen naar het kasdek gericht kunnen blijven om een optimale benutting van het opgevangen NIR te bereiken.
- Om oververhitting van de PV-cellen te voorkomen worden ze aan de achterzijde door water gekoeld, verder zijn ze aan de voorzijde door een glazen afdekplaat beschermd.

Voor de realisatie van de prototypekas is eerst de draagconstructie ontworpen waarbij rekening gehouden is met de krachten op de draagarm en de eventuele wind- en sneeuwbelasting. De draagconstructie is zodanig ontworpen dat deze exact de vooraf berekende baan van de collector kan volgen. De definitieve constructie bestaat uit twee gekoppelde, draaibare armen met twee lineaire motoren per arm. Voor het overspannen van de 10 meter lange collector worden drie draagarmen gebruikt die de collector om de 5 meter ondersteunen. Vervolgens is de gehele kasconstructie ontworpen en berekend om te kunnen voldoen aan de geldende normen. De collector is opgebouwd uit twee type watergekoelde PV cellen, en zodanig mechanisch ontworpen dat de doorbuiging minder dan 1 mm bedraagt.

Het besturingsmechanisme voor de positionering van de collector bestaat uit een software voor de standregeling waarin vooraf bepaalde posities van de collector als tabellen zijn ingevoerd. De fijnregeling op uitgangsvermogen vindt vooralsnog met de hand plaats.

In de realisatiefase is de prototype kas van 100 m² gerealiseerd. De kas, bestaande uit twee kappen van 4,8 m breed en een lengte van 10 m, is op een draaibaar plateau geplaatst om de opbrengst bij verschillende oriëntaties van de kas te kunnen bepalen.

In de tweede helft van 2008 zijn metingen verricht aan het thermische en elektrisch geleverde vermogen. Daarbij is geconstateerd dat door de constructie van de draagarmen en de glasroeden, schaduwvorming op gedeelten van de collector kan optreden met als gevolg dat de beschaduwde PV cellen de totale opbrengst van het huidige systeem verlagen. De schakeling van de PV cellen in de strips zal hiervoor in de toekomst moeten worden aangepast. Bij de definitieve metingen is hiervoor met behulp van extra meetunits gecorrigeerd.

Op basis van de metingen zijn berekeningen gemaakt voor de opbrengst op jaarbasis en de haalbare piekvermogens. In de zomer bij een instraling van 900 W/m² is een elektrisch piekvermogen van ca. 21 W/m² te verwachten. Thermisch is het piekvermogen 150 W/m². Op jaarbasis is 16 kWh/m² elektrische energie en 193 MJ/m² (54 kWh/m²) thermische energie haalbaar. De berekende piek en jaaropbrengsten zijn iets lager dan op basis van de theoretische berekeningen kon worden verwacht en dit is deels te verklaren door het wat lagere rendement van de PV cellen en door de nog niet gehaalde optimale focussering van de NIR straling waardoor een deel naast de PV-

module valt. Ook de folie is nog niet geoptimaliseerd. Desondanks zijn de resultaten uitermate bevredigend en is de technische werking van het concept overtuigend aangetoond.

Uit de eerste globale economische verkenning blijkt dat het ELKAS principe momenteel nog niet economisch rendabel ingezet kan worden. De belangrijkste redenen zijn o.a. de hoge prijs van de lineaire motoren en van de zonnecel modules. Er is naast de kostenreductie van materialen door serieproductie nog een vereenvoudiging in het ontwerp nodig en een om tot een voor de tuinbouw aanvaardbaar kostenniveau en afschrijvingsperiode te kunnen komen.

1 Inleiding

Het verbruik van aardgas door de Nederlandse glastuinbouw bedraagt circa 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 in het jaar 2010. In het GLAMI convenant is vastgelegd dat in het jaar 2010 de energie-efficiëntie index (energiegebruik per eenheid product) met 65% gedaald moet zijn t.o.v. het referentiejaar 1980. Geleidelijk zien we dat energiegebruik eerst bekeken werd in termen van energie-efficiëntie, vervolgens in absoluut gebruik van fossiele energie en tenslotte gaat het vooral om de verminderde afhankelijkheid en reductie van de CO₂ emissie. De overheid heeft in 2005 bepaald dat de glastuinbouwsector (bij gelijkblijvend areaal) in het jaar 2010 maximaal 6.5 miljoen ton CO₂ mag uitstoten. De EU streeft naar een reductie van CO₂ emissie met 20-30%. Het regeerakkoord van Balkenende IV gaat uit van een CO₂ emissie reductie van 30% in het jaar 2020 en een aandeel duurzame energie van 20% (als percentage van de totale energievoorziening). In mei 2007 heeft LTO Glaskracht samen met Stichting Natuur en Milieu het actieplan klimaatneutrale glastuinbouw in Nederland gepresenteerd met afspraken over de afname van de CO₂ uitstoot met 45% in het jaar 2020 en 75% in het jaar 2030.

In 2002 hebben sector (Productschap Tuinbouw) en overheid (ministerie van LNV) de beleidsvisie energietransitie vastgesteld met de ambitie dat nieuw te bouwen kassen in 2020 energieneutraal zijn en nagenoeg onafhankelijk van fossiele energie. Daarna is een transitieprogramma opgesteld om deze ambitie te kunnen verwezenlijken. In het transitieprogramma worden een aantal transitiepaden benoemd, te weten zonne-energie, aardwarmte, biobrandstoffen, energiearme rassen en energiebesparende teeltstrategieën, licht (benutting natuurlijk licht en ontwikkeling energie efficiëntere lampen), duurzame elektriciteit en duurzame CO₂.

In tuinbouwkassen wordt de beschikbare zonnewarmte nu slechts doordat een deel van het jaar te veel zonnewarmte wordt ingestraald en dit teveel in huidige kassen door ventilatie naar de omgeving wordt afgevoerd. Een schatting is dat zo per m² kasoppervlak totaal ca. 30 m³ aardgasequivalenten ofwel 1050 MJ verloren gaat. Voor Nederland betekent dit dat 105 PJ aan zonne-energie niet wordt benut. 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 zonnenspectrum bestaat uit verschillende golflengten waarvan de meeste energie in het zichtbare (ca. 45%) en het nabij infrarode deel (ca. 45%) aanwezig is. Voor een groot aantal toepassingen en in het bijzonder in kassen is alleen het zichtbare gedeelte van het zonlicht van direct belang voor de gewasgroei. De warmte-inhoud van de straling is in het warmere seizoen veelal niet gewenst terwijl de zichtbaar licht component nuttig gebruikt moet worden.

Momenteel wordt de techniek om de overtollige zomerwarmte via een warmtewisselaar uit de kaslucht te onttrekken en op te slaan in aquifers bij een watertemperatuur van ca 20 °C in een beperkt aantal kassen in de praktijk toegepast.

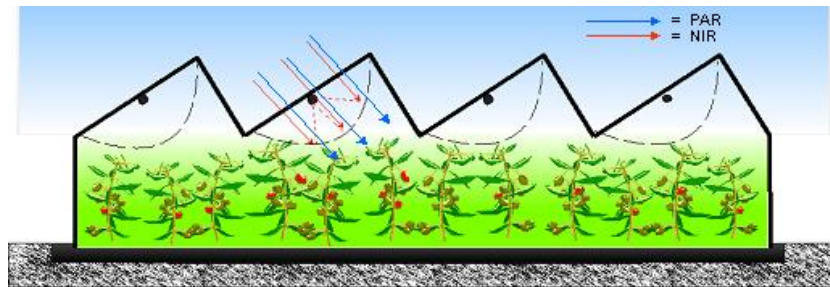
In principe kan in de zomer 3-4x zoveel warmte worden onttrokken en opgeslagen als noodzakelijk voor de verwarming van dezelfde kasoppervlakte in de winter. Hoervoor wordt de kas volledig gesloten gehouden (Gesloten Kas, geen warmteafvoer door ventilatie) wat voordelen biedt voor de gewasproductie en de productkwaliteit. De in de winter niet benutte warmte kan in dat geval worden geleverd aan niet gesloten buurkassen. Nadeel van deze methodiek is het over het algemeen laagwaardige energieniveau van de warmte (temperatuurniveau ca. 20 °C) dat geleverd kan worden. Een systeem waarbij de onttrokken overtollige energie direct omgezet wordt in hoogwaardige energie verdiend verre de voorkeur.

Zonne-energie bestaat overwegend uit vrijwel gelijke energiehoeveelheden zichtbaar licht en warmtestraling (nabij infrarode straling: NIR). Voor kassen is vooral de zichtbaar licht component van de zon belangrijk omdat dit deel van het licht het fotosyntheseproces aandrijft. Daarnaast is er een klein deel UV (ca 5%) en de rest is nabij infrarood (NIR) twv ca 50%.

Als de NIR zou kunnen worden tegengehouden wordt de warmtebelasting van de kas verlaagd zodat deze meer gesloten kan blijven. Als de tegengehouden NIR benut kan worden voor hoogwaardige energieopwekking, snijdt het

mes aan twee kanten. Dit principe is Elkas genoemd (Elektriciteit Leverende Kas). Omdat het in de glastuinbouw, zowel nationaal als internationaal gaat om zeer grote kasoppervlakken, biedt een dergelijk systeem een grote potentie voor de opwekking van duurzame energie.

Het doel van dit project is het potentieel van de kas als energiebron via het Elkas principe tot een ver doorgevoerde uitvoering te brengen door de overtollige energie direct om te zetten in hoogwaardige elektrische energie. Integratie van de technologie in kassystemen biedt mogelijk kansen om de kassen zelfs meer dan de voor eigen gebruik vereiste hoogwaardige elektrische energie te laten leveren. De in het proces vrijkomende warmte kan, op een vergelijkbare manier als in bestaande (semi)gesloten kassystemen, worden opgeslagen voor benutting in het stookseizoen.



Figuur 1.1. Voorbeeld van het Elkas principe: kas met geïntegreerde systemen voor energieopwekking uit warmtestraling. De extra lichtonderschepping is minimaal door integratie van de collector met constructiedelen.

De basis van de Elkas wordt gevormd door transparante materialen zoals een kunststofplaat of folie die voorzien zijn van een NIR reflecterende coating. Door deze reflector in een geschikte vorm te brengen zullen de warmtestralen focuseren op een klein oppervlak (brandpunt). In dit brandpunt wordt een collector geplaatst voor de omzetting van zonnestraling naar elektrische energie. Door de concentratie is het oppervlak van de collector gering en wordt er dus weinig zichtbare straling (PAR) onderschept.

Voor de omzetting naar elektrische energie zijn twee opties denkbaar:

- Omzetting van zonne-energie in hoogwaardige thermische energie en vervolgens met een warmtemotor (Stirling of ORC) in elektrische energie.
- NIR-cellen die NIR direct omzetten in elektrische energie. De cellen worden gekoeld zodat ook laagwaardige thermische energie beschikbaar komt om de warmtevraag in de winter energiezuinig te dekken.

In dit eindrapport over het ontwerp- en realisatietraject wordt het ontwerptraject beschreven, inclusief de verschillende keuzes m.b.t. de verschillende deelsystemen, de bouw van de prototype proefkas en de behaalde resultaten ten aanzien van de elektriciteit- en warmtelevering.

2 Scheiden van NIR van PAR straling

De basis van het Elkas concept wordt gevormd door het tegenhouden van het NIR deel van de zonnestraling en het doorlaten van het zichtbare (VIS) en fotosynthetisch actieve deel (PAR). In het project is primair uitgegaan van bestaande materialen voor toepassing in de te bouwen testkas. De bestaande materialen zijn op hun toepasbaarheid beoordeeld door het verifiëren van de optische eigenschappen van een groot aantal zonwerende folies. Daarnaast zijn opties onderzocht voor de verbetering van de selectiviteit van de materialen.

2.1 Bestaande folies

Ter beoordeling van de beschikbare materialen zijn metingen voor reflectie en transmissie van loodrecht licht in een meetgebied van 300-2500nm uitgevoerd op een spectrofotometer zoals die bij WUR Glastuinbouw operationeel is. De reflectie en de transmissie als functie van de golflengte is gemeten voor loodrecht opvallend licht. Er zijn metingen verricht aan 22 verschillende monsters die in principe NIR reflecterende eigenschappen hebben (Tabel 2.1).

Tabel 2.1. Overzicht doorgemeten monsters.

Nr.	Materiaal	Code	Dikte (µm)
1	Happy Sunlight HS-SB-35	HL03A	65
2	Happy Sunlight HS-SB-35	HL03B	65
3	Fassolar PS-65	FS03A	70
4	Fassolar PB-70	FS03B	75
5	Fassolar PS-80	FS03C	65
6	Fassolar PG-70	FS03D	75
7	Out of the Sun OSH-COLST-35	OS03A	65
8	Out of the Sun OSH-COLST-50	OS03B	65
9	Out of the Sun OSH-COLST-70 2MIL UV Block	OS03C	75
10	Out of the Sun OSH-OPTITUNE-40	OS03D	75
11	Polycool Gold	PL03A	170
12	Polycool Gold	PL03B	170
13	Scotchint Window Film LE35AMARL	3M03A	40
14	Scotchint Sun Control Window Film RE70NEARL	3M03B	40
15	Scotchint Plus All Season. Window Film LE20SIAR, High Performance Silver	3M03C	35
16	Scotchint Plus All Season Window Film LE30CUARL, High Performance Copper	3M03D	70
17	Scotchint Plus All Season Window Film LE50AMARL, Light Amber	3M03E	40
18	3M Ebiral film	3M04A	60
19	Glaverbel AutoRuit 1	GB05A	
20	Glaverbel AutoRuit 2	GB05B	
21	TR03133 (Bekaert coating Hilite®70)	BK05A	
22	PR04086 (Bekaert coating: SOL-MOX Hilite®)	BK05B	

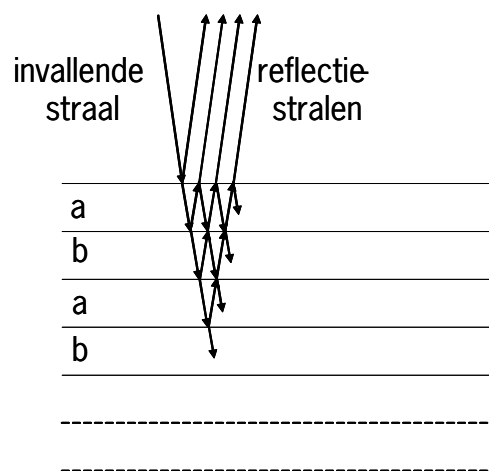
Voor de uitgebreide weergave van de meetresultaten wordt verwezen naar de bijlage. Er zijn folies met een hoge NIR-reflectie beschikbaar maar daarvan is de PAR doorlatendheid slecht. Het beste materiaal qua lichtdoorlatendheid

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 een gebied van 850-1200 nm (ca. 40% van het NIR). Materialen zoals Scotchtint Window Film LE35AMARL, met een redelijk hoge reflectiewaarde in NIR gebied (ca. 72%) hebben weer een slechte transparantie in PAR gebied. Uit deze metingen blijkt dat de folies die weinig PAR-licht doorlaten een hoge NIR-reflectie hebben en folies met een hoge NIR-reflectie een slechte PAR doorlatendheid.

Op basis van alle metingen gezamenlijk is geconcludeerd dat de nu beschikbare folies te weinig ($< 90\%$) PAR-licht doorlaten in combinatie met (te) weinig specifieke NIR-reflectie. Voor een daadwerkelijk optimaal functionerend Elkas principe moeten deze eigenschappen dus verder verbeterd worden, voor het aantonen van het werkingsprincipe kan echter wel volstaan worden met het gebruik van een bestaande folie. Voor de realisatie van het prototype van de Elkas is uitgegaan van de folie met de hoogste PAR transmissie, de 3M Ebiral film.

2.2 Ontwikkeling verbeterde spectraal selectieve folie

Omdat de eigenschappen van bestaande folies niet optimaal zijn, is het noodzakelijk om deze spectrale eigenschappen verder te verbeteren om aan beide eisen, hoge transparantie van PAR en hoge reflectie van NIR, te kunnen voldoen. Het principe hiervoor bestaat uit de toepassing van een multilayer van twee of meer materialen met verschillende brekingsindex (hoog en laag) waarmee in principe een scheiding tussen PAR en NIR te maken is. Door de vele interne reflecties en transmissies bij elke overgang van de ene laag naar de andere laag kunnen lichtgolven elkaar versterken of juist verzwakken (zie ook Figuur 2.3).



Figuur 2.3. Schema van optische transmissies en reflecties in een diëlektrische multilayer.

Het effect hiervan is dat voor bepaalde golflengtegebieden de folie transparant is, terwijl voor andere golflengtegebieden de folie het licht reflecteert als een spiegel. De golflengtegebieden waarin dit het geval is, kunnen worden beïnvloed door aanpassing van de laagdiktes van de individuele lagen in de folie. De gangbare methode is om uit te gaan van een 'basiseenheid' die bestaat uit een gering aantal lagen van twee of meer verschillende materialen; de uiteindelijke folie is dan weer opgebouwd uit een stapeling van een aantal van deze identieke basiseenheden. Samengevat komt het erop neer dat de totale dikte van de basiseenheid bepaalt welke golflengte(s) gereflecteerd worden, terwijl de mate van de reflectie wordt bepaald door de onderlinge dikteverhoudingen van de lagen in de basiseenheid. Voor de achtergrond van dit principe wordt verwezen naar de bijlage.

De eerste stap in de constructie van een multilayer folie is de selectie van de te gebruiken materialen. Voor het materiaal met een hogere brekingsindex komen PC en PET in aanmerking, voor die met de een lagere brekingsindex PMMA of THV. Voor de meeste golflengtes heeft PC een (iets) hogere brekingsindex dan PET, en heeft daarom de

voorkeur. Evenzo heeft wat brekingsindex betreft THV de voorkeur boven PMMA, zodat het verschil in brekingsindex tussen de te gebruiken materialen zo groot mogelijk is. Dit kan tot beperking in het aantal benodigde lagen leiden.

Op basis van het onderzoek is geconcludeerd dat de ontwikkeling van een NIR-reflecterende folie mogelijk is waarbij de NIR reflectie verhoogd kan worden tot 70% waarbij de NIR warmtestraling tot 1800nm wordt gereflecteerd. De daadwerkelijke realisatie van een dergelijk folie vraagt een apart ontwikkelingsproject en is binnen dit project niet uitgevoerd.

3 Energie omzettingssystemen

De ELKAS kent naast het spectraal selectieve materiaal waarmee de reflector (zie H4) wordt uitgerust, een tweede hoofdcomponent: het systeem voor omzetting van de opgevangen NIR straling in elektriciteit.

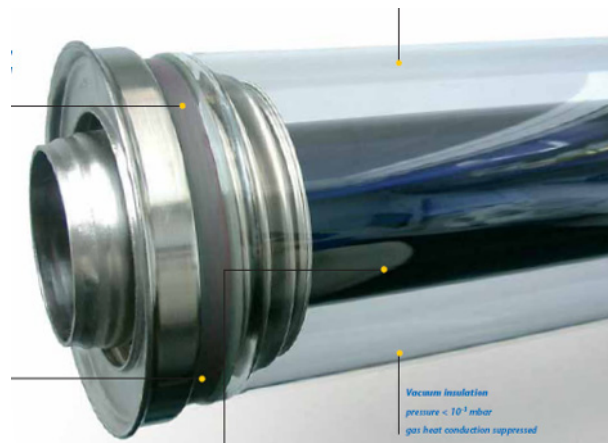
Hiervoor zijn 2 hoofdlijnen onderzocht.

- omzetting van licht in warmte, die vervolgens via een thermodynamische kringloop in elektriciteit wordt omgezet
- directe omzetting van licht in elektriciteit met behulp van PhotoVolaïsche cellen (PV-cellen).

3.1 Thermisch omzetting

Het principe van thermische omzetting is gebaseerd op een thermodynamische cyclus: via een temperatuur-verschil kan een drukverschil worden opgebouwd, waarmee arbeid kan worden geleverd en daarmee vermogen. Omdat in een kas hoge temperaturen en drukken zeer onderhoudsgevoelig zijn en er relatief grote verliezen optreden, is uitgegaan van het gebruik van omzettingssystemen voor lagere temperaturen, zoals de Stirling motor en de ORC (Organic Rankine Cycle), in plaats van bv stoomturbines. Voor het verkrijgen van de noodzakelijke hoeveelheid warmte op het gewenste temperatuurniveau en het transport van deze warmte naar de warmtemotor een cruciaal punt. Deze functionaliteit wordt ingevuld door de collectorbuis.

In de zonne-energie-industrie wordt de collector uitgevoerd in de vorm van twee concentrische buizen, waarbij de binnenste buis heet wordt en de buitenste buis voor een zo goed mogelijke isolatie van die hete kern zorgt. De binnenste buizen kunnen met behulp van koppelstukken aaneengeschild worden tot een lange buis, zodat een vloeistof al opwarmend door de buis getransporteerd kan worden.

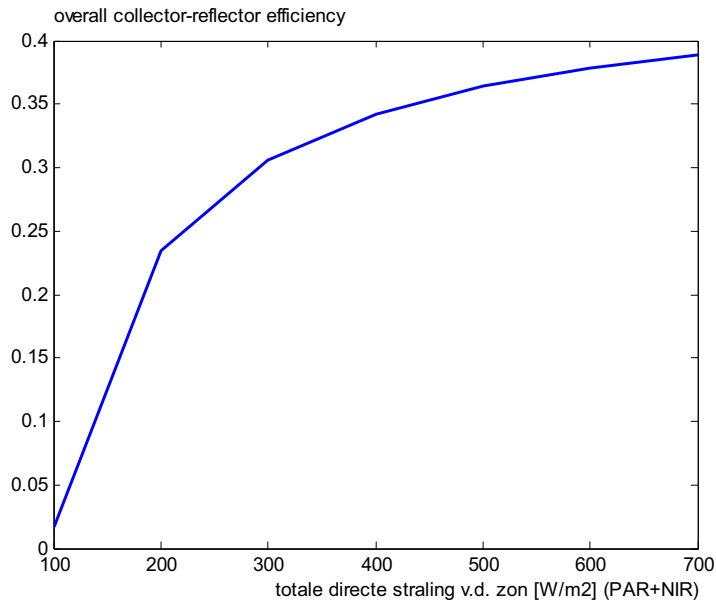


Figuur 3.1. Foto van een collectorbuis.

De basis voor de warmte-verzameling is de absorptie van licht op de donker gecoate binnenste buis. Daartoe moet het licht echter eerst door de mantelbuis en het ontwerp vereist dus een hoge lichtdoorlaat van de mantelbuis en een hoge absorptiecoëfficiënt van de binnenste buis. Door de stralings- en convectieve warmteoverdracht van binnen- naar mantelbuis ontstaat er bij een bepaalde instraling een evenwichtstemperatuur van de mantelbuis.

Er is een fysisch model gemaakt (zie bijlage) waarmee de verschillende warmtestromen zijn berekend in afhankelijkheid van fysische parameters (transmissie en emissiecoëfficiënten) en fysieke afmetingen. Hiermee kunnen vervolgens de verliezen vanuit de kern worden geschat als functie van de temperatuur van die kern. Dit model is vergeleken met de getallen die in het rapport 'Solar Thermal Energy production: guidelines and future programmes of ENEA' worden gepresenteerd.

Uit de berekeningen blijkt dat het verlies van de buis is nagenoeg onafhankelijk van het ingestraalde vermogen (namelijk alleen afhankelijk van de temperatuur van de buis). Verschil in ingestraald vermogen komt vrijwel alleen tot uitdrukking in de snelheid waarmee de vloeistof door de collectorbuis stroomt (maximaal ongeveer 0.9 m/s). De consequentie hiervan is dat het procentuele energieverlies vanuit de collectorbuis toeneemt naarmate de stralingsintensiteit van de zon afneemt. Daarmee neemt ook de totale efficiency van het collector systeem af (Figuur 3.4)



Figuur 3.4. Efficiency voor de omzetting van direct zonlicht (loodrecht ten opzichte van de hoek van instraling) via een NIR-reflecterende spiegel naar een collectorbuis zoals gebruikt in het ENEA-project. De concentratiefactor=82, de ingaande vloeistoftemperatuur is 300 °C en een uitgaande temperatuur 550 °C.

Het geleverde vermogen loopt door de verminderde efficiëntie sterk terug wanneer de directe stralingsintensiteit onder de 200 W/m² zakt. Bij lagere zonshoogten in combinatie met een nauw grid van collectoren (zoals bij de Elkas) is er dan sprake van onderlinge beschaduwing. Hier verschilt de ELKAS dan ook wezenlijk van zonne-centrales die zijn opgebouwd uit een veld van trog-collectoren waarbij de gekozen opstelling van de collectoren veel minder sprake is van onderlinge beschaduwing.

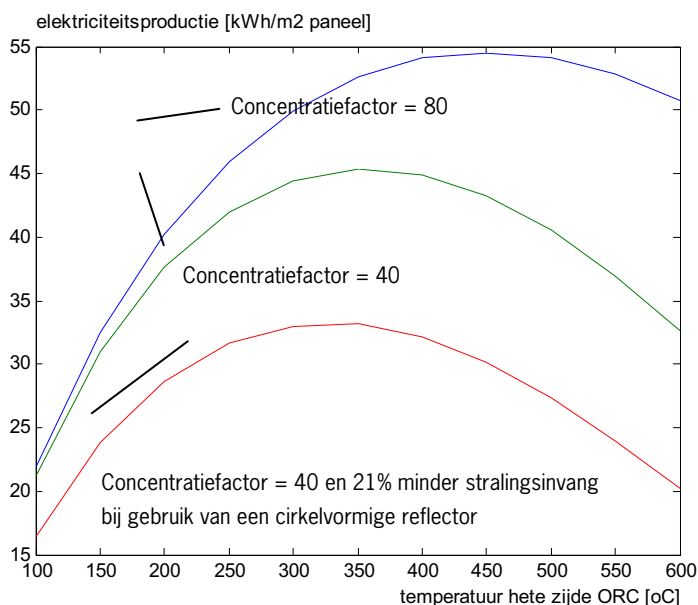
Combinatie van de rendementscurve met de in Nederland invallende straling geeft inzicht in de hoeveelheid energie die middels de reflector en de collectorbuis vanuit het zonlicht gewonnen kan worden.

Voor de omzetting van de warmte in elektriciteit via een warmtemotor komen de Stirlingmotor en de ORC in aanmerking. Voor beide motoren geldt dat het omzettingsrendement wordt begrensd door het zogenaamde Carnotrendement:

$$\eta_{carnot} = \frac{T_h - T_l}{T_h}$$

waarin T_h en T_l de hoge en de lage temperaturen zijn waartussen de kringloop zich beweegt. Uit de beschikbare specificaties blijkt dat de omzettingsrendementen van de betere typen liggen rond de 50% van het Carnotrendement. Als vloeistof met een temperatuur van 500 °C naar een warmtemotor wordt gevoerd en de koude kant van de warmtemotor is 50 °C, is het overall rendement voor de omzetting van warmte naar elektriciteit 50% * $(500-50)/(500+273) = 29\%$. Dit betekent dat de 190 kWh warmte die volgens Figuur 3.5 bij 500 °C vrijkomt zou kunnen worden omgezet in 55 kWh elektriciteit.

Deze berekening leidt tot de grafiek die in Figuur 3.5 is afgebeeld. Deze grafiek laat de elektriciteitsproductie lijnen zien voor collectorsysteem met een zeer verschillende concentratiefactor (zeer hoog: 82; het ENEA-zonne-energie systeem), maar ook voor een meer praktisch haalbare concentratiefactor van ca 40.



Figuur 3.5. Jaarlijkse elektriciteitsproductie wanneer de warmte-output van de reflector-collectorcombinatie met een warmtemotor de warmte omzet naar elektriciteit met 50% van het Carnotrendement.

De hoge concentratiefactor (80) vereist een zeer maatvast en draaibare parabolische spiegel. De spiegel in het ELKAS-project moet gecombineerd worden met een kierdichte dekconstructie waarbij bovendien zo min mogelijk PAR-licht onderscheppende constructiedelen moeten worden gebruikt, daarom is in het ELKAS-project een cirkelcilindrische spiegel (zie H4) gebruikt. Deze heeft een minder mooi focuspunt en een lagere concentratiefactor. Waarmee de onderste lijn in Figuur 3.5 ontstaat. De optimale uittreedtemperatuur wordt daarbij 350°C en de elektriciteitsproductie 31 kWh/m² paneel per jaar.

Het verschil tussen de elektriciteitsproductie en het warmteaanbod komt in de vorm van laagwaardige warmte op 30 °C vrij. Dit zal in de orde van 80 kWh/m² per jaar bedragen (350 MJ/m² per jaar).

De belangrijkste kostenposten bij dit systeem zijn de ORC, de collectorbuis en, eventueel een buffer voor het tijdelijk opslaan van warmte op hoge temperatuur.

Het huidige prijsniveau voor een ORC die de helft van het Carnotrendement weet te behalen bij een temperatuur van 350 °C ligt in de orde van € 2000,- per kW elektrisch vermogen. Zonder tijdelijke opslag zouden de kosten hiervoor op € 140,- per m² komen en met een buffer op € 50,- per m².

Een hoogrendement collectorbuis, met eigenschappen zoals die hierboven zijn beschreven, is zeer duur, namelijk zo'n € 700,- per strekkende meter en zal dus, bij een kapbreedte van 4 meter op € 175,- per m² kas uitkomen.

Als er een buffer zou worden gebruikt moet deze ongeveer 4 MJ warmte per m² kas kunnen bufferen. Hiervoor zal gebruik gemaakt moeten worden van bv opslag in smeltbare zouten met hoge kosten: in de orde van 700 MJ/m³. Voor een opslagsysteem zou ongeveer 60 m³ per hectare moeten worden aangelegd. De kosten hiervoor worden geschat op zo'n € 100.000 per ha en dus € 10 per m².

Bij de thermische omzetting zijn de kosten dus € 235,- per m², en aangenomen dat de jaarkosten 10% van de investeringskosten bedragen kan worden gesteld dat het omzettingstraject ongeveer € 23,- per m² kas kost en uitgaande van de berekende elektriciteitsopbrengst dus $32/31 = € 0.74$ per kWh. Vergeleken met de huidige kosten per kWh is dit een onacceptabel hoog kostenniveau.

3.2 PV en TPV cellen

De tweede methode voor elektriciteitsproductie uit zonlicht bestaat uit de directe omzetting van licht in elektriciteit met behulp van PhotoVoltaïsche cellen (PV-cellen).

Hiervoor is de bijlage een uitgebreide beschrijving gegeven van de beschikbare principes, systemen en materialen. Er zijn een viertal verschillende (T)PV-cellen met elkaar vergeleken namelijk Silicium (Si), Koper-Indium Sulfide (CIS), Germanium (Ge) en Gallium-Antimoon (GaSb). Twee van deze celtypen, Ge en GaSb, (TPV cellen) kunnen NIR omzetten tot 1800 nm.

Uit het onderzoek blijkt dat het rendement van PV en TPV cellen vergelijkbaar is, namelijk respectievelijk 15,7% en 14,5%. De Si-cel heeft het hoogste omzettingsrendement, en de Si cellen blijken daarmee het meest geschikt zijn. Van een aantal commercieel verkrijgbare PV cellen zijn de eigenschappen onderzocht en samengevat in Tabel 4.5. Omdat de meest geschikte cellen monokristallijn zijn, zijn ze nog duurder dan de multikristallijne cellen (ca. 450 €/m²). De verwachting is dat ze op termijn naar dit prijsniveau zullen dalen.

Tabel 3.1. Eigenschappen van een aantal zonnecellen.

Nr	Type	Fa.	Materiaal	Rendement bij 20x[%]	Afmeting Cel cm	Prijs [€/m ²]	Opmerkingen
1	c-Si	INEA	c-Si	21	1,1x1,2 cm	-	Lab cellen
2	Cz	Day4	mono-Si	16,1	10x10	-	
3	Cz	NR cel	mono-Si	19	5x10	2200	
4	Mono	Q-Cells	mono-Si	15,2	15x15	1000	AM1,5 cell
5	Mono CB310	Solartec	mono-Si	14	10x10/ 5,1x1,7	-	15x Conc cell
6	Mono	Hp	mono-Si	Ca. 10	5x5	1000	Lage celspanning
7	Mono	Sunpower	mono-Si	20,2	12,5x12,5	1400	AM1,5 cell
8	Maxis BC	Photo voltech	multi-Si	16,2	12,5x12,5	-	AM1,5 cell
9	Mono	Guascor Foton	mono-Si	27,2	-	-	400xConc cell
10	Multi	Solland Solar	multi-Si	17,2	-	-	AM1,5 cell

¹⁾ Schatting. Max concentratie factor is feitelijk 10x

²⁾ Schatting. Cel is bedoeld voor AM 1,5

De vier meest interessante cellen zijn op dit moment de nummer 9, 1, 3 en 7: Guascor Foton, INEA, NR-cel en Sunpower. De Cellen van INEA en Guascor Foton zijn echter alleen beschikbaar op laboratoriumafmetingen (ca. 1 cm²) en zijn dus niet gelijk toepasbaar. De Sunpower cel heeft weliswaar de hoogste efficiëntie maar is niet geschikt voor hoge concentratiefactoren (maximaal ca C = 3). Voor de uiteindelijke keuze voor het PV conversiesysteem in het vervolg van het project gekozen voor cellen van NR-cel.

De kosten voor een omzettingstraject via PV cellen (silicium) zijn globaal de kosten van de PV cellen (0.025 m² silicium per m² kas) en de montage daarvan op een ¼ meter gekoelde buis (een concentratiefactor 40 in een

kapbreedte van 4 meter). Buisprofiel komt op ongeveer € 10,- per strekkende meter en het noodzakelijk silicium PV-materiaal kost naar verwachting ongeveer 450-1200 euro per m². De investeringskosten voor het fotovoltaïsche omzettingstraject zijn dus globaal € 21,- tot € 40 per m². Als richtlijn voor de jaarkosten wordt uitgegaan van 10% van de investering waarmee de kosten voor de omzetting van het geconcentreerde licht in elektriciteit slechts € 0.10 tot € 0.20 per kWh zijn. Dit is aanzienlijk lager dan bij het gebruik van de thermische weg. Voor het vervolg van de realisatie van de Elkas is daarom uitgegaan van het uitwerken van een systeem gebaseerd op PV cellen als omzettingssysteem.

4 Concentratiesysteem

Om de gereflecteerde NIR straling te kunnen omzetten in elektriciteit is op basis van het onderzoek naar de conversiesystemen gekozen voor toepassing van PV cellen. Er wordt in het concept uitgegaan van het gebruik van relatief weinig PV cellen om daarmee enerzijds de investeringen laag te houden en anderzijds de lichtonderschepping door de gehele constructie te minimaliseren. Om dit te bereiken wordt uitgegaan van een gebogen spiegel (uitgevoerd met NIR reflecterende folie): de zogenaamde concentrator. In het Elkas concept moet deze concentrator worden geïntegreerd in het kasdek en er is uitgebreid studie gedaan naar de beste vorm voor de concentrator (de NIR reflector) in combinatie met een niet bewegend kasdek.

In de ontwerpfase zijn een aantal verschillende concentratie systemen onderzocht waarbij na een eerste selectie is gekozen voor een parabool of een cirkelvormige concentrator (reflector).

In Tabel 4.2 is een overzicht gegeven van de zeven verschillende typen kas/ concentratiesystemen die zijn onderzocht en waarbij de belangrijkste eigenschappen van de reflector, het concentratie systeem, standregeling samen met de belangrijkste voor- en nadelen zijn beschreven.

De kassystemen 1 en 2 hebben een cilinder cirkelvormige reflector waardoor alleen de collector beweegt.

De systemen 3 t/m 6 zijn uitgevoerd met een parabolische reflector. Bij 3 en 4 bewegen de collectors mee met de parabool terwijl bij de kassen 5 en 6 de collector respectievelijk in de nok en onder de dakgoot geplaatst zijn.

De uitvoering 7 bevat een SMTS (Single Mirror Two Stage) concentrator. Het bijzondere aan deze concentrator is dat de collector aan de uiteinden van beide spiegels geplaatst is, waardoor de lichtonderschepping en de hoeveelheid constructie minder kan zijn.

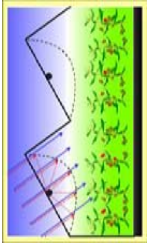
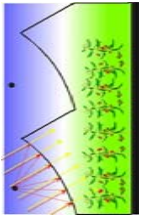
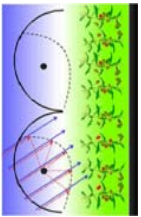
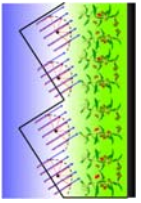
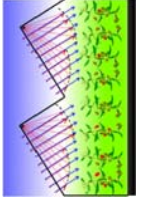
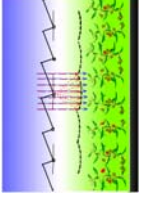
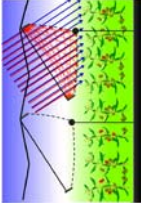
In Tabel 4.3 zijn de geschatte extra kosten voor de verschillende uitvoeringsvormen van de Elkas aangegeven. De in de tabel ingeschatte meerkosten zijn geschat voor de langere termijn, wanneer de onderdelen in serie geproduceerd worden. De belangrijkste kostenposten zijn de hoogtransparant en NIR reflecterende folie, de kosten voor de parabool en de kosten voor de PV cellen. Deze kosten variëren voor de verschillende uitvoeringen omdat deze afhankelijk zijn van de concentratiefactor. Uitvoering 7 is de duurste kas omdat hier het gehele kasdek mee beweegt waardoor er veel extra constructie nodig is. Ook uitvoering 4 is kostbaar omdat hier gebogen en gehard glas nodig voor zowel de omhulling als voor de reflector. Bij de kasttypen 1, 2, 4-6 zijn de verschillen in extra kosten niet groot. De kassen 4 en 5 hebben ook gebogen en gehard glas voor zowel de omhulling als voor de reflector maar de hoge concentratie factor levert hier besparing op bij de PV cellen.

In Tabel 4.4 is een overzicht gegeven van de belangrijkste eigenschappen van de verschillende uitvoeringen. De lichttransmissie eigenschappen zijn vooral gunstig bij de uitvoeringen waar de NIR folie verwijderd kan worden (uitvoeringen 1 en 2). De energie opbrengsten zijn hoger bij de systemen met hogere concentratiefactoren en parabolen (uitvoeringen 3 t/m 7). Lichttransmissie (kerntaak van het systeem) weegt echter zwaarder dan energieopbrengst. Uitvoering 6 heeft als extra nadeel dat het ontwerp een kleine niet gangbare kapbreedte vereist. Dit zal tevens extra lichtverlies tot gevolg hebben. De kassen 3 en 7 zijn minder aantrekkelijk door de hogere kosten.

In de bijlage wordt uitgebreid ingegaan op de uitgevoerde model- en raytracing berekeningen voor het vaststellen van de optimale dimensies van het kasdek en de onderlinge vergelijking van de cirkelvormige en paraboolvormige concentrator, de hoek en de baan van de collector, de randeffecten en de lichtverdeling op de collector etc,

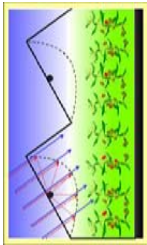
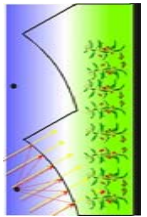
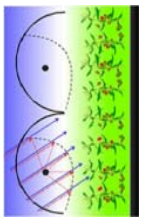
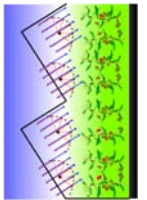
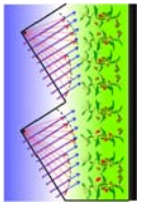
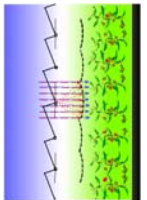
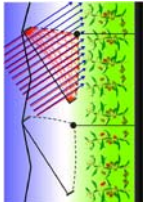
Op basis van deze berekeningen en simulaties is voor de verdere ontwikkeling ontwerp 2 gekozen met als voordelen hoge lichttransmissie, met bestaande materialen te construeren, relatief goedkoop en goede uitstraling.

Tabel 4.1. Overzicht van de verschillende Elkas systemen.

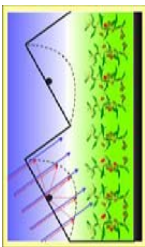
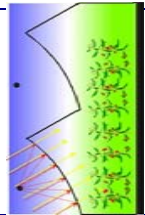
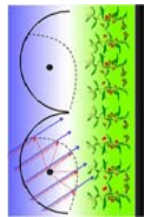
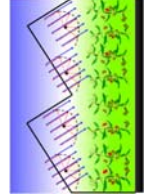
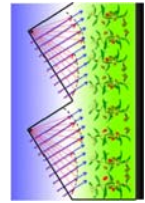
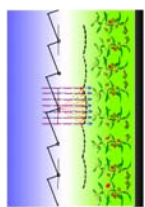
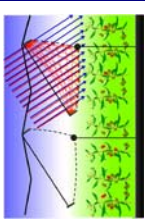
Systeem	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
							
Reflector	Glas omhulling met selectieve folie	Glas omhulling met selectieve folie	Omhulling en Parabool-reflector van glas	Glas omhulling en meervoudige pmma reflector	Glas omhulling en meervoudige pmma reflector	Glas omhulling met selectieve folie	Glas met selectieve folie of gecoat glas
Standregel.	Alleen collector beweegt	Alleen collector beweegt	Reflector met collector	Reflector met collector	Alleen reflector beweegt	Alleen reflector beweegt	Kasdek en reflector beweegt
Nadelen	Zijwaardse afdichting 4 motoren Beperking radius	Collector buiten op afstand, Meerprijs gebogen glas	Meerprijs gebogen glas Dek+parabool Meer lichtverlies	Meerprijs gebogen parabool, Meer lichtverlies	Meerprijs gebogen parabool, Meer lichtverlies	Meerprijs gebogen parabool, Meer lichtverlies	Iets meer lichtverlies, Veel constructie
Voordelen	Weinig lichtverlies* Extra isolatie Low cost	Weinig licht verlies *Minder warmte in de kas, meer opbrengst	Hoge concentratie, Hoge opbrengst, Extra isolatie Eén motor	Meerprijs gebogen parabool, beperkt lichtverlies	Hoge concentratie, Hoge opbrengst, Extra isolatie Eén motor	Hoge concentratie, Hoge opbrengst, Een motor	Hoge concentratie, Hoge opbrengst, Extra isolatie

*) met opralbare folie

Tabel 4.2. Schatting van de extra kosten (€/m²) voor de verschillende uitvoeringsvormen van de Elkas systemen.

Systeem	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
							
Gehard glas (licht gebogen)		10	10				
Parabolen/folie	15	15	30	30	30	30	30
motoren	3	2	1	2	2	2	2
Bevestiging afdichting	8	3	1	3	3	3	15
PV cellen	12 (C=40)	12 (C=40)	4 (C=120)	4 (C=120)	4 (C=120)	4 (C=120)	5
Totaal	38	42	46	39	39	39	52

Tabel 3.1. Overzicht eigenschappen van de verschillende Elkas uitvoeringen.

Systeem	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
							
Licht-transmissie	++	++	+	-	0	0	0
Energie-opbrengst	0	0	+	+	+	+	+
Concentratie factor	-	-	+	+	+	+	+
Range hoek	-	-	+	+	+	+	+
Patenten	+	+	+	+	+	+	-
Regelbaarheid	+	+	+	-	-	-	-
#Motoren	4	3	2	2	2	2	2
Eenvoud constructie	0	+	0	0	-	-	-
Luchtramen	+	+	+	+	+		
Uitstraling	0	+	0	0	0		
Kosten	36	42	39	39	52		

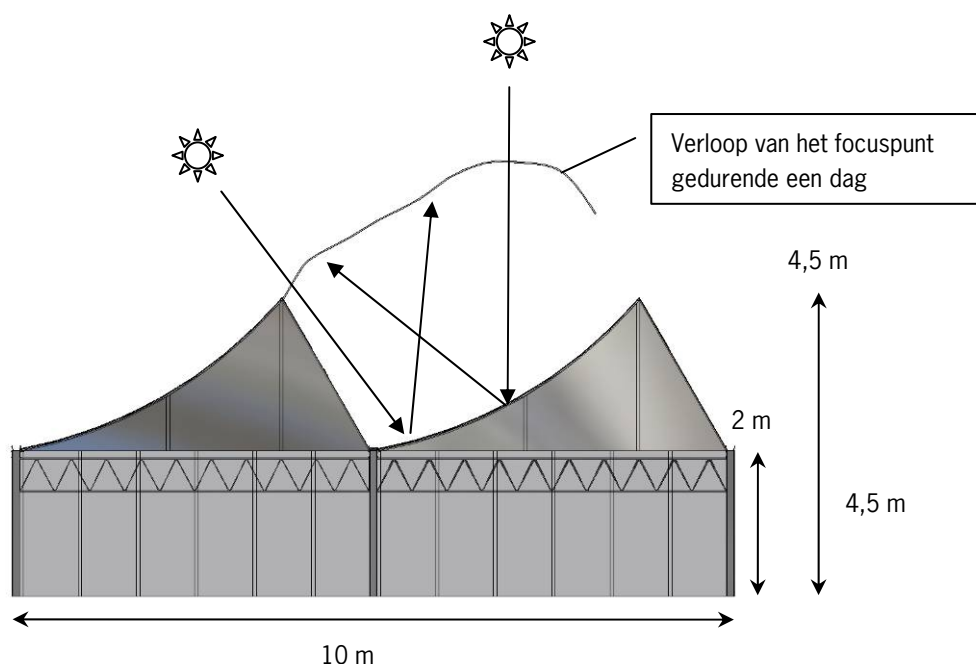
5 Basisontwerp, constructie en besturing.

Basisontwerp

Op basis van alle afwegingen en optimalisaties tijdens de ontwerpfase is gekomen tot het definitieve basis ontwerp voor de realisatie van het prototype van 100 m². Dit basisontwerp voor de Elkas bestaat uit een gebogen cirkelvormig kasdek waartegen aan de onderkant een oprolbare folie is aangebracht die het NIR deel van het zonlicht reflecteert. De kas heeft luchtramen in de rechte delen van de kapconstructie. Door de cirkelvorm van het kasdek wordt de NIR gefocusseerd in een lijn. Op deze lijn wordt het licht opgevangen door fotovoltaïsche cellen (kort PV-cellen) die het NIR licht omzetten naar een elektrische stroom.

Gedurende het verloop van de dag beschrijft de zon een bepaalde baan ten opzichte van het kasdek waardoor het punt (vooraanzicht van de focuslijn) waarin het licht wordt gefocusseerd, een grillig traject aflegt (zie Figuur 5.2). De draagconstructie voor de PV cellen (de collector) moet het verloop van het focuspunt over de dag heen exact kunnen volgen. Bovendien moet de collector om zijn as kunnen roteren zodat de PV cellen naar het kasdek gericht kunnen blijven om een optimale benutting van het opgevangen NIR te bereiken.

Om oververhitting van de PV-cellen te voorkomen worden ze aan de achterzijde door water gekoeld, verder zijn ze aan de voorzijde door een glazen afdekplaat beschermd. Het koelwater van de collectoren wordt afgevoerd naar een koelunit met buffersysteem in de kas.



Figuur 5.2. Zijaanzicht van het basisontwerp van de Elkas met gebogen kasdek en verloop van het focuspunt van het gereflecteerde zonlicht gedurende de dag.

Uitgaande van dit basisontwerp zijn vervolgens keuzes gemaakt voor het kasdek materiaal, is de draagconstructie en de aandrijving voor de collector ontworpen, en zijn alle mechanische belastingen op de collector en de kasconstructie berekend, rekening houdend met eventuele wind- en sneeuwbelasting om te zorgen dat de constructies voldoen aan de voor de kassenbouw geldende normen.

5.1 Kasdek materiaal Elkas

Bij de keuze voor het kasdek materiaal voor de ELkas is gestreefd naar een goed toepasbaar materiaal met een hoge lichttransmissie. Belangrijk bij de keuze is dat het materiaal in een gebogen vorm moet kunnen worden gebracht om, in combinatie met de NIR reflectie, de concentrator (reflector) te vormen. Op voorhand zijn daarbij een aantal materialen afgevalen vanwege een aantal minder goede fysische/constructietechnische redenen. Materialen als PC en PET zijn afgevalen omdat deze zachter zijn, waardoor deze sneller uit de glasroeden schieten en omdat ze niet verkrijgbaar zijn als plaat met een grote kanaalbreedte. Grotere diktes van deze materialen hebben tevens een verlaagde lichttransmissie tot gevolg zodat voor de definitieve keuze is uitgegaan van de materialen PMMA en (gehard) glas (Tabel 5.1).

Op basis van constructietechnische eigenschappen, condensatiegedrag en prijs is voor de realisatie van de prototype kas gekozen voor een gebogen gehard glas dek materiaal. In de aanloop naar de realisatie is eerst een proefmodel gemaakt van het gebogen kasdek (Figuur 5.1), De glasdikte is 4mm en de radius van de kromming is ca. 6m.



Figuur 5.1. Eerste proefmodel van gehard gebogen glas.

Tabel 5.1. Eigenschappen van een aantal materialen (2D gebogen).

Nr	Type	Fa.	Materiaal	Transmissie Lt [%]	Met AR coating	Nodrop coating	Prijs [€/m ²]	Opmerkingen
1	SD 96 mm	Mönch	PMMA	80	nvt	nvt	27	Onevenheden in de kanaalrichting Onevenheden dwars in de kanaalrichting
2	SD 96 mm	Röhm	PMMA	88	nvt	4x	28	
3	Plaat 4 mm		PMMA	90	nvt	?	22	
4	Plaat 5 mm		PMMA	90	nvt	?	30	gehard
5	Plaat 6 mm		PMMA	90	nvt	?	34	
6	Plaat 6 mm	Glaverbel	Glas	90	95	nvt	20	

5.2 Ontwerp constructie en aandrijving voor de zonnecollector

5.2.1 Draagconstructie

Bij het bouwen van het prototype door kassenbouwbedrijf Bosman is, om de bouwkosten te minimaliseren, uitgegaan van het gebruik van standaardonderdelen met een vakmaat van de tralieligger van 4,8 m. De buitenmaten van de kas zijn ongeveer 9.6 x 9.6 m en de lengte van de zonnecollector is ongeveer gelijk aan deze maat, ter vereenvoudiging wordt in het vervolg 10 m aangehouden. De breedte van de PV-cellen is gekozen op 150 mm uitgaande van een in de handel veel voorkomende maat. Om de lichtonderschepping van het inkomende licht naar de kas door de zonnecollector minimaal te houden moet de PV ondersteunende constructie binnen de breedte van de PV-cellen vallen.

Als het kasdek netjes gebogen is en er daarin geen grote vervormingen optreden zal het gefocusseerde licht een smalle streep beschrijven boven het kasdek. De PV-cellen moeten zo goed mogelijk in deze focus geplaatst worden om een zo hoog mogelijke omzetting te halen. De constructie van de collector is daardoor lang (10 m) en smal (150 mm) en de doorbuiging mag maximaal 1 mm zijn om de PV-cellen zo goed mogelijk in het focuspunt te houden.

Om dit te realiseren is er gekozen om in het midden 1 extra steunpunt op te nemen zodat de constructie wordt opgedeeld in 2 gelijke stukken van 5 meter. De constructie krijgt dan in totaal 3 steunpunten (en 3 armen), 2 aan het eind en 1 in het midden, zodat de kolommen die het kasdek ondersteunen ook de draagarmen van het aandrijfmechanisme kunnen koppelen. Omdat de gehele constructie om zijn as moet kunnen roteren, moet de constructie in alle richtingen ongeveer even stijf zijn zodat ook de doorbuiging in alle richtingen gelijk blijft. In de bijlage is in detail beschreven hoe het definitieve ontwerp van de dragende constructie tot stand is gekomen.

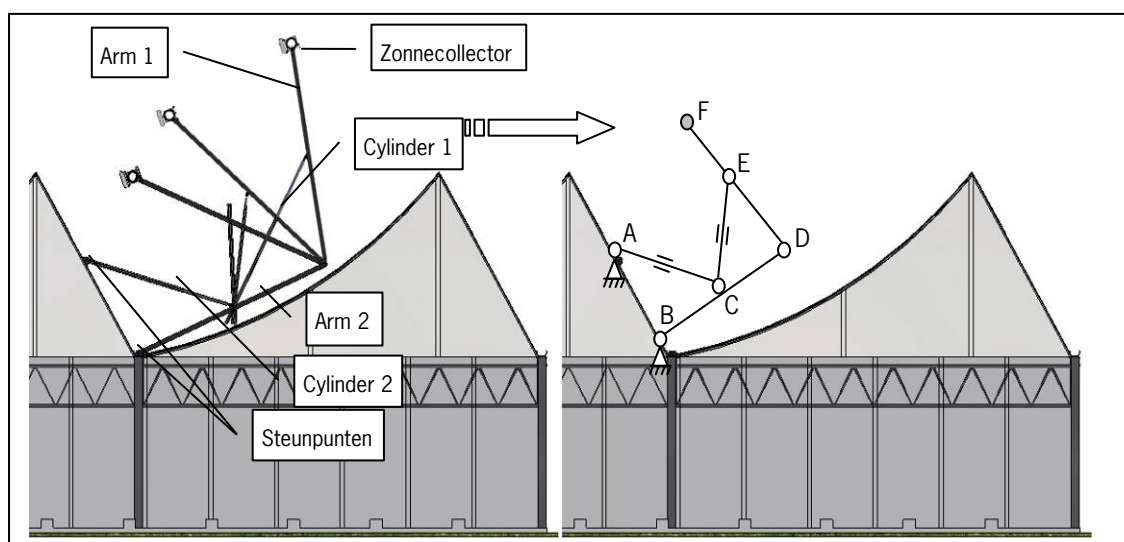
5.2.2 Ontwerp van het hef- en aandrijfmechanisme

De collector met de PV-cellen wordt langs een bepaalde curve verplaatst. Deze lijn wordt beschreven door een verzameling van punten in een XY-vlak. In principe is in een vlak ieder punt te bereiken door de volgende manieren van bewegen:

- A: een translatie gevolgd door een tweede translatie.
- B: een translatie gevolgd door een tweede rotatie.
- C: een rotatie gevolgd door een tweede rotatie.

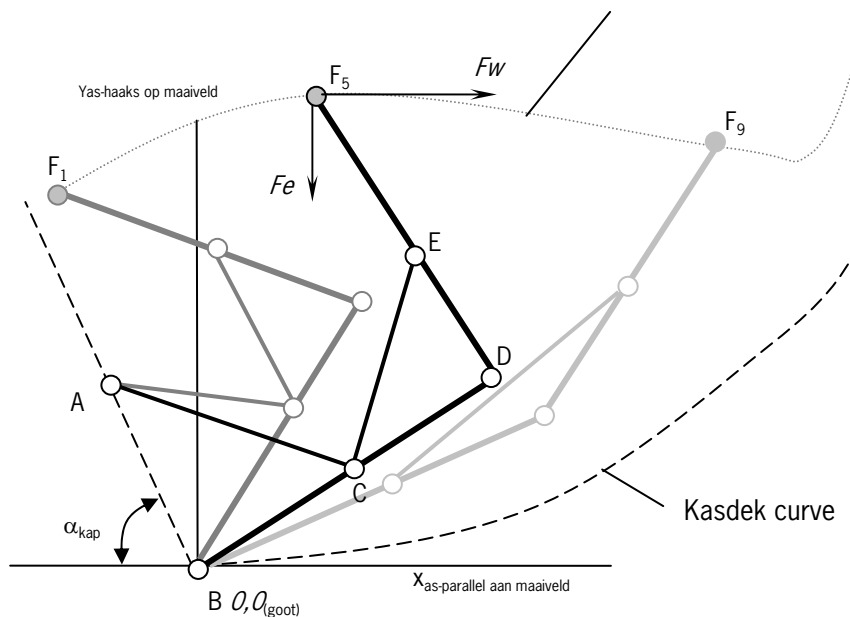
In de bijlage is beschreven welke diverse ontwerpen er zijn onderzocht. Uit deze ontwerpen is vervolgens vanwege de eenvoud van de constructie, de gunstige belasting op het kasdek, de extra stabiliteit en de lineaire cilinders gekozen voor het mechanisme met twee roterende assen om de collector met PV-cellen langs de gewenste baan te bewegen.

Het definitieve mechanisme waarmee de zonnecollector wordt bewogen bestaat uit een tweetal armen aangedreven door 2 lineaire cilinders. Het mechanisme is via twee steunpunten aan het kasdek verbonden. In onderstaande Figuur 5.11 is links een zijaanzicht gegeven waarin de armen met de zonnecollector in verschillende standen staat. De zonnecollector is roterend opgehangen in punt F. Rechts is het mechanisme vertaald naar een mechanisch model.



Figuur 5.11. Zonnepaneel constructie, met aangegeven kracht knooppunten.

In Figuur 5.20 is de baan van de collector en de stand van de beide armen met de draaipunten in meer detail weergegeven.



Figuur 5.20. Detail van de standen van het mechanisme voor de beweging van de zonnecollector tijdens het volgen van de af te leggen baan.

5.3 Berekeningen kasconstructie

De kasconstructie van de Elkas wijkt met name op het punt van bovenbouw sterk af van de gangbare kasdekken. Voorafgaand aan de realisatie van de prototypekas zijn daarom uitgebreide ontwerpberekeningen uitgevoerd aan de constructie.

De onderbouw kasconstructie is relatief standaard en bestaat uit kolommen met tralieliggers met overspanningen van 9,6 m. De onderbouw is berekend met het Casta-Kassenbouw programma door Bosman, Aalsmeer. Als uitgangspunt voor de belastingen zijn de belastingen t.g.v. eigen gewicht van de constructie + glasomhulling, sneeuw en wind aangehouden conform de NEN 3859 Tuinbouwkassen, d.d. dec. 2004. De belastingen veroorzaakt door opgehangen gewassen, de (permanent aanwezige) installaties en de windbelasting op de gevels worden geheel opgevangen door de onderbouw met kolommen en tralieliggers en belasten het dek dus niet.

De sterkte van de bovenbouw van de kasconstructie met gebogen dakvlakken is apart doorgerekend uitgaande van de maatvoering en gebruikte materialen van de kas: gebogen dakvlakken, gedekt met gehard glas 4 mm en met kapoverspanningen van 4,80 m. De nokhoogte is 5,078 m boven het maaiveld en de hoogte van onderkant goot tot het maaiveld is 3 m. De kap van 4,80 m wordt gevormd door een gebogen dakvlak en een recht dakvlak, waarvan de dakhellingen afwijken. De gebogen glasroeden en de rechte glasroeden staan op onderlinge afstanden van 1,25 m en de hoofdspanten (met tralies) op 5 m. De kapconstructie wordt uitgevoerd met éénzijdige luchtramen in de rechte dakvlakken, die scharnieren om de nok van de kas (aandrijving met tandheugels e. d.).

Voor details van de berekeningen en de conclusies wordt verwezen naar de bijlage met de uitgebreide rapportage.

Op basis van de berekeningen zijn een aantal extra versterkingen aangebracht in het dek om te zorgen dat de gehele constructie voldoet aan de eisen, genoemd in de NEN 3859 Tuinbouwkassen, d.d. dec. 2004.

In verband met het kunnen uitvoeren van metingen onder diverse oriëntaties t.o.v. de Noord-Zuid as, is besloten om de kas in zijn geheel draaibaar te maken zodat er onderzoek gedaan kan worden naar de maximaal haalbare energieopbrengst vergeleken met een normale kas met bv. een noord zuid oriëntatie.

5.4 Meet- en regelsystemen

De klimaatbeheersing van de prototype kas is eenvoudig uitgevoerd: normale ventilatieregeling (luchtramen), standaard verwarming met boven en ondernet (met pomp en driewegklep), geen energiescherm. Het meetsysteem voorziet in normale temperatuursensoren en een standaard weerstation met de volgende metingen: globale straling, windrichting, windsnelheid, regenmelding. Alle actuatoren hebben een positie terugmelding.

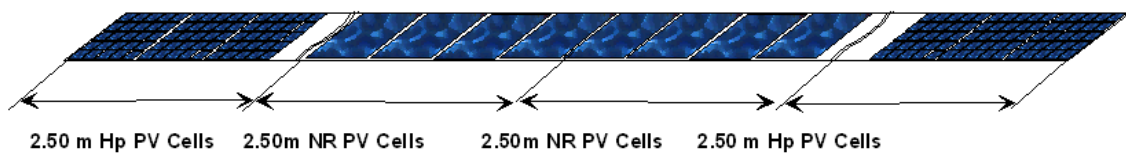
Het totale meet- en regelsysteem van de experimentele ELkas wijkt op één belangrijk punt af van de traditionele kasklimaatregeling: de aansturing van de beweging én de koeling van de twee PV collectoren boven het kasdek. Verder moesten voor het onderzoek meetinstrumenten worden aangebracht voor het meten van het geleverde vermogen, de totale hoeveelheid energie, de verdeling van de temperatuur en licht over de collector gemeten kunnen worden evenals de aansturing van het warmteopslagsysteem. De communicatie van de computer naar de kas voor de raamstand, stand van de motoren en kleppen worden geregeld via een Wago systeem, dit systeem zorgt ook voor de datalogging.

De besturing van de positie van de collector is gebaseerd op de stand van de zon en wordt berekend door een speciaal hiervoor ontwikkeld programma. Het volgsysteem zorgt ervoor dat de collector op de berekende coördinaten en stand gepositioneerd wordt en dat de stand van de zonnecollector zo geregeld wordt dat de gereflecteerde straling loodrecht op de PV cellen staat. Om de stand van de collector te kunnen bepalen zijn aan beide uiteinden 16 sensoren in dwarsrichting op de balk gemonteerd. Het volgsysteem bestaat uit twee X,Y,R servo's aan de uiteinden van de collector.

Het traject kan op basis van geografische positie, tijdstip en karakteristiek van het gebogen dak berekend worden en is voor beide servo's gelijk. De vooraf bepaalde posities van de PV-modules zijn als tabellen in de standregeling software opgenomen waardoor de modules automatisch in positie gebracht kunnen worden. Een aparte fijnregeling op elke servo zorgt ervoor dat de collector over de gehele lengte optimaal in het brandpunt komt te staan. Als de zon niet schijnt wordt het berekende traject uitgevoerd zonder fijnregeling, zodra de zon weer schijnt wordt de fijnregeling actief en zit dan meteen weer in zijn werkgebied. In de prototype kas vindt de fijnregeling op uitgangsvermogen vooralsnog met de hand plaats.

5.5 Constructie collectorsysteem

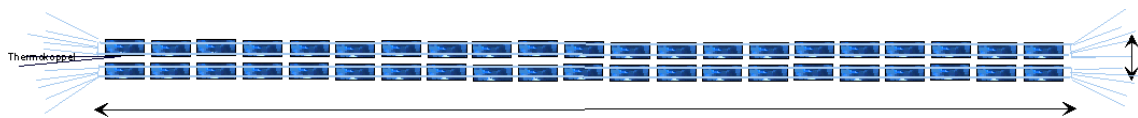
De zonnecel modules zijn opgebouwd uit NR PV cellen die speciaal ontworpen zijn voor geconcentreerde zonnestraling (nr 3 uit Tabel 4.5). In Figuur 7.2 is het totaal overzicht weergegeven. Aan beide uiteinden zijn totaal 4 modules geplaatst met kleine Hp cellen volgens Figuur 7.2B. In het middelste gedeelte zijn twee modules geplaatst met NR cellen (Figuur 7.2 C). De 4 modules aan het uiteinde zijn opgebouwd uit kleinere cellen (type HP, nummer 6 uit Tabel 4.5). Deze zijn gedurende de uitwerking van de definitieve constructie van de collector toegevoegd zodat bij gedeeltelijke belichting in de ochtend- en avonduren (bij schuin invallend licht), een deel van de modules uitgeschakeld kan worden. Hierdoor blijft het systeem ook functioneren bij gedeeltelijke belichting.



A.



B.



C.

Figuur. 7.2. A. Opbouw van de totale watergekoelde PV module; B. De vier modules met de HP Cells (51x51) aan beide uiteindes; C. Module met de NR 51x116 totaal twee stuks in het midden geplaatst.

6 Bouw van de kas

In november 2007 werd er begonnen met de voorbereidingen voor de bouw van de prototype kas met het storten van een betonnen vloer. Deze vloer is als extra optie toegevoegd tijdens het traject om de kas draaibaar te kunnen maken en om te invloed te kunnen testen van een niet optimaal op het zuiden gerichte kas. Tevens kan deze experimentele kas bij verschillende zonnestanden gedraaid worden zodat metingen onder diverse zonnestanden en invalshoeken kunnen worden uitgevoerd. Na het aanbrengen van de draaiconstructie en vloer is het frame verder opgebouwd. In Figuur 6.1 zijn foto's gedurende de opbouwperiode weergegeven.



Figuur 6.1 a. *Betonnen fundering met de draaiconstructie*
 b. *Opbouw constructie*
 c. *Eerste kap geplaatst*
 d. *Plaatsing van gebogen (gehard) glas.*
 e. *Plaatsing van het zonnevolgsysteem*
 f. *Zonnecel modules*
 g. h. i. *Verschillende aanzichten van de complete kas*

Het uiteindelijk gerealiseerde prototype bestaat uit een asymmetrisch kastype om te voldoen aan een hoge energie opbrengst en een zo veel mogelijk gelijkmatige belichting in de teeltruimte. De reflector is in het kasdek geïntegreerd en wordt gevormd door een in cirkelvorm gebogen gehard glas, gemonteerd in voorgebogen glasroeden. De reflecterende NIR folie wordt aan de binnenzijde tegen het glas gespannen. De collector, bestaande uit gekoelde Silicium PV cellen bevindt zich buiten de kas waardoor de warmteverliezen van de collector naar de omgevingslucht niet in de kas terecht komen.

De voordelen van deze uitvoering zijn een hoge lichttransmissie (mits de gebruikte materialen hierop zijn toegesneden), het gebruik van bestaande materialen en een goede esthetische uitstraling.

De kas, met een goothoogte van 2.5 m, bestaat uit twee kappen van 4.80m geplaatst op een tralie en heeft een lengte van 10 m. De kas is op een draaibaar plateau geplaatst om de opbrengst bij verschillende oriëntaties van de kas te kunnen bepalen. De zijgevels van de kas zijn van polycarbonaat kanaalplaten. De constructie voor de beweging van de zonnecellen is na realisatie van de kas met een kraan op de kas getild en gemonteerd waarna tenslotte de watergekoelde zonnecelmodules aan de beweegbare armen zijn gemonteerd.



Figuur 6.2. Foto van de totale watergekoelde PV module gemonteerd aan de beweegbare armen.

7 Meetresultaten en opbrengstbepalingen

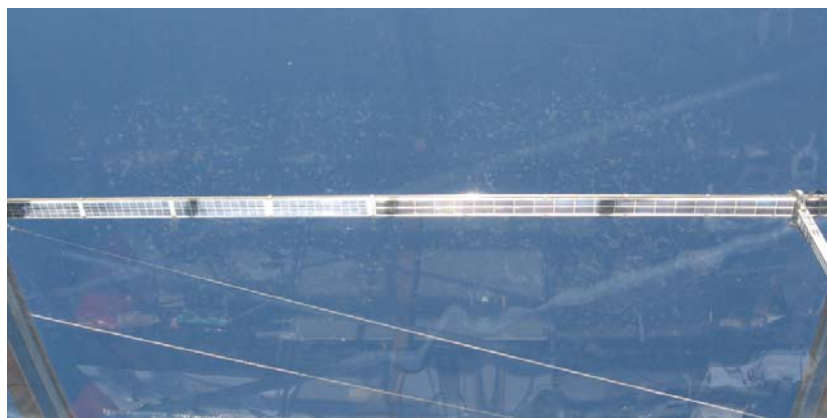
Na de oplevering en de officiële ingebruikname in juli 2008 zijn nog een aantal praktische problemen opgelost voordat eind augustus daadwerkelijk met de meting van de elektriciteitsproductie kon worden gestart. Bij deze metingen zijn een aantal punten naar voren gekomen die in een definitieve versie verder verbeterd moeten worden maar desondanks is uit de metingen een goede inschatting te maken van de verwachte jaaropbrengst met het Elkas principe.

7.1 Meting van dagopbrengsten

Omdat het glas en folie naast de NIR straling tevens zichtbaar licht reflecteren ontstaat er behalve een (onzichtbaar) NIR brandpunt, ook een zichtbaar brandpunt zoals te zien is aan de lichtbundel over de collector in Figuur 7.1. Uit deze foto's blijkt tevens dat er schaduwstrepen op de zonnecel modules vallen, afkomstig van de glasroeden en de beweegbare armen, waardoor lokaal enkele cellen onder- en/of onbelicht blijven en er geen stroom loopt. Daardoor worden de uitgangsströmen van de modules sterk begrensd.



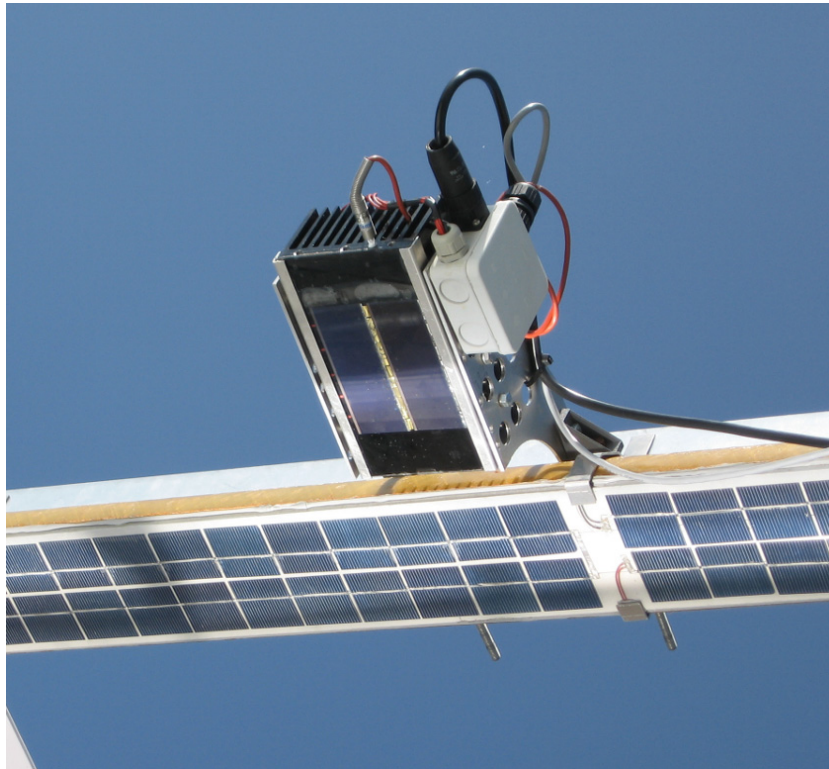
A.



B.

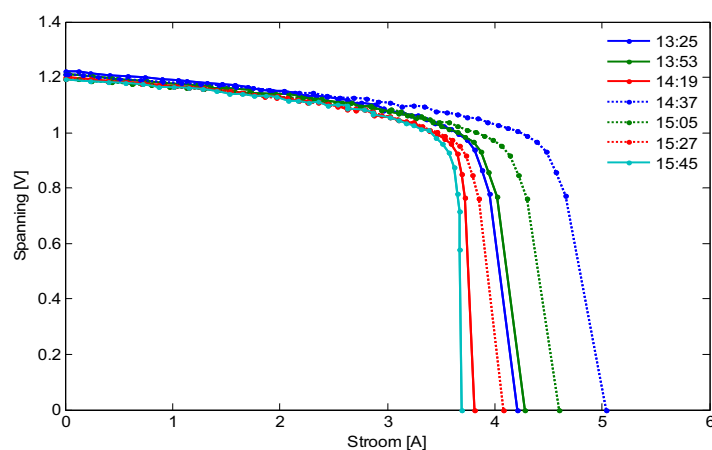
Figuur 7.1. Foto's van de PV modules in het brandpunt.

Om de invloed van de schaduwstrepen uit te sluiten is voor de vervolgmetingen een aparte luchtgekoelde meetmodule geplaatst met twee PV cellen in serie, zoals te zien in Figuur 7.3.

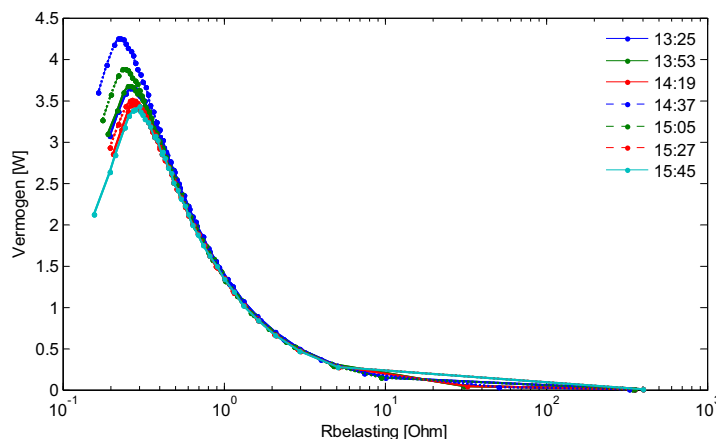


Figuur 7.3. Aparte meetmodule gemonteerd aan de beweegbare armen.

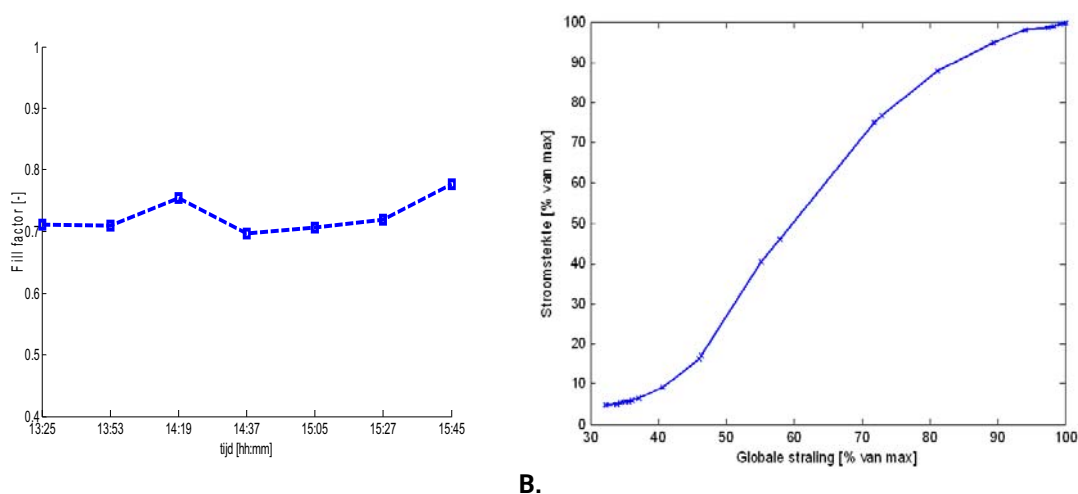
In Figuur 7.4 is de I-V karakteristiek van de gebruikte meetmodule met twee NR-cellen weergegeven. De uitgangsstroom is afhankelijk van de intensiteit van de zonnestraling en daardoor ook van de tijd. Uit deze metingen is tevens een belastingskarakteristiek bepaald welke is weergegeven in Figuur 7.5. Uit deze belastingcurves zijn de punten van maximaal vermogen (maximum power punt; MPP) en de Fill-Factor (FF) van de modules te bepalen. De waarden voor de Fill-Factor voor deze metingen zijn weergegeven in Figuur 8.6 en de gemiddelde waarde is 73%. Dit zijn normale waarden voor dit type cellen.



Figuur 7.4. I-V karakteristiek van de meetmodule gemeten op 30 aug. 2008.



Figuur 7.5. Maximum vermogen als functie van de belasting van de meetmodule gemeten op 30 aug. 2008.



Figuur 7.6. A. Fill factor van de meetmodule gemeten op 30 aug. 2008.
B. Geleverde stroom als functie van de instraling (effect van bewolking).

Het uitgangsvermogen en de opvallende straling als functie van de tijd van de meting op 30 augustus is weergegeven in Figuur 7.7. Voor deze meting is naast de stralingsgegevens van het WUR meteo station aan de Haarweg tevens een meter ingezet op het dak van de Elkas (groene meetpunten). Door de verschillende locaties treden er bij bewolking kleine verschillen op. Op 11 september is deze meting herhaald. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 7.8. Hierbij zijn metingen (met twee solarimeters) verricht met de kas in vaste positie (Pnom (vast)), en metingen waarbij de kas meedraaide in de azimuth positie van de zon (Pnom (dr)).

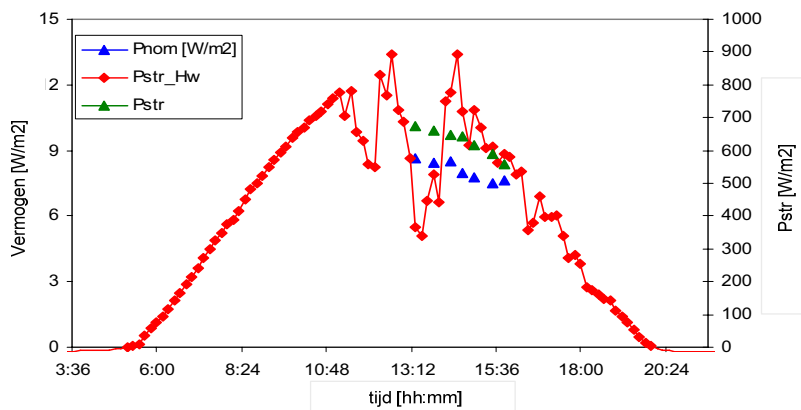
Uit deze resultaten blijkt dat het maximaal vermogen voor beide situaties (meedraaiend of vaste positie) nagenoeg gelijk is. Bij een bepaalde positie van de zon zijn er twee belangrijke factoren die de opbrengst bepalen:

- de mate van focussering op de PV module (de collector)
- de invalshoek, en de daarmee gepaard gaande reflectieverliezen, op de PV-module.

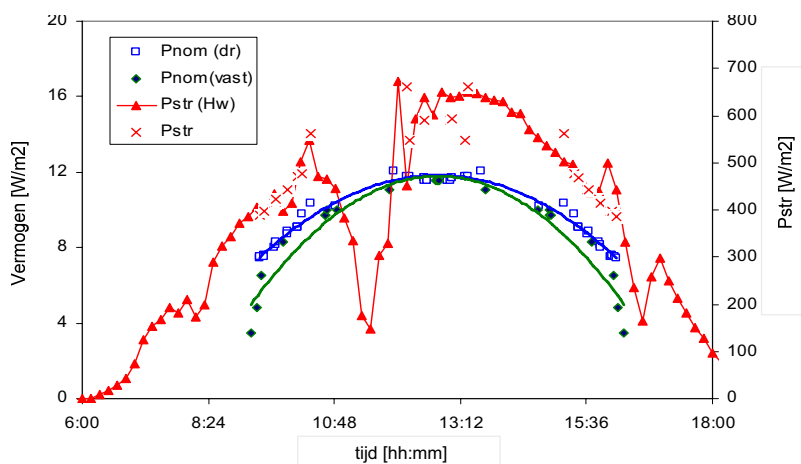
In de ochtend- en avonden is de elevatie van de zon laag. Dit betekent dat bij een vaste kas het zonlicht onder een grote hoek op de PV-module terecht komt waardoor de reflectie hoog is. Daar staat tegenover dat de focussering beter is ten opzichte van een met de zon meedraaiende kas omdat een groter deel van het focusserende gedeelte

belicht wordt. Uit de modelsimulaties is gebleken dat de focussering afneemt naarmate een kleiner deel van de reflector belicht wordt.

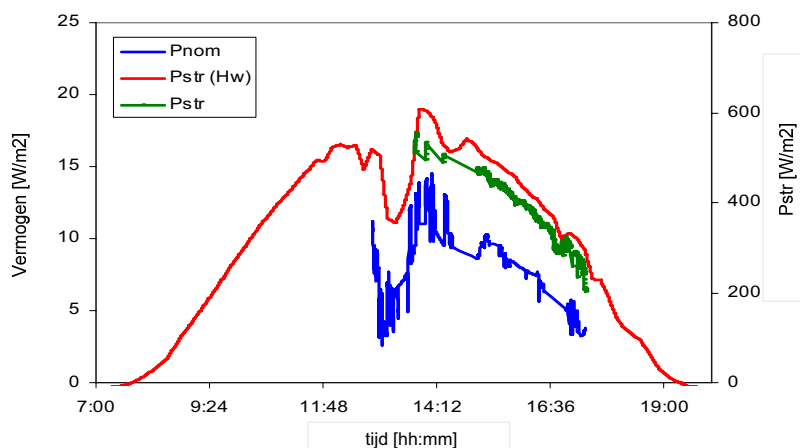
Het overall effect van een slechtere focussering en minder reflectieverliezen is positief omdat de meedraaiende kas 's morgens en 's avonds extra elektrisch vermogen gegenereerd ten opzichte van de vaste kas. Gedurende de morgen van deze dag is gemeten aan de meedraaiende kas en gedurende de middag is in vaste positie gemeten. Daarna zijn de resultaten gespiegeld ten opzichten van het tijdstip met de hoogste zonnestand. Voor alle metingen geldt dat de PV-module handmatig in het brandpunt gezet is omdat door mechanische defecten de positieregeling van de motoren niet optimaal werkte. Dit heeft soms geleid tot extra fluctuaties (naast de fluctuatie door verandering in de instraling) in de energieopbrengst metingen.



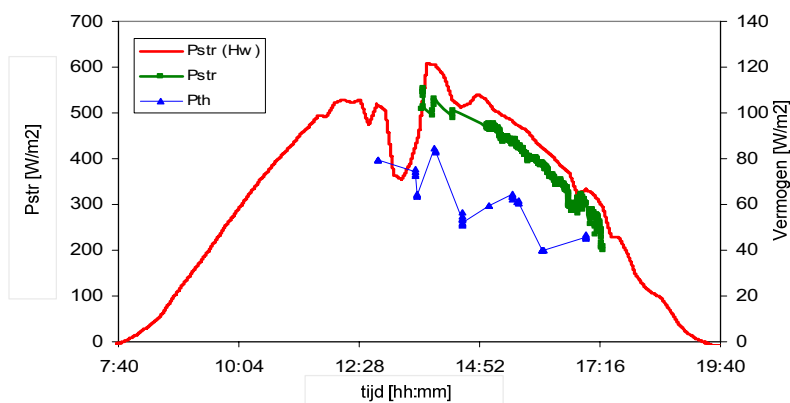
Figuur 7.7. Uitgangsvermogen (P_{nom}) en invallende straling (P_{str}) op locatie en op de Haarweg (P_{str_Hw}) Wageningen d.d. 30 aug. 2008.



Figuur 7.8. Uitgangsvermogen (P_{nom}) en invallende straling (P_{str}) op locatie en op de Haarweg (Hw) Wageningen d.d. 11 sept. 2008.



Figuur 7.9. Uitgangsvermogen (P_{nom}) en invallende straling (P_{str}) op locatie en op de Haarweg (Hw) Wageningen d.d. 26 sept. 2008.



Figuur 7.10. Thermisch opgewekt vermogen (P_{th}) en invallende straling (P_{str}) op locatie en op de Haarweg (Hw) Wageningen d.d. 26 sept. 2008.

In Tabel 7.1 is een overzicht weergegeven van de meetgegevens van de drie gemeten dagen. Het geleverde vermogen van 14 W/m^2 op de laatste dag (Figuur 7.9) is het hoogste. Dit is te verklaren omdat na 15 september de NIR reflecterende folie nog strakker tegen het gebogen glas bevestigd was zodat er na deze datum een nog beter brandpunt ontstond en dus een hogere opbrengst.

Deze metingen geven de potentie aan van de elektriciteitsproductie en wanneer dit vermogen omgerekend wordt naar een periode in juni-juli, met een invallend vermogen van 900 W/m^2 , zal het piekvermogen evenredig toenemen naar 21 W/m^2 .

Tabel 8.2 geeft het gemeten thermisch vermogen op 26 september 2008. Het opvallende hierbij is dat de gemeten waarde hoger is dan de theoretische waarde gebaseerd op directe straling. De verklaring hiervoor is dat ook de diffuse straling een bijdrage levert aan het totaal.

Tabel 7.1. Gegevens van maximum stralingsniveau (P_{str}), directe aandeel (P_{dir}), Gereflecteerde NIR straling door folie (P_{nir}), Gereflecteerde zichtbare straling door glas en folie (P_{refl}), totaal op zonnecellen vallende straling (P_t) het nominaal elektrisch vermogen (P_{nom}) en het berekende PV omzettingsrendement.

Parameter/meetdatum	30 aug. 2008	11 sept 2008	26 sept. 2008
P_{str} [W/m ²]	680	640	600
P_{dir} [W/m ²] (69% van P_{str})	469	441	414
P_{nir} [W/m ²] (15% van P_{dir})	70	66	62
P_{refl} [W/m ²] (15,6% van P_{str})	70	66	62
P_t [W/m ²]	140	132	124
P_{nom} [W/m ²]	8,5	12	15
PV Rendement [%]	6,0	9,1	12

In Figuur 7.10 zijn de resultaten weergegeven van de opbrengst van de thermische energie. Omdat dit gemeten is aan de luchtgekoelde onderzoeksmodule is de energieopbrengst hier bepaald door het meten van de temperatuurstoename van de module per tijdseenheid.

Tabel 7.2. Gegevens van maximum stralingsniveau (P_{str}), directe aandeel (P_{dir}), Gereflecteerde NIR straling door folie (P_{nir}), Gereflecteerde zichtbare straling door glas en folie (P_{refl}), totaal op zonnecellen vallende straling (P_t) en het thermisch vermogen (P_{th}).

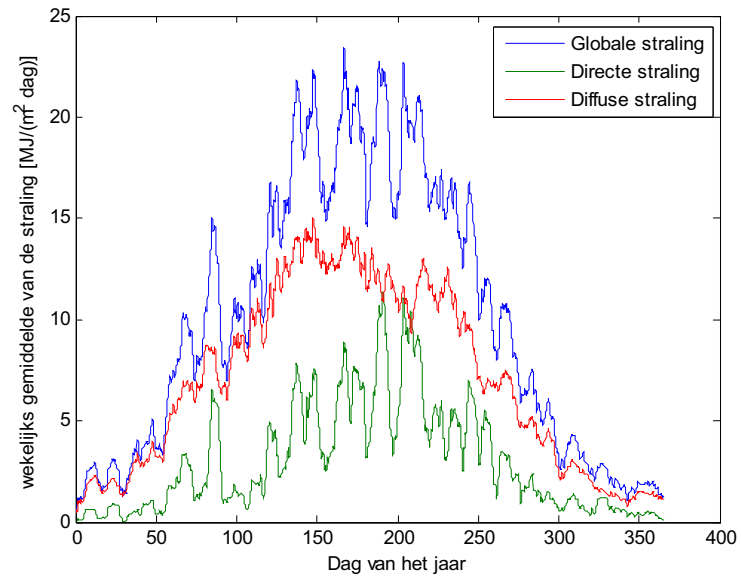
Parameter/meetdatum	26 sept. 2008
P_{str} [W/m ²]	600
P_{dir} [W/m ²] (69% van P_{str})	414
P_{nir} [W/m ²] (15% van P_{dir})	62
P_{refl} [W/m ²] (15,6% van P_{str})	62
P_t [W/m ²]	124
P_{th} [W/m ²]	150

7.2 Bepaling van de jaaropbrengsten

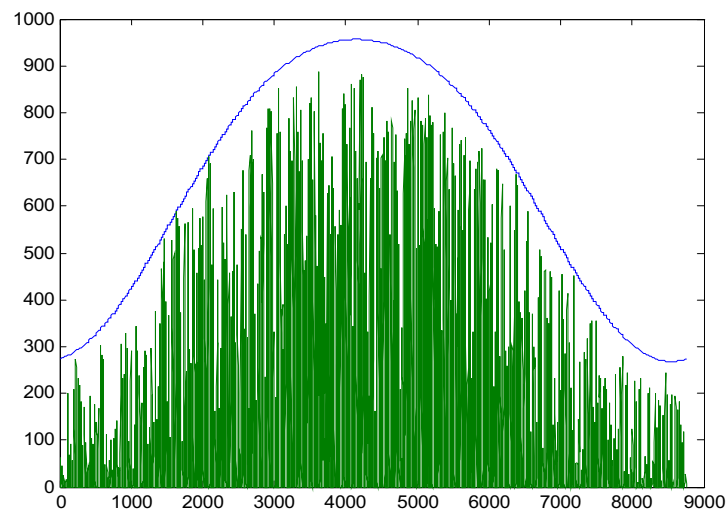
Voor het berekenen van de jaaropbrengsten aan elektriciteit en warmteproductie is gebruik gemaakt van jaarrond simulatie met behulp van de gemeten overall elektrische en thermische efficiëntie voor de PV modules uit Tabel 8.1 en 8.2 van de Elkas in combinatie met een jaarrond stralingverloop. Voor de straling is uitgegaan van de hieronder aangegeven dataset. De verkregen warmte en elektriciteitsproductie zijn vergeleken met een jaarrond warmtevraagpatroon van een normale tuinbouwkas.

7.2.1 Stralingsgegevens

Figuur 7.11 laat de totale straling over het jaar (3.65 GJ) zien in De Bilt met de onderverdeling naar diffuse en directe straling (1.08 GJ). De directe straling vormt 29.6% van de globale straling en wordt in het Elkas systeem geconcentreerd op de PV collector. Voor de jaaropbrengst berekening is uitgegaan van de maximale straling zoals weergegeven in Figuur 7.12 en een bepaalde bewolkingsgraad.

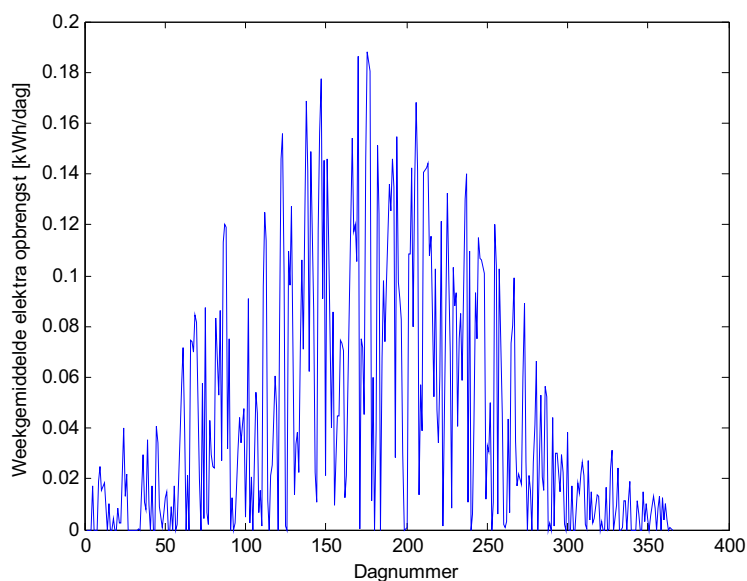


Figuur 7.11. Dagelijkse stralingssom over het jaar gemeten in De Bilt.



Figuur 7.12. De maximale straling en de globale straling over het jaar.

7.2.2 Elektriciteitsproductie



Figuur 7.13. Weekgemiddelde elektriciteitsopbrengst over het jaar per dag.

Uit de stralingsgegevens van Figuur 7.11 en de gemeten efficiëntie voor de PV collector is de jaarrond elektriciteit productie berekend. Hierbij is uitgegaan dat een 40^{ste} deel van de straling wordt gebruikt zoals in Tabel 8.1 te zien.

In Figuur 7.13 zijn de resultaten per dag over het totale jaar te zien. Geïntegreerd over het gehele jaar wordt er 16 kWh per m² opgewekt. Dit is iets lager dan de voorspelde jaaropbrengst van 18-20 kWh/m² en de verklaring hiervoor is enerzijds het wat lage rendement van de PV cellen en deels door de nog niet gehaalde optimale focusering van de NIR straling waardoor een deel naast de PV-module valt. Verbetering van het systeem op deze punten, in combinatie met een geoptimaliseerde NIR folie kan zorgen voor een verdere verhoging van de jaaropbrengst. Desondanks kan geconcludeerd worden dat de prototype kas goed presteert ten opzichte van de oorspronkelijke verwachtingen.

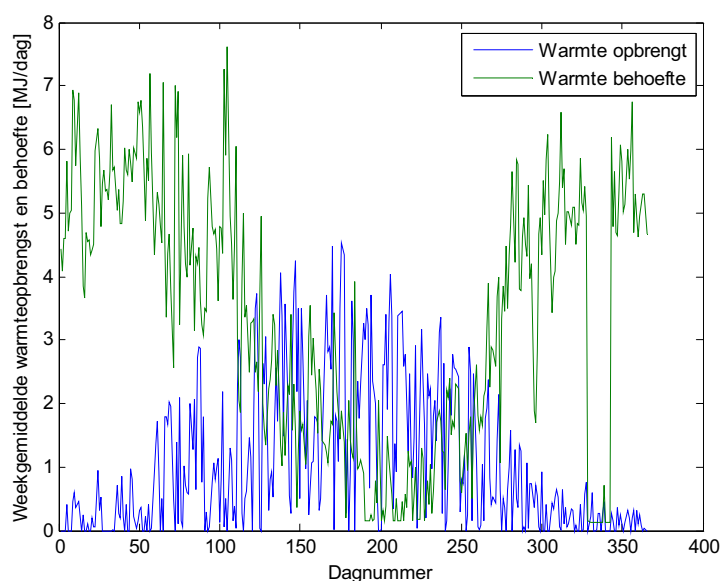
7.2.3 Warmteproductie en afstemming vraag en aanbod

Naast de elektriciteitsproductie wordt door de collector ook warmte gewonnen door de directe straling te concentreren. In Figuur 7.12 is de opbrengst van de collector te zien (blauwe lijn) in combinatie met een via KASPRO gesimuleerde warmtebehoefte van een kas met een normale tomatenteelt.

Bij de berekening van de warmteproductie is er vanuit gegaan dat een 6^e deel van de opvallende straling in warmte wordt omgezet. (Tabel 7.2) in combinatie met de hoeveelheid directe straling uit Figuur 7.6 B. In de berekening is aangenomen dat bij minder dan 35% van de maximale globale straling, afhankelijk van de periode van het jaar zoals in Figuur 7.12 weergegeven, er geen warmte wordt opgewekt. Indien de straling meer dan 82% van de maximale straling is wordt de maximale hoeveelheid warmte gegenereerd. In het tussengebied verloopt de opbrengst lineair. Het thermische piekvermogen is ongeveer 150 W/m² en de maximale hoeveelheid zonnewarmte die per vierkante meter op jaarbasis kan worden ingevangen bedraagt 386 MJ (107 kWh). Uit de vergelijking van beide lijnen in de Figuur blijkt dat in de winter een deel van deze zonnewarmte direct kan worden toegepast voor de verwarming van de kas en uit de simulatieberekeningen blijkt dat dit in totaal 38 MJ bedraagt, waarbij de warmteverliezen van de collector naar de omgeving niet zijn meegenomen. Door toepassing van een buffer kan de hoeveelheid benutbare

gewonnen warmte worden verhoogd, in combinatie met een dagbuffer kan 246 MJ voor verwarming worden ingezet en met een weekbuffer 290 MJ, waarmee ca 68% van de gewonnen warmte kan worden hergebruikt voor de verwarming van de kas.

Toepassing van een weekbuffer vraagt een opslagcapaciteit van 15 MJ per m², wat neerkomt op een waterbuffer van 178 liter per vierkante meter kas en een temperatuurverschil van 20 K. Toepassing van een seizoensbuffer zou theoretisch de resterende 32% van de warmtebehoefte van de kas kunnen invullen, maar gegeven het feit dat een groot deel van de warmte direct gebruikt kan worden als een dagbuffer/weekbuffer wordt ingezet, maakt dat een seizoensbuffer voor het aanvullend opslaan van de warmte van de collector naar verwachting niet economisch rendabel is.



Figuur 7.14. Weekgemiddelde warmteopbrengst van de collector en de warmtebehoefte van de kas (tomaat) over het jaar per dag.

8 Inschatting economisch perspectief

De Elkas is een zeer innovatief concept en als zodanig onder de huidige omstandigheden nog niet economisch rendabel. Een aantal componenten en voorzieningen verhogen de investeringen van een kas: gebogen glas en glasroeden, spectraal reflecterende NIR-folie, mechaniek voor standregeling en de zonnecel (PV) modules. Omdat naar verwachting binnen een bepaalde periode diverse kosten verder omlaag kunnen, bv voor de standregeling en de zonnecel modules, is in Tabel 9.1, naast de huidige kosteninschatting een verwachte prijs over 5 en 10 jaar ingevoerd. Sommige kostenposten in deze tabel zijn nog niet exact te geven en zijn daarom een zo goed mogelijke benadering. In de tabel is aangenomen dat de energieprijzen de komende 5 jaar zullen verdubbelen en over tien jaar dezelfde toename zal ontstaan.

Tabel 8.1. Kosten analyse Elkas.

Onderdeel	Investering					
	Gewone kas			Kas met aquifer		
	Nu [€/m ²]	5 jaar [€/m ²]	10 jaar [€/m ²]	Nu [€/m ²]	5 jaar [€/m ²]	10 jaar [€/m ²]
Totale extra Investering						
Gebogen kasdek	30	20	20	30	20	20
NIR-folie	20	10	10	20	10	10
Folie oprol systeem	24	10	10	24	10	10
PV cellen (C=30x) ¹	45	35	35	45	35	35
Laminatie module ²	20	10	10	20	10	10
Standregeling ²	45	20	20	45	20	20
Warmtewisselaar ²	5	5	5	5	5	5
Installatie ²	10	10	10	10	10	10
Totale kosten	199	120	120	199	120	120
Afschrijving+rente [€ per m ²]						
Rente (gemiddeld over afschrijvingsperiode; 5%)	5.0	3.0	3.0	5.0	3.0	3.0
Afschrijving	0.0	4.3	9.1	5.1	11.2	16.6
Totale jaarkosten	5	7.3	12.1	10.1	14.2	19.6
Baten € per m ²						
Elektrische energie ^{2,3}	1,5	4,4	8,4	1,5	4,4	8,4
Thermische energie 100 kWh ³	0,7	1,4	2,2	1,1	2,3	3,7
Besparing warmtewisselaar + elektr. verbruik				6	6	6
Besparing schermstelsysteem (1 scherm) ⁴	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Totale opbrengst	5,2	7.3	12,1	10,1	14.2	19,6
Terugverdientijd	199/0= niet	120/4,3= 27,9 jaar	120/9,1= 13,2 jaar	199/5,1= 38,8 jaar	120/11,2= 10,7 jaar	120/16,6= 7,2 jaar

¹⁾ Deze kosten gelden bij grote aantallen.

²⁾ Voor deze kosten zijn de volgende aannames gemaakt: elektriciteitsprijs nu 0,10€/kWh, over 5 jaar 0,20€/kWh en over 10 jaar 0,30€/kWh

³⁾ Zie voor de berekening van deze baten Tabel 9.2

⁴⁾ Schermkosten berekening die uitgaat van een 10-jarige afschrijving

Tabel 8.2. Overzicht van de gebruikte waarden voor de hoeveelheid opgewekte elektrische energie en de waarde bepaling van de thermische energie.

Product/periode	nu	Na 5 jaar	Na 10 jaar
Opbrengst elektrische energie [kWh]	16	22	28
Gasprijs [€/m ³]	0,20	0,40	0,60
Gasprijs [€/kWh]	0,023	0,045	0,068
Waarde deel in buffer (32%) [€/kWh]	0,007	0,014	0,022
Waarde deel in aquifer (68%) [€/kWh]	0,003	0,009	0,015
Totale waarde [€/kWh]	0,01	0,023	0,037

Er zijn tevens kolommen opgenomen voor een energieneutrale (semigesloten) kasuitvoering. De elektrische energie opbrengst en de waarde van de opgevangen warmte is weergegeven in Tabel 9.2. Hierbij is uitgegaan van een gasprijs nu van 0,20 €/m³, na 5 jaar een prijs van 0,40 €/m³ en na 10 jaar een prijs van 0,60 €/m³. Verder is aangenomen dat 32% van de opgevangen warmte direct in de kas gebruikt kan worden (via een buffer). De overige warmte wordt vernietigd (bij de gewone kas) of opgeslagen in de aquifer (kas met aquifer).

Er zijn tevens drie kolommen opgenomen voor een energieneutrale (semigesloten) kasuitvoering. Voor de eerste inschatting van het economisch perspectief is een zeer eenvoudige analyse van de terugverdientijd gemaakt, zonder rekening te houden met eventuele effecten op de gewasproductie omdat die in dit stadium nog niet zijn te schatten. De eerste resultaten met NIR folie, toegepast bij roos, laten echter zien dat er in elk geval geen nadelige effecten gevonden zijn bij veranderde NIR/PAR verhouding (referentie: Stanghellini *et al.*, 2008).

De indicatieve afschrijvingsperiode is bepaald uit de opbrengst van het systeem minus de benodigde rentekosten. In deze berekening is de afschrijvingsperiode dus gelijk aan de terugverdientijd. De afschrijvingsperiodes zijn nu nog zeer hoog door de hoge kosten van enkele componenten. Als volgens verwachting een deel van deze kosten in de toekomst daalt, wordt het Elkas principe eerder aantrekkelijk. Daarvoor is het in elk geval ook noodzakelijke te komen tot een vereenvoudiging van het ontwerp om tot een voor de tuinbouw aanvaardbaar kostenniveau en afschrijvingsperiode te kunnen komen.

De gevonden resultaten en met name de toepassing van de NIR folie component bieden echter ook perspectieven voor implementatie in bestaande (semi) gesloten kassen.

9 Conclusies

- Er is aangetoond dat het ELKAS principe, gebaseerd op integreren van een kassysteem en elektriciteitsproductie technisch haalbaar is.
- Het concept is realiseerbaar met bestaande materialen en componenten en levert naar verwachting bij een instraling van 900 W/m^2 piekvermogen van ca. 21 W/m^2 elektrisch en een thermisch piekvermogen van 150 W/m^2 .
- Op jaarbasis is een opbrengst haalbaar van 16 kWh/m^2 elektrische energie en 193 MJ/m^2 (54 kWh/m^2) thermische energie. Deze vermogens zijn iets lager dan de theoretische berekeningen en deels te verklaren door het wat lage rendement van de PV cellen en de nog niet optimale focussering van de NIR straling.
- Het ELKAS principe is nog niet economisch rendabel, de belangrijkste reden is de hoge prijs van de motoren voor de besturing van de collector en de zonnecel modules. Er is naast een kostenreductie van de materialen door serieproductie nog een vereenvoudiging in het ontwerp nodig om tot een aanvaardbaar kostenniveau en afschrijvingsperiode te kunnen komen.
- Het selectief scheiden van NIR en zichtbaar licht is mogelijk met bestaande foliematerialen waarbij de 3M Ebral film de hoogste PAR transmissie heeft van 85.3% maar slechts een NIR reflectie in het gebied van 850-1200 nm (ca. 40% van het NIR). Scotchtint Window Film LE35AMARL heeft een redelijk hoge reflectiewaarde in NIR gebied (ca. 72%) maar juist een slechte transparantie in PAR gebied. Alle bestaande materialen hebben óf een lage PAR-licht doorlaten en een hoge NIR-reflectie, óf een hoge NIR-reflectie en een lage PAR doorlatendheid.
- Voor de uitontwikkeling van het Elkas concept moeten nieuwe materialen worden ontwikkeld die aan beide eisen, hoge transparantie in PAR en hoge reflectie in NIR, voldoen. Op basis van theoretische berekeningen blijkt dat de ontwikkeling van een multilayer NIR-reflecterende folie mogelijk is op basis van PC en THV waarbij de NIR reflectie kan worden verhoogd tot 70% en NIR warmtestraling wordt gereflecteerd in het gebied tot 1800nm.
- Voor de omzetting van de geconcentreerde NIR straling in elektriciteit is toepassing van silicium PV cellen het meest economisch haalbaar in vergelijking met toepassing van een thermodynamische cyclus met een ORC. Een combinatie van PV en TPV levert van de zonnecellen het beste rendement (ca. 22%) maar is gezien de hoge prijs van de TPV cellen economisch minder haalbaar.
- Voor de concentratie van de invallende straling is een cirkelvormig kasdek het meest gunstig, mede als gevolg van de eenvoudiger wijze van constructie vergeleken met een paraboolvorm van het dek.
- Het volgen van de grillige baan van het focuspunt vereist een speciale draagconstructie voor de collector, de optimale constructie daarvoor bestaat uit twee onafhankelijk van elkaar draaibare armen in combinatie met een draaibare collector.
- De mechanische uitvoering van de draagconstructie en de glasroeden levert schaduwvorming op gedeelten van de PV collector met als gevolg dat de beschaduwde PV cellen de opbrengst sterk verlagen. Aanpassing van de schakeling van de PV cellen in de strips is noodzakelijk om dit bij praktische toepassing te voorkomen.
- Voor het vervolg moet de ontwikkeling worden gericht op verbetering van de zonnecellen, de NIR folie, het eenvoudiger mechanisch ontwerp en optimale regeling en vergroting van de schaalgrootte zodat ook gewasproductie als belangrijk onderdeel van het Elkas concept kan worden onderzocht.

10 Knelpunten en aanbevelingen

Knelpunten

Tijdens de uitvoering van het project zijn bij de realisatie van de prototype kas een aantal knelpunten naar voren gekomen, vooral op het gebied van de motoren en PV-modules. De belangrijkste knelpunten zijn:

1. De gekozen lineaire motoren zijn in principe geschikt voor een proefkas maar zijn voor een commerciële praktijkkas (veel) te duur. Daarnaast zijn tijdens het project problemen ondervonden met betrekking tot de besturingssoftware van de motoren.
2. Het mechanisme om de NIR folie op te rollen (bijvoorbeeld in de koude periode) is relatief duur en werkt nog niet feilloos. De folie ligt niet overal strak tegen het glas zodat de focussering nog niet optimaal is. Dit mechanisme dient nog verbeterd te worden.
3. De Fill-Factor van de PV-module van ca. 50% is momenteel nog te laag. Deze lage waarde is ontstaan doordat een aantal cellen beschadigd worden door elementen in de kasconstructie en dan vooral de glasroeden. Hiervoor zijn verschillende oplossingen beschikbaar zoals de montage van betere (shotky) diodes, FET's met een lage weerstand en stuurlektronica of een serie-parallelschakeling van de cellen.
4. Bij de vervaardiging van de PV-modules blijkt de montage van de zware strips (noodzakelijk voor de hogere stromen van de cellen geschikt voor geconcentreerde straling) een probleem. De zware strips leiden bij solderen snel tot celbeschadigingen door thermische uitzettingsverschillen. Een oplossing hiervoor is het ontwikkelen van speciale strips die flexibiliteit combineren met voldoende doorsnede.
5. Gedurende het laminatie proces blijkt het moeilijk bij deze relatief smal PV-module de cellen strak in een rechte lijn te houden.
6. Siliciumcellen geschikt voor (NIR) geconcentreerde straling zijn nog moeilijk verkrijgbaar in grote aantallen. De meeste bedrijven produceren de cellen nog op pilotschaal en dan voor het gewone zonnenspectrum
7. De NIR Folie reflecteert teveel PAR (ca. 15%) en nog te weinig NIR (ca. 40%).

Aanbevelingen

Om de Elkas uit te ontwikkelen tot een systeem dat geschikt is voor toepassing in de markt moeten nog een aantal vervolgstappen worden gezet, zowel op technisch (economisch) als op het terrein van de optimalisatie en combinatie met gewasproductie. Samengevat zijn de belangrijkste stappen:

1. Verbeteringen van het standregelmechanisme van de PV-panelen waardoor de positieregeling uiteindelijk volautomatisch wordt.
2. Verbeteringen van het oprolmechanisme van de NIR folie zodat de folie strakker en zonder oneffenheden op- en afgerold wordt en tegen het gebogen kasdek gespannen kan worden.
3. Aanpassing en optimalisatie van de zonnecel modules om de nadelige invloed van schaduwwerking te voorkomen.
4. Systeemstudie voor de aanpassingen van de kas naar praktijkomstandigheden zoals goedkopere besturingsmotoren en optimalisatie van de regeling.
5. Verbetering van de NIR folie met betrekking tot verlaging van de PAR lichtonderschepping vergroting van het deel van het NIR spectrum dat gereflecteerd wordt.
6. Stapsgewijze implementatie van de oplossingen in de prototype kas en gedurende langere tijd doormeten van de elektrische en thermische energieopbrengst en de performance/robustheid van de technische/mechanische systeemcomponenten
7. Combinatie van het Elkas concept met gewaskundig onderzoek in de aanwezige onderzoekskas en/of een opgeschaald systeem.

11 Publicaties en promotie gedurende het project

(voor de gebruikte achtergrondliteratuur wordt verwezen naar de bijlage)

Langen Ellis, 2005

Duurzame energie vereist lef, , *Groente & Fruit* week 49, p.9

Sonneveld P.J., G.L.A.M. Swinkels, G.P.A. Bot, 2006,

De energieproducerende kas, *Glastuinbouw Techniek*, 1, dec., p6-9

Mol Clement, 2005,

Elektriciteit leverende kas is baanbrekend, *Agrarisch Dagblad*, 14 dec.

Sonneveld P.J (interview), 2005,

Energieverbruik centraal in onderzoek tuinbouw, *Agrarisch Dagblad*, woensdag 14 december

Sonneveld P.J. (interview), 2005,

Wageningen UR ontwikkelt elektriciteit leverende kas, *Agri pers*, 9 dec

Sonneveld P.J. (interview), 2005,

Elektriciteit leverende kas in ontwikkeling, *Vakblad voor de bloemisterij*, nr. 49, p.10

Sonneveld P.J. (interview), 2006,

Project Elkas, *Energie*, 26, nr.1, feb.

Sonneveld, P. J, G.L.A.M. Swinkels, F. Kempkes, J. van Campen and G.P.A. Bot, 2006,

Greenhouse

with an integrated NIR filter and a solar cooling system, *Greenhouse Cooling Conference Almeria*, Paper no. 06-99, Spain, 24 - 27 April

Sonneveld P.J. (persbericht), 2006,

Elektrakas, *Stromen*, nr. 13/14, 18 aug.

Sonneveld P.J. 2006 , (persbericht), Concentreren straling geeft hogere opbrengst, *Cobouw*, nr. 143, 1 aug.

Sonneveld, P. J. G.L.A.M. Swinkels, G.P.A. Bot and G. Flamand, 2006,

Solar Greenhouse with an integrated PV or TPV system, *21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition Dresden*, Germany, 4 – 8, Paper no. 6DV 4.10, September

Sonneveld, P. J, G.L.A.M. Swinkels, G.P.A. Bot and G. Flamand, 2006,

Conversion of NIR-radiation to electric power in a Solar Greenhouse, *7th TPV conference Madrid, Spain*, 4 – 8, Paper no. 6.5, 23-28 September

Sonneveld, P.J. (interview),

WUR onderzoekt kas die elektriciteit levert - Bouw Elkas kan van start, *Nieuwe Oogst Tuinbouw*, 3, nr.5 3 maart 2007

Sonneveld, P. J. and G.L.A.M. Swinkels, 2007,

Energy Conversion of Concentrated Near Infrared Radiation in a Solar Greenhouse, International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen ICSC-4, EL Escorial, Spain, March 12-14

Sonneveld P.J. 2007,

Demonstratie miniatuur ELKAS op de Hortifair 2007

Sonneveld P.J. (interview), 2007, Kasdek produceert elektriciteit, *Groente & Fruit*, nr. 41, 12 okt. p.9

Sonneveld, P. J, G.L.A.M. Swinkels, H.J. Holterman, B.A.J. van Tuijl, G.P.A. Bot, 2007,

Solar Energy Delivering Greenhouse with an Integrated NIR filter, *Greensys 2007*, October 4-6, Naples, Italy

Sonneveld, P. J, G.L.A.M. Swinkels, H.J. Holterman, B.A.J. van Tuijl, G.P.A. Bot, 2007,

Greenhouse with an integrated concentrating PV system, *22st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition Messe Milan*, Italy, Paper no. 5BV 3.26, September

Sonneveld, P. J, J. Campen, G.L.A.M. Swinkels, G.P.A. Bot, 2008,

Kassen met hoogwaardige energieproductie, *NVTL lezing Wageningen WICC/CD-ROM*, 19 feb.

Sonneveld, P.J. (interview), 2008

Komkomers telen én stroom opwekken, *NRC Next*, vrijdag 27 juni p. 23

- Boo, Marion, Sonneveld, P.J.(interview), 2008,
Draaiende kas maakt zelf stroom, *NRC*, donderdag 26 juni p. 11
- Eggink I., Sonneveld, P.J.(interview), 2008,
Kas Werkt op eigen energie, *Telegraaf*, zaterdag 28 juni p.TA11
- Brouwer D., Sonneveld, P.J.(interview), 2008,
ELKAS: een kas die elektriciteit produceert, *De weekkrant. De stad Wageningen*, woensdag 2 juli p.23
- Sonneveld, P.J.(interview), 2008,
Wageningen neemt elektriciteitproducerende kas in gebruik, *Agrarisch Dagblad* 1 juli p11.
- Veghter B. Sonneveld, P.J.(interview), 2008,
Elkas levert gewas én stroom, *Vakblad voor de bloemisterij*, nr. 26, 27 juni p.36-37
- Visser P. Sonneveld, P.J.(interview), 2008,
Elkas zet overtollige warmte om in elektriciteit, *Weekblad Groenen en Fruit*, 27, 4 juli 2008, p.20-21
- Kierkels T., Sonneveld, P.J.(interview), 2008,
Speciale lens zet zonnestraling om in hoogwaardige warmte, *Onder Glas*, No. 6/7, juni/juli, p. 86-87
- Sonneveld . P.J.,(interview), 2008,
Kas produceert warmte en stroom, *De Technologie krant*, Nr.14, 11/7/p3
- Sonneveld, P.J.(interview), 2008,
Elektriciteitskas, *De Ingenieur*, Nr.10/11, jaargang 120, 4 juli, p9
- Sonneveld, P.J. (interview), 2008,
Kas met zonlichtspiegel, *Technisch Weekblad*, jaargang 39, 5 juli, p5
- Sonneveld, P.J.(interview), 2008,
Minister opent nieuwe energieleverende kas, *Resource*, 37, 2e jaargang, 10 juli, p.4
- Sonneveld P.J., 2008, ELKAS,
Glastuinbouw Techniek, 4, aug. p46-47
- Sonneveld, P. J, Jagers op Akkerhuis, F., 2008,
Greenhouse produces electricity from solar radiation, *Fruit & Veg Tech* nr.8.4 , july/august, p.18-19
- Sonneveld P.J.,(interview), 2008,
Een kas die elektriciteit produceert, *Flora Holland Magazine*, 7, aug, p30 – 31
- Sonneveld, P. J, G.L.A.M. Swinkels, H.J. Holterman, B.A.J. van Tuijl, G.P.A. Bot, 2008,
PV System Integrated in a Solar Greenhouse with NIR Selective Coating, 23st European Photovoltaic Solar, Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain, Paper no. 5BV 2.53, 1-4 September
- Sonneveld, P. J, Jagers op Akkerhuis, F., 2008,
Innovative roof produces electricity, *FlowerTECH*, 11, no.6, p.18-19
- Sonneveld, P. J, Jagers op Akkerhuis, F., 2008,
De kas als energiecentrale, *De Gelderlander*, zaterdag 25 oktober