



WAGENINGENUR
For quality of life

Statusrapport Elkas en Fresnelkas

Openbare rapportage

P.J. Sonneveld, G.L.A.M. Swinkels, H.J.J. Janssen, S. Toenger, B.A.J. van Tuijl & M. Ruijs



Ministerie van Landbouw, Natuur en
Voedselkwaliteit



Productieschap **Tuinbouw**
Voor een bloeiende zaak

Rapport 300



Statusrapport Elkas en Fresnelkas

Openbare rapportage

P.J. Sonneveld, G.L.A.M. Swinkels, H.J.J. Janssen, S. Toenger, B.A.J. van Tuijl & M. Ruijs

© 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

Exemplaren van dit rapport kunnen worden gedownload vanaf de website van het Productschap Tuinbouw of bij de auteur worden besteld. Bij toezending wordt een factuur toegevoegd; de kosten (incl. verzend- en administratiekosten) bedragen € 50 per exemplaar.

Dit onderzoek is gefinancierd door:



Ministerie van Landbouw, Natuur en
Voedselkwaliteit



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	3
2 Evaluatie toegepaste methoden en materialen	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Energie omzetting Elkas en Fresnelkas	5
2.2.1 Energieomzetting	5
2.2.2 PV – cellen Elkas	6
2.2.3 PV – cellen Fresnelkas	6
2.3 Overige materialen en systemen	7
2.3.1 NIR reflecterende folie	7
2.3.2 Oprolsysteem NIR-reflecterende folie	7
2.3.3 Concentratiesystemen Elkas	7
2.3.4 Concentratiesystemen Fresnelkas	8
2.3.5 Volgsystemen	8
2.4 Conclusies methodes en materialen	9
3 Metingen en opbrengst bepaling	11
3.1 Inleiding	11
3.2 Meting dagopbrengsten Elkas	11
3.3 Meting dagopbrengsten Fresnelkas	13
3.4 Nauwkeurigheid van de jaaropbrengsten	17
3.5 Conclusies meetresultaten	18
4 Economische analyse	19
4.1 Inleiding	19
4.2 Economische evaluatie Elkas	19
4.3 Economische evaluatie Fresnelkas	23
4.4 Conclusies economische haalbaarheid	26
5 Transitiescenario naar energieneutrale kassen	27
5.1 Inleiding	27
5.2 Inpassing	27
5.3 Markintroductie model	28
5.4 Conclusies transitie scenario	30
6 Conclusies	31
7 Referenties	33

Samenvatting

In dit status rapport worden de belangrijkste materialen en omzettingmethoden, meetresultaten, aanvullende meetresultaten, economische kengetallen en een transitie scenario van de elektriciteit leverende kassen beschreven. Deze informatie is gevraagd door de opdrachtgevers: Het Ministerie van LNV en Productschap Tuinbouw en is van belang voor de verdere ontwikkeling van de Elkas en Fresnelkas.

Doel van dit rapport is om op basis van aanvullende informatie de verdere ontwikkeling en innovatie van beide kastypen zo optimaal mogelijk te laten plaatsvinden. Het principe van de Elkas is om het warmte aandeel van de zonne-energie zoveel mogelijk om te zetten in hoogwaardige elektrisch energie en warmte. Omdat de lichttoetreding hoog blijft is deze kas geschikt voor alle gewassen. De Fresnelkas is speciaal ontwikkeld voor potplanten en siergewassen. Bij deze kas kan een deel van het direct licht omgezet worden in elektrische energie. Hierdoor wordt bij deze gewassen te hoge stralingsintensiteit voorkomen.

In hoofdstuk 2 zijn de gebruikte energie omzettingmethoden en de belangrijkste materialen en methoden geëvalueerd. Bij de omzetting met PV bestaan er een groot aantal PV-materialen die mogelijk een alternatief kunnen bieden voor het in het eerste prototype gebruikte Silicium. Innovaties zijn tevens mogelijk in de optimale concentratie factor en het zonnevolgsysteem van de zonneopvangsystemen. Voor de energieconversie is in het eerste onderzoek voor Silicium PV cellen gekozen voor zowel de Fresnel als de Elkas op basis van rendement, beschikbaarheid en prijs overwegingen. Hoewel er een groot aantal verschillende PV materialen ontwikkeld zijn, zijn er slechts enkele materialen op grote schaal beschikbaar en geschikt voor geconcentreerde straling. Om deze reden blijft Silicium voorlopig het meest geschikte materiaal voor de energie omzetting van de Elkas. Op termijn kan echter CIS PV materiaal een aantrekkelijk en goedkoper alternatief worden. Hiertoe wordt in het vervolgetraject een ontwikkeling ingezet.

Voor de Fresnelkas zijn er naast het eerder toegepaste Silicium eveneens een aantal andere geschikte PV materialen geschikt. De belangrijkste alternatieve PV materialen zijn GaAs en Triple junctie cellen. Deze PV materialen vertonen hogere rendementen dan Silicium PV cellen waardoor deze materialen interessant zijn om te onderzoeken in het vervolgetraject. Tevens is in de literatuur gevonden dat de temperatuurcoëfficiënt verminderd bij hogere concentratiefactoren. Dit voordeel samen met de geringere lichtonderschepping en lagere kosten geven het belang aan de concentratiefactor van de PV systemen flink te verhogen in het vervolgproject.

Door snelle ontwikkelingen in de markt is er in de thermische omzettingmethoden een nieuw gezichtspunten ontstaan dat mogelijk nader uitgewerkt kan worden. Als mogelijk alternatief voor zowel de Elkas als de Fresnelkas is de thermische omzettingmethode onderzocht. Dit is een combinatie van een vacuümcollector met een ORC of Stirlingmotor. ORC is voor grotere systemen het meest geschikt. Ondanks dat er momenteel low cost vacuüm collectoren beschikbaar gekomen zijn van Chinese makelij is de economische haalbaarheid van deze systemen minder dan van PV technologie. Daarom wordt deze optie niet verder onderzocht in het vervolgproject.

In de eerste projecten van de Elkas en Fresnelkas was het aantal meetdagen beperkt door de slechte weersomstandigheden van de zomer van 2008. Tevens kon met de Elkas in principe alleen 's middags gemeten worden, omdat de meetmodule aan de oostkant van de ontvanger gemonteerd was. Om de opbrengst metingen gedurende de gehele dag mogelijk te maken is de positie van de meetmodule veranderd. Tevens is de NIR reflecterende folie strakker om het gebogenglas aangebracht waardoor er een beter focusering ontstaat. De meetresultaten van vier dagen zijn voor beide kassen weergegeven in hoofdstuk 3. Tevens is de nauwkeurigheid van de meetresultaten bepaald om een inschatting te kunnen maken ten aanzien van de potentie van de twee ontwerpen.

Van zowel de Elkas als de Fresnelkas is voor vier verschillende dagen het piekvermogen bepaald. Voor de Elkas is het piekvermogen 24 W/m^2 , 15% hoger dan de in het eindrapport van de 2008 voorspelde waarde van 21 W/m^2 . Dit is te verklaren door de hiervoor genoemde verbeteringen aan de kas. Door deze toename kunnen de verwachte jaaropbrengsten eveneens 15% toenemen tot 18 kWh/m^2 per jaar. De meetresultaten geven tevens mogelijkheden om de jaaropbrengsten verder te laten toenemen tot ca. 28 kWh/m^2 per jaar. Bij de Fresnelkas zijn de metingen in overeenstemming met de resultaten van 2008. De jaaropbrengstberekeringen blijven hierdoor hetzelfde als in 2008 genoemd (29 kWh/m^2). Verhoging van de opbrengst tot ca. 50 kWh/m^2 is mogelijk door laminatie van de lens op het

glas en het gebruik van AR gecoat glas. Verdere verhoging van de opbrengst tot 100 kWh/m² kan plaatsvinden door de toepassing hogere concentratie factoren en het gebruik van triple-junctie PV cellen. De standaard deviatie van de meetresultaten van de jaaropbrengst is bepaald op 11%. De grootste afwijkingen zullen echter kunnen ontstaan door de fluctuaties in het jaarlijks klimaat. Hiervan is de standaard deviatie 20%. Gebruik makend van de klimaatdata van de afgelopen 20 jaar kunnen erin de opbrengst variaties optreden tot 50%.

In hoofdstuk 4 is voor de twee systemen de terugverdientijd bepaald bij doorontwikkeling van de systemen. Daarbij is gebruik gemaakt van zoveel mogelijk actuele gegevens van toeleveranciers. Er is gerekend met de meerprijs ten opzichte van de referentietechnologie. Bij de Elkas is dit een Venlo type kas met één scherminstallatie. Bij de Fresnelkas is dit eveneens een Venlo typekas maar dan uitgevoerd met drie scherminstallatie. Dit laatste om een voldoende goede lichtregeling te verkrijgen zoals gebruikelijk bij potplanten.

De Elkas is momenteel nog niet rendabel in te zetten. De grootste invloed op de kostprijs en daaraan gekoppelde terugverdientijd zijn de PV module, het zonnevolgsysteem, het gebogen kasdek en de NIR-folie. Deze onderdelen verdienen aandacht en ontwikkeling in het vervolgproject. Ook het energieprijsscenario heeft een grote invloed op de terugverdientijd. Verhoging van de energieprijzen werkt fors door in de terugverdientijd. De primaire stappen die genomen moeten worden liggen echter op het vlak van verlaging van het kostenniveau van de installatie. Na een vereenvoudiging van de constructie, toename van de concentratiefactor en opbrengst in combinatie met hogere energieprijzen kan de terugverdientijd voor de normale uitvoering binnen afzienbare tijd ca. 9-13 jaar zijn. Onder dezelfde uitgangspunten is de terugverdientijd voor systeem met aquifer 5 tot 9 jaar.

Voor de Fresnelkas ligt het economisch perspectief dichterbij. De grootste invloed op de kostprijs en terugverdientijd zijn de kosten van de Fresnellens, laminatie, de PV module en het zonnevolgsysteem. Door deze kosten reducties en opschaling van processen kan de terugverdientijd van de 'gewone kas' (dus zonder aquifer), bij een midden of hoog scenario voor de energieprijzen in een periode van 10 jaar dalen tot ca. 5-10 jaar. De kas met aquifer is door verdere investeringskostenverlaging mogelijk eerder rendabel in te zetten, bij het hanteren van het huidige energieprijzniveau is de terugverdientijd 11 jaar, bij een hoog energieprijsscenario daalt dit tot ca.4 jaar.

In hoofdstuk 5 is het transitiescenario naar energieneutrale kassen met bijbehorende energiebesparing aangegeven. De gangbare nieuwbouw per jaar bepaald hierin de snelheid van invoering. Hiertoe zijn vier transitiepaden ontwikkeld en verschillende technieken in combinatie met de elektriciteit leverende kassen leiden tot de energieneutrale kas. Voor de Elkas en de Fresnelkas zijn de te verwachte arealen en introductiesnelheden bepaald. Mogelijke spinoffs op de weg naar marktintroductie worden benoemd. Met de gestelde aannames zijn de te verwachten arealen voor de Fresnelkas 1750 ha en voor de Elkas 3750 ha. De benodigde tijd om deze arealen te halen zijn ca. 20-25 jaar.

1 Inleiding

In dit status rapport worden de belangrijkste materialen en omzettingmethoden, meetresultaten, aanvullende meetresultaten, economische kengetallen en een transitie scenario van de elektriciteit leverende kassen beschreven. Deze informatie is gevraagd door de opdrachtgevers Het Ministerie van LNV en Productschap Tuinbouw en is van belang voor de verdere besluiten bij de doorontwikkeling van de Elkas en Fresnelkas.

Doel van dit rapport is de verdere ontwikkeling en innovatie van beide kastypen zo optimaal mogelijk te laten plaatsvinden. Het principe van de Elkas is om het warmte aandeel van de zonne-energie zoveel mogelijk om te zetten in hoogwaardige elektrisch energie en warmte. Omdat de lichttoetreding hoog blijft is deze kas geschikt voor alle gewassen. De Fresnelkas is speciaal ontwikkeld voor potplanten en siergewassen. Bij deze kas kan een deel van het direct licht omgezet worden in elektrische energie. Hierdoor worden bij de gewassen te hoge stralingsintensiteit voorkomen.

In hoofdstuk 2 worden de gebruikte energie omzettingmethoden en de belangrijkste materialen en methoden geëvalueerd. Bij de omzetting met PV bestaan er een groot aantal PV-materialen die mogelijk een alternatief kunnen bieden voor het in het eerste prototype gebruikte Silicium. Innovaties zijn tevens mogelijk in de optimale concentratie factor en het zonnevolgsysteem van de zonneopvangsystemen. In de thermische omzettingmethoden is door snelle ontwikkelingen in de markt een nieuwe gezichtspunt ontstaan dat nader uitgewerkt kan worden.

In de eerste projecten van de Elkas en Fresnelkas was het aantal meetdagen beperkt door de slechte weeromstandigheden van de zomer van 2008 en een tijdslimiet t.a.v. de projectlooptijd. Tevens kon met de Elkas in principe alleen 's middags gemeten worden, omdat de meetmodule aan de oostkant van de ontvanger gemonteerd was. Om de opbrengst metingen gedurende de gehele dag mogelijk te maken is de positie van de meetmodule veranderd. Tevens is de NIR reflecterende folie strakker om het gebogenglas aangebracht waardoor er een beter focusering ontstaat. Aan beide kassen is vier gehele dagen gemeten. De meetresultaten zijn weergegeven in hoofdstuk 3. Tevens is de nauwkeurigheid van de meetresultaten bepaald om een inschatting te kunnen maken ten aanzien van de potentie van de twee ontwerpen.

In hoofdstuk 4 is de simpele terugverdientijd van de kasontwerpen bepaald op basis van reëel gemaakte kosten. De gehanteerde kosten zijn de meerprijs ten opzichte van de referentietechnologie. Bij de Elkas is dit een Venlo type kas met één scherminstallatie. Bij de Fresnelkas is dit eveneens een Venlo typekas maar dan uitgevoerd met drie scherminstallatie. Dit laatste om een voldoende goede lichtregeling te verkrijgen zoals gebruikelijk bij potplanten. Door de uitvoering van een gevoeligheidsanalyse kunnen kritische componenten in de ontwerpen worden benoemd.

In hoofdstuk 5 is het transitie scenario naar energieneutrale kassen met bijbehorende energiebesparing aangegeven. De gangbare nieuwbouw per jaar bepaald hierin de snelheid van invoering. Hiertoe zijn vier transitiepaden ontwikkeld en verschillende technieken in combinatie met de elektriciteit leverende kassen leiden tot de energieneutrale kas. Voor de Elkas en de Fresnelkas zijn de te verwachte arealen en introductiesnelheden bepaald. Mogelijke spin-offs op de weg naar marktintroductie worden benoemd.

2 Evaluatie toegepaste methoden en materialen

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zijn in de twee ontwerpen van de elektriciteitleverende kassen, de gebruikte energie-omzettingsmethoden en de belangrijkste materialen en methoden geëvalueerd. In de thermische omzettingsmethoden zijn door snelle ontwikkelingen in de markt nieuwe gezichtpunten ontstaan die nader uitgewerkt kunnen worden. Bij de omzetting met PV bestaan er een groot aantal PV-materialen die mogelijk een alternatief kunnen bieden voor het in het prototype gebruikte Silicium. Innovaties zijn tevens mogelijk in de optimale concentratie factor en zonnevolgsysteem van de zonneopvangsystemen.

2.2 Energie omzetting Elkas en Fresnelkas

2.2.1 Energieomzetting

Voor de energieomzetting van de ELKAS zijn een aantal opties mogelijk. De opties zijn: PV cellen, thermisch methoden Stirling en Organic Rankine Cycle (ORC) en Thermo Elektrische Generators (TEG). De thermische methoden zijn gedurende het eerste project uitvoerig onderzocht en beschreven. Deze technieken waren in het eerste onderzoek afgefallen om reden van de hoge kosten van de vacuümcollector. In deze situatie is verandering gekomen waardoor de thermische systemen alsnog meegenomen worden in de evaluatie voor het vervolg onderzoek. Door snelle ontwikkelingen in de markt zijn de prijzen van vacuümcollectoren gedaald zodat dit een interessante optie zou kunnen worden voor elektriciteitsleverende kassen. De combinatie PV-cellen en TEG kan interessant zijn voor het geval dat er geen hoge temperatuur warmte noodzakelijk is. Het rendement van de Stirling motoren en de ORC zijn nagenoeg hetzelfde. Het maximale vermogen van Stirling motoren is echter beperkt tot ca. 50 KW. Bij vrij zuiger motoren zelfs minder dan 1 kW. Hierdoor is de toepassing beperkt tot kleinere of modulaire installaties. ORC installaties zijn beschikbaar voor grotere vermogens namelijk tot 1.500KW. In Tabel 2.1 is een kostenoverzicht gegeven van een thermisch omzettingssysteem met een ORC. Ondanks de flinke kosten afname van de vacuümcollector met een factor 10 door productie in China zijn de kosten nog ca. 2x zo hoog als omzetting met PV (inclusief inverter). Andere nadelen van een thermisch systeem zijn: hogere onderhoudskosten door meer bewegende delen, kans op lekkage en het systeem wordt brandgevaarlijker door de aanwezigheid van hete olie (ca. 300°C) in het systeem.

Tabel 2.1. *Kostenoverzicht van de thermische omzettingsmethoden.*

Onderdeel	Investering	Investering per m ² kas [€/m ²]
Vacuümcollector	70 €/m	14
ORC	1.200 €/kWh	36
Hoge temperatuur pomp	8.000 €/st.	0,8
Thermische olie	6 €/dm ³	1,2
Totaal		52

2.2.2 PV – cellen Elkas

De PV-cellen die voor de Elkas toegepast kunnen worden zullen een voldoende lage bandgap en een grote maximaal te absorberen golflengte moeten hebben zodat voldoende NIR straling kan worden omgezet. De cellen dienen tevens geschikt te zijn voor geconcentreerde straling (factor 10-20x AM1,5). Tevens dienen deze op grote schaal geproduceerd te kunnen worden om de prijs voldoende laag te laten worden. Een overzicht van geschikte cellen is in Tabel 2.2 weergegeven. Uit het eerste onderzoek is naar voren gekomen dat Si-cellen het hoogste omzettingsrendement vertonen en een goede economische keus zijn. Het CIS materiaal heeft vergelijkbare eigenschappen en zelfs een ca. 2x lager prijsniveau maar momenteel zijn er geen cellen beschikbaar die geschikt voor hogere concentratie factoren. Hierdoor zijn deze cellen momenteel nog minder geschikt. Door het lage prijsniveau van deze cellen is het echter interessant om deze optie verder te ontwikkelen in het vervolgonderzoek.

Tabel 2.2. Eigenschappen van PV-cellen die geschikt zijn voor de Elkas.

Materiaal	Bandgap (eV)	Maximale golflengte [nm]	Open celsp. V_{oc} (V)	Str. sterkte (Am^{-2}) vanaf 750 nm	Fill Factor FF	Vermogen (Wm^{-2})	Eff. (%)
Ge	0.67	1850	0.270	306	0.70	57.8	12.0
GaSb	0.74	1680	0.35	274	0.73	74.0	14.5
CuInSe ₂ (CIS)	1.05	1180	0.51	172	0.72	63	13.1
Si	1.11	1140	0.650	146	0.80	75.9	15.7

2.2.3 PV – cellen Fresnelkas

Voor PV-cellen voor de Fresnelkas kan de bandgap bij voorkeur hoger zijn dan bij de Elkas omdat het volledige zonnenspectrum gebruikt wordt en een hogere rendement bereikt kan worden. Een overzicht van mogelijke cellen is weergegeven in Tabel 2.3. Van de genoemde cellen zijn vooral kristallijn Silicium, GaAs en Triple junction cellen zeer geschikt omdat deze cellen beter werken met geconcentreerde straling. In het eerste prototype van de Fresnelkas is gekozen voor monokristallijn Silicium vanwege de lage concentratiefactor (55x), de goede beschikbaarheid en het prijsniveau. Voor de hoogste concentratie factoren (tot 1000x) kunnen GaAs en Triple junction cellen gebruikt worden. Door de hogere concentratiefactor weegt het prijsniveau van deze cellen minder zwaar. De GaAs cellen hebben naast het voordeel van een hoog rendement tevens een grote bandgap waardoor het materiaal een lagere temperatuurcoëfficiënt heeft. De temperatuurscoëfficiënt geeft aan hoeveel het omzettingsrendement verminderd bij een bepaalde temperatuursverhoging van de cel (5^{de} kolom van Tabel 2.3). Tevens is gevonden dat bij hogere concentratiefactoren de temperatuurcoëfficiënt afneemt waardoor de cellen beter geschikt zijn voor hoge temperatuurstoepassingen (Nishoika *et al.*, 2006). Hierdoor is de generatie van heet water tot ca. 80°C mogelijk in combinatie met een hoog elektrische omzetting rendement. Om deze redenen is in het vervolgproject de keuze van GaAs en triple junctie cellen voor de hand liggend.

Tabel 2.3. Eigenschappen van PV-cellen die geschikt zijn voor de Fresnelkas.

Materiaal	Bandgap (eV)	Open celsp. V_{oc} [V]	Maximale golflengte [nm]	Temperatuur Coeff. op rendement $\times 10^{-3}$ [1/K]	Typisch rendement bij AM 1,5 [%]
CuInSe ₂ (CIS)	1,05	0,51	1181	-3,9	13
Kristallijn Si	1,11	0,65	1117	-4,7	18
Cu(InGa)Se ₂ (CIGS)	1,20	0,71	1150	-8,0	6,4/13,8
Cu(InGa)(SeS) ₂ (CIGS)	1,50	0,76	890/1140	-4,5	9,0/13
InP	1,34	0,77	946	-3,1	15,5
GaAs	1,43	1,03	867	-2,5	25
CdTe	1,45	0,82	856	-3,5	7
CuGaSe ₂	1,60	0,85	800	-2,9	14,5
Amorf Si	1,75	0,90	709	-1,8	6
InGaP/InGaAs/ Ge triple-junction	-	2,53	1851	-2,5	29,5

2.3 Overige materialen en systemen

2.3.1 NIR reflecterende folie

Voor de Elkas wordt gebruik gemaakt van een multilaags NIR-reflecterende folie. Deze folie combineert goede reflecterende eigenschappen in het gebied van 800-1200nm (ca. 40% NIR straling) met een goede PAR transmissie van 85%. De folie is in grote hoeveelheden beschikbaar maar de prijs is nog onduidelijk. In 2010 zal de leverancier naar verwachting een nieuwe folie op de markt brengen die een groter deel van de NIR-straling reflecteert, namelijk van 800-1800nm. Het is de verwachting dat dit zal resulteren in een verbeterd klimaat in de kas gedurende 's zomerse omstandigheden en in een verhoogde thermische energieopbrengst. Alternatieven voor de NIR-reflecterende folie zijn inmiddels beschikbaar gekomen in de vorm van NIR reflecterend glas. In het vervolgproject zal onderzocht worden of gecoat glas een goed alternatief kan zijn voor de NIR-reflecterende folie.

2.3.2 Oprolsysteem NIR-reflecterende folie

Het oprolsysteem van de NIR-reflecterende folie van het eerste prototype Elkas biedt de mogelijkheid de NIR-folie te verwijderen wanneer deze niet noodzakelijk is. Hierdoor kan de NIR warmtestraling op koude dagen toegelaten worden tot de teeltruimte van de kas, waardoor energie bespaard wordt (afhankelijk van de totale NIR reflectie ca. 2-4 m³ aardgas equivalenten per jaar voor tomatenteelt, Hemming *et al.*, 2006) en blijft de lichttransmissie hoog wanneer dat nodig is (bewolkte dagen). Dit laatste argument is zwaarwegend omdat het lichtverlies van de huidige folie nog 15% bedraagt. Het huidige systeem is echter kostbaar (twee motoren met regeling noodzakelijk per kap), is gevoelig voor vervuiling en werkt nog niet feilloos. De optie van permanent aanbrengen is door bovengenoemde redenen minder gewenst en ook niet zonder kosten (laminatie kosten). Wanneer het concentratiesysteem uitgevoerd wordt als modulair reflectiesysteem (zoals beschreven in paragraaf 2.3.3 en 2.3.5 is het mogelijk de folie direct op de reflectoren te lamineren waardoor bovengenoemde nadelen opgeheven worden en de kosten laag blijven.

2.3.3 Concentratiesystemen Elkas

In Hoofdstuk 4 van het eindrapport eerste project Elkas is bepaald dat cirkelvormige constructies beter zullen voldoen dan parabolisch gevormde vormen. Tevens zijn in paragraaf 4.5 verschillende uitvoeringsvormen met elkaar vergeleken en de voor- en nadelen afgewogen m.b.t. verwachte energieopbrengst, concentratie factor, patent

situatie, regelbaarheid, aantal motoren, mogelijkheden voor luchtramen, eenvoud constructie en de kosten. Hierbij is ook gevonden dat een loshangende folie niet de gewenste vorm oplevert maar de folie onder een licht overdruk wel. Dit vraagt echter aan de uiteinden van iedere kap flinke technische inspanningen die resulteren in hoge kosten. Het gekozen cirkelvormig gebogen kasdek voldoet goed als concentrator. Het optreden van schaduwstrepen op de zonnecel modules was echter niet voorzien. In het vervolgproject zal hiervoor een oplossing ontwikkeld worden. Hierbij gaan de eerste gedachten richting een modulair reflectie systeem dat werkt als een Fresnelspiegel (gedeelde spiegels die naar één punt reflecteren).

2.3.4 Concentratiesystemen Fresnelkas

Er zijn twee verschillende Fresnellenzen beschikbaar: gewone Fresnel lenzen en lineaire Fresnel lenzen. Lineaire Fresnellenzen geven een brandlijn en vertonen een lagere concentratie factor van ca. 50-100x. Deze concentratie factor past goed bij silicium cellen die geschikt zijn voor geconcentreerde straling. In het eerste onderzoek is een knelpunt gevonden bij het toepassen van deze combinatie. Door de constructie en glasroeden ontstaan er schaduwstrepen op de zonnecel module waardoor de Fill factor en daardoor het rendement sterk afneemt. Dit is deels te vermijden door het toepassen van parallel schakeling van diodes aan de zonnecellen. Een aangepast lens design heeft echter de voorkeur omdat hiermee het probleem geheel verholpen wordt. De normale Fresnel en lineaire lenzen zijn vrij op de markt verkrijgbaar. Om reflectie verliezen te verminderen is het gunstig de lens direct op glas te lamineren en het glas te voorzien van een anti reflectie coating. Omdat bij lineaire Fresnel lenzen de koeling van de PV-module eenvoudig is, zijn de hiervoor geschikte Silicium cellen gebruikt mede door de concentratiefactor, de goede beschikbaarheid en de eenvoudige regeling is in het eerste project voor deze lens gekozen. In het vervolgproject wordt het lensdesign aangepast en de lens direct op glas gelamineerd. De gewone Fresnellenzen geven een brandpunt en vertonen een concentratiefactor van 200-2000x afhankelijk van de kwaliteit van de lens. Door deze hoge concentratiefactor is er slechts een zeer klein PV-cel oppervlak (ca. 0,1%) noodzakelijk. Hierdoor is de lichtonderschepping van de zonnecelmodule zeer gering (tot ca. 0,1%). Door het geringe PV-oppervlak en de hoge opbrengst aan elektrische energie is de prijs van het systeem geen probleem. Deze lens kan het beste toegepast worden in combinatie met triple-junction PV-cellen. Met triple junctie cellen kan een zeer hoog omzettingsrendement van ca. 30% bereikt worden waardoor de elektrische energie output zeer hoog is. De regeling en koeling zijn bij dit systeem iets ingewikkelder. Dit laatste omdat er een grotere nauwkeurigheid nodig is. In het vervolgproject zal deze optie ontwikkeld worden.

2.3.5 Volgsystemen

Bij het volgsysteem van de Fresnelkas wordt de module opgehangen aan dunne staalkabels. Met twee motoren kan de module evenwijdig en loodrecht aan de Fresnellens bewogen worden. Hierdoor is het mogelijk om met slechts twee motoren de module in de gehele kap te bewegen. Deze eenvoud resulteert in een eenvoudige low cost en betrouwbaar zonnevolgsysteem. De besturing vindt allereerst plaats door van te voren opgeslagen optimale posities als functie van de tijd te gebruiken. De fijnregeling vindt plaats door meting van het uitgangsvermogen van de module als functie van de positie. In het vervolgproject zal de fijnregeling verder worden ontwikkeld en getest worden onder verschillende weersomstandigheden.

Het volgsysteem bij het huidige prototype van de Elkas bestaat per vakmaat van 4,8x5m uit twee beweegbare armen en twee lineaire actuators. Per kap van 100 m lengte resulteert dit in 42 motoren en 42 beweegbare armen. Verder zijn er nog twee motoren nodig voor het aanbrengen van de NIR-reflecterende folie. Hierdoor zijn de kosten van het zonnevolgsysteem aanzienlijk. Tevens is het systeem in deze staat storingsgevoelig. Een belangrijke doelstelling in het vervolgproject is de complexiteit en kosten van het zonnevolgsysteem van de Elkas flink omlaag te brengen. Het plan hiertoe is de NIR-reflecterende spiegel te fragmenteren tot losse modulaire delen waardoor het geheel als lamellen samen werken. De opzet is te vergelijken met een Fresnelspiegel systeem. Deze NIR – reflecterende spiegels reflecteren de NIR straling naar de noordkap waarin de zonnecel modules gemonteerd zijn. Door deze werkwijze komen al de 42 besturingsarmen met 42 motoren te vervallen en kunnen twee centrale

motoren de gehele kap bedienen. Tevens vervalt hierdoor de noodzaak voor gebogen glas. Door deze innovatie stap zullen de kosten voor het Elkas principe naar verwachting flink kunnen dalen.

2.4 Conclusies methodes en materialen

Bij de voorbereiding en realisatie van beide elektriciteit leverende kassen zijn een groot aantal bedrijven betrokken geweest. Naast de kasbouw bedrijven Bosman BV kassenbouw voor de Elkas en Technokas voor de Fresnelkas is er samenwerking geweest met: Bode Project- en Ingenieursbureau B.V, IMEC in Leuven, ECN in Petten. De twee laatst genoemde instituten zijn betrokken geweest bij de keuze van PV-systemen. De laminatie voor het samenstellen van de PV-cellen tot modules is uitgevoerd door Soltec in Tienen (B). De firma Dekker heeft de scherminstallatie voor de Elkas ontwikkeld en gerealiseerd. Andere bedrijven zijn actief geweest voor de toelevering van Fresnel lenzen, de multilaags NIR-reflecterende folie van 3M, het warmte opslagsysteem en installatie. Om reden van vertrouwelijkheid en geheimhouding kunnen echter niet al deze bedrijven bekend gemaakt worden. Met de verdere ontwikkeling van beide kassen zal in het vervolgproject tevens de samenwerking met productie bedrijven geïntensiveerd worden.

Voor de energieconversie is in het eerste onderzoek voor Silicium PV-cellen gekozen voor zowel de Fresnel als de Elkas op basis van rendement en prijsoverwegingen. Hoewel er een groot aantal verschillende PV-materialen ontwikkeld zijn, zijn er slechts enkele materialen op grote schaal beschikbaar en geschikt voor geconcentreerde straling. Om deze reden blijft Silicium voorlopig het meest geschikte materiaal voor de energie omzetting van de Elkas. Op termijn kan echter CIS PV-materiaal een aantrekkelijk en goedkoper alternatief worden. Hiertoe wordt in het vervolgtraject een ontwikkeling ingezet. Voor de Fresnelkas zijn er naast het eerder toegepaste Silicium eveneens een aantal andere PV-materialen geschikt. De alternatieve PV-materialen zijn GaAs en Triple junctie cellen. Deze PV-materialen vertonen hogere rendementen en lagere temperatuurcoëfficiënten dan Silicium PV-cellen waardoor deze materialen interessant zijn om te onderzoeken in het vervolgtraject. Tevens is in de literatuur gevonden dat de temperatuurcoëfficiënt verminderd bij hogere concentratiefactoren. Dit voordeel samen met de geringere lichtonderschepping en lagere kosten geven het belang aan de concentratiefactor van de PV-systemen flink te verhogen in het vervolgproject.

Als mogelijk alternatief voor zowel de Elkas als de Fresnelkas is de thermische omzettingmethode onderzocht. Dit is een combinatie van een vacuümcollector met een ORC of Stirlingmotor. ORC is voor grotere systemen het meest geschikt. Ondanks dat er momenteel low cost vacuüm collectoren beschikbaar gekomen zijn van Chinese makelij blijven de kosten voor de thermische omzetting 2x zo hoog als voor de PV-technologie, de economische haalbaarheid van deze systemen is dus aanzienlijk minder dan van PV-technologie. Daarom wordt deze optie niet verder onderzocht in het vervolgproject.

3 Metingen en opbrengst bepaling

3.1 Inleiding

In de eerste projecten van de Elkas en Fresnelkas was het aantal meetdagen beperkt door de slechte weeromstandigheden van de zomer van 2008 en een tijdlimiet ten aanzien van de projectlooptijd. Tevens kon met de Elkas in principe alleen 's middags gemeten worden, omdat de meetmodule aan de oostkant van de ontvanger gemonteerd was. Ten opzicht van de metingen van 2008 in het eerste rapport zijn enkele verbeteringen aan de kas aangebracht:

1. Om de opbrengst metingen gedurende de gehele dag mogelijk te maken is de meetmodule nu in het midden van de ontvanger (aan de middelste arm) gemonteerd zoals weergegeven in Figuur 3.1.
2. De folie is strakker om het gebogen glas aangebracht waardoor er een betere focussering ontstaat.

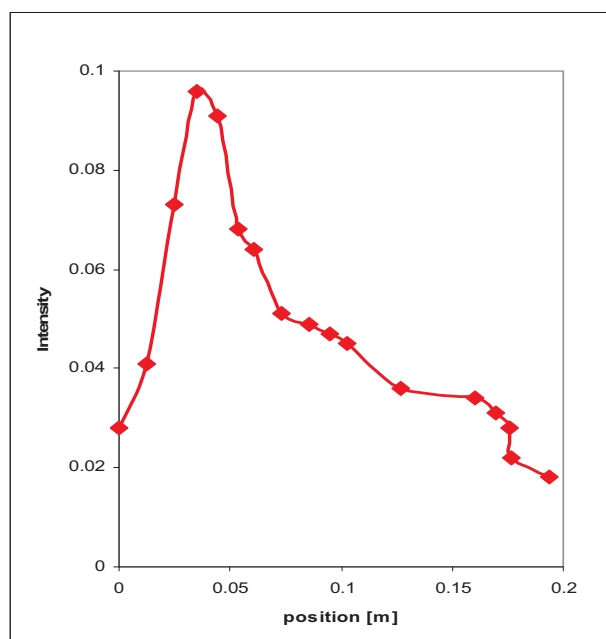
De metingen aan de Fresnelkas kunnen wel met het automatisch zonnevolg systeem uitgevoerd worden omdat hier de posities van de PV-module nauwkeurig bekend zijn. Hierdoor is het aantal metingen per dag groter dan bij de Elkas. In het vervolgproject zal de fijnregeling van het zonnevolgsysteem verder ontwikkeld worden voor de verschillende weersomstandigheden.



Figuur 3.1. A. Meetmodule gemonteerd aan de middelste arm. B. Detail van de meetmodule met twee Silicium PV-cellen.

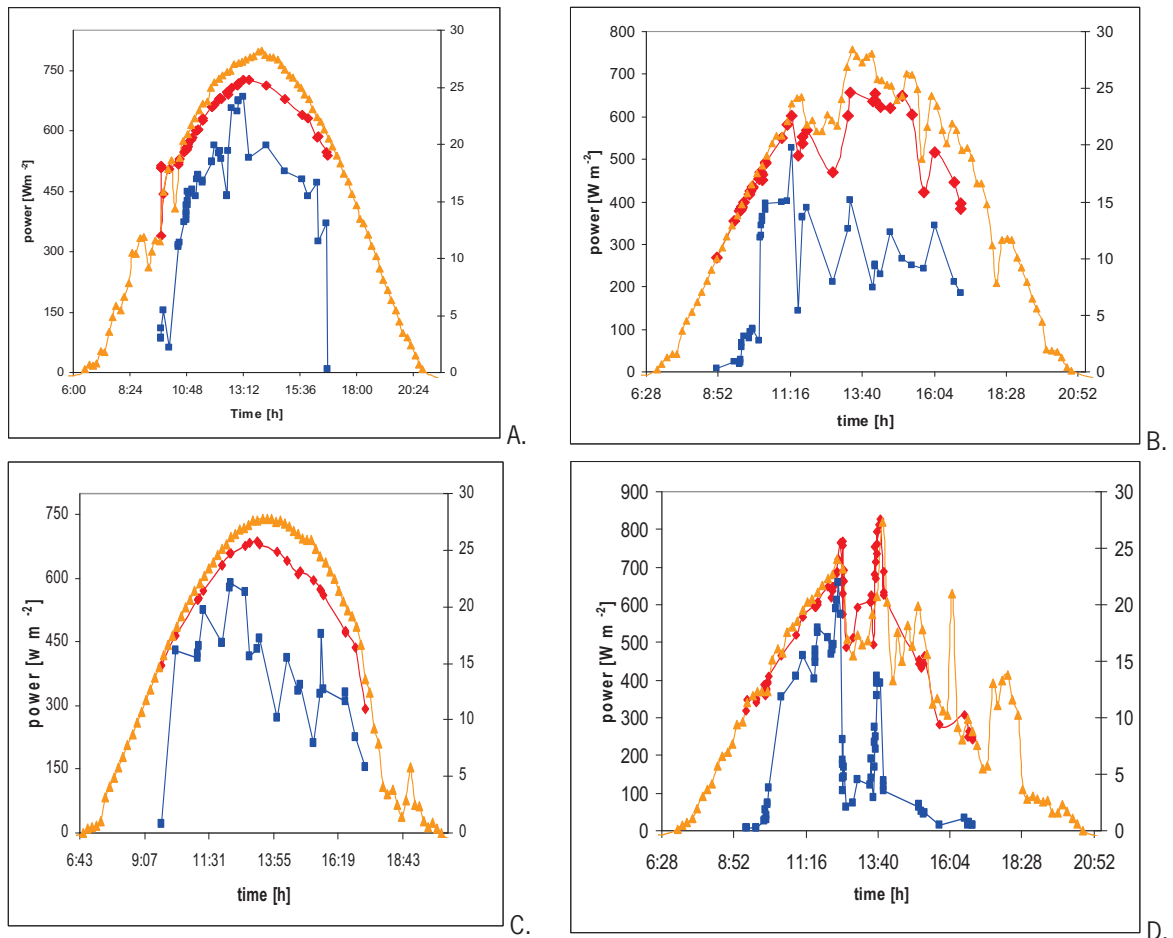
3.2 Meting dagopbrengsten Elkas

Op 19 augustus 2009 is de intensiteit verdeling van het brandpunt gemeten om 15.50h door de module te voorzien van een diafragma met een spleetbreedte van 3 mm. Daarna is de module door het brandpunt bewogen, waarbij de stroom en de positie gemeten is. Het resultaat is weergegeven in Figuur 3.2. Uit dit figuur blijkt dat de intensiteit verdeling van het brandpunt asymmetrisch is waaruit blijkt dat de focussering niet optimaal is.



Figuur 3.2. Intensiteitsverdeling d.d. 19 augustus 2009 15:50 in het brandpunt gemeten met de meetmodule is een diafragma van 3 mm breed.

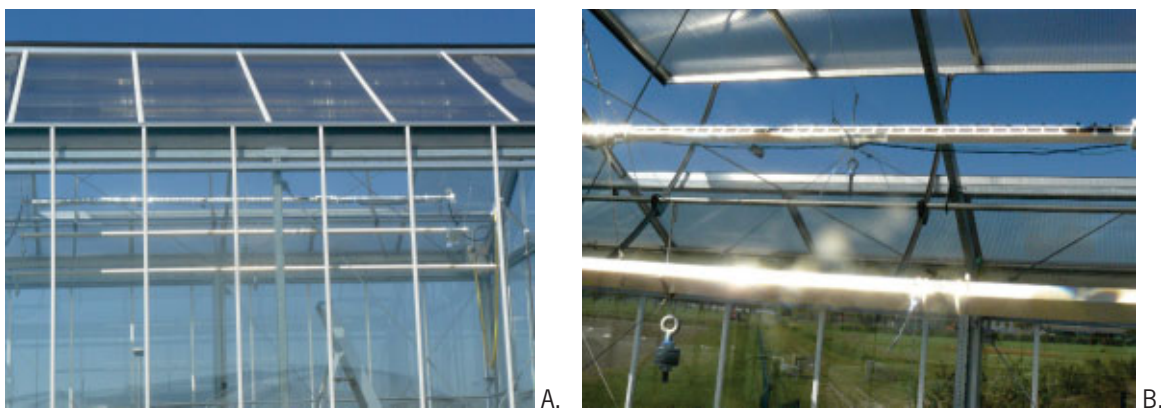
In Figuur 3.3 zijn de meetresultaten voor vier dagen weergegeven namelijk op 6 aug. 2009, 19 aug. 2009, 24 augustus 2009 en 26 augustus 2009. In de vier grafieken van Figuur 3.3 is het opgewekte vermogen en de opvallende straling (buiten) weergegeven. De opvallende straling is gemeten met een solarimeter op het dak van de Elkas. Bij de bepaling van het uitgangsvermogen P_{nom} is een Fill Factor (FF) van de zonnecel module aangenomen van 70%, zoals eerder vastgesteld. Het vermogen is bepaald met $P_{nom} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF$. Hierbij is V_{oc} de open cel spanning van de module en I_{sc} de kortsluitstroom. Het uitgangsvermogen is gedeeld door de kapbreedte en de breedte van de module waardoor het vermogen per m^2 kasoppervlak ontstaat. Het uitgangsvermogen is 's morgens ca. 17% hoger dan 's middags omdat 's middags de constructiedelen van het zonnevolgsysteem schaduw geven op het glas gedeelte dat straling naar de module gereflecteerd. Op alle dagen was er enige sluibewolking waardoor de zonneinstraling beperkt was tot ca. $750W/m^2$. Op 19 en 24 augustus was er enige bewolking waardoor extra fluctuaties in het uitgangsvermogen zijn ontstaan. Er ontstaan ook fluctuaties in het uitgangsvermogen omdat het zonnevolgsysteem nog niet optimaal functioneert. Het hoogste vermogen van $24 W/m^2$ is op 6 augustus 2009 gemeten bij een instraling van $730W/m^2$. Ook op 24 augustus en 26 augustus zijn vergelijkbare piekvermogens gemeten. Op 26 augustus (niet in de grafieken van Figuur 3.3) is zelfs een vermogen van $30W/m^2$ gemeten door gehele kas in een optimale positie te roteren. Het vermogen van $24W/m^2$ is 15% hoger dan de in eindrapport van de 2008 voorspelde waarde van $21 W/m^2$. Hierdoor kunnen de verwachte jaaropbrengsten uit het typisch Nederlands SEL-jaar eveneens 15% toenemen naar $18 kWh/m^2$ per jaar. De jaaropbrengsten zijn bepaald door voor ieder uur in het SEL-jaar de bewolgingsgraad te bepalen. De invloed van bewolking is hierbij gewogen volgens grafiek van Figuur 8.6B uit het eindrapport van het eerste Elkas rapport. De jaaropbrengst is vervolgens bepaald uit de sommatie van de hoeveelheid directe straling voor elk uur. De gemeten niet ideale focussing in Figuur 3.2 en het maximum vermogen van $30W/m^2$ geven aan dat er mogelijkheden zijn de jaaropbrengsten verder te laten toenemen.



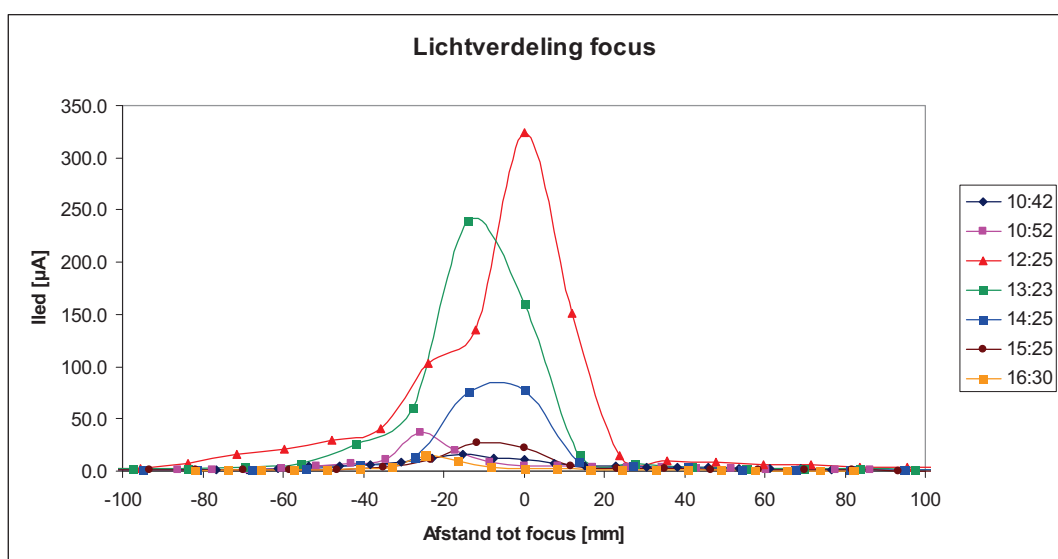
Figuur 3.3. Het opgewekt elektrisch (P_{nom} — blue squares — schaal rechts) en instraling ter plaatse (P_{rad} — red diamonds — schaal links) en Haarweg (P_{rad} — orange triangles — schaal links) als functie van de tijd op: A. 6 augustus 2009; B. 19 augustus 2009; C. 24 augustus 2009 en 26 augustus 2009.

3.3 Meting dagopbrengsten Fresnelkas

Bij de Fresnelkas is de intensiteit verdeling van het brandpunt eveneens op 19 augustus gemeten met een AlInGaP LED type HLMP-ED25-TW000 geschakeld als fotodiode. Hiertoe is de diode door het brandpunt bewogen, waarbij de stroom en de positie gemeten is. De intensiteitsverdeling van het brandpunt is op verschillende tijden gemeten en het resultaat is weergegeven in Figuur 3.5. Uit dit figuur blijkt een flinke toename van de intensiteit in de tijd. Verder blijkt de intensiteit verdeling van het brandpunt afhankelijk van de tijd soms asymmetrisch is en dat de spotgrootte groter is dan de breedte van de PV-module (20mm).

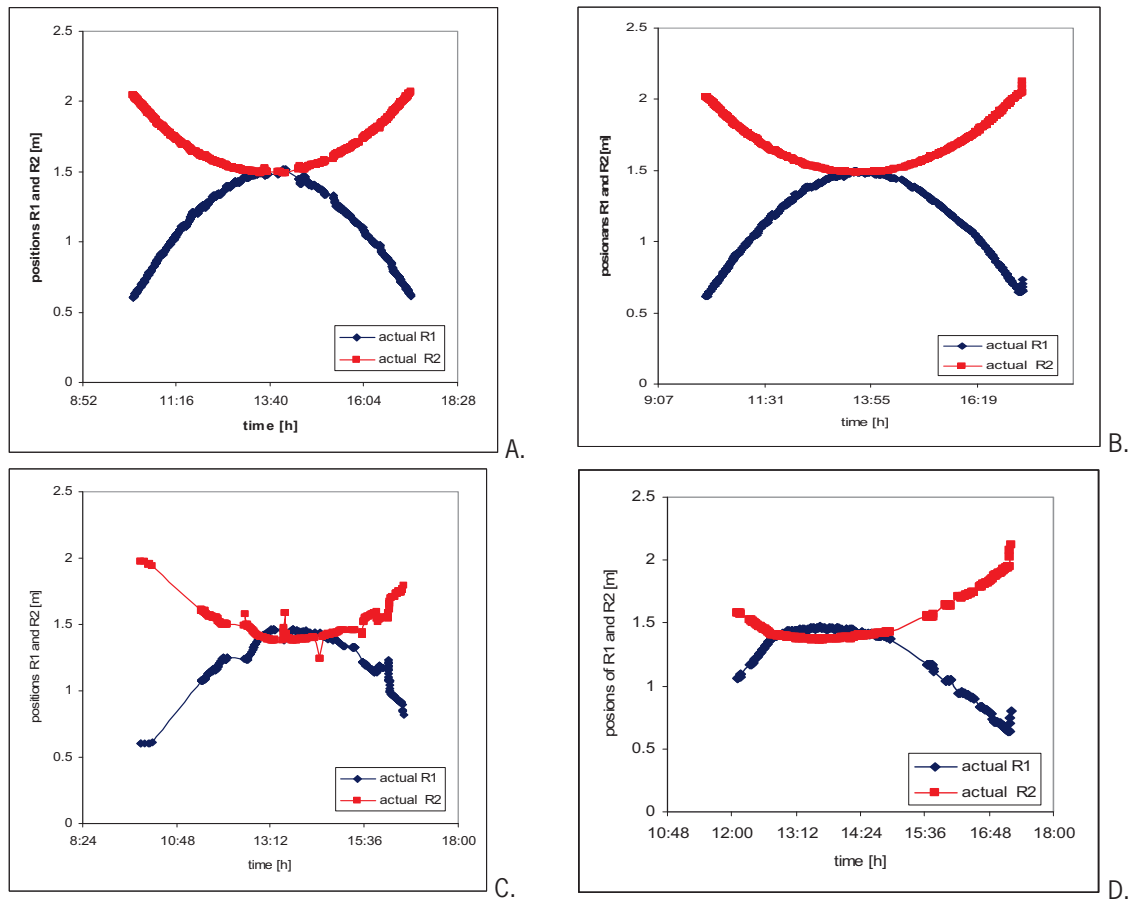


Figuur 3.4. A. PV-modules in het brandpunt van de Fresnellenzen. B. Detail van de modules in het brandpunt.



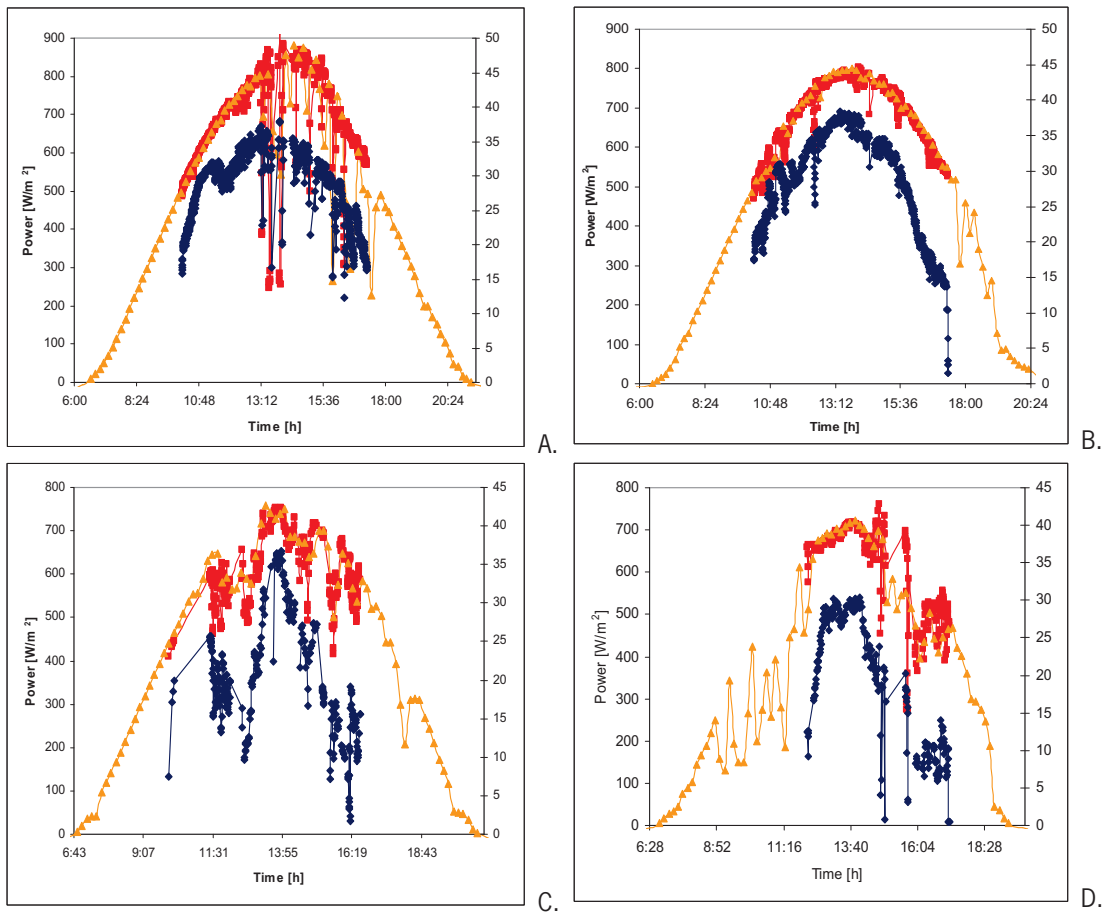
Figuur 3.5. Intensiteitsverdeling in het brandpunt gemeten met een LED op verschillende tijden.

De metingen aan de Fresnelkas hebben op vier dagen plaatsgevonden namelijk: 4 augustus 2009, 5 augustus 2009, 19 augustus 2009 en 20 augustus 2009. De rode lijn (R1) geeft de positie van de module loodrecht op de Fresnellens en de blauwe lijn (R2) de positie van de module parallel aan de Fresnellens. Uit deze figuren blijkt dat de module 's morgens vroeg en 's middags laat in dezelfde positie staan namelijk dicht bij de Fresnellens in de meest zuidelijke richting. De meting op 4 en 5 augustus hebben automatisch plaats gevonden. D.w.z. de besturingssoftware houdt de module in het brandpunt door de monitoring van het uitgangsvermogen.



Figuur 3.6. Beide motorposities van de positieregeling waarbij de module in het brandpunt gehouden wordt voor vier verschillende dagen: A. 4 augustus 2009; B. 5 augustus 2009; C. 19 augustus 2009 en 20 augustus 2009. R1 is de positie van motor die de verticale beweging stuurt en R2 is de positie van de motor die de horizontale beweging stuurt.

In Figuur 3.7 zijn de meetresultaten voor vier dagen weergegeven namelijk op 4 aug. 2009, 5 aug. 2009, 19 augustus 2009 en 20 augustus 2009. In de vier grafieken van Figuur 5.6 is het opgewekte vermogen en de opvallende straling (buiten) weergegeven. De koelwatertemperatuur was ca. 30°C. Hierbij is de opvallende straling is gemeten met een solarimeter op het dak van de Fresnelkas. Bij de bepaling van het uitgangsvermogen P_{nom} is een Fill Factor (FF) van de zonnecel module aangenomen van 70%. Het vermogen is bepaald met $P_{nom} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF$. Hierbij is V_{oc} de open cel spanning van de module en I_{sc} de kortsluitstroom. Het uitgangsvermogen is gedeeld door de hoogte van de Fresnellens en de breedte van de module waardoor het vermogen per m² lensoppervlak ontstaat.



Figuur 3.7. Het opgewekt elektrisch vermogen (P_{nom} — blauw — schaal rechts) en instraling ter plaatse (P_{rad} — rood — schaal links) en Haarweg (P_{rad} — oranje — schaal links) als functie van de tijd op: A. 4 augustus 2009; B. 5 augustus 2009; C. 19 augustus 2009 en 20 augustus 2009.

Door het heldere weer van 4 en 5 augustus was het mogelijk de zonnecel module met de software automatisch in het brandpunt te houden. Op dagen met bewolking 19 en 20 augustus werkt het zonnevolgssysteem nog niet optimaal. Op 4 en 5 augustus is het maximale vermogen bepaald op 37 W/m^2 bij een invallende straling van resp. 840 W/m^2 en 800 W/m^2 . Omdat de weeromstandigheden door sluibewolking in 2009 niet geheel vergelijkbaar waren is dit vermogen vergelijkbaar met het gemeten maximale vermogen van 40 W/m^2 in 2008. De jaaropbrengsten zijn bepaald door voor ieder uur in het SEL-jaar de bewolgingsgraad te bepalen. Met de hieruit bepaalde hoeveelheid directe straling is voor elk uur de opbrengst bepaald en over een jaar gesommeerd. Verdere toename van het vermogen en jaar opbrengsten is mogelijk door laminatie van de Fresnellens op het glas en gebruik te maken van AR gecoat glas.

Tabel 3.1. *Lichttransmissies piekvermogen en geschatte jaaropbrengst op basis van lichttransmissie en hoeveelheid directe straling.*

Type afdekking	Transmissie kas Loodrecht (%)	Piekvermogen [W/m ²]	Jaaropbrengst Elektrisch [kWh/m ²]	
			Si-PV-cel	Trij-cel
Enkele PMMA Fresnellens	74	70	53	106
PMMA Fresnellens als kanaalplaat	64	61	45	90
PMMA Fresnellens tussen dubbelglas	42	40	30	61
PMMA Fresnellens gelamineerd tussen AR gecoat dubbelglas	72	68	51	102

In Tabel 3.1 is een overzicht gegeven van de piekvermogens en mogelijke jaaropbrengsten bij de verschillende typen afdekkingen. Hierbij heeft de optie 'PMMA Fresnellens gelamineerd tussen AR gecoat dubbelglas' de voorkeur omdat de lens dan beschermd is tegen vocht en stof en toch een goede opbrengst mogelijk is van 51 kWh/m² voor silicium cellen en 102 kWh/m² voor triple-junctie cellen. In het vervolgproject zal de laatst genoemde optie in Tabel 3.1, dus laminatie van de Fresnellens op AR gecoatglas, geïmplementeerd worden in de kas.

3.4 Nauwkeurigheid van de jaaropbrengsten

Voor de bepaling van de meetnauwkeurigheden zijn eerst de meetnauwkeurigheden van alle meetinstrumenten en de jaaropbrengst berekening bepaald. Het resultaat is in Tabel 3.2 weergegeven.

Tabel 3.2. *Meetnauwkeurigheid van de verschillende meetinstrumenten inclusief afwijkingen van het data-acquisitie systeem.*

Meting variabele		Standaard Deviatie
Solarimeter	Pstr [W]	0,04
Spanning	Voc [V]	0,02
Stroom	Isc [A]	0,02
Jaaropbrengst berekening	Wb [kWh]	0,10

De grootste afwijkingen kunnen ontstaan bij de jaaropbrengst berekening boven de Pstr waarden van het SEL-jaar een curve gefit is die de waarden voor heldere dagen aangeeft. De waarden hiervan beperkt de nauwkeurigheid van de berekening. De totale standaard deviatie van de bepaling van de jaaropbrengst is dan:

$$SD(W) = \sqrt{\left[\left(\frac{\Delta P_{str}}{P_{str}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_{oc}}{V_{oc}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_{sc}}{I_{sc}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta W_b}{W_b}\right)^2\right]}$$

Dit geeft voor de standaard deviatie voor de jaaropbrengst: 11%. De grootste variaties in de jaaropbrengsten zullen echter ontstaan door jaarlijkse variaties in het klimaat. De jaarlijkse variatie in de lichtsom zullen een op een resulteren in variaties in de opbrengst. Voor directe straling in De Bilt is de standaard deviatie over de laatste

20 jaar 1989-2009 19%. In deze periode zijn fluctuaties van 50% voorgekomen. Daarom zal het niet mogelijk zijn exacte waarden voor jaaropbrengsten te geven maar de gemiddelde waarden zijn wel bekend.

3.5 Conclusies meetresultaten

Van zowel de Elkas als de Fresnelkas is voor vier verschillende dagen piekvermogens bepaald. Voor de Elkas was het bepaalde piekvermogen 24 W/m^2 . Dit is 15% hoger dan de in het eindrapport van de 2008 voorspelde waarde van 21 W/m^2 . Dit is te verklaren door de verbeterde positie van de module en omdat de NIR folie strakker om het gebogen glas was aangebracht. Door deze toename kunnen de verwachte jaaropbrengsten eveneens 15% toenemen tot 18 kWh/m^2 per jaar. De meetresultaten geven tevens mogelijkheden om de jaaropbrengsten verder te laten toenemen tot ca. 28 kWh/m^2 per jaar. Bij de Fresnelkas zijn de metingen in overeenstemming met de resultaten van 2008. De jaaropbrengstberekeningen blijven hierdoor hetzelfde als in 2008 genoemd (29 kWh/m^2). Verhoging van de opbrengst tot ca. 50 kWh/m^2 is mogelijk door laminatie van de lens op het glas en het gebruik van AR gecoat glas. Verdere verhoging van de opbrengst tot 100 kWh/m^2 kan plaatsvinden door verhoging van de concentratiefactor en de toepassing van triple-junctie PV-cellen. De standaard deviatie van de meetresultaten van de jaaropbrengst is bepaald op 11%. De grootste afwijkingen zullen echter kunnen ontstaan door de fluctuaties in het jaarlijks klimaat. Hiervan is de standaard deviatie 20%.

4 Economische analyse

4.1 Inleiding

In de rapportage van de eerste projecten Elkas en Fresnelkas was de terugverdientijd bepaald door de totale extra investering te delen door de afschrijving. Hoewel dit logisch lijkt, is dit niet gebruikelijk. In onderstaande paragrafen is dit omgezet in de meer gangbare methode door de (meer) investering te delen door het jaarsaldo van meeropbrengsten en meerkosten (de meerkosten te delen door de totale financiële besparing per jaar) wat resulteert in de simpele terugverdientijd (in jaren). Verder zijn de kosten zoveel mogelijk bepaald op basis van opgaven van toeleveranciers. De kosten zijn alleen de meerprijs ten opzichte van de referentietechnologie. Bij de Elkas is dit een Venlo type kas met één scherminstallatie. Bij de Fresnelkas is dit eveneens een Venlo typekas maar dan uitgevoerd met drie scherminstallaties. Dit laatste om een voldoende goede lichtregeling te verkrijgen zoals gebruikelijk bij potplanten. Momenteel zijn er meer prijzen van leveranciers bekend geworden zodat deze nauwkeuriger geschat kunnen worden voor de toekomstige scenario's. Tevens worden de uitgangspunten van de berekeningen duidelijk omschreven en zijn zoveel mogelijk gebaseerd op werkelijke kosten.

Tabel 4.1. Overzicht van de waarde van elektrische energie en de waarde bepaling van de thermische energie.

Product/periode	kWh-prijs	Nu	Na 5 jaar	Na 10 jaar
Opbrengst elektrische energie	€/kWh	0,10	0,15	0,20
Gasprijs	€/m ³	0,20	0,30	0,40
Gasprijs	€/kWh	0,023	0,034	0,045
Waarde deel in buffer (50%)	€/kWh	0,012	0,017	0,023
Waarde deel in aquifer (50%)	€/kWh	0,003	0,008	0,009
Totale waarde	€/kWh	0,015	0,025	0,031

De waarde van energie is voor het aangenomen scenario weergegeven in Tabel 4.1. Hierbij is een mindere sterke stijging aangenomen dan in het eindrapporten van de eerste projecten. Dit is meer in overeenstemming met de huidige verwachtingen. Verder is aangenomen dat ca. 50% 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).

4.2 Economische evaluatie Elkas

Voor de eerste inschatting van het economisch perspectief is in Tabel 4.2 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 in te schatten. De inmiddels bekende 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 in de Nederlandse situatie (Kemkers *et al.*, 2008 & 2009). Er is daarom voor één situatie een opmerking gemaakt over de terugverdientijd bij een iets hogere gewasopbrengst. De elektrische energie opbrengst en de waarde van de opgevangen warmte is weergegeven in Tabel 4.2. De eerste drie kolommen zijn de kosten en de te verwachten opbrengsten aangegeven voor nu, over 5 jaar en over 10 jaar. Hierbij zijn de energieprijzen volgens Tabel 4.1 gebruikt. In de vierde kolom '10 jaar' is de huidige energieprijs gebruikt, waardoor de gevoeligheid voor energieprijzen duidelijk wordt. Er zijn tevens vier kolommen opgenomen voor een energieneutrale (semigesloten) kasuitvoering van het Elkas principe. Hierbij wordt de warmte van de PV-module gebruikt voor opslag in een aquifer. Dit kan gerealiseerd worden met een verbeterde NIR-reflecterende folie. Hierdoor is in principe de warmtewisselaar in

de kas niet meer noodzakelijk. Verder is aangenomen dat de geogoste warmte een voldoende hoog temperatuurniveau heeft, zodanig dat deze gebruikt kan worden in een etmaalbuffer. Hierdoor ontstaan flinke besparingen op hoogwaardige energie omdat de warmtepomp dan minder gebruikt hoeft te worden. 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 het zonnevolgsysteem en de zonnecel (PV) modules. Omdat naar verwachting binnen een bepaalde periode diverse kosten verder omlaag kunnen, bv voor het zonnevolgsysteem en de zonnecelmodules, is naast de huidige kosteninschatting een verwacht prijsscenario (voor componenten) over 5-10 jaar ingevoerd, het energieprijsscenario is zoals weergegeven in Tabel 4.1. De getallen zijn bepaald per m² grondoppervlak van de kas.

Tabel 4.2. Economische verkenning ELKAS.

Onderdeel	Investering							
	Gewone kas				Kas met aquifer			
	Nu [€/m ²]	5 jaar [€/m ²]	10 jaar [€/m ²]	10 jaar [€/m ²]	Nu [€/m ²]	5 jaar [€/m ²]	10 jaar [€/m ²]	10 jaar [€/m ²]
Totale extra investering								
Gebogen/asymmetrisch kasdek	30	20	10	10	30	20	10	10
NIR-folie	20	10	10	10	20	10	10	10
Folie oprolsysteem	24	10	8	8	24	10	8	8
PV-cellen (C=30x; 50x; 100x) ¹	50	30	7	7	50	30	7	7
Invertors (500 €/KW)	15	15	12	12	15	15	12	12
Laminatiemodule ²	20	10	10	10	20	10	10	10
Zonvolgsysteem ²	45	20	15	15	45	20	15	15
Warmtewisselaar ²	5	5	5	5	5	5	5	5
Installatie ²	10	10	10	10	10	10	10	10
Totale investering	219	130	87	87	219	130	87	87
Afschrijving+rente [€ per m ²]								
Rente (gem. over afschrijvingsperiode 5%)	5,5	3,3	2,2	2,2	5,5	3,3	2,2	2,2
Afschrijving (7%)	14,8	9,1	7,1	7,1	14,8	9,1	7,1	7,1
Onderhoud (1% van investeringsbedrag)	2,2	1,3	1,0	1,0	2,2	1,3	1,0	1,0
Totale jaarkosten	22,5	13,7	11,2	11,2	22,5	13,7	11,2	11,2
Baten € per m ²								
Elektrische Energie (16 kWh, 22 kWh, 28 kWh) ^{2,3}	1,8	3,3	5,6	2,8	1,8	3,3	5,6	2,8
Thermische energie (100 kWh, 150 kWh) ³	1,2	2,6	3,4	3,4	1,5	3,8	4,6	4,6
Besparing warmtewisselaar + elektr. verbruik					6	6	6	6
Besparing schermstelsel (1 scherm) ⁴	1,3	1,5	1,5	1,5	1,3	1,5	1,5	1,5
Totale opbrengst	4,3	7,4	10,5	7,7	10,6	14,6	17,7	14,9
Saldo van totale opbrengst en totale kosten, excl. afschrijving en berekende rente	2.1	6.1	9.5	6.7	8,4	13.3	16.7	13,9
Terugverdientijd (investering/saldo opbrengsten minus kosten, excl. afschrijving)	94,8	21,3	9,0⁵⁾	12,7 j	25,4	9,5	5,2⁵⁾	6,2 j

¹ Deze kosten zijn voor nu en over 5 jaar gebaseerd op Silicium cellen die geschikt zijn voor geconcentreerde straling, in de tijd kan de concentratiefactor toenemen van: 30x naar 50x en 100x, de prijzen gelden bij grote aantallen. De kosten voor deze cellen zijn de afgelopen periode flink gedaald. De kosten over 10 jaar zijn gebaseerd op CIS cellen die geschikt gemaakt zijn voor geconcentreerde straling.

² Voor deze kosten zijn de volgende aannames gemaakt: elektriciteitsprijs nu 0,10 €/kWh, over 5 jaar 0,15 €/kWh en over 10 jaar 0,20 €/kWh en 0,10 €/kWh.

³ Zie voor de berekening van deze baten Tabel 4.2.

⁴ Schermkostenberekening die uitgaat van een 10-jarige afschrijving.

⁵ Als er naast genoemde energetische opbrengst sprake zou zijn van 1 euro/m² extra gewas opbrengst, dalen de hier genoemde terugverdientijden naar 8.3 en 4.9 jaar

Gevoeligheidsanalyse van de prijsontwikkelingen Elkas

Gebogen/asymmetrisch kasdek De prijs van 30 €/m² voor nu is voor een gebogen glas kasdek (Bosman BV). In de toekomst is naar verwachting geen gebogen kasdek meer noodzakelijk zodat de prijs kan dalen tot 10 €/m² over 10 jaar.

NIR-folie De prijs van deze folie (3M) zal door opschaling van de productie dalen tot ca. 20 €/m². Dit is echter nog niet bevestigd door de leverancier. Daarna zal de prijs door autonome ontwikkeling verder kunnen dalen.

Folie oprolsysteem In dit systeem is nog een belangrijke vereenvoudiging mogelijk waardoor de prijs naar verwachting in de toekomst daalt naar ca. 8 €/m²

PV-cellen De prijs van de cellen is ca. 1500 €/m² (prijs gegevens buitenlandse leverancier). Met een concentratie factor van 30x is de prijs per kasoppervlak 50 €/m². Wanneer de concentratiefactor over 5 jaar is toegenomen tot 50 x wordt de prijs per kasoppervlak 30 €/m². Verder daling is mogelijk met CIS cellen en een concentratiefactor van 100x. Dan wordt de prijs per kasoppervlak 7 €/m². Door het kleine oppervlak van de PV-cellen is de lichtonderschepping gering. Bij een concentratiefactor van 30x ca. 3%), bij 50 x 2% en bij 100x 1%.

Invertors De prijs hiervan is tamelijk stabiel op ca. 500 €/kW (prijs gegevens ECN). Door opschaling kan de prijs dalen tot 400 €/kW.

Laminatie module Laminatie is een standaard techniek en zal niet veel in prijs dalen.

Zonnevolgsysteem In het zonnevolgsysteem zijn nog flinke vereenvoudigen mogelijk en daarmee kostprijs reducties (prijs gebaseerd op onderdelen en montage tijd). Daarom is het de verwachting dat de prijs afneemt tot ca. 20 €/m².

Warmtewisselaar Door integratie met het laminatie proces is deze prijs redelijk laag en constant.

Installatie De installatiekosten op grote schaal zijn momenteel een schatting.

Tabel 4.2a. Gevoeligheid terugverdientijd bij verschillende energieprijsscenario's en investeringsniveaus.

Investeringsniveau	Energieprijs: gasprijs (voor overige uitgangspunten zie Tabel 4.1)					
	Gewone kas			Kas met aquifer		
	20	30	40	20	30	40
219	95	42	26	26	18	14
130	43	21	14	14	10	8
87	26	13	9	9	6.4	5.2

De grootste invloed op de kostprijs en de investeringen zijn de PV-module, het gebogen kasdek en het zonnevolgsysteem. Ook de energieprijs heeft een grote invloed op de terugverdientijd (zie Tabel 4.2a). In het bijzonder voor de gewone kas zijn de afschrijvingsperiodes hoog door de kosten van enkele componenten (Zonnevolgsysteem, PV-module en de NIR-folie). Er is in elk geval primair een verdere reducering van de investeringskosten noodzakelijk om het ELKAS-principe economisch aantrekkelijk te maken. Daarvoor is een vereenvoudiging van het ontwerp nodig om tot een voor de tuinbouw aanvaardbaar kostenniveau en afschrijvingsperiode te kunnen komen. Door de kosten reducties en opschaling van processen kan de terugverdientijd van de gewone kas, bij een hoge energieprijs in een periode van 10 jaar dalen zijn tot ca. 9 jaar. De energie neutrale kas (met aquifer) is door investeringskostenverlaging mogelijk eerder rendabel in te zetten (afhankelijk van het energieprijsscenario is de terugverdientijd ca 5 jaar). Het gebogen of asymmetrisch kasdek, de NIR folie, zonnevolgsysteem en de PV-cellen zijn de grootste economisch kritische componenten zijn voor de Elkas. In de eerste vijf jaar zijn de kosten reducties vnl. door innovatiestappen te bereiken. In de volgende vijf jaar kan dit door verdere autonome stappen bereikt worden. Door deze combinatie kan de kas uiteindelijk meer dan 50% in kosten dalen.

4.3 Economische evaluatie Fresnelkas

Een overzicht van de economische kengetallen voor de Fresnelkas is op een vergelijkbare wijze weergegeven in Tabel 4.3. Het oppervlak is hierbij het oppervlak van de kas. Ook hier wordt er van uitgegaan dat de gewasproductie niet nadelig wordt beïnvloed. Ook eventuele positieve effecten van een betere gewasproductie ten gevolge van het beter afgestelde lichtniveau worden niet meegerekend maar er is voor één situatie een opmerking gemaakt over de terugverdientijd bij een iets hogere gewasopbrengst. Als alternatief van de gewone Fresnellens is een kasdek met geïntegreerde lineaire Fresnellens mogelijk. Deze lange lenzen kunnen eveneens ingebouwd worden in een kanaalplaat waarbij de lijnvormige groeven van de Fresnellens aan de onderzijde van het oppervlak van de bovenste plaat aangebracht worden om vervuiling en vochtproblemen te voorkomen. Met lineaire Fresnellens zijn concentratie factoren op een brandlijn mogelijk van 50-100x, afhankelijk van de kwaliteit van de lens. In deze brandlijn wordt een smalle strook PV-cellen gepositioneerd. Het oppervlak van de smalle strook PV-cellen is beperkt (ca.2%) waardoor de lichtonderschepping gering is (ca. 2%). De kosten van de cellen zijn op dit moment nog hoog omdat er weinig van dit soort strookvormige cellen geproduceerd worden. De waterkoeling en elektrische verbinding van een strook cellen is eenvoudiger dan bij de normale lenzen met hun brandpunt. Door het grotere totaaloppervlak van de PV-modules zijn de PV-cellen duurder dan bij de puntvormige cellen in het brandpunt van de normale Fresnellens. Het zonnevolgsysteem met lineaire Fresnellens heeft echter minder variabelen (alleen een regeling in noord-zuid afstand en de afstand tot de lens) waardoor deze goedkoper is dan bij de normale Fresnellens. Een overzicht van de economische kengetallen is weergegeven in Tabel 4.3 voor nu, over 5 jaar en over 10 jaar. In de vierde kolom is over 10 jaar een lagere energieprijis verondersteld. Hierdoor wordt de invloed van de energieprijis duidelijk. Er zijn tevens vier kolommen opgenomen voor een energieneutrale (semigesloten) kasuitvoering. Een overzicht van de economische kengetallen is weergegeven in Tabel 4.3. Hieronder is de gevoeligheidsanalyse van de prijzen van de verschillende onderdelen weergegeven. Uit de tabel blijkt ook dat de Fresnellens, laminatie en de PV-cellen de grootste economisch kritische componenten zijn voor de Fresnelkas.

Tabel 4.3. Economische verkenning lineaire Fresnelkas.

Onderdeel	Investering							
	Gewone kas				Kas met aquifer			
	Nu [€/m ²]	5 jaar [€/m ²]	10 jaar [€/m ²]	10 jaar [€/m ²]	Nu [€/m ²]	5 jaar [€/m ²]	10 jaar [€/m ²]	10 jaar [€/m ²]
Totale extra Investering								
Fresnellens	50	40	30	30	50	40	30	30
Laminatie lens	30	25	20	20	30	25	20	20
PV-cellen (C=50x, 100x, 1000x) ¹	30	15	30	30	30	15	30	30
Laminatie PV ²	20	10	10	10	20	10	10	10
Invertors (500 €/KW)	15	15	12	12	15	15	12	12
Zonvolgsysteem ²	30	15	12	12	30	15	12	12
Warmtewisselaar ²	15	15	10	10	15	15	10	10
Installatie ²	10	10	15	15	10	10	15	15
Totale investering	200	145	139	139	200	145	139	139
Afschrijving+rente [€ per m ²]								
Rente (5%)	5,0	3,6	3,5	3,5	5,0	3,6	3,5	3,5
Afschrijving (7%)	14,0	10,2	9,9	9,9	14,0	10,2	9,9	9,9
Onderhoud (1% van investeringsbedrag)	2,0	1,5	1,4	1,4	2,0	1,5	1,4	1,4
Totale jaarkosten	21,0	15,3	14,8	14,8	21,0	15,3	14,8	14,8
Baten € per m ²								
Elektrische energie (29 kWh, 50 kWh en 100 kWh) ^{3,4}	2,9	7,5	20	10	2,9	7,5	20	10
Thermische energie (150 kWh, 250 kWh) ⁴	1,8	4,3	5,8	5,8	2,2	6,3	7,7	7,7
Besparing warmtewisselaar + elektr. Verbruik					6	6	6	6
Besparing schermstelsel (2 schermen) ⁵	3	3	3	3	3	3	3	3
Totale opbrengst	7,7	14,8	28,8	18,8	14,1	22,8	36,7	26,7
Saldo van totale opbrengst en totale kosten, excl. afschrijving en berekende rente	5,7	13,4	27,4	17,4	12,1	21,4	35,8	25,3
Terugverdientijd (investering / saldo opbrengsten minus kosten, excl.. afschrijving)	35.1	10.9	5.1 ⁶⁾	8,0 j	16.5	6.8	3.9 ⁶⁾	5,5 j

¹ Deze kosten van Siliciumcellen met 100x concentratie zijn bij grote aantallen. Over 10 jaar zijn triple junction cellen genomen met een concentratiefactor 1000x.

² Deze kosten zijn gebaseerd op Silicium cellen die geschikt zijn voor geconcentreerde straling, een concentratie factor van 100x, de prijzen gelden bij grote aantallen. De kosten voor deze cellen zijn de afgelopen periode flink gedaald.

³ Voor deze kosten zijn de volgende aannames gemaakt: elektriciteitsprijs nu 0,10 €/kWh, over 5 jaar 0,15 €/kWh en over 10 jaar 0,20 €/kWh en 0,10 €/kWh.

⁴ Zie voor de berekening van deze baten Tabel 9.2.

⁵ Schermkosten berekening die uitgaat van een 10-jarige afschrijving.

⁶ Als er naast genoemde energetische opbrengst sprake zou zijn van 1 euro/m² extra gewas opbrengst dalen de hier genoemde terugverdientijden naar respectievelijk 4.9 en 3.8 jaar

Gevoeligheidsanalyse van de prijsontwikkelingen Fresnelkas

Fresnel lens De prijs van de PMMA Fresnellenzen (Leverancier) is momenteel 50 €/m². De prijs kan flink dalen door de lenzen direct op het glas te lamineren. De verwachting is dat de prijs dan dalen tot ca. 30 €/m².

Laminatie lens De laminatie met het glas kost momenteel van Nederlandse Leverancier 40 €/m². Op termijn zijn nog kosten reducties mogelijk door opschaling en uitbesteding in het buitenland.

PV-cellen De prijs van de cellen is ca. 1500 €/m² (prijs gegevens buitenlandse leverancier). Met een concentratie factor van 50x is de prijs per kasoppervlak 30 €/m². Wanneer de concentratiefactor over 5 jaar is toegenomen tot 100 x wordt de prijs per kasoppervlak 15 €/m². De prijs van triple-junctie cellen is ca. 30.000 €/m² (prijs Boeing). Hierdoor verdubbeld de energie opbrengst en is een concentratiefactor van 1000x mogelijk. Dan wordt de prijs per kasoppervlak 30 €/m². De meerkosten zijn dan 30 €/m², waar een opbrengst van 7,5 €/m² tegenover staat. Deze extra investering is dus zeer rendabel. oor het kleine oppervlak van de PV-cellen is de lichtonderschepping gering. Bij een concentratiefactor van 50x: ca. 2%, bij 100 x: 1% en bij 1000x: 0,1%.

Laminatie Laminatie (prijs leverancier) is een standaard techniek en zal niet veel in prijs dalen.

Invertors De prijs hiervan is tamelijk stabiel op ca. 500 €/kW. Door opschaling kan de prijs dalen tot 400 €/kW.

Zonnevolgsysteem Het zonnevolgsysteem is door de besturing met twee motoren en kabels eenvoudig waardoor de kosten beperkt zijn tot 30 €/m² (prijs gebaseerd op onderdelen en montage tijd). Het is de verwachting dat de prijs over 5 jaar afneemt tot ca. 15 €/m² door schaalgrootte voordelen en binnen 10 jaar verder kan dalen tot 12 €/m².

Warmtewisselaar Door integratie met het laminatie proces is deze prijs redelijk laag en constant.

Installatie De installatiekosten op grote schaal zijn momenteel een schatting.

Tabel 4.3a. Gevoeligheid terugverdientijd bij verschillende energieprijsscenario's en investeringsniveaus Fresnelkas.

Investeringsniveau	Energieprijs: gasprijs (voor overige uitgangspunten zie Tabel 4.1)					
	Gewone kas			Kas met aquifer		
	20	30	40	20	30	40
200	35.1	15.6	7.5	16.5	9.6	5.8
145	23.4	10.9	5.3	11.5	6.8	4.1
139	22.1	10.4	5.1	10.9	6.5	3.9

De grootste invloed op de kostprijs hebben de kosten van de Fresnellens, laminatie, de PV-module en het zonnevolgsysteem. Een verdere daling van deze kosten is noodzakelijk om het systeem economisch rendabel te maken. De combinatie met een hogere energieprijs verlaagd de terugverdientijd aanzienlijk (zie Tabel 4.3a). Er wordt van uitgegaan dat de gewasproductie niet nadelig wordt beïnvloed. Primair moeten de investeringskosten verlaagd worden waarbij het systeem met aquifer eerder rendabel zal worden dan het systeem zonder. In de eerste vijf jaar zijn kosten reducties vnl. door innovatiestappen te bereiken. In de daarna volgende vijf jaar kan de lineaire lens vervangen worden door normale lenzen met hogere concentratiefactor en duurdere tripel junctie cellen. Deze cellen geven de dubbele opbrengst waardoor de energieopbrengst stijgt en de terugverdientijd korter wordt. Door de kosten reducties en opschaling van processen kan de terugverdientijd van de 'gewone kas' (dus zonder aquifer), bij een midden of hoog scenario voor de energieprijs in een periode dalen tot ca. 5-10 jaar. De kas met aquifer is door verdere investeringskostenverlaging mogelijk eerder rendabel in te zetten, bij het hanteren van het huidige energieprijsniveau is de terugverdientijd 11 jaar, bij een hoog energieprijsscenario daalt dit tot ca. 4 jaar.

4.4 Conclusies economische haalbaarheid

De Elkas is momenteel nog niet rendabel in te zetten. De grootste invloed op de kostprijs en daaraan gekoppelde terugverdientijd zijn de PV-module, NIR-folie, het gebogen kasdek en het zonnevolgsysteem. Deze onderdelen verdienen aandacht en ontwikkeling in het vervolgproject. Ook het energieprijsscenario heeft een grote invloed op de terugverdientijd. Verhoging van de energieprijzen werkt fors door in de terugverdientijd. De primaire stappen die genomen moeten worden liggen echter op het vlak van verlaging van het kostenniveau van de installatie.

Na een vereenvoudiging van de constructie, toename van de concentratiefactor en opbrengst in combinatie met hogere energieprijzen kan de terugverdientijd voor de normale uitvoering binnen afzienbare tijd ca. 9-13 jaar zijn. Onder dezelfde uitgangspunten is de terugverdientijd voor systeem met aquifer 5 tot 9 jaar.

Voor de Fresnelkas ligt het economisch perspectief dichterbij. De grootste invloed op de kostprijs en terugverdientijd zijn de kosten van de Fresnellens, laminatie, de PV-module en het zonnevolgsysteem. Door deze kostenreducties en opschaling van processen kan de terugverdientijd van de 'gewone kas'(dus zonder aquifer), bij een midden of hoog scenario voor de energieprijs in een periode van 10 jaar dalen tot ca. 5-10 jaar. De kas met aquifer is door verdere investeringskostenverlaging mogelijk eerder rendabel in te zetten, bij het hanteren van het huidige energieprijsniveau is de terugverdientijd 11 jaar, bij een hoog energieprijsscenario daalt dit tot ca.4 jaar.

Voor beide concepten geldt dat de belangrijkste vooruitgang kan worden geboekt door verlaging van het investeringsniveau. Los daarvan kunnen mogelijke positieve effecten op de gewasproductie en kwaliteit de haalbaarheid (sterk) verbeteren door verhoging van de financiële opbrengst. Op dit moment is er echter nog te weinig informatie beschikbaar om deze effecten mee te nemen in de economische berekeningen. Stel dat echter een productieverhoging en/of kwaliteitsverhoging kan worden bereikt waarmee 2.5% meeropbrengst wordt gehaald dan bedraagt dit al gauw 1 euro/m². De terugverdientijden worden daarmee iets verkort.

5 Transitie scenario naar energieneutrale kassen

5.1 Inleiding

De Elkas en Fresnelkas projecten passen volledig in het programma Kas als energiebron en het transitiepad Zonne-energie. Hierbij is als doelgesteld dat vanaf 2020 nieuwbouw kassen in Nederland energieneutraal dienen te zijn en dat de tuinbouw 48% minder CO₂ uitstoot ten opzichte van 1990. Het resultaat van dit project kan een aanzienlijke bijdrage leveren in de realisatie van een klimaatneutraal glastuinbouw productiesysteem.

Er zijn vier verschillende transitiepaden om deze doelstellingen te bereiken. De primaire lijn daarbij is in de eerste plaats energiezuinige teeltmaatregelen toe te passen, waarmee ca. 35% energie te besparen is en combinatie met warmteopslag (aquifer) plus warmtepomp kan het totaal op ca. 50% energiebesparing worden bereikt (project 'Toekomstbeelden'). Voor een energieneutrale kastuinbouw die onafhankelijk moet zijn van fossiele brandstoffen zijn echter nog verdergaande energiebesparingen nodig in combinatie met toepassing van duurzame bronnen (bv zonne-energie en aardwarmte). Binnen het programma Kas als energiebron worden daarom in de diverse transitiepaden die onderdelen ontwikkeld die gecombineerd en geïntegreerd zullen leiden tot verschillende energiezuinige en energieneutrale systemen. Via het *transitiepad Teeltstrategie* worden energiezuinige teeltstrategieën ontwikkeld en getoetst om groente- en sierteelt mogelijk te maken met aanzienlijk minder fossiele brandstof. Dit betreft onder andere de lopende projecten 'Energie onder de knie', 'Energiezuinig teeltconcept snijbloemen' en 'Betere benutting zonne-energie voor energiezuiniger potplantenteelt'. Voor tomaat is het streven daarbij een teelt in een kassysteem met een eigen warmtebehoefte van 875 MJ/m²/jr en een elektriciteitsbehoefte van 20 kWh/m²/jr. Door inzet van een combinatie van WKK en Warmtepomp kan dit gerealiseerd worden met slechts 16m³ aardgas per m² (Rapport 'Richtinggevend beeld voor energiezuinig telen in semigesloten kassen', Poot en Bakker, oktober 2008). Binnen het *transitiepad Licht* is o.a. het project 'Ultra-energiezuinige kassystemen met Supertransparante Micro-V gestructureerde materialen' gericht op de verdere verlaging van de totale energiebehoefte van kassystemen. In het *transitiepad Aardwarmte* wordt sterk ingezet op het uitrollen van het succesvolle systeem zoals dat is gerealiseerd bij vd Bosch.

5.2 Inpassing

Bijdrage van dit project aan de integrale ontwikkeling van energieneutrale productiesystemen

Binnen dit project wordt gewerkt aan de verbetering van het Elkas principe met als doelstelling te komen tot systeemverbeteringen waarmee tot 29 kWh/m²/jr elektriciteit en 85-150 kWh/m²/jr (=300-540 MJ) warmte kan worden geleverd.

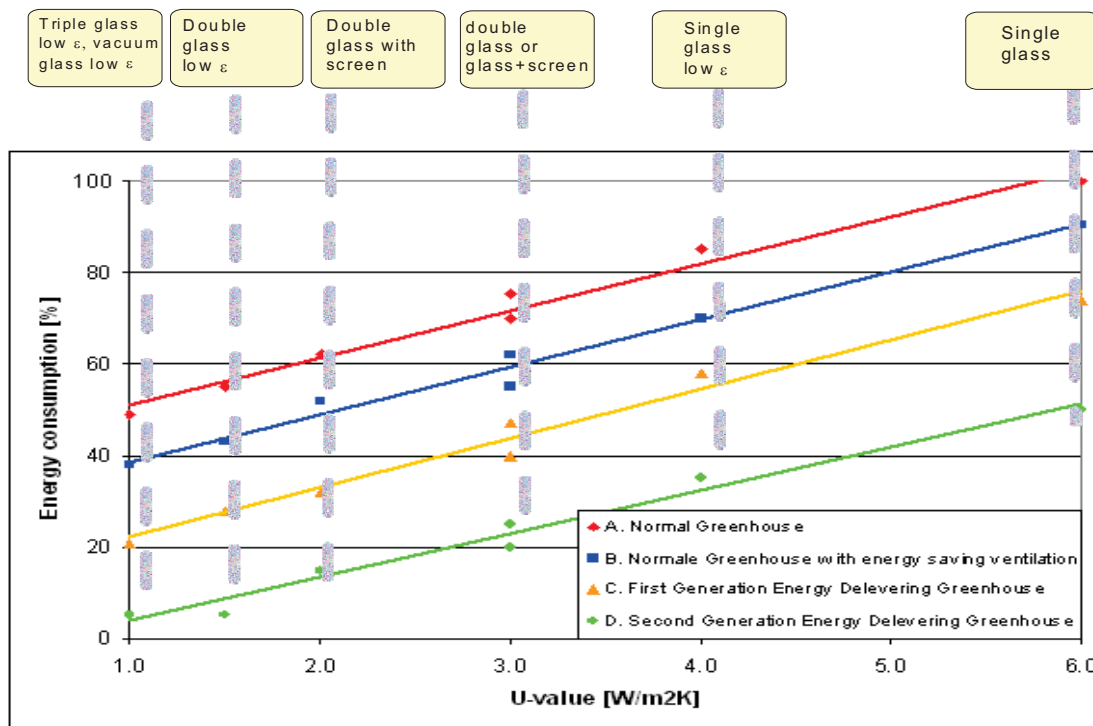
In combinatie met de resultaten uit het *transitiepad Teeltstrategie* (o.a. 'Energie onder de knie') komt hierdoor een systeem binnen bereik waarmee de additionele input van energie is teruggebracht tot slechts 27 kWh/m²/jr elektrisch vermogen en een overschot aan warmte.

Combinatie met nieuwe dekmaterialen met verhoogde isolatie en transmissie (zoals worden ontwikkeld binnen het *transitiepad licht*) maakt een verdere verlaging van de warmtebehoefte van het systeem (nu 875 MJ) mogelijk waarmee de capaciteit van de warmtepomp, en dus de additionele elektriciteitsbehoefte tot nul kan worden teruggebracht waarmee verdere stappen worden gezet in de richting van een klimaatneutraal productiesysteem. Toepassing van het verbeterde Fresnel principe biedt weliswaar zicht op nog hogere elektriciteit- en warmte-producties van respectievelijk 50-100 kWh/m² en 245 kWh/m² (ruim 850 MJ) maar dat systeem is vooral geschikt voor de minder lichtbehoeftige gewassen (potplanten) en kent dus een lager toepassingsareaal.

Een tweede toekomstig klimaatneutraal productiesysteem wat zowel met het verbeterde Elkas als Fresnel principe binnen bereik komt ligt in de combinatie van dit systeem met toepassing van aardwarmte voor de warmtevoorziening. De benodigde elektriciteit voor de bronpompen en overige systemen (15-25 kWh/m²) kan ruimschoots

geleverd worden uit de ingevangen zonne-energie. Het overschot aan elektriciteit biedt opties voor toepassing voor (energiezuinige) belichting of levering aan derden. Combinatie met nieuwe dekmaterialen met hoogde isolatie en transmissie (zoals worden ontwikkeld binnen het transitiepad licht) maakt een aanzienlijke vergroting van het areaal, dat vanuit één aardwarmtebron op duurzame wijze kan worden verwarmd, mogelijk.

Het Elkas/Fresnelsysteem vormt daarmee een belangrijke schakel bij de uitwerking en realisatie van diverse klimaatneutrale kassen.



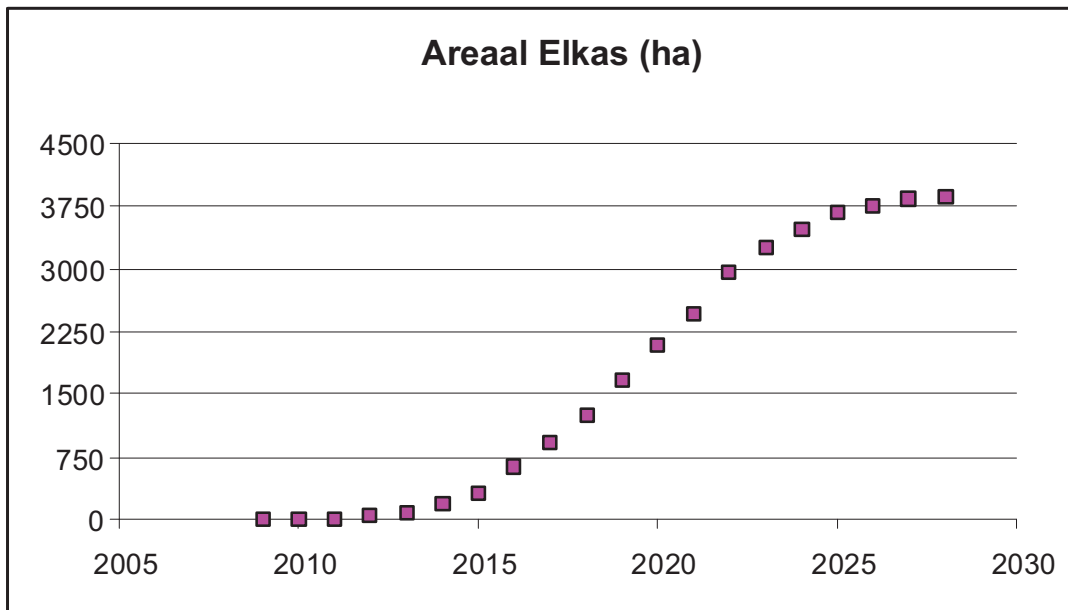
Figuur 5.2. Het energiegebruik van kassen als functie van de isolatiewaarde U voor vier verschillende kassystemen: — normale kassen, — normale kassen met energiezuinige ventilatie, — eerste generatie energieleverende kassen — elektriciteit leverende kassen.

In Figuur 5.2 zijn de verschillende technieken samengevat om te komen tot aanzienlijke energiebesparingen. Hierbij is het energiegebruik van vier verschillende kassystemen weergegeven als functie van de isolatiewaarde U in vierverschillende lijnen. Deze vier lijnen zijn: A. Normale kas; B. normale kas met energiezuinige ontvochtiging; C. Eerste generatie energie leverende kas. Dit zijn kassen met een warmtewisselaar voor de oogst van warmte, een aquifer als warmte opslagsysteem en een warmtepomp; D. Tweede generatie energieleverende kassen. Dit zijn kassen die naast warmte tevens elektrische energie kunnen leveren zoals de Elkas en de Fresnelkas. In de onderliggende lijnen is steeds de voorgaande maatregelen meegenomen. Door de implementatie van deze technieken en een hoge isolatiewaarde kan de kas volledig energieneutraal worden.

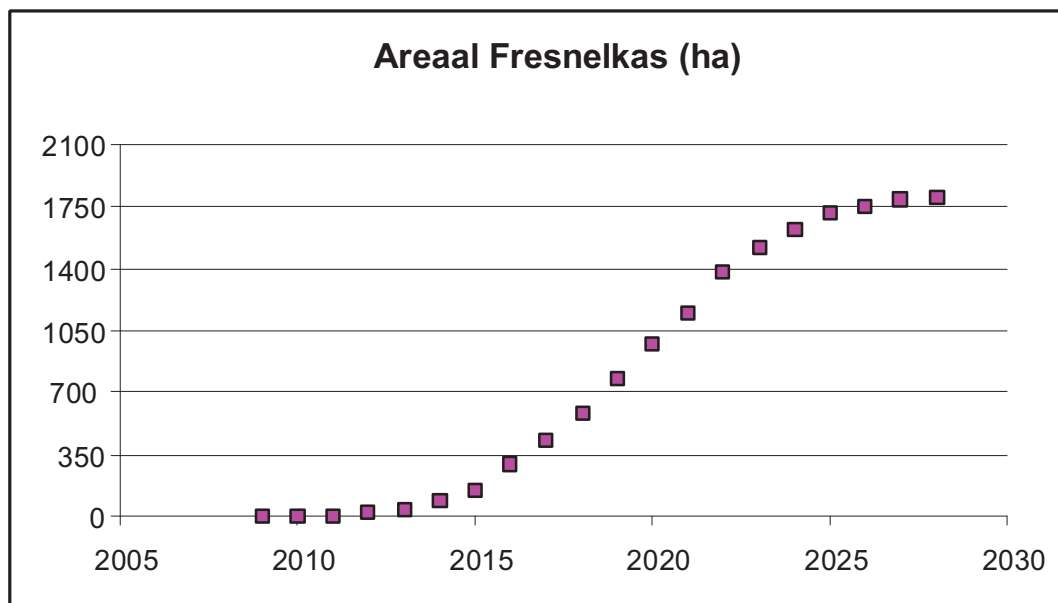
5.3 Markintroductie model

Het totaal kasoppervlak in Nederland van ca. 10.000 ha bestaat voor ca. 25% uit potplant areaal en 75% groenten, fruit en bloemen. De Fresnelkas is geschikt potplant areaal, terwijl de Elkas geschikt is voor het overige deel. Ook sierplanten (areaal in Nederland ca. 1500 ha vnl. roos) zijn mogelijk geschikt voor de Fresnelkas omdat hiermee een goede lichtregeling mogelijk is waardoor op zeer heldere dagen een deel van het directe licht weggevangen kan worden. Hierdoor is het mogelijk de lichtfluctuatie kleiner te maken zodat de oogsttijden beter voorspelbaar worden. Met een nieuwbouw van gemiddeld 400 ha per jaar en de aanname dat de overgang voor 50% van de markt

interessant is kan een marktintroductiemodel bepaald worden. Dit model is afgeleid van de adoptie van de substraatteelt in de praktijk in de periode 1975-1995 en andere vergelijkbare systeeminnovaties.



Figuur 5.2. Marktintroductiemodel van de Elkas.



Figuur 5.3. Marktintroductiemodel van de Fresnelkas.

De maximale introductiesnelheid door de vervangingsmarkt zal voor de Fresnelkas dan ca. 70 ha per jaar en voor de Elkas 130 ha per jaar kunnen bedragen. Met de gestelde aannames zijn de te verwachten uiteindelijke arealen voor de Fresnelkas 1750 ha en voor de Elkas 3750 ha. De benodigde tijd om deze arealen te halen zijn dan ca. 20-25 jaar. In de Figuren 5.2 en 5.3 zijn de geschatte marktintroducties voor beide kassen grafisch weergegeven. Naast de Nederlandse markt zijn er volop kansen in Europa. Verder toename van de marktgrootte kan door spin-offs

ontstaan. Vooral zijn merken als lichtstralen voor kantoren en fabrieken, lichtkoepels en andere transparante overkappingen voor winkel centra's en zwembaden etc. interessant om de ontwikkelde technologie te vermarkten.

5.4 Conclusies transitie scenario

De transitie naar volledig energie neutrale kassen is aangegeven. Hiertoe zijn vier transitiepaden ontwikkeld en verschillende technieken in combinatie met de elektriciteit leverende kassen leiden tot de energieneutrale kas. Voor de Elkas en de Fresnelkas zijn de te verwachte arealen en introductiesnelheden bepaald. Met de gestelde aannames zijn de te verwachten arealen voor de Fresnelkas 1750 ha en voor de Elkas 3750 ha. De benodigde tijd om deze arealen te halen zijn ca. 20-25 jaar.

6 Conclusies

Bij de voorbereiding en realisatie van beide elektriciteit leverende kassen zijn een groot aantal bedrijven betrokken geweest. Naast de kasbouw bedrijven Bosman BV kassenbouw voor de Elkas en Technokas voor de Fresnelkas valt ook te noemen: Bode Project- en Ingenieursbureau B.V, IMEC in Leuven ECN Petten. De twee laatst genoemde instituten zijn betrokken geweest bij de keuze van PV-systemen. De laminatie voor het samenstellen van de PV-cellen tot modules is uitgevoerd door Soltec in Tienen (B). De firma Dekker heeft de scherminstallatie voor de Elkas ontwikkeld en gerealiseerd. Andere bedrijven zijn actief geweest voor de toelevering van Fresnellenzen, de multilaags NIR-reflecterende folie, het warmte opslagsysteem en installatie. Met de verdere ontwikkeling van beide kassen zal in het vervolgproject tevens de samenwerking met productie bedrijven geïntensiveerd worden.

Voor de energieconversie is in het eerste onderzoek voor Silicium PV-cellen gekozen voor zowel de Fresnel als de Elkas op basis van rendement en prijs overwegingen. Hoewel er een groot aantal verschillende PV-materialen ontwikkeld zijn, zijn er slechts enkele materialen op grote schaal beschikbaar en geschikt voor geconcentreerde straling. Om deze reden blijft Silicium voorlopig het meest geschikte materiaal voor de energie omzetting van de Elkas. Op termijn kan echter CIS PV-materiaal een aantrekkelijk en goedkoper alternatief worden. Hiertoe wordt in het vervolgtraject een ontwikkeling ingezet. Voor de Fresnelkas zijn er naast het eerder toegepaste Silicium eveneens een aantal andere geschikte PV-materialen geschikt. De alternatieve PV-materialen zijn GaAs en Triple junctie cellen. Deze PV-materialen vertonen hogere rendementen en lagere temperatuurcoëfficiënten dan Silicium PV-cellen waardoor deze materialen interessant zijn om te onderzoeken in het vervolgtraject. Tevens is in de literatuur gevonden dat de temperatuurcoëfficiënt verminderd bij hogere concentratiefactoren. Dit voordeel samen met de geringere lichtonderschepping en lagere kosten geven het belang aan de concentratiefactor van de PV-systemen flink te verhogen in het vervolgproject.

Als mogelijk alternatief voor zowel de Elkas als de Fresnelkas is de thermische omzettingmethode onderzocht. Dit is een combinatie van een vacuümcollector met een ORC of Stirlingmotor. ORC is voor grotere systemen het meest geschikt. Ondanks dat er momenteel low cost vacuüm collectoren beschikbaar gekomen zijn van Chinese makelij is de economische haalbaarheid van deze systemen minder dan van PV-technologie. Daarom wordt deze optie niet verder onderzocht in het vervolgproject.

Van zowel de Elkas als de Fresnelkas is voor vier verschillende dagen piekvermogens bepaald. Voor de Elkas was het bepaalde piekvermogen 24 W/m^2 . Dit is 15% hoger dan de in het eindrapport van de 2008 voorspelde waarde van 21 W/m^2 . Dit is te verklaren door de verbeterde positie van de module en omdat de NIR folie strakker om het gebogen glas was aangebracht. Door deze toename kunnen de verwachte jaaropbrengsten eveneens 15% toenemen tot 18 kWh/m^2 per jaar. De meetresultaten geven tevens mogelijkheden om de jaaropbrengsten verder te laten toenemen tot ca. 28 kWh/m^2 per jaar. Bij de Fresnelkas zijn de metingen in overeenstemming met de resultaten van 2008. De jaaropbrengstberekeringen blijven hierdoor hetzelfde als in 2008 genoemd (29 kWh/m^2). Verhoging van de opbrengst tot ca. 50 kWh/m^2 is mogelijk door laminatie van de lens op het glas en het gebruik van AR gecoat glas. Verdere verhoging van de opbrengst tot 100 kWh/m^2 kan plaatsvinden door verhoging van de concentratiefactor en de toepassing van triple-junctie PV-cellen. De standaard deviatie van de meetresultaten van de jaaropbrengst is bepaald op 11%. De grootste afwijkingen zullen echter kunnen ontstaan door de fluctuaties in het jaarlijks klimaat. Hiervan is de standaard deviatie 20%.

De Elkas is momenteel nog niet rendabel in te zetten. De grootste invloed op de kostprijs en daaraan gekoppelde terugverdientijd zijn de PV-module, NIR-folie, het gebogen kasdek en het zonnevolgsysteem. Deze onderdelen verdienen aandacht en ontwikkeling in het vervolgproject. Ook het energieprijsscenario heeft een grote invloed op de terugverdientijd. Verhoging van de energieprijzen werkt fors door in de terugverdientijd. De primaire stappen die genomen moeten worden liggen echter op het vlak van verlaging van het kostenniveau van de installatie. Na een vereenvoudiging van de constructie, toename van de concentratiefactor en opbrengst in combinatie met hogere energieprijzen kan de terugverdientijd voor de normale uitvoering binnen afzienbare tijd ca. 11 jaar zijn. Onder dezelfde uitgangspunten is de terugverdientijd voor systeem met aquifer 5 tot 9 jaar.

Voor de Fresnelkas ligt het economisch perspectief dichterbij. De grootste invloed op de kostprijs en terugverdiëntijd zijn de kosten van de Fresnellens, laminatie, de PV-module en het zonnevolgsysteem. Voor de Fresnelkas ligt het economisch perspectief dichterbij. De grootste invloed op de kostprijs en terugverdiëntijd zijn de kosten van de Fresnellens, laminatie, de PV-module en het zonnevolgsysteem. Door deze kosten reducties en opschaling van processen kan de terugverdiëntijd van de 'gewone kas' (dus zonder aquifer), bij een midden of hoog scenario voor de energieprijs in een periode van 10 jaar dalen tot ca. 5-10 jaar. De kas met aquifer is door verdere investeringskostenverlaging mogelijk eerder rendabel in te zetten, bij het hanteren van het huidige energieprijsniveau is de terugverdiëntijd 11 jaar, bij een hoog energieprijsscenario daalt dit tot ca. 4 jaar.

Als de systemen ook nog een klein positief effect hebben op de gewasproductie zal de terugverdiëntijd nog verder afnemen en de haalbaarheid op termijn nog verder toenemen.

De transitie naar volledig energie neutrale kassen is aangegeven. Hiertoe zijn vier transitiepaden ontwikkeld en verschillende technieken in combinatie met de elektriciteit leverende kassen leiden tot de energieneutrale kas. Voor de Elkas en de Fresnelkas zijn de te verwachte arealen en introductiesnelheden bepaald. Met de gestelde aannames zijn de te verwachten arealen voor de Fresnelkas 1750 ha en voor de Elkas 3750 ha. De benodigde tijd om deze arealen te halen zijn ca. 20-25 jaar.

7 Referenties

- Al Baali, A.A., 1986.
Improving the power of a solar panel by cooling and light concentrating. *Solar & Wind Technology* 3, 241–245.
- Bakker, J.C., 2009.
Energy saving greenhouses. *Chronica Horticulturae* 49 (2). - p. 19 - 23.
- Brogren, M., P. Nostell & B. Karlsson, 2000.
Optical efficiency of a PVthermal hybrid CPCmodule for high latitudes. *Solar Energy* 69, 173–185.
- Coventry, J., 2005.
Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector. *Solar Energy* 78, 211–222.
- Hemming, S., F.L.K. Kempkes, V. Mohammadkhani, N.J. van de Braak, T.A. Dueck, R.E.E. Jongschaap & Marissen, 2005.
Het effect van NIR-filterende kasdek- en schermmaterialen op kasklimaat, energieverbruik en Wageningen : Agrotechnology & Food Innovations, (A&F Rapport 505).
- James, L.W. & J.K. Williams, 1978.
Fresnel optics for solar concentration on photovoltaic cells. In: Proceedings of the 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New York, pp. 673–679.
- Kempkes, F., C. Stanghellini, S. Hemming & J. Dai1, 2008.
Cover materials Excluding Near Infrared Radiation: Effect on Greenhouse Climate and Plant Processes, *ActaHorticultura.*, 797, ISHS 2008, p477-482.
- Kempkes, F., C. Stanghellini, S. Hemming & J. Dai1, 2009.
NIR-selectief scherm; Energie-, vochtuithouding en Gewasrespons: openbare rapportage Wageningen : Wageningen UR Glastuinbouw, (Nota / Wageningen UR Glastuinbouw 610, Maart 2009).
- Kritchman, E.M., A.A. Friesem & G. Yekutieli, 1979.
Efficient Fresnellens for solar concentration. *Solar Energy* 22, 119–123.
- Leutz, R., A. Suzuki, A. Akisawa & T. Kashiwagi, 1999.
Design of nonimaging Fresnellens for solar concentrators. *Solar Energy* 65, 379–387.
- Lorenzo, E. & G. Sala, 1979.
Hybrid silicon-glass Fresnellens as concentrator for photovoltaic applications. In: Proceedings of the ISES Conference Silver Jubilee Congress, Atlanta, pp. 536–539.
- Nabelek, B., M. Maly & V. Jirka, 1991.
Linear Fresnellenses, their design and use. *Renewable Energy* 1, 403–408.
- Nishoika, K., T. Tkamoto, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka & T. Fuyuki, 2006.
Solar Materials & Solar Cells, 90, 57-67.
- Nelson, D.T., D.L. Evans & R.K. Bansal, 1975.
Linear Fresnellens concentrators. *Solar Energy* 17, 285–289.
- O'Neil, M.J., R.R. Walters, J.L. Perry, A.J. McDanal, M.C. Jackson & W.J. Hess, 1990.
Fabrication, installation and initial operation of the 2000 sq. m. linear Fresnellens photovoltaic concentrator system at 3M/Austin (Texas). In: Proceedings of the 21th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Florida, pp. 1147– 1152.
- Poot, E.H., F. de Zwart, J.C. Bakker, G.P.A. Bot, J.A. Dieleman, A. de Gelder, L.F.M. Marcelis & D. Kuiper, 2008.
Richtinggevend beelden voor energiezuinig telen in semigesloten kassen Wageningen : Wageningen UR Glastuinbouw, (Nota / Wageningen UR Glastuinbouw 538). Cover materials Excluding Near Infrared Radiation: Effect on Greenhouse Climate and Plant Processes.
- Sonneveld, P.J., G.L.A.M. Swinkels, H.J.J. Janssen, B.A.J. van Tuijl & G.P.A. Bot, 2009.
Fresnel concentrerende systemen voor de tuinbouw : openbare rapportage Wageningen : Wageningen UR Glastuinbouw, (Nota / Wageningen UR Glastuinbouw 604).
- Sonneveld, P.J., G.L.A.M. Swinkels, V. Mohammadkhani, H.J. Holterman, H.F. de Zwart, G.P.A. Bot, H.J.J. Janssen, B.A.J. van Tuijl & J.B. Campen, 2009.
Ontwikkeling van de Elektriciteit Leverende Kas (ELKAS) : openbare rapportage (Rapport / Wageningen UR Glastuinbouw 236).

- Sonneveld, P.J., G.L.A.M. Swinkels, G.P.A. Bot & G. Flamand, 2009.
Feasibility study for combining cooling and high grade energy production in a solar greenhouse, *Biosystems Engineering*, In Press.
- Sonneveld, P.J., G.L.A.M. Swinkels & G.P.A. Bot, 2009.
Design of a Solar Greenhouse with Energy Delivery by the Conversion of Near Infrared Radiation - Part 1 Optics and PV-cells, *Acta Horticulturae*, 807 jan 2009, p. 47 – 53.
- Sonneveld, P.J., H.J. Holterman, G.L.A.M. Swinkels, B.A.J. van Tuijl & G.P.A. Bot, 2008.
Solar Energy Delivering Greenhouse with an Integrated NIR filter, *Acta Horticulturae*, 801 nov 2008, p. 703-710.
- Tripanagnostopoulos, Y., Th. Nousia, M. Souliotis & P. Yianoulis, 2002.
Hybrid photovoltaic/thermal solar systems. *Solar Energy* 72, 217–234.
- Tripanagnostopoulos, Y., M. Souliotis, R. Battisti & A. Corrado, 2005a.
Energy, cost and LCA results of PV and hybrid PV/T solar systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 13, 235–250.
- Tripanagnostopoulos, Y., M. Souliotis, J.K. Tonui & A. Kavga, 2005b.
Irradiation aspects for energy balance in greenhouses. In: Proceedings of the International Conference on Sustainable Greenhouse Systems. *Acta Horticulturae* 691, 733-740.
- Vanthoor, B.H.E., C. Stanghellini, E.J. van Henten & P.H.B. de Visser, 2008.
Optimal greenhouse design should take into account optimal climate management. *Acta Horticulturae* 802 p. 97 - 104.
- Whitfield, G.R., R.W. Bentley, C.K. Weatherby, A.C. Hunt, H.D. Moring, F.H. Klotz, P. Kenber, J.C. Minano & E. Alarte-Garui, 1999.
The development and testing of small concentrating PV systems. *Solar Energy* 67, 23–34.