



Praktijkervaringen met de DaglichtKas

H.F. de Zwart, F. van Noort



Referaat

De DaglichtKas is een innovatief ontwerp voor kassen voor schaduwminnende teelten waarbij gebruik gemaakt wordt van lenzen in het dak. Deze lenzen buigen het directe licht af naar een brandlijn waar een collector het omzet in warmte en in elektriciteit. De lens is alleen effectief voor direct licht en daardoor heeft het systeem nauwelijks effect op de diffuse doorlatendheid. Dit blijkt te resulteren in een zeer geschikt lichtklimaat voor de teelt van potplanten. Het zonne-collectorsysteem heeft in het eerste proefjaar 19% van de directe straling in warmte kunnen omzetten. Dit betekent onder Nederlands omstandigheden een jaarlijkse warmteopst van 360 MJ/m², ofwel ruim 11 m³ aardgas equivalenten per m². Er is ook geëxperimenteerd met prototypen voor een CPVT-collector (een collector voor zowel warmte als elektriciteit). Uit de metingen blijkt dat zo'n collector met de huidige rendementen jaarlijks 15 kWh per m² kas zou kunnen voortbrengen. In 2012 zal worden beproefd of deze potentie als daadwerkelijke stroom uit het stopcontact kan worden gerealiseerd. Het lenzensysteem is aangebracht in de spouw van een dubbel glasdek, waardoor de warmtevraag van de kas jaarlijks niet meer dan 16 m³ aardgas equivalenten per m² bedraagt. Deze warmtevraag kan worden ingevuld middels een warmtepomp die de in de zomer verzameld warmte via een seizoensopslagsysteem opwerkt naar de vereiste verwarmingswatertemperatuur. Het complete systeem blijkt energetisch mooi in balans zodat het uiteindelijke toe te rekenen energieverbruik van de DaglichtKas tussen de 6 en 9 m³/(m² jaar) uitkomt. Het effect van de kas op gewasgroei is bestudeerd door de teelt van een 7-tal potplanten uitgebreid te volgen (Anthurium, Areca, Asplenium, Bromelia, Calathea, Ficus en Varen 'Blue Star'). Alle gewassen bleken volgens de begeleidende groep kwekers beduidend sneller te groeien. Voor de Bromelia en Calathea is de groeiversnelling in de DaglichtKas vastgesteld op 10 tot 20% ten opzichte van de praktijk.

Abstract

The DaglichtKas (Daylight Greenhouse) is an innovative design for greenhouses for plants with a low light tolerance. It has lenses in the roof that focus direct radiation in a focal line, where it is converted into heat and electricity. The lens is effective only for direct light and therefore the system hardly affects the diffuse transmittance. This appears to be very productive for the cultivation of ornamental pot plants. In this first year, the system has converted 19% of the direct solar radiation into heat. For Dutch conditions, this means an annual heat collection of 360 MJ/m². Besides the thermal solar collector, there have been experiments with a small CPVT collector (a collector for both heat and electricity). The observations indicate that, with the current conversion efficiencies, an electricity production of 15 kWh per m² greenhouse comes into reach. In 2012 it will be tested whether this potential can be converted into an actual electricity production for the public grid. The lens system is placed in the space between the layers of an insulating double glass panel. Therefore, the average annual heat demand of the greenhouse is not more than 500 MJ/m². This heat can be provided by a heat pump that applies the heat gathered in the collector during summer. The complete design, including a seasonal storage facility, appears to yield a well balanced heating system, yielding a primary energy consumption between 6 and 9 m³ of natural gas. The effect of greenhouse on crop growth has been studied by the cultivation of 7 different types of potted plants (Anthurium, Areca, Asplenium, Bromeliads, Calathea, Ficus, and Barges 'Blue Star'). The achievements were monitored by a group of growers and they observed a significantly faster growth and development (up to 10 to 20%).

© 2012 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw.

Wageningen UR Glastuinbouw

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

Inhoudsopgave

	Summary	5
	Samenvatting	7
1	Inleiding	9
2	Kerntechnologie in de DaglichtKas	11
	2.1 De Fresnellens	12
	2.2 Het zonvolgmechaniek	13
	2.3 Variabele beschaduwning	14
3	De bouw van de DaglichtKas	17
	3.1 Het asymmetrisch kasdek	17
	3.2 Vrije ruimte in de nok	18
	3.3 Het schuifluchtraam systeem	19
4	Energieverzameling met de zonnecollector	21
	4.1 Warmteverzameling met de DaglichtKas	21
	4.2 Elektriciteitsverzameling met de DaglichtKas	24
5	Kasklimaat en energiehuishouding	31
	5.1 Kasluchttemperatuur, luchtvochtigheid en CO ₂ concentratie	31
	5.2 Lichtregime in de kas	34
	5.3 Energiehuishouding	37
	5.4 Alternatieve energievoorziening met kleine WKK	40
	5.5 Conclusie	41
6	Gewasgroei	43
	6.1 Onderzoeksopzet	43
	6.2 Resultaten	44
	6.3 Conclusie	46
7	Tuinders over de DaglichtKas	47
8	Conclusies	49
9	Publiciteit	51
10	Dankwoord	53
Bijlage I	Het lenssimulatiemodel	55

Summary

The DaglichtKas (Daylight Greenhouse) is an innovative design for greenhouses for plants with a low light tolerance. The key development is the use of lenses in the south-facing roof segments. These lenses deflect direct light to a focal line. In case a collector is positioned in this focal line, solar energy can be converted into heat and electricity.

Deflection of direct light means that direct and diffuse sunlight are separated. This means that direct light can be intercepted selectively without affecting the greenhouse transmissivity for diffuse light. This selective interception has not previously been used in greenhouses, and is found to result in very favourable light conditions for the cultivation of a number of ornamental plants.

The realization of a greenhouse with such a lens and with these properties gives a number of challenges with respect to the construction. For example, the greenhouse roof is asymmetric in order to maximize surface of the lens. Also, a tracking mechanism had to be developed that keeps the collector in the focal line during the day, following the displacement of the sun.

In principle, by positioning the collector in the focal line, somewhat beside it, or completely next to the focal line, the light transmission of the greenhouse can be controlled continuously between certain limits. However, this possibility is not used in the current project. The collector was almost placed as good as possible at the focal line, in order to maximize the energy collected.

In order to provide enough space for the movement of the collector, the gutter of the greenhouse had to be mounted quite high above the trellis-girder. Also, a newly designed sliding-window was used in order to reduce the shadow-casting of the one span onto the next. Moreover, this mechanism provided the space needed for the displacement of the collector. The greenhouse was completed in March 2011, which was just in time since, for the plants grown in the greenhouse, screening is only needed starting in March. In the period from March to 15 October, on average 20% of direct sunlight was intercepted by the collector. In summer, this percentage was slightly higher and during the hours with the sun at its highest point in June, even 30% of the direct light was intercepted. In the morning and at the end of the day the interception is much lower or even zero. From 15 October to early March, the interception is by definition zero because in that period all the light in the greenhouse is welcome for growth. This puts the average year-round heat collection at 19% of direct radiation with the greenhouse as has functioned in 2011. In the Netherlands, the direct radiation amounts to about 1900 MJ/m² per year so the annual harvest of thermal energy with the current Frensel system will be typically 360 MJ/m².

The heat production appeared to be well described as a function of the intensity of the direct sunlight and the position of the sun in the sky with the lens model developed. This model is using a ray-tracing technique to compute how light is deflected by the lens and keeps track of hits and losses of light. Just like seen in practice, the model calculates that the lens brings much less light on the collector during the edges of the day compared to the amount of light cast onto the collector around noon. At larger angles of incidence the losses of light around the lens increase sharply, resulting in a far from constant fraction of light captured by the collector.

If the collector would be implemented as CPVT collector (a collector which produces both heat and electricity), then the interception of 19% of the direct radiation had resulted in a 15 kWh electricity production when assuming an efficiency of 15% of the PV-cells. In the past year, two prototypes for CPVT collectors in the DaglichtKas were tested. The experiences with the second prototype show that this potential of 15 kWh per m² per year is realistic. The real proof of this potential in terms of electric current delivered to the electricity grid will be tested in 2012. Then the technical installations will be placed that actually will convert the DC-power from PV cells to electricity at the outlet.

The climate realized in the DaglichtKas in 2011 proved to be very favourable for plant growth, although the light intensities measured were significantly higher than expected and also much higher than usual in the cultivation of the pot plants used in the experiment. Intensities above 300 μmole/(m² s) were quite common (more than 1000 hours per year) and there were over 100 days with a light sum of more than 12 mole/m².

The fact that the plants were growing well despite this unusually high light intensities and light sums is attributed to the diffuse nature of light in the greenhouse, the tempered daytime temperatures stable and high humidity (75-80%). The lens in the south facing roof provided that the light had a diffuse character all the time.

Partly because of the experiences in the DaglichtKas, experiments will be carried out in 2012 for further examination of the effect of light intensity and diffuse light on pot plants. These experiments will take place in the DaglichtKas as also in other greenhouses.

The lens in the south facing roof is placed in the cavity of double glazing. This roof face therefore has a high insulation value and also north facing roof is made of insulating glass. The greenhouse has an energy screen as well and these factors together contribute to a greenhouse with a very low heat demand. The average annual consumption is 16 m³ of natural gas equivalents per square meter when using a heating setpoint of 18 °C in winter and 20 °C in summer.

In the DaglichtKas, this heat demand will be produced predominantly by a heat pump. It heats the greenhouse in the winter, using the heat gathered in summer by the collector and stored in a seasonal storage system (an aquifer).

The heat pump is electrically powered, but the electricity production of the DaglichtKas is not sufficient to meet the total electricity demand of the greenhouse. The shortage of electric power can be bought, and in that case the net electricity consumption amounts to 30 kWh/(m² year). Converted to primary energy consumption with the average Dutch power plant efficiency, and taking into account the use of a boiler during heating peaks, the eventual energy consumption of the DaglichtKas will be almost 9 m³/(m² year).

Another choice for the energy production for the DaglichtKas might be the use of a small CHP unit of 35 kW per ha. Such an engine would produce enough electricity to compensate for the electricity use of the heat pump and the other electricity consuming systems in the greenhouse. This would make the DaglichtKas electrically neutral to the public grid (meaning that it produces annually as much electricity (mainly in summer) as it buys (predominantly in winter)). In that case, the net energy consumption of the DaglichtKas drops to 6 m³ / (m² year).

The effect of greenhouse on crop growth has been studied by the cultivation of a 7 types of potted plants (Anthurium, Areca, Asplenium, Bromeliads, Calathea, Ficus, and Barges 'Blue Star'). In addition, an exploratory examination on the growth of Phalaenopsis, Spathiphyllum and Zamioculcas was carried out.

According to a group of growers who are familiar with the plants grown in the DaglichtKas, the growth and development of all plants was significantly faster. Bromelia and Calathea showed a 10 to 20% increment of annual growth rate.

Three of the observed species grew hard, but did not quite meet the usual quality standards. Anthurium developed leaf and flower colors too light and Asplenium had too light leaves to. Areca showed some damage in old leaves. However, it might be possible to improve the quality of these plants when using an adapted fertilizer mixture and Areca might benefit from some additional screening.

The good results, both in cultivation and in terms of energy, have led to enthusiastic reactions of pot plant breeders on these new developments. The experiment and the demonstration will therefore be continued for another year.

Apart from additional observations on crop development, the experiments in 2012 will focus on the actual production of electricity for the public grid. Moreover, in 2012 the effect of a new type of glass will be studied. This glass has an equal transmission in the PAR-spectrum but a higher transmission in the NIR-spectrum. This will result in an increased energy density at the collector and therefore in an elevated energy production.

Samenvatting

De DaglichtKas is een innovatief ontwerp voor kassen voor schaduwminnende teelten waarbij gebruik gemaakt wordt van lenzen in de zuidwaarts gerichte dakvlakken die het directe licht afbuigen naar een brandlijn. Als een collector in deze brandlijn wordt gebracht kan ter plaatse zonlicht worden omgezet in warmte en in elektriciteit.

Het concentreren van het directe licht betekent dat direct en diffuus zonlicht van elkaar worden gescheiden. Het directe licht kan hierdoor worden onderschept zonder dat dit invloed heeft op de doorlatendheid van de kas voor diffuus licht. Deze selectieve onderschepping is nog niet eerder in kassen toegepast en blijkt te resulteren in een zeer geschikt lichtklimaat voor de teelt van allerlei soorten potplanten.

De realisatie van een kas met zo'n lens en met deze eigenschappen geeft een aantal bouwkundige uitdagingen. Zo is het kasdek asymmetrisch uitgevoerd om het lens-oppervlak te maximaliseren en moest een volgmechaniek worden ontwikkeld waarmee de collector gedurende dag steeds in de zich verplaatsende brandlijn kan worden gehouden. In principe kan met de positionering van de collector in, of juist een beetje ernaast of volledig erbuiten, de lichttransmissie van de kas tussen bepaalde grenzen traploos worden geregeld. Deze mogelijkheid is in het huidige project evenwel niet gebruikt. De collector is steeds zo goed mogelijk in het brandpunt gehouden, waardoor zoveel mogelijk direct licht werd afgevangen en er maximaal energie kon worden verzameld.

Om ruimte te bieden aan de beweging van de collector heeft de kas een fors verhoogde goot ten opzichte van de tralie. Ook is er gebruik gemaakt van een nieuw ontwikkeld schuif-luchtraam, waarmee schaduwwerking van de ene kap op de volgende bij opening van de ramen voorkomen wordt. Bovendien draagt dit raammechaniek bij aan voldoende vrije ruimte voor de verplaatsing van de collector in de nok van de kas.

De kas was eind maart 2011 gereed, wat goed op tijd was om het directe licht met de collector weg te kunnen schermen. In de winterperiode is de hoeveelheid direct licht immers klein en zijn de intensiteiten laag waardoor er, ook bij schaduwminnende teelten in die periode geen behoefte aan schaduw is. In de periode van maart tot en met 15 oktober heeft de zonnecollector gemiddeld 20% van het directe zonlicht onderschept. Hartje zomer is dit percentage wat hoger en op de uren dat de zon in juni op z'n hoogste punt staat wordt zelfs 30% van het directe licht onderschept. In de ochtend en aan het eind van de dag is de onderschepping echter veel lager of zelfs 0 en in de periode van 15 oktober tot begin maart is de onderschepping per definitie 0 omdat in die periode al het licht in de kas welkom is voor de groei. Daardoor komt de jaarrond gemiddelde warmteproductie die met de kas zoals die in 2011 gefunctioneerd heeft op 19% van de directe straling. In Nederland valt er per jaar ongeveer 1900 MJ/m² aan directe straling binnen zodat de jaarlijkse warmteoogst op 360 MJ/m² uitkomt, ofwel ruim 11 m³ aardgas equivalenten.

De warmteproductie als functie van de intensiteit van het directe zonlicht en de positie van de zon aan de hemel ten opzichte van de kas bleek goed met een model te kunnen worden beschreven. Dit model berekent aan de hand van ray-tracing techniek hoe het licht door de lens wordt gebroken en welke verliezen er daarbij optreden. Zoals ook in de praktijk was te zien, berekent het model dat het lensrendement in de randen van de dag beduidend lager is dan in het midden van de dag. Bij grote hoeken van inval lopen de verliezen door allerlei reflecties fors op, waardoor de fractie afgevangen licht verre van constant is.

Als de collector zou zijn uitgevoerd als CPVT-collector (een collector die zowel warmte als elektriciteit produceert), dan had er met een onderschepping van 19% van de directe straling en een collectorrendement van 15% 15 kWh aan elektriciteit kunnen worden voortgebracht. In het afgelopen jaar zijn een tweetal prototypes voor CPVT-collectoren in de DaglichtKas beproefd. De ervaringen met het tweede prototype laten zien dat dit potentieel van 15 kWh per m² per jaar realistisch is. In 2012 zal dit als vervolg op het experiment van 2011 worden beproefd. Dan worden de technische installaties geplaatst die daadwerkelijke stroom uit het stopcontact mogelijk maken.

Het kasklimaat dat in 2011 in de DaglichtKas werd gerealiseerd bleek zeer groeizaam, hoewel de lichtintensiteiten die in de kas zijn gemeten beduidend hoger waren dan verwacht en ook veel hoger waren dan gebruikelijk bij de teelt van de potplanten die in het experiment werden opgekweekt. Het kwam vaak voor (1000 uur) dat de intensiteit boven de 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ uitkwam en er waren ruim 100 dagen met een lichtsom van meer dan 12 mol/m². Dat er ondanks deze ongebruikelijk hoge lichtintensiteiten en lichtsommen toch planten met een goede kwaliteit werden voortgebracht wordt toegeschreven aan het diffuse karakter van het licht in de kas, de getemperde dagtemperaturen en de stabiel hoge RV (75-80%).

De lens in het zuiddek maakt namelijk dat het directe licht onder allemaal verschillende hoeken word doorgelaten waardoor geen scherpe schaduwen meer in de kas optreden. Een bezoek aan de kas op een zonnige dag is dan ook een bijzonder ervaring omdat het licht en tegelijk ook getemperd aandoet. Mede door de ervaringen in de DaglichtKas zal er in 2012 verder worden gekeken naar het effect van lichtintensiteit en diffuus licht op potplanten; zowel in de DaglichtKas als in andere kassen.

De lens in het zuiddek is geplaatst in de spouw van dubbel glas. Het zuiddek heeft daarom een hoge isolatiewaarde en ook het noorddek is van isolatieglas gemaakt. De kas heeft ook nog een energiescherm *et al.* deze factoren samen maken dat de kas weinig warmte nodig heeft. Het gemiddelde jaarverbruik bedraagt 16 m³ aardgas equivalenten per m² bij een stooklijn die in de winter op 18 °C en in de zomer op 20 °C ligt.

De invulling van deze warmtevraag vindt in het DaglichtKas-concept vooral plaats door een warmtepomp. Deze verwarmt de kas in de winter, gebaseerd op de warmte die in de zomer middels de collector is verzameld en die via een seizoensopslagsysteem (een aquifer) is bewaard.

De warmtepomp wordt elektrisch aangedreven, maar de stroomproductie van de DaglichtKas is niet voldoende om in de gehele elektriciteitsbehoefte van de kas te voorzien. Het tekort aan stroom kan worden ingekocht en in dat geval gaat dit op jaarbasis om 30 kWh/m² netto inkoop. Omgerekend naar primair energieverbruik bij het gemiddelde Nederlandse centrale-rendement en rekening houdend met de inzet van een ketel tijdens verwarmingspieken komt het uiteindelijke energieverbruik van de DaglichtKas in dat geval op bijna 9 m³/m² jaar. Er kan ook gebruik gemaakt worden van een kleine WKK-installatie (35 kW per ha) die op jaarbasis voldoende stroom produceert om de kas elektrisch neutraal te maken (net zoveel stroom verkoop in de zomer als stroom inkoop in de winter). In dat geval daalt het energieverbruik van de DaglichtKas naar 6 m³/(m² jaar).

Het effect van de kas op gewasgroei is bestudeerd door de teelt van een 7-tal potplanten uitgebreid te volgen (Anthurium, Areca, Asplenium, Bromelia, Calathea, Ficus en Varen 'Blue Star'). Daarnaast is oriënterend gekeken naar de groei van Phalaenopsis, Spathiphyllum en Zamioculcas. Alle gewassen bleken volgens de begeleidende groep kwekers beduidend sneller te groeien. De gewassen Bromelia en Calathea zijn vergeleken met referentiepartijen uit de praktijk en de jaarproductie lag voor deze gewassen in de DaglichtKas 10 tot 20% hoger dan in de praktijk.

Drie soorten groeiden weliswaar hard, maar voldeden niet helemaal aan de gangbare kwaliteitsnormen. Anthurium kreeg een te lichte blad- en bloemkleur, Asplenium een te lichte bladkleur en de Areca vertoonde bladschade in oude blad. Het lijkt echter goed mogelijk de kwaliteit van deze gewassen op niveau te brengen door een aangepaste voeding en bij de Areca door aanvullend met een licht scherm de intensiteit nog iets af te vlakken.

De goede resultaten, zowel qua teelt als qua energiehuishouding, hebben ertoe geleid dat potplantentelers enthousiast zijn over deze nieuwe ontwikkelingen en het experiment met belangstelling volgen. Het experiment en de demonstratie wordt dan ook nog een jaar voortgezet, waarin behalve aanvullende gewaswaarnemingen en de daadwerkelijke productie van stroom uit het stopcontact ook nog gekeken zal worden naar het effect van ander glas op het zuiddek. Dit dakvlak zal daarom worden vervangen door glas dat een hogere lichtdoorlatendheid in het NIR-gebied en een gelijke doorlatendheid in het PAR-gebied als waarmee in 2011 is gewerkt. Dit zal een grotere energie-dichtheid op de collector opleveren en daardoor tot een hogere energieproductie leiden.

1 Inleiding

In 2009 en 2010 hebben Bode Project- en Ingenieursbureau samen met Wageningen UR Glastuinbouw op kleine schaal experimenten uitgevoerd in een kas waarin lenzen in het zuidwaarts gerichte kasdek waren opgenomen. Deze lenzen concentreren direct zonlicht naar een brandlijn. Wanneer er in deze brandlijn een collector wordt geplaatst kan de energie in het zonlicht ter plaatse worden omgezet in warmte en zelfs in elektriciteit. In dit experiment werd aangetoond dat het principe werkt en daarmee mogelijkheden biedt om langs deze weg duurzame warmte en elektriciteit te produceren. De techniek is bestemd voor schaduwminnende teelten. Immers, in deze teelten is er in de zomer al snel een overschot aan zonlicht die in de referentiesituatie wordt onderschept via krijt of schaduwschermen.

In voorliggend rapport wordt verslag gedaan van het eerste jaar waarin dit principe is toegepast op semi-praktijkschaal niveau. Hiervoor is een kas van 500 m² gebouwd met 4 kappen van 30 meter lang. Alle zuidwaarts gerichte dakvlakken zijn van een lensstelsel voorzien waardoor het directe licht gebroken wordt en naar twee brandlijnen wordt afgebogen. Elke kap is voorzien van twee collectorbuizen die via een eenvoudig maar doeltreffend mechaniek in deze brandlijn kunnen worden gebracht. Wanneer de collector in het brandpunt staat wordt het afgebogen directe zonlicht afgevangen. Hierdoor wordt de lichtintensiteit in de kas getemperd, wat de kwaliteit van de planten die in de kas geteeld worden sterk bevordert. De toegepaste collectoren zetten het afgevangen zonlicht om in warmte. Een klein gedeelte van de collectoren is uitgevoerd als een zogenaamde CPVT-collector, wat betekent dat de collector naast warmte ook elektriciteit uit het geconcentreerde zonlicht kan maken.

In het project dat in dit rapport wordt beschreven is gedurende bijna een jaar gemeten aan het effect van het systeem op de gewasgroei, de verzameling van thermische energie door de collector, de lichtintensiteiten in de kas en de warmtevraag van de kas. Ook is middels verschillende prototypes van PV-cellen de potentie voor de duurzame elektriciteitsproductie die met de kas kan worden gerealiseerd bepaald.

In hoofdstuk 2 wordt de essentie van de technologie die in de DaglichtKas is toegepast uitgelegd en in hoofdstuk 3 wordt uiteengezet hoe deze techniek in bouwkundige zin is geïmplementeerd.

Hoofdstuk 4 gaat specifiek in op details van de werking van het collectorsysteem en Hoofdstuk 5 beschrijft de overall prestatie van de kas. Er wordt stilgestaan bij het temperatuur en vochtregime, de lichtcondities in de kas en de CO₂ concentratie.

Hoofdstuk 5 gaat in op de jaarrond energiehuishouding, de bijdrage van duurzame energie daarin en de wijze waarop dit via het gebruik van een aquifer, een warmtepomp, een ketel en een WKK-installatie wordt gerealiseerd. Het blijkt dat de DaglichtKas uitkomt op een netto jaarlijks energieverbruik van 6 tot 9 m³ aardgas (equivalenten) per m², afhankelijk van het feit of de kas met een kleine WKK-installatie wordt uitgevoerd of niet.

Hoofdstuk 6 gaat in op de gewasontwikkeling die in de zomer van 2011 is waargenomen. De gewasgroei was boven verwachting, wat voornamelijk is toegeschreven aan het diffuse karakter van het licht in de kas en de goede klimaatbeheersing, waardoor hogere lichtintensiteiten kunnen worden geaccepteerd. Het onderzoek in de DaglichtKas heeft daarmee opnieuw een impuls gegeven aan de belangrijkste ontwikkeling in de potplantenteelt van de laatste jaren, namelijk een vergroting van de lichtniveaus die toegelaten kunnen worden.

Het anders omgaan met licht en de inpassing van duurzame energie worden dan ook door tuinders als belangrijkste toekomstige ontwikkelingen voor de potplantenteelt gezien. Dit wordt bondig beschreven in hoofdstuk 7 waar een aantal tuinders hun visie op het project hebben verwoord.

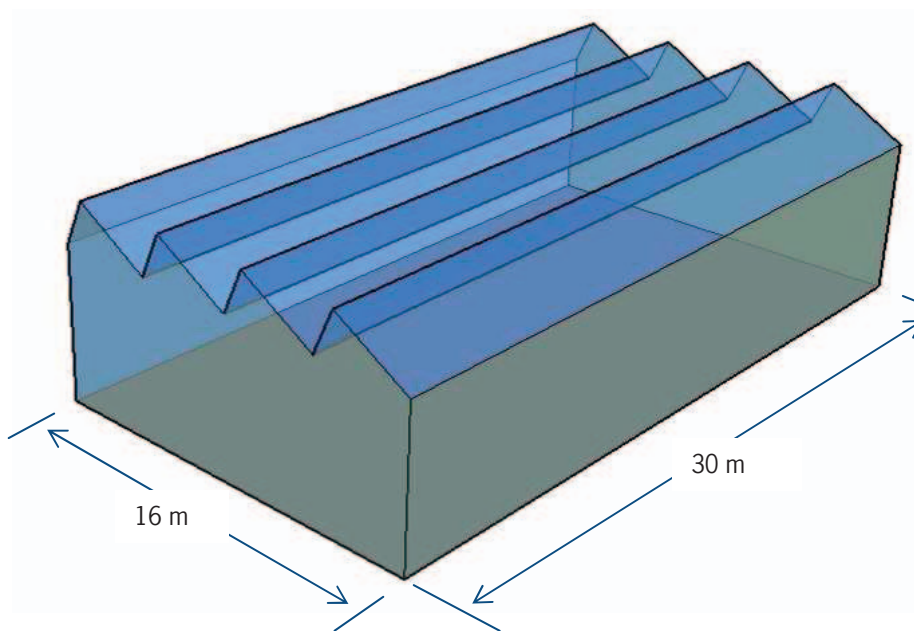
De interessante resultaten en ervaringen van 2011, maar ook het feit dat de elektriciteitsproductie tot nu toe alleen nog maar als potentie in kaart is gebracht en nog niet daadwerkelijk in stroom uit het stopcontact heeft geresulteerd, hebben de aanleiding gevormd tot het besluit om het project nog een jaar te vervolgen. Hiermee wordt in 2012 doorgedaan met het onderzoek naar licht en gewasgroei in de potplantenteelt en komt er een praktisch werkende PV-installatie voor schaduwminnende teelten beschikbaar. Tevens zal dan blijken of de energieproductie inderdaad nog verder kan toenemen door een ander type glas in het zuiddek te plaatsen. Glas dat een hogere transmissie in het NIR-gebied oplevert. Het voorliggende rapport is daarom een tussenrapportage, die eind 2012 zal worden opgevolgd door een eindrapport over de experimenten in de DaglichtKas.

2 Kerntechnologie in de DaglichtKas

De sleuteltechniek die in de DaglichtKas wordt toegepast is het gebruik van de fresnellens om direct zonlicht te concentreren in een brandlijn. De hogere energie-dichtheid in deze brandlijn geeft de mogelijkheid om met minder materiaal de zonne-energie om te zetten in warmte en elektriciteit. Het direct zonlicht uit een 1.6 meter breed oppervlak wordt door de lens afgebogen naar een streep van zo'n 4 cm. Het omzetten van direct licht naar warmte en elektriciteit kan in die 4 cm gebeuren in plaats van op die 1.6 meter. Voor de omzetting van licht naar elektriciteit betekent dit een forse vermindering van de benodigde hoeveelheid PV-materiaal en voor de omzetting van licht naar warmte is er slechts één buis in de brandlijn nodig. Bovendien kan in deze brandlijn desgewenst een veel hogere temperatuur worden verkregen dan uit niet-geconcentreerd licht.

Het concentreren van het directe licht betekent ook dat direct en diffuus zonlicht van elkaar worden gescheiden en daarmee apart behandeld kunnen worden. Dit geeft de mogelijkheid om selectief het directe licht te onderscheppen. Voor teelten waarin veel gebruik gemaakt wordt van schaduwschermen opent dit de mogelijkheid voor een heel snelle en nauwkeurige regeling van de lichtintensiteit van de kas. Daar waar standaard beschaduwstechnieken gebaseerd zijn op schermen met een vaste schaduwfactor heeft de installatie in de DaglichtKas de mogelijkheid voor een traploos instelbare beschaduwingsfactor. De regelbare daglichtinstallatie in de DaglichtKas is daarmee enigszins vergelijkbaar met andere traploos instelbare schaduwsystemen, zoals het diafragmascherm en het lamellensysteem wat in de ZonWindKas is toegepast. Het regelbereik van de traploze beschaduwing in de DaglichtKas ligt echter in een ander gebied (de maximale scherming is beduidend lager dan bij andere schermssystemen), maar de regelkarakteristiek is bij wisselend bewolkt weer beduidend sneller.

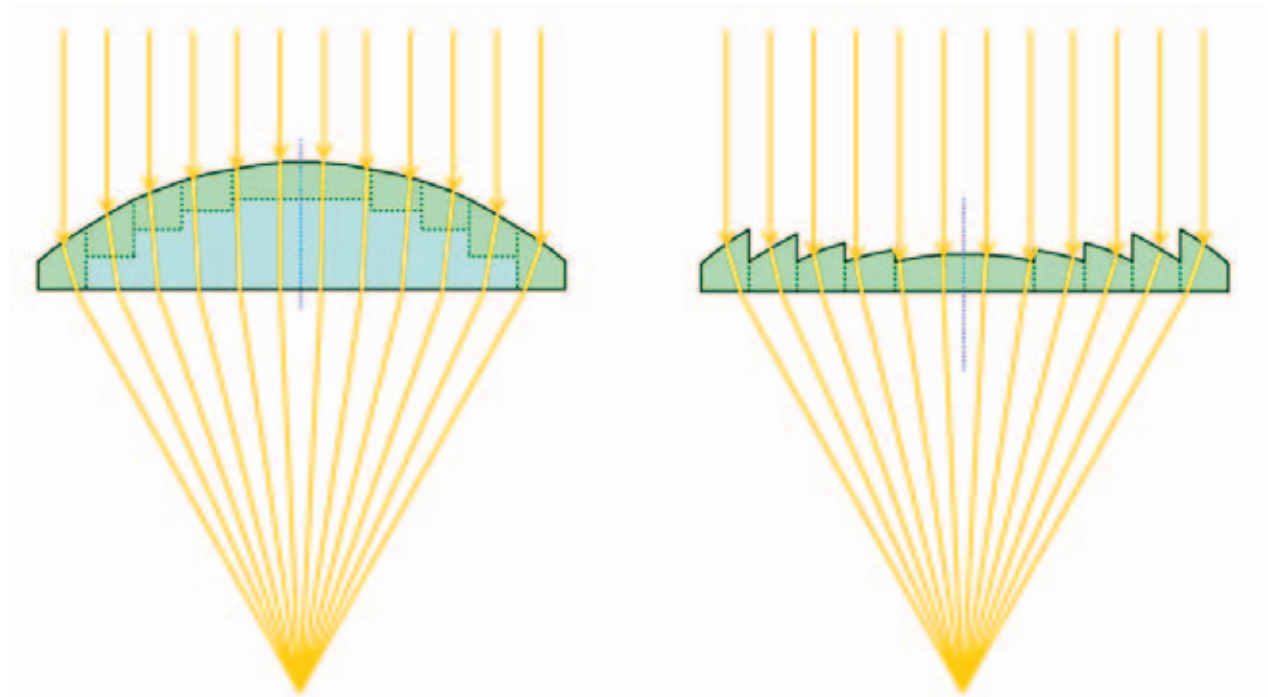
In dit hoofdstuk wordt de essentie van de fresnellens uitgelegd en wordt nader ingegaan op de mogelijkheden voor de continue regelbaarheid van de schaduwwerking.



Figuur 2.1. Schets van de DaglichtKas zoals die bij het IDC in Bleiswijk is gebouwd.

2.1 De Fresnellens

De voorloper van de huidige DaglichtKas ging als FresnelKas door het leven omdat het gebruik van de Fresnellens één van de belangrijkste componenten in het ontwerp is. De Fresnellens is een gesegmenteerde lens, waardoor de bolle (of holle) vorm van een lens in een relatief dun oppervlak kan worden verwerkt. Dit is geschetst in Figuur 2.2. Bij een loodrechte hoek van inval, zoals in de tekening, gedragen een bolle lens of een Fresnellens zich hetzelfde. Bij schuinere hoeken van inval geeft een Fresnel lens echter wat meer verstrooiing dan een bolle lens omdat een deel van het licht via de opstaande kantjes wordt gebroken en dus niet in het brandpunt zal komen. Dit effect wordt groter naarmate de lens dunner wordt. Een dunnere lens heeft immers meer opstaande vlakjes nodig om de kromming te kunnen volgen.



Figuur 2.2. De vergelijking van een gewone lens (links) met een Fresnel lens (rechts). De lichtbreking is gelijk maar de Fresnellens is veel dunner.

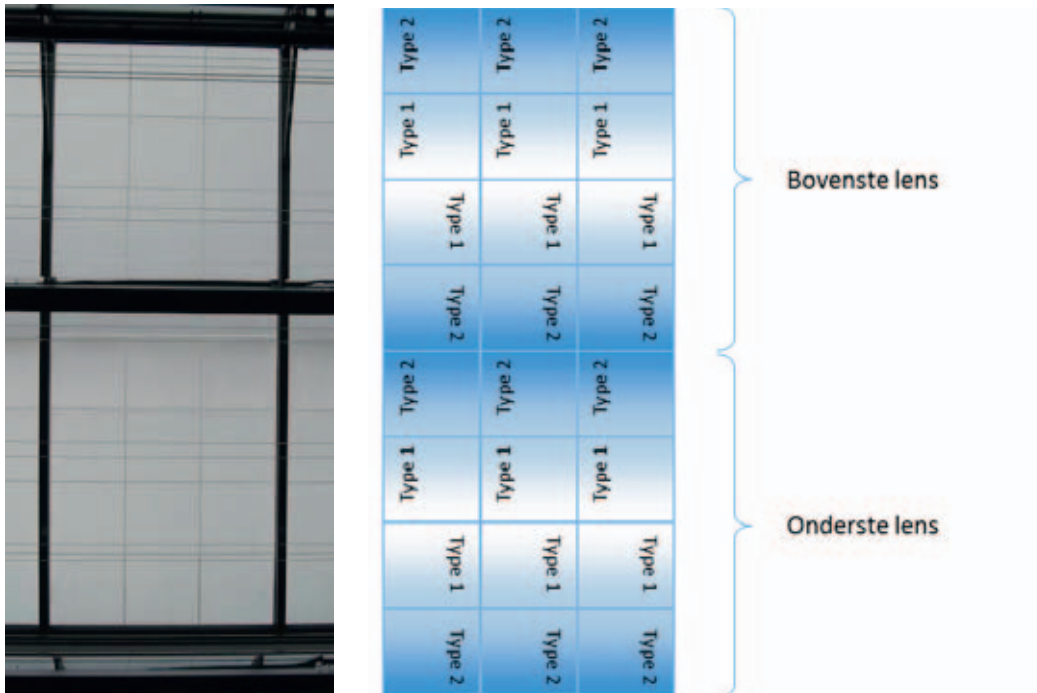
In de tekening van Figuur 2.2. zijn alle segmenten waarin de lens is opgedeeld even breed, behalve de middelste. Hierdoor wordt de lens naar de rand toe dikker. Er kan ook gekozen worden voor een constante hoogte van de segmenten. De segmenten zullen dan naar de rand toe smaller worden. De fresnellens die in de DaglichtKas wordt gebruikt bestaat uit een combinatie van beide mogelijkheden. De middelste segmenten zijn allemaal even breed, terwijl de segmenten naar de rand toe smaller worden.

Bij nauwkeurige bestudering van Figuur 2.2. is te zien dat de bovenkantjes van de segmenten precies de kromming van de bolle lens volgen waar de fresnellens van afgeleid is. Wanneer het licht niet precies naar een punt gefocussed hoeft te worden, maar wanneer concentratie naar een smal vlakje ook voldoet kan de vorm van de fresnellens nog wat vereenvoudigd worden door geen bolle vlakjes te gebruiken, maar smalle rechte vlakjes. Aangezien de breedte van de collector in de DaglichtKas 4 cm bedraagt is er van deze vereenvoudigingsmogelijkheid gebruik gemaakt.

De lens die gebruikt is in de DaglichtKas heeft een brandpuntafstand van 1.875 meter. Als de lens in de vorm van een bolle lens zou zijn gemaakt zou de lens op het dikste punt zo'n 50 cm dik zijn geweest. Nu de lens als Fresnellens is uitgevoerd bedraagt de dikte slechts 3 mm. Zo'n lens kan dus gemakkelijk in de spouw van isolatieglas worden aangebracht. Op deze manier blijft de lens schoon en krijgt de kas tegelijkertijd een goed isolerend kasdek.

Een praktisch punt in de toegepaste lens is de keus voor een lens die samengesteld is uit 4 'tegels'. In Figuur 2.2. blijkt dat de lens een symmetrieas heeft, waardoor een fresnellens productie-technisch uit twee gelijke delen kan worden samengesteld die 180° ten opzichte van elkaar gedraaid zijn. In de DaglichtKas, waar in de zuidwaarts gerichte dakvlakken steeds twee lenzen zitten van elk 154 cm breed, zou dus gewerkt kunnen worden met 4 stroken

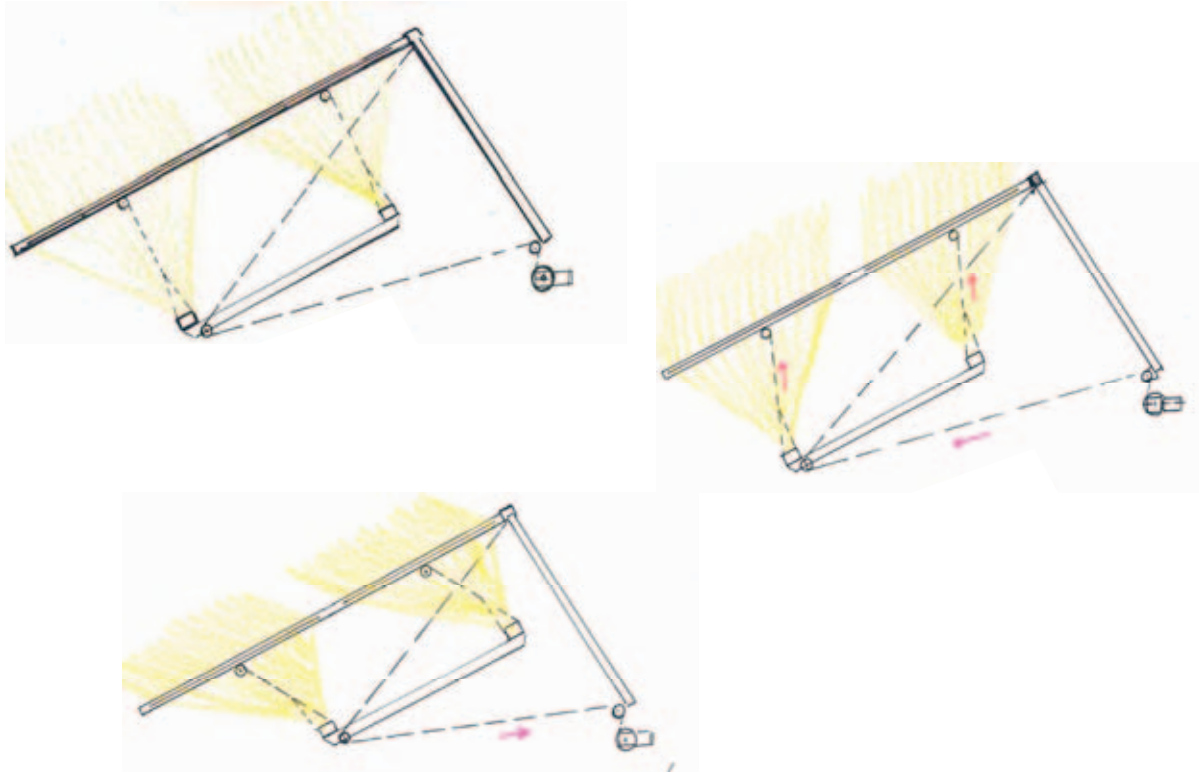
van 77 cm breedte en 120 cm lengte. Deze stroken kunnen dan, gaande van beneden naar boven in het dakvlak, telkens om en om tegen elkaar worden gelegd. Zulke stroken zouden gemakkelijk met een extrusie-proces kunnen worden gemaakt wanneer er grote oppervlakken volgens het DaglichtKas-principe zouden worden uitgevoerd. Vanwege de beperkte schaalgrootte van de demonstratiekas op het IDC kon de lens echter niet tegen acceptabele kosten middels zo'n extrusieproces worden vervaardigd, en is gekozen voor een veel goedkopere spuit-giet techniek. De maximale oppervlakte die daarbij gemaakt kon worden was echter beperkt tot maximaal 0.20 m² zodat één lens van 1.54 m breed en 1.20 m lang niet uit twee delen, maar uit 12 'tegels' moest worden gemaakt. Onderstaande figuur toont een foto en een schets van de gebruikte lens.



Figuur 2.3. Samenstelling van de twee lenzen per dakvlak uit 24 tegels, waarvan 12 van het Type 1 (centrum-delen) en 12 van het Type 2 (randdelen). Links is een foto uit de kas, rechts is een schematische weergave.

2.2 Het zonvolgmechaniek

Gedurende de dag verplaatst de zon zich over de hemelkoepel zodat de positie van de brandlijn op elk moment van de dag op een andere plek ligt. De collector moet dus verplaatst kunnen worden om het brandpunt te kunnen volgen. Onderstaande schets geeft het principe weer van de verplaatsing van de collector.



Figuur 2.4. De collector kan heen en weer en naar boven en naar beneden worden verschoven om de verplaatsing van de focus te kunnen volgen (Tekeningen Renny van de Laar).

Omdat de twee lenzen in het dak identiek zijn verschuiven de twee brandlijnen parallel aan elkaar en kunnen de twee collectoren samen als één unit worden bediend. In de DaglichtKas is hiervoor een uitgekiend, maar eenvoudig systeem ontwikkeld dat met twee trekdraden de collectoren over een groot bereik door de nok van de kas kan verschuiven. Rondom het hoogste punt van de zon is de benodigde verplaatsing klein, ongeveer 0.3 cm per minuut. Naar de randen van de dag loopt de benodigde verplaatsingssnelheid in de richting parallel aan het dek op naar 0.8 cm per minuut.

2.3 Variabele beschaduwing

De stralingsintensiteit van de zon kan sterk fluctueren. Met name op dagen met wisselend bewolkt weer kan de hoeveelheid zonlicht binnen een minuut van 300 naar 800 W/m² en weer terug. De grootste deel van deze variatie wordt bepaald door wisselingen in de directe straling. Als er een wolk voor de zon schuift wordt het directe licht geblokkeerd, terwijl het diffuse licht daar nauwelijks door beïnvloed wordt.

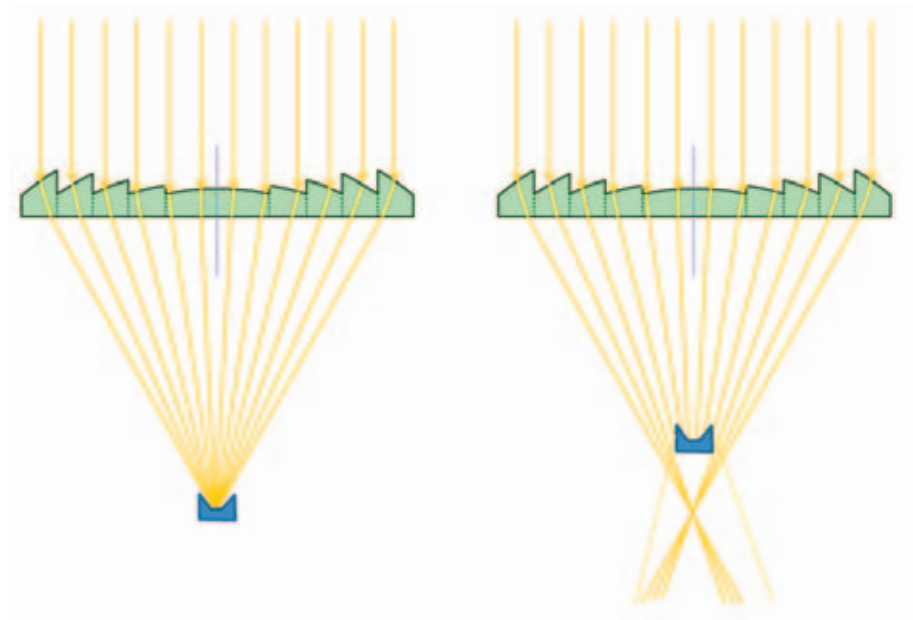
De doorlatendheid van de kas voor diffuus licht is ongeveer 50%. Dit is vrijwel onafhankelijk van de positie van de collector. Voor het directe licht hangt het heel sterk van de positie van collector af hoeveel licht er tot op gewasniveau binnendringt. Als de collector in het focuspunt staat wordt er veel licht onderschept, zodat slechts 20% van het directe licht op gewasniveau gemeten wordt. Wanneer de collector een stuk naast het brandpunt wordt gezet zal het directe licht, voor zover dat niet gereflecteerd of geabsorbeerd wordt door de twee glaslagen, de lens en constructiedelen, kunnen doordringen tot op gewasniveau. De DaglichtKas heeft daarmee een sterk variabele beschaduwingsfactor.

Wanneer de schaduwfactor middels een getal moet worden uitgedrukt vormt de eigenschap van de DaglichtKas echter een probleem. Voor een standaard-schermsysteem volgt de beschaduwingsfactor simpelweg uit de fractie van het licht dat door het scherm wordt weggenomen en die is nagenoeg onafhankelijk van het soort licht. Bij de DaglichtKas is de schaduwwerking wél sterk afhankelijk van het soort licht.

Als we veronderstellen dat op een bepaald moment de diffuse lichtintensiteit buiten $400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ is en de directe lichtintensiteit $1300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ dan is de lichtintensiteit in de kas $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ uit diffuus licht en zo'n $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ uit direct licht. Samen is dit $500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ en is de lichttransmissie van de kas dus $500/1700 = 29\%$. Schuift er dan een wolk voor de zon, dan wordt de diffuse lichtintensiteit buiten bijvoorbeeld $500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ is en de directe lichtintensiteit praktisch 0. De binnen-intensiteit dan $250 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ en de lichttransmissie is dan 50%. In feit is het schaduwpercentage dat de collector levert van het ene op het ander moment veranderd van 41% naar 0%¹. Zodra de wolk voor de zon wegschuift geeft de collector weer de eerder berekende schaduwfactor van 41%.

Door de specifieke werking van de collector op direct licht schiet zo'n beschaduwingsfactor in feite bij wisselend bewolkt weer steeds heen en weer tussen deze twee waarden.

Naast bovengenoemde variatie in beschaduwingsgraad tussen 0 en de maximumwaarde is deze maximumwaarde ook regelbaar via de plaats van de collector ten opzichte van het brandpunt. Onderstaande figuur laat schematisch zien dat door de collector bewust boven het brandpunt te hangen een deel van het directe licht niet afgeschermd wordt.



Figuur 2.5. Variabele schaduwwerking. Links geeft een maximale onderschepping van direct licht. In de rechterFiguur is de collectro bewust boven de focuslijn gezet. Hierdoor wordt een deel van het licht niet onderscheept en is de beschaduwing minder.

Deze eigenschap van de DaglichtKas geeft de mogelijkheid om bijvoorbeeld aan de randen van de dag minder direct licht weg te schermen en alleen midden op de dag maximaal te schermen. Dit zou een hogere lightsom over de dag kunnen geven, terwijl de maximale intensiteiten toch beperkt blijven.

In het experiment van 2011 is deze tweede mogelijkheid niet gebruikt. De nadruk van het experiment lag namelijk in het maximaliseren van de energie-opbrengst en niet in het maximaliseren van de gewasgroei. Bovendien laat de DaglichtKas van zichzelf ook al zien dat de onderschepping van direct licht in de randen van de dag relatief kleiner is dan rond het middaguur. Bij grotere hoeken van inval tussen het directe licht en de Fresnellens neemt de verstrooiing van de lens toe en 'glijpt' er dus meer direct licht langs de collector.

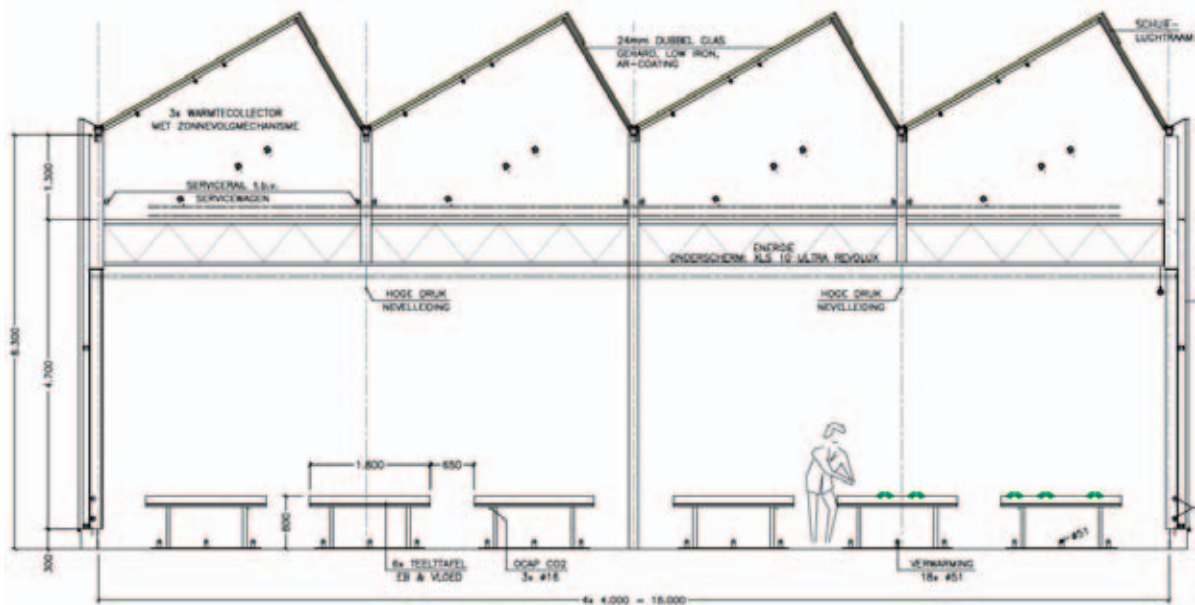
1 41% schaduw door de collector volgt uit het feit dat in de geschetste situatie bij direct licht zonder collector in het brandpunt de lichttransmissie $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ uit diffuus plus $650 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ uit direct licht = $850 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ zou zijn. De collector heeft dit gereduceerd naar $500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ en dus is de schaduwwerking van de collector $350/850 = 41\%$.

3 De bouw van de DaglichtKas

Bij de bouw van de DaglichtKas is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van standaarden die in de tuinbouw gebruikelijk zijn. Er is gekozen voor een 4 meter kap op een tralie van 8 meter en een standaard teeltsysteem. Ook het energiescherm is volledig volgens de gangbare standaarden aangebracht.

De kas is voorzien van een buizenet onder de teelttafels voor de verwarming en een apart geregeld gevelnet dat zorgdraagt voor de compensatie van de extra verliezen langs de gevels. Ten behoeven van een goede beheersbaarheid van de luchtvochtigheid is een vernevelingsinstallatie aangebracht.

Naast alle bovengenoemde standaard-onderdelen zijn er drie in het oog springende bijzonderheden, namelijk het asymmetrische kasdek, het feit dat de goot een heel stuk boven de tralie uitsteekt en het gebruik van schuif-luchtramen. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de achtergrond van deze afwijkende bouwwijze.



Figuur 3.1. Dwarsdoorsnede uit de bouwtekening van de DaglichtKas.

3.1 Het asymmetrisch kasdek

De lenzen die het zonlicht in een de brandlijn focuseren werken het beste als de zon met een kleine hoek van inval binnenkomt (dus min of meer haaks op het kasdek schijnt). In standaard kassen zijn de hoeken van inval bij het noordwaarts gerichte dakvlak meestal groot (meer dan 50°) en in het voor- en najaar valt een groot deel van het directe licht zelfs van achteren tegen het noordwaarts gerichte dakvlak. Daarom is alleen het zuidwaarts gerichte dakvlak geschikt voor de toepassing van het Fresnellenzen-systeem.

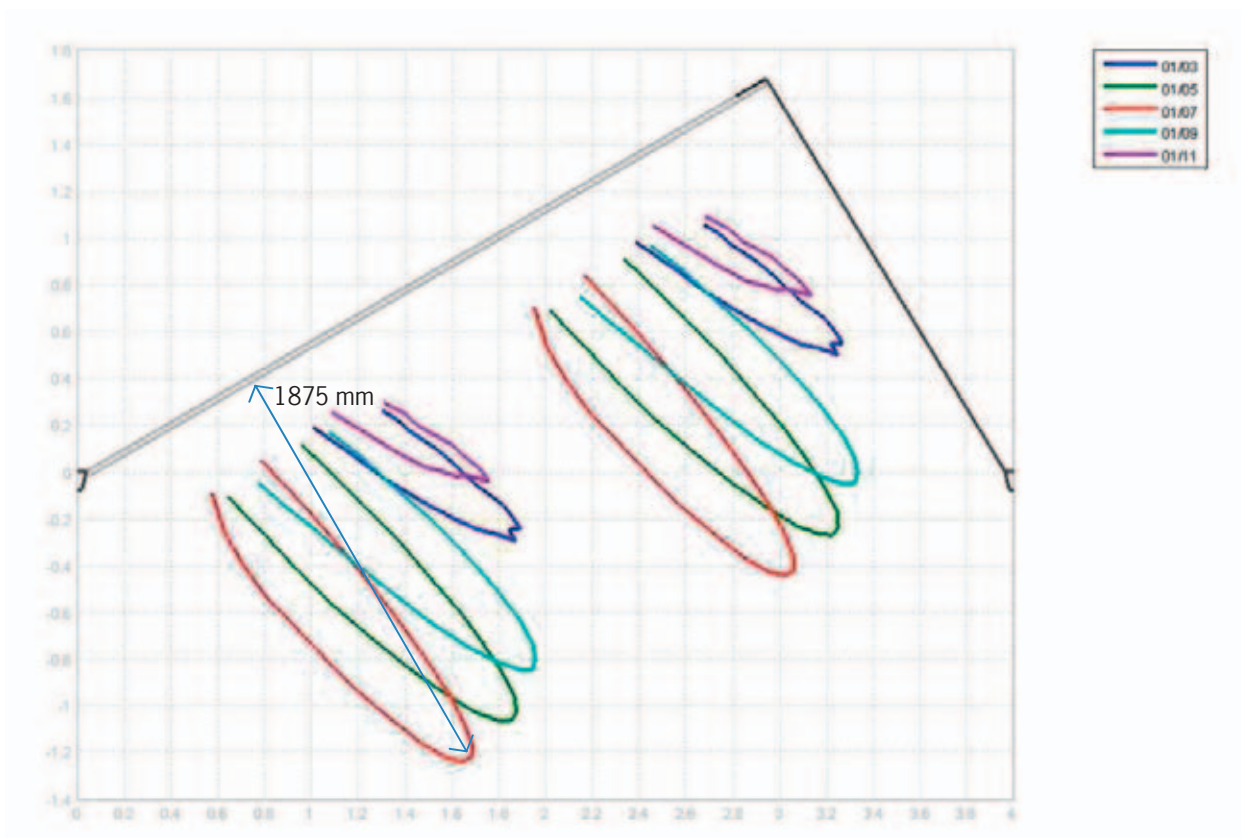
Wanneer in een symmetrisch kasdek alleen op de zuidwaarts gerichte vlakken lenzen worden gelegd hangt het lensoppervlak per m² kas direct samen met de hellingshoek. Bij de standaard hellingshoek van ongeveer 25° bedraagt het oppervlak van het zuidvlak in een symmetrische kas 55% van het kasoppervlak. Bij een dakhelling van 35° wordt dit 61% en bij 45° is dit 71%. Het vereist dus in een symmetrische kas een heel steil dak, om een behoorlijk lensoppervlak in het zuidvlak te krijgen. Bovendien komt er bij een symmetrisch dek met een niet al te grote dakhelling in de zomer nog regelmatig direct licht met een hoge intensiteit door noorddek, wat ongewenst is bij de teelt van schaduwminnende teelten.

Een oplossing voor beide problemen wordt gevonden door het dek asymmetrisch te maken. In de DaglichtKas is gebruik gemaakt van een lang zuidwaarts gericht kasdek onder een vrij vlakke hoek (30°), maar met een grote daklengte van 3.5 meter. Bij een kapmaat van 4 meter beslaat het zuiddek daarmee 87.5% van het kasoppervlak. Het noorddek maakt een hoek van 54°, waardoor de nok van de kas een vrijwel haakse hoek maakt.

De hoek van het noorddek is zo steil, dat de zon als die op het hoogste punt aan de hemel staat (op een elevatie van 62°) heel vlak over het noorddek scheert (een hoek van inval van 86°). Bij een dergelijk grote hoek van inval is een dakvlak vrijwel 100% reflecterend, waardoor het noorddek praktisch geen direct zonlicht door zal laten. Alleen aan de randen van een zomerse dag, wanneer de zon opkomt met een azimuth kleiner dan 90° en ondergaat bij een azimuth groter dan 270° kan er enig direct zonlicht door het noorddek binnenkomen. De intensiteit is op die momenten echter nog klein omdat het het begin en eind van de dag betreft. Toch is om deze reden het noorddek in de vorm van diffuus glas uitgevoerd.

3.2 Vrije ruimte in de nok

De fresnellens die voor de DaglichtKas ontworpen is heeft een brandpuntsafstand van 1.875 m zodat de collector op die afstand ten opzichte van de lens moet kunnen worden gebracht op het moment dat de zon loodrecht op het kasdek invalt (hoek van inval = 0°). Bij de verplaatsing van de zon langs de hemelkoepel worden de hoeken van inval steeds anders en verplaatst het brandpunt. Onderstaande figuur laat zien welke paden het brandpunt gedurende de dag doorloopt op verschillende dagen van het jaar. De rode lijn geldt voor 1 juli en dus voor de tijd van het jaar dat de zon midden op de dag loodrecht op het kasdek invalt. In dat geval ligt het focuspunt precies in de brandpuntsafstand. Het blijkt dat op andere momenten van het jaar en op andere momenten van de dag het brandpunt wat dichterbij de lens komt te liggen en dat het brandpunt naar rechts verschuift. Via wat goniometrie blijkt dat bij de gebruikte brandpuntsafstand van 1.875 meter betekent dat de collector een vrije ruimte van 1.30 meter onder de bovenkant van de goot nodig heeft. Doorrekenend met wat extra hoogte voor vanwege het feit dat de collector een zekere dikte heeft, ruimte voor een service-platform en voor aandrijfmechanieken die voor de verplaatsing van de collector zorgen komt de bovenkant van de tralieligger op 1.60 meter onder de goot uit.



Figuur 3.3. Posities van het brandpunt gedurende de dag voor verschillende dagen van het jaar. De lussen worden steeds van linksboven, via de onderkant en dan weer naar rechtsboven doorlopen.

3.3 Het schuifluchtraam systeem

Standaardkassen hebben meestal om en om luchtramen aan beide zijden van de nok. Ook zijn er kassen met dubbel- of enkelzijdige doorlopende nokluchting. Vanwege de lenzen, kan er geen luchting in het zuiddek worden aangebracht, dus moet er per definitie enkelzijdige luchting worden gebruikt, in dit geval in het noorddek. Wanneer hier een standaardluchtmechaniek voor wordt gebruikt zal dat echter schaduwen op het volgende zuiddek geven en bovendien zou het bedieningsmechanisme voor zo'n standaard doorlopende nokluchting de bewegingsvrijheid van de collector belemmeren. Zoals in Figuur 3.3. te zien is moet de collector van september tot april aan het eind van de dag ver naar rechts schuiven om het focuspunt te kunnen bereiken. Dat zou niet kunnen als daar ook tandheugels zouden zitten voor de raambediening.

Om de twee bovengenoemde redenen heeft de DaglichtKas een schuifluchtraamsysteem. Dit is geschetst in figuur Figuur 3.4.



Figuur 3.4. Het schuifluchtraamsysteem in gesloten positie (links) en in gedeeltelijk geopende positie (rechts).

De ramen in één nok worden bediend door een doorlopende as die tandheugels naar boven duwt of naar beneden trekt. Hiermee wordt een smal doorlopend raam (50 cm hoog) op een kleinere of grotere kier getrokken waardoor de kas kan ventileren. Onderstaande foto toont het schuifluchtraamsysteem zoals dat in de kas is geïmplementeerd.



Figuur 3.5. Foto van het schuifluchtraamsysteem met maximaal geopende ramen.

De bouw van de DaglichtKas is gestart op 1 november 2010. Op 15 februari 2011 was de kas glasdicht.



Figuur 3.6. Januari 2011. De glasplaten waartussen de lenzen zitten worden met een kraan in de zuidwaarts gerichte dakvlakken gehesen.



Figuur 3.7. Februari 2011. Nadat de kas glasdicht is gemaakt kunnen de installaties worden aangebracht.

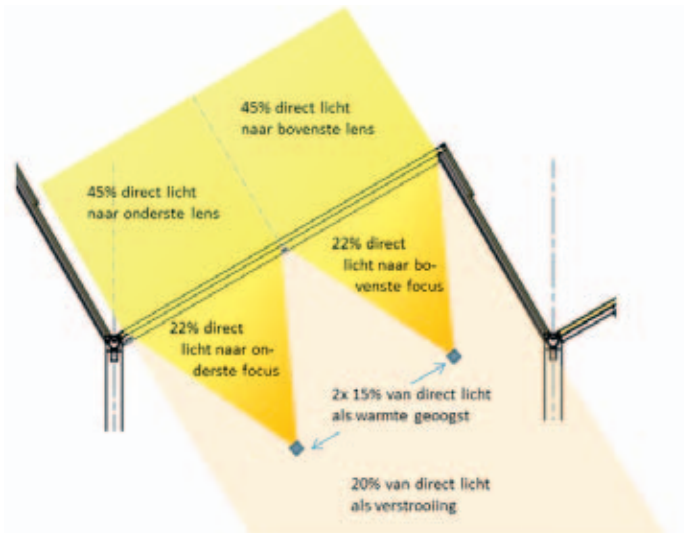
4 Energieverzameling met de zonnecollector

De DaglichtKas is ontworpen om gedurende de zomer energie uit direct zonlicht te verzamelen. Over de zomerperiode van 2011 heeft de installatie vrijwel non-stop gedraaid, afgezien van een paar dagen waarop er aan de kas gewerkt moest worden. De installatie is ook een paar keer aan het eind van de dag uitgeschakeld geraakt doordat beveiligingen voor een uiterste-stand-begrenzing te krap stonden afgesteld. Al met al hebben zich echter geen wezenlijke problemen voorgedaan. Dit hoofdstuk rapporteert over de prestaties over de periode van 1 april t/m 1 november oktober en gaat in detail in op de werking van thermische en elektrische energieverzameling.

4.1 Warmteverzameling met de DaglichtKas

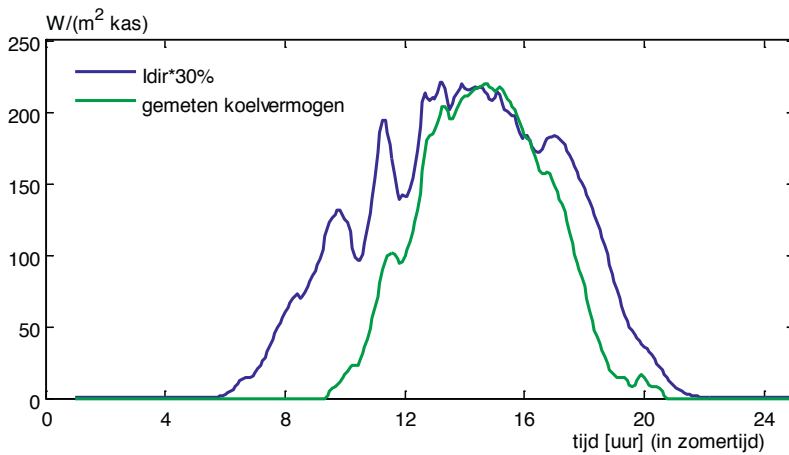
Als de collector in het brandpunt staat en er is direct zonlicht dan wordt een belangrijk deel van dit zonlicht naar de collector afgebogen. Daarnaast komt een deel van het directe licht verstrooid in de kas.

Als het zonlicht loodrecht op het kasdek invalt werkt de lens het beste, in die zin dat de verstrooiing minimaal is. Onderstaande figuur geeft een schets van zo'n ideale situatie. De getekende situatie geldt voor de momenten waarop de zon op het hoogste punt staat in de dagen rond de langste dag.



Figuur 4.1. Schetsmatige weergave van de afbuiging en verstrooiing van direct zonlicht op momenten dat de zon hoog aan de hemel staat (het middaguur rond de langste dag).

Goten en nokken maken dat niet 100% van het directe licht op de lenzen invalt, maar samen slechts 90%. Het directe zonlicht wordt middels twee 'troggen' van zonlicht naar de collector afgebogen. Daarna wordt het licht door de collectorbuizen in de vorm van warmte geogst. Bij de omzetting van licht in warmte zit een zekere verliesfactor omdat de collectorbuis is afgedekt met een glasplaatje dat een beperkte transmissie heeft (89%) en omdat de absorptie van licht op de buis lang geen 100% bedraagt. De twee keer 15% van het directe zonlicht die volgens 4.1 als warmte wordt geogst geldt voor de DaglichtKas zoals die in 2011 is gebouwd. Dit percentage kon nauwkeurig worden vastgesteld uit de vergelijking van de directe stralingsintensiteit en het koelvermogen dat nodig was om de collectorbuis op een temperatuur te houden die dicht bij de kasluchttemperatuur lag. Onderstaande figuur toont de het verloop van de directe straling maal 30% en het koelvermogen over 14 juni 2011 (beiden in W/m^2 kasoppervlak). 14 Juni 2011 was een dag met veel directe straling en ligt dicht bij 21 juni, de langste dag. De elevatie van de zon op het hoogste punt is dan 61° , zodat de zon dan inderdaad praktisch loodrecht invalt.

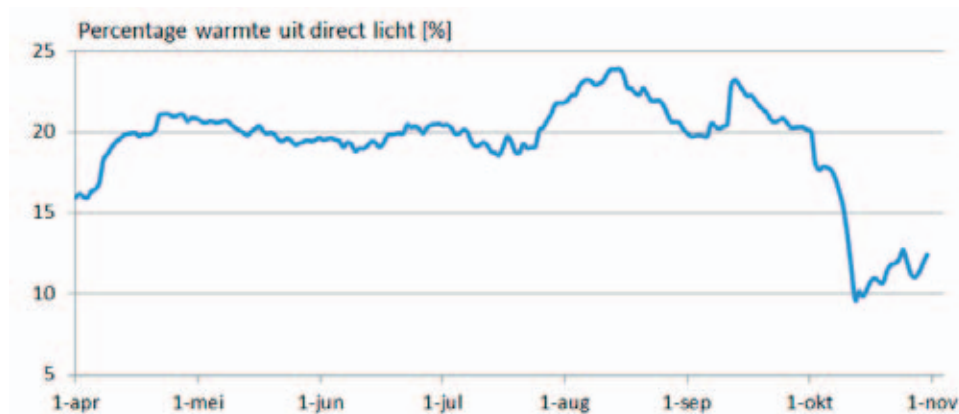


Figuur 4.2. Gemeten koelvermogen in de DaglichtKas op 14 juni 2011 in vergelijking met 30% van de directe straling.

Figuur 4.2. laat zien dat midden op de dag het koelvermogen goed samenvalt met 30% van de directe straling. Meer naar de randen van de dag neemt de verstooiing van de lens toe en zal ook de reflectie van het zonlicht op de drie glasvlakken (twee in het dek en één als afdekking van de collectorbuis) toenemen. Daarom is op die momenten het gemeten koelvermogen minder dan 30% van de directe straling.

Het valt ook op dat er aan het begin van de dag wel directe straling is, maar geen koeling. Dat komt doordat op die momenten de zon 'van achteren' tegen het zuidvlak schijnt zodat er geen brandlijn gemaakt wordt. Rond 10:00 (zomertijd) is de zon voldoende naar het zuiden gedraaid om wél een brandlijn te kunnen maken.

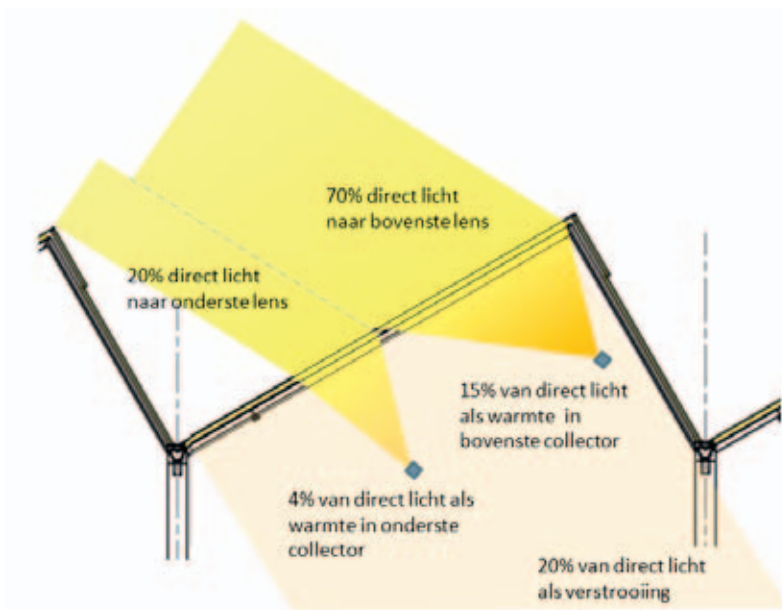
De lagere concentratiefactor in de randen van de dag en het feit dat de lens per definitie alleen kan werken binnen de azimuth range van 116° tot 276° (niet symmetrisch om het zuiden (180°) omdat de kas 16° naar het westen gedraaid is) maken dat gemiddeld genomen het percentage van het directe licht dat door de collector in warmte is omgezet elke dag een stuk lager is dan de 30% die op de gunstigste momenten gerealiseerd is. Figuur 4.3. laat het zien dat dit percentage over het jaar heen rond de 20% schommelt met uitschieters naar 24% in augustus.



Figuur 4.3. Percentage van het directe licht dat door de DaglichtKas in 2011 middels de thermische collector als zonnewarmte geogst is op een temperatuur van 28 tot 30 °C. De data zijn middels een voortschrijdend gemiddelde filter met een venster van 21 dagen afgevlakt.

Figuur 4.3. laat geen gegevens over maart zien omdat de installatie toen nog niet operationeel was, maar gegeven het feit dat werking van de collector min of meer symmetrisch over het jaar zal zijn, zal het percentage van het directe licht dat in maart als warmte middels de collector kan worden geogst ook rond de 12% liggen.

Van 1 november tot 1 maart kan de collector in de uitvoering zoals die op dit moment in de DaglichtKas is gebouwd de brandlijn niet bereiken en is het percentage van het directe licht dat in die periode geoogst kan worden dus 0%. Een andere configuratie van het volgmechanisme zou deze beperking in principe kunnen opheffen. De constructie was dan echter complexer geworden, maar belangrijker is nog dat in deze periode van het jaar de directe straling in de potplantenteelt niet als overtollige straling wordt aangemerkt. De invalshoek van de zon is laag, waardoor de intensiteit van de directe straling beperkt is, zeker wanneer dit licht door de fresnellenzen ook nog eens verstrooid wordt. Beschaduwing is in deze periode dus ongewenst. De achtergrond van het feit dat het percentage dat geoogst kan worden in maart en oktober zoveel kleiner is ligt in de vlakkere invalshoek van de zon. Figuur 4.4. toont de situatie zoals die begin oktober halverwege de dag optreedt. De collector zit dan een stuk dicht bij het dak, maar wat vooral opvalt is dat het zonlicht dan zeer ongelijk verdeeld is over de beide lenzen. Het meeste directe licht valt dan op de bovenste lens. De ongunstigere hoek van inval maakt dat de lens minder goed werkt. Daardoor blijft het percentage van het directe licht dat door de bovenste collector in warmte wordt omgezet 15%, net als in figuur Figuur 4.1, ondanks het feit dat er aanzienlijk grotere fractie van het directe licht op de bovenste lens valt.



Figuur 4.4. Schetsmatige weergave van de afbuiging en verstrooiing van direct zonlicht op momenten dat de zon laag aan de hemel staat (het middaguur begin oktober).

Overigens kan die verdeling van de warmteverzameling over de onderste en bovenste collector in de DaglichtKas niet gemeten worden omdat alleen het totale koelvermogen over alle buizen gemeten kan worden. De bovengetoonde onderverdeling is daarom afgeleid uit de resultaten van het lens-simulatiemodel (zie bijlage I).

Ondanks het feit dat in de randen van het jaar de omzetting van direct licht naar warmte behoorlijk onder de 20% zakt en in de maanden november t/m maart de collector helemaal geen warmte verzamelt, komt het jaargemiddelde rendement waarmee de DaglichtKas in 2011 energie aan het directe zonlicht weet te onttrekken op 19%. Dit komt doordat in de maanden waarin de collector niet gebruikt kan worden, of uitsluitend met een laag omzettingsrendement, de hoeveelheid directe straling zeer beperkt is.

Gegeven het feit dat er in Nederlandse omstandigheden gemiddeld 1900 MJ aan directe straling invalt betekent een warmteverzameling van 19% dat er in een gemiddeld jaar 360 MJ/m² per jaar aan warmte kan worden verzameld. Dit komt overeen met ruim 11 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar.

4.2 Elektriciteitsverzameling met de DaglichtKas

Behalve warmte, kan er uit het directe zonlicht dat in het brandpunt geconcentreerd wordt ook elektriciteit worden gemaakt. Daartoe moeten er photovoltaïsche cellen in de brandlijn worden geplaatst.

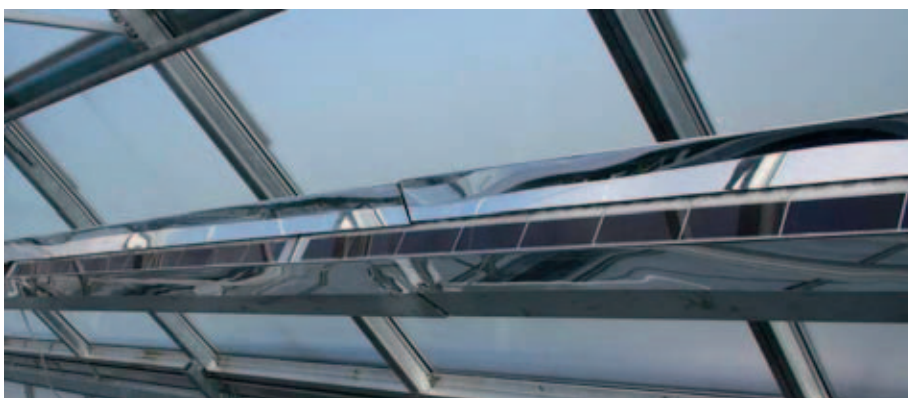
Bij aanvang van de meetperiode was de verwachting dat ruim voor de zomer een tweetal thermische collectoren zouden worden vervangen door een photovoltaïsche collector. Het soldeerproces, de laminatie van de zonnecellen op het glas en de montage van de zonnepanelen op de collectorbuis bleken echter allemaal ingewikkelder en tijdrovender dan gedacht, waardoor de PV-collector pas 15 juli in de DaglichtKas kon worden gemonteerd. Vanaf 18 juli kon de stroomopbrengst worden gemeten, maar het glas waarvan de collector was gemaakt bleek niet bestand tegen de combinatie van thermische en mechanische spanningen die in de collector optreden en bovendien bleek de warmte-overdracht naar de koelbuis onvoldoende. Grote delen van het glas waren hierdoor al snel gebroken en de daar aan vast gelamineerde zonnecellen braken op veel plaatsen mee. Figuur 4.5. toont de zwaar gehavende PV-collector op 20 augustus.



Figuur 4.5. Het eerste prototype PV-collector in de DaglichtKas is zwaar gehavend door de zomer gekomen. De gemeten stroomproductie is daarmee verre van representatief voor het potentieel van de DaglichtKas.

De PV-collector heeft elektriciteit via een omvormer aan het elektriciteitsnet geleverd (2 kWh per m² kas uit 500 MJ directe straling per m² kas, ofwel nog geen 1.5% van de directe straling), maar de hoeveelheid was door al de bovengenoemde problemen in het geheel niet representatief voor de potentie van de DaglichtKas.

Eind augustus is er daarom een tweede prototype PV-collector aangebracht (zie Figuur 4.6.).



Figuur 4.6. Foto van het tweede prototype PV-collector dat vanaf 23 augustus operationeel is geweest. Dit tweede prototype heeft de nazomer zonder enig probleem doorstaan.

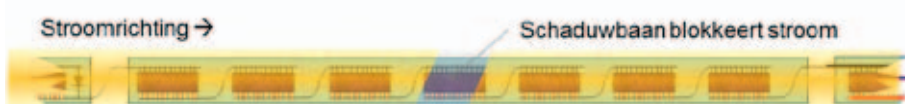
Het tweede prototype PV-collector is gebaseerd op gehard glas en bovendien wordt de sterkte van de collector niet aan het glas ontleend, maar aan een aluminium achterplaat. Daarbij is dit tweede prototype een losse module van 1.25 meter die gemakkelijk over de collectorbuis kan worden geschoven. Dit laatste is een groot voordeel ten opzichte van het eerste prototype omdat dan in geval een module onverhoopt defect zou raken, zo'n module gemakkelijk uitgewisseld kan worden. Bij het eerste prototype waren de PV-cel en de collectorbuis één samengestelde unit van 5 meter die alleen kon worden geplaatst als het systeem werd uitgeschakeld en het koelwater werd afgetapt.

Afgezien van belangrijke verschillen in de mechanische opbouw van de beide prototypes is er voor het tweede prototype een principieel andere benadering gekozen voor de oplossing van het probleem van schaduwbanen op de collector. Onderstaande foto die genomen is op een zonnige dag waarbij de lens in het brandpunt was geplaatst, laat goed zien dat er brede en smalle schaduwbaantjes dwars over de collector lopen. De brede banen worden veroorzaakt door de glasroeden. De glasroeden leiden natuurlijk tot schaduwbanen doordat er ter plaatse van de roede geen lens is en wanneer de zon niet haaks op het kasdek invalt leidt daarnaast de hoogte van de roede tot een schaduwvlek. In Figuur 4.7. zijn tussen de brede schaduwbanen ook nog twee smalle schaduwbaantjes te zien. Deze worden veroorzaakt door de randen van de lenstegels (zie Figuur 2.3.) en zijn dus het gevolg van het feit dat de lens niet met een extrusieproces is gemaakt maar met het in paragraaf 2.1 beschreven spuitgiet-proces.



Figuur 4.7. Schaduwbanen door de glasroeden en tegelrandjes in de lenzen op de collector.

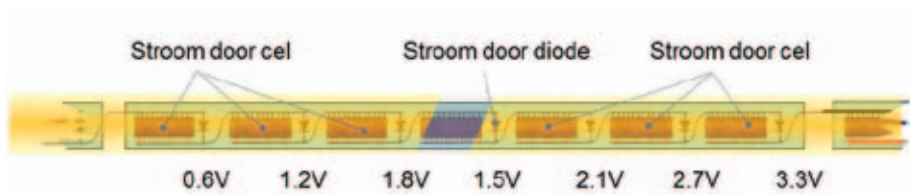
De schaduwbanen geven een groot probleem wanneer de opeenvolgende PV-cellen elektrisch gezien allemaal in serie worden geplaatst. Dit is schetsmatig weergegeven in Figuur 4.8. Door de serieschakeling van de individuele PV-cellen bepaalt de cel die de minste stroom doorlaat de totale stroom door de keten (de keten is zo sterk als de zwakste schakel). In de figuur is weergegeven dat de schaduwbaan het grootste deel van de middelste cel blokkeert en daarom wordt de totale stroom in de keten begrensd op zo'n 8% van de maximaal haalbare stroom. De schaduwbaan die slechts een klein deel van de collector beschaduwde geeft zo een heel grote beperking van de elektriciteitsproductie.



Figuur 4.8. Bij een eenvoudige serieschakeling van PV-cellen kunnen schaduwbanen leiden tot een forse beperking van de elektriciteitsproductie.

In het eerste prototype PV-collector die in de DaglichtKas is beproefd was het probleem van de schaduwbanen opgelost door de toevoeging van kortsluit-diodes. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 4.9. Daar waar een individuele cel in de keten door plaatselijke beschaduwning geen of minder stroom levert dan de andere cellen in de keten, zal de stroom via de parallelgeschakelde diode gaan lopen. De stroom wordt daardoor niet door de schaduw gehinderd. De bypass van de stroom via de diode levert echter wel een terugval van 0.3 V in de spanningsopbouw. In het geschetste voorbeeld zouden 7 cellen in serie in de onbeschaduwde situatie $7 \times 0.6 = 4.2$ Volt opleveren, maar door de beschaduwning levert dit stuk collector een spanningsopbouw van 3.3 Volt.

Het schaduwbaantje dat één van de zeven cellen bedekt leidt geeft dus geen 14% verlaging van de maximale elektriciteitsproductie van dit collectorsegment, maar 22% verlaging.



Figuur 4.9. De toevoeging van bypass diodes voorkomt de blokkering van de stroom en geeft slechts een beperkte verlaging van de spanning.

In de ontwikkeling van het eerste prototype voor de PV-collector, die gebaseerd was op het bovenbeschreven principe, is gebleken dat de oplossing van het schaduwbaan-probleem middels de bypass diodes functioneert en leidt tot een niet al te grote hinder van de schaduwbanen. Berekeningen gaven aan dat een schaduwbaan van 5% maximaal 10% vermindering van de elektriciteitsopbrengst geeft (ten opzichte van de theoretische opbrengst zonder schaduwbanen).

Het aanbrengen van de diodes is echter een arbeidsintensief proces en de afmeting van de diodes, die 30A moeten kunnen doorlaten maakt dat deze niet zo gauw in een goedkoop assemblageproces kunnen worden ingepast.

Het tweede prototype PV-collector dat in de DaglichtKas is geplaatst maakt daarom gebruik van een fundamenteel andere werkwijze. Het uitgangspunt bij deze oplossing van het schaduwprobleem is het feit dat de schaduwbanen op de collector een zuiver repeterend karakter hebben omdat de kas volgens een strak stramien is gebouwd. Als de collector wordt opgebouwd uit een serie van modules met dezelfde stramien-maat en de zonnecellen daarbinnen parallel gezet zijn dan heeft iedere module precies evenveel last van het schaduwbanen en wordt de elektriciteitsproductie niet méér gehinderd dan de relatieve breedte van de schaduwbanen. Dit is schetsmatig weergegeven in Figuur 4.10. De zeven cellen per module (in de echte module van de DaglichtKas zitten 11 cellen in één module) zijn parallel geschakeld, waardoor een module 0.6 Volt spanningsopbouw geeft, namelijk de spanning per PV-cel (zie ook Figuur 4.9). De stroom die de module levert is evenredig met het aantal werkende cellen en in dit schetsmatige voorbeeld zou dit 6 maal de stroom van één PV-cel zijn. Het elektrisch vermogen is dan 6/7 van het vermogen dat de module zou leveren zonder schaduwbaan, zodat het verlies aan elektriciteitsopbrengst precies gelijk is aan de vermindering van het lichtaanbod door de schaduwstreep.

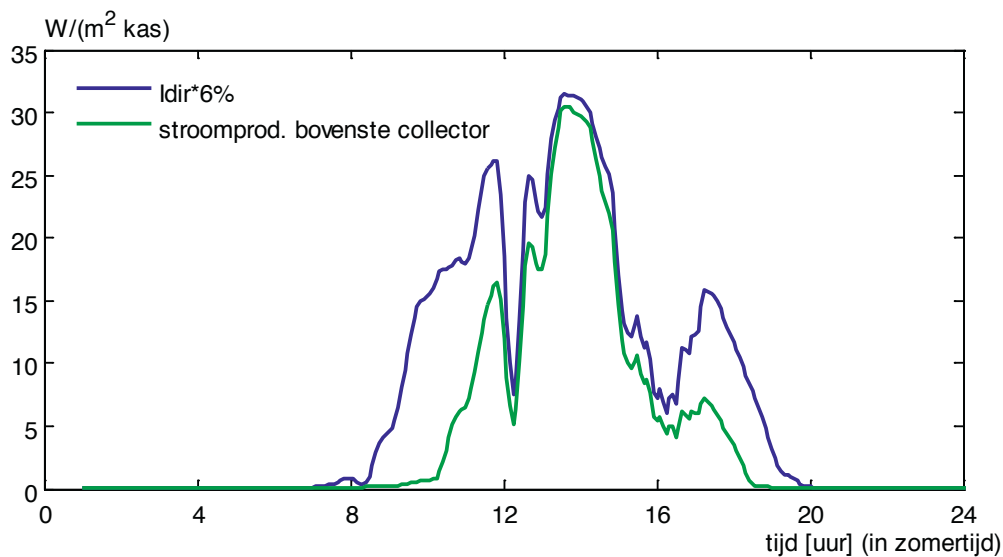


Figuur 4.10. Bij de parallel-serieschakeling heeft elke collector-module hetzelfde nadeel van de schaduwbanen en blijft het nadeel van de schaduwbanen precies gelijk aan de fractie beschaduwing. De belangrijkste eigenschap van de parallel-serieschakeling is dat er grote stromen omgaan bij een lage spanningsopbouw per meter collectorlengte.

De minimalisatie van het effect van de schaduwbanen door de parallel-serieschakeling heeft echter ook een nadeel en dat is de geringe spanningsopbouw per meter en de navenant hoge stroom die in het systeem omgaat. Vergeleken met de situatie in Figuur 4.9. is de stroom die geleverd wordt 6× zo hoog en de spanningsopbouw per collector 5.5× zo laag. In een kas als de DaglichtKas, met 11 PV-cellen per module van 1.25 meter lang betekent dit een stroom tot 300 Ampere op een mooie zomerse dag. Het transport van elektriciteit bij een dergelijk hoge stroom met een acceptabel spanningsverlies door de ohmse weerstanden in de bekabeling vraagt om dikke kabels (ordegrootte 15 mm diameter).

Het prototype dat vanaf 26 augustus in de DaglichtKas is beproefd bestond uit een serieshaking van twee modules en leverde dus 1.2 Volt. De maximale stroom die met deze module in het najaar van 2011 is gemeten bedroeg 200A. Voor een dergelijk lage spanning en hoge stroom kunnen geen standaard omvormers worden gekocht en daarom is de elektriciteitsproductie van deze twee panelen berekend uit het product van de open celspanning, de kortsluitstroom en een zogenaamde fill-factor. De fill-factor is een experimenteel te bepalen getal waarmee de iets lagere stroom en spanning tijdens bedrijf verdisconteerd wordt in vergelijking met de open celspanning en de kortsluitstroom. Anders gezegd; De spanning is tijdens bedrijf iets lager dan de open celspanning (de spanning die gemeten wordt als er slechts een héél klein stroompje loopt) en de stroom is tijdens bedrijf ook iets lager dan de kortsluitstroom. Volgens fabrieksopgave is de fill factor voor de gebruikte PV-cellen 0.78, maar omdat er in een praktijkinstallatie nog extra overgangsweerstanden en ohmse weerstanden zullen optreden is gerekend met een fill factor van 0.75.

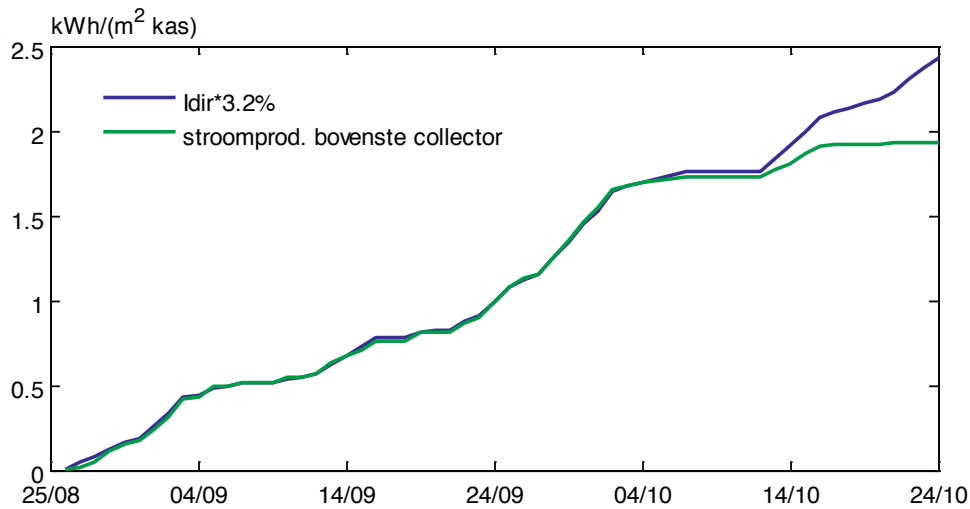
De zonnigste dag na 26 augustus was 3 september. Onderstaande grafiek toont de elektriciteitsproductie volgens de bovenbeschreven formule (dus open celspanning \times kortsluitstroom \times 0.75) en de directe straling op die dag maal 6%.



Figuur 4.11. Gemeten elektriciteitsproductie op 3 september 2011 op de bovenste collector in de DaglichtKas met het tweede prototype zonnecollector in vergelijking met 6% van de directe straling.

In bovenstaande figuur die geldt voor de elektriciteitsproductie zien we weer een vergelijkbaar patroon als in Figuur 4.2. voor de gemeten warmteproductie, namelijk dat de relatie tussen energieproductie en directe straling op het midden van de dag aanzienlijk gunstiger is dan aan de randen van de dag. Ook hier komt dit doordat de lenswerking minder zuiver is bij grotere hoeken van inval. Op dagbasis is op deze dag (3 september 2011) 0.1 kWh elektriciteit per m² kas door de bovenste collector verzameld terwijl er die dag 2.85 kWh directe straling per m² is ingevallen. Dit betekent dat op deze dag de bovenste collector 3.6% van de directe straling in elektriciteit heeft omgezet.

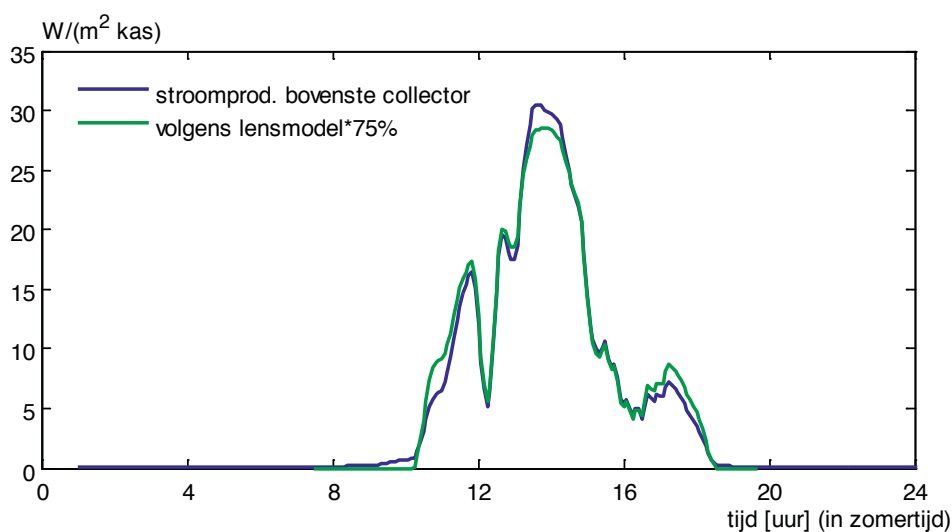
Op de onderste collector zijn geen PV-cellen gemonteerd. Met Figuur 4.4. in het achterhoofd weten we echter dat in het najaar, de bovenste collector bovengemiddeld zal presteren en de onderste collector ondergemiddeld. Het lenssimulatiemodel geeft aan dat op de betreffende dag de bovenste collector 53% van het dagtotaal oplevert en de onderste collector 47%. Bij gebruik van onderste en bovenste collector zou de gemiddelde omzettingsefficiëntie van direct zonlicht naar elektriciteit op deze dag in de DaglichtKas dus 3.4% zijn geweest.



Figuur 4.12. Cummulative elektriciteitsproductie door de bovenste collector vanaf het moment dat het tweede prototype operationeel was in vergelijking met 3.2% van de dagelijkse directe stralingssom.

Gegeven het feit dat de omzettingsefficiëntie nogal afhangt van het moment op de dag waarop de straling valt is die 3.6% omzettingsefficiëntie voor de bovenste collector geen constante. In Figuur 4.12. is de cummulative elektriciteitsproductie door de bovenste collector samen met 3.2% van de dagelijkse directe stralingssom (allebei in kWh/m² uitgedrukt) getoond. De figuur laat zien dat 3.2% van de directe straling een goede performance index is tot half oktober. In de dagen daarna is de efficiëntie van het systeem veel lager. Dit komt doordat vanaf half oktober de brandlijn zo hoog in de kas zit en zo ver naar rechts (zie Figuur 3.3.) dat de collector er vaak door mechanische beperkingen niet bij kan.

De data die in de periode van 26 augustus tot 10 oktober zijn verkregen kunnen ook vergeleken worden met de verwachtingen die voortkomen uit het lensmodel. Dit lensmodel geeft de efficiëntie van de focussing naar beide collectoren als functie van de hoek van inval en geeft dus niet een vast getal, zoals de 6% die in Figuur 4.11. is gebruikt. Figuur 4.13. toont de vergelijking van de gemeten stroomproductie op de bovenste collector met de stroomproductie die verwacht wordt door het lensmodel, uitgaande van een celrendement van 13.8% (het rendement dat door de fabrikant van de zonnecellen is opgegeven), aangevuld met een correctiefactor van 75%.



Figuur 4.13. Gemeten elektriciteitsproductie op 3 september 2011 op de bovenste collector in de DaglichtKas in vergelijking met de verwachte productie door het lensmodel, na correctie met een factor 0.75.

Uit Figuur 4.13. kan worden geconcludeerd dat het lensmodel behoorlijk goed het verloop van de gemeten stroomproductie kan voorspellen, maar dat kennelijk de lichtintensiteit boven de collector wordt overschat. Lensonnauwkeurigheden of andere factoren maken dat er een factor 0.75 nodig is om meting en berekening dicht bij elkaar te brengen. In ieder geval is het echter duidelijk dat het lensmodel een veel betere basis vormt voor de schatting van de elektriciteitsproductie door de dag heen dan een vaste factor op de directe straling, zoals gebruikt in Figuur 4.11.

Aan de hand van het lensmodel, wat voor elk moment van het jaar een verwachting geeft voor de lichtintensiteit boven de bovenste en de onderste collector, als functie van de directe straling onder de verschillende azimuths en elevaties, kan berekend worden hoeveel elektriciteit over de periode van 15 maart tot 15 oktober (dat zijn de begin en einddata waartussen de DaglichtKas de collector in de brandlijn kan brengen) verzameld kan worden.

Het lensmodel, na te zijn gecalibreerd met de data die in de periode van 26 augustus tot 15 oktober zijn verzameld, berekent dat de totale elektriciteitsproductie van de DaglichtKas in 2011 op 15 kWh per m² kas zou zijn uitgekomen. Eigenlijk kan beter gesteld worden dat de kas 30 kWh per strekkende meter CPVT-collector oplevert aangezien het aantal meters PV-cellen de elektriciteitsproductie bepaalt.

5 Kasklimaat en energiehuishouding

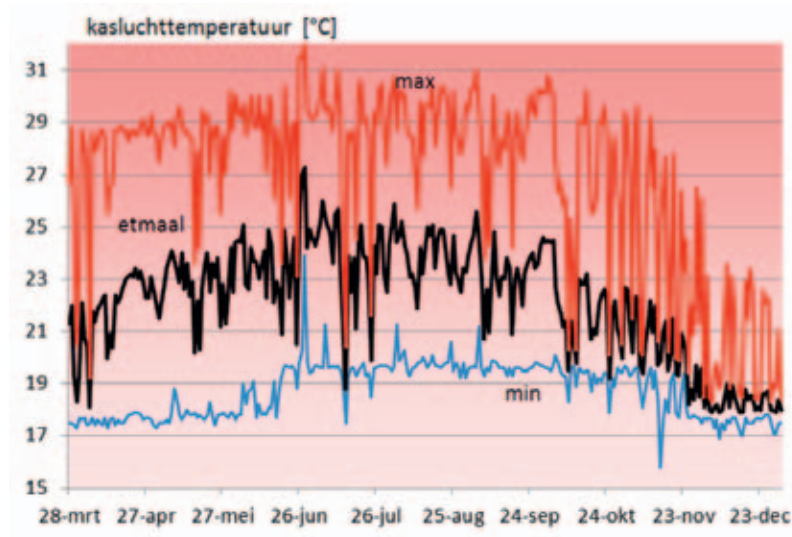
De DaglichtKas is eind maart in gebruik genomen voor de teelt van een 7-tal potplanten. Het betrof partijen Anthurium, Ficus, Bromelia, Areca, Calathea en twee soorten varens. Al deze soorten worden in de praktijk bij hoge temperaturen geteeld en bij lage lichtintensiteiten.

De gekozen gewassen maken dat de stooklijn hoog is gekozen (18 °C in de wintermaanden en 20 °C in de zomer) en om maximaal gebruik te maken van de warmte van de zon staat de ventilatielijn ook hoog (28 °C). In lijn met de positieve resultaten met verneveling in de potplantenteelt² is er veel gebruik gemaakt van verneveling om de luchtvochtigheid hoog te houden. Tenslotte is er gebruik gemaakt van CO₂-dosering om de groei te bevorderen.

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het gerealiseerde klimaat en het energieverbruik dat hiermee gemoeid is. Dit energieverbruik is voor een deel gebaseerd op simulaties omdat getallen over het energieverbruik op een jaar rond betrekking moeten hebben terwijl de metingen in Bleiswijk de periode van maart t/m november beslaan.

5.1 Kasluchttemperatuur, luchtvochtigheid en CO₂concentratie

De toepassing van de teeltstrategie die rond Het Nieuwe Telen is ontwikkeld betekent dat er op de meeste dagen een heel groot verschil is tussen de minimale en maximale temperatuur. Door een grote temperatuurrange toe te staan kan een hoge etmaaltemperatuur worden gerealiseerd met een maximale gebruikmaking van het zonlicht. Door de stooklijn laag te leggen en de ventilatielijn hoog, wordt het stoken zo lang mogelijk uitgesteld en het afluchten van warmte, die via de zon is ingebracht, tot een minimum beperkt. Er is geen gebruik gemaakt van een minimumbuis- of minimumraaminstelling. Onderstaande figuur toont de gemiddelde etmaaltemperatuur, de minimum- en de maximumtemperatuur over de proefperiode.



Figuur 5.1. Verloop van de gemiddelde, minimale en maximale kasluchttemperatuur in de DaglichtKas over de proefperiode van 2011.

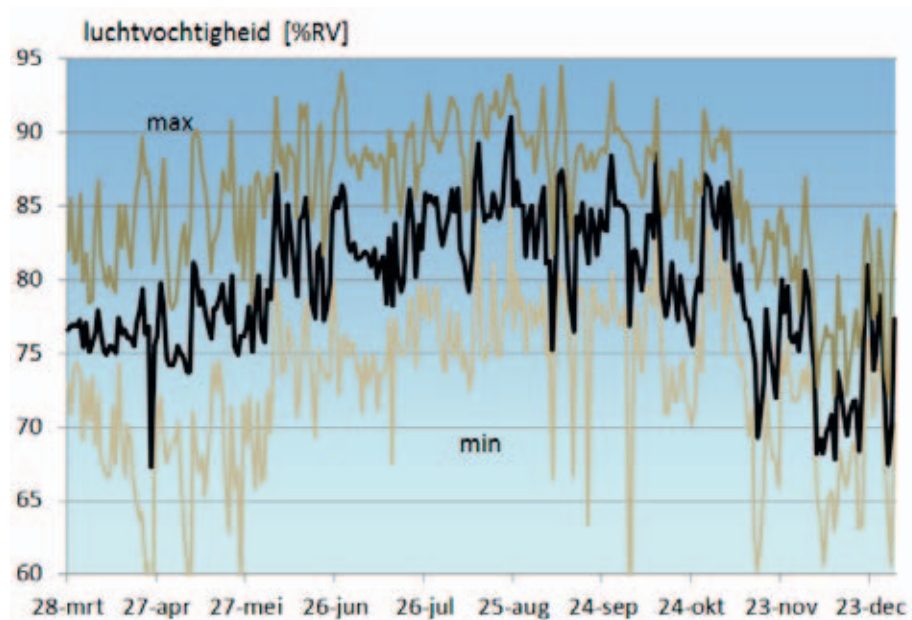
De grafiek toont dat op de meeste dagen het verschil tussen minimum en maximumtemperatuur erg groot is, maar dat er ook dagen zijn waarop de maximumtemperatuur maar een paar graden boven de minimumtemperatuur ligt. Dit betreft vooral de najaars- en winterdagen, maar zelfs in de zomerperiode komt dit af en toe voor.

2 Noort, Filip van., Kempkes, Frank., Zwart, Feije de. 2011. Het Nieuwe Telen – Meer licht toelaten bij wijdere temperatuurgrenzen bij een hogere luchtvochtigheid.

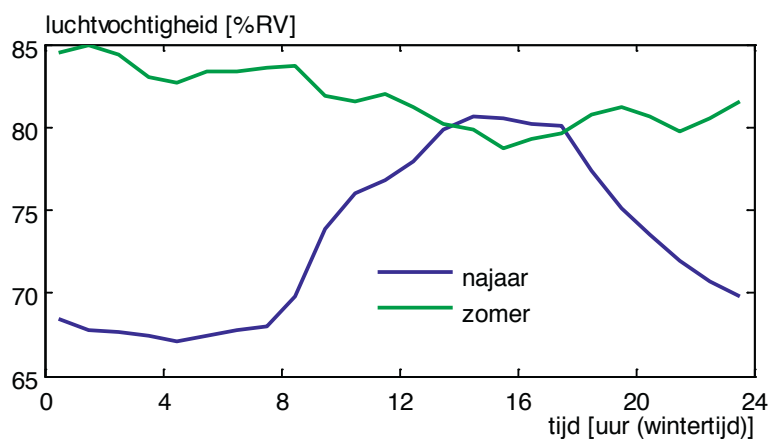
Vanaf half november komen de maximumtemperaturen niet meer boven de 28 °C dus vanaf die periode wordt hoeft er in de kas niet meer gelucht te worden, zelfs niet op vocht aangezien de luchtvochtigheid vanaf die periode praktisch niet meer boven de 85% komt (zie Figuur 5.2).

De etmaaltemperaturen zijn hoog in vergelijking met de praktijk. Dit was nodig omdat bij de grotere assimilaten-aanmaak die in de DaglichtKas plaatsvindt een hogere groeisnelheid van de plant vereist is. Hierdoor blijft de plant-opbouw conform de marktwensen.

Figuur 5.2. toont het verloop van de gemiddelde, minimale en maximale luchtvochtigheid in de kas. Over de hele zomerperiode en het begin van de herfst was de luchtvochtigheid hoog. Vanaf november zakt de luchtvochtigheid wat weg, wat veroorzaakt wordt door grotere verliezen van vocht door condensatie en lek waardoor vooral 's nachts de luchtvochtigheid laag wordt (zie Figuur 5.3). In het begin van de proefperiode is de luchtvochtigheid ook laag. Daar kwam het vooral doordat er in de eerste weken nog maar weinig bladmassa in de kas was vanwege de verspringende teelt (zie hoofdstuk 6). Die geringe kasvulling en het scherpe, zonnige weer in april en mei, was samen met de beperkte vernevelingscapaciteit de oorzaak van een lagere luchtvochtigheid dan eigenlijk gewenst was. Ook waren er in het begin van de proefperiode een aantal dagen waar de verneveling helemaal niet heeft gewerkt omdat de installatie in onderhoud was. In september waren er ook 3 dagen waarop de verneveling storingen heeft gegeven.

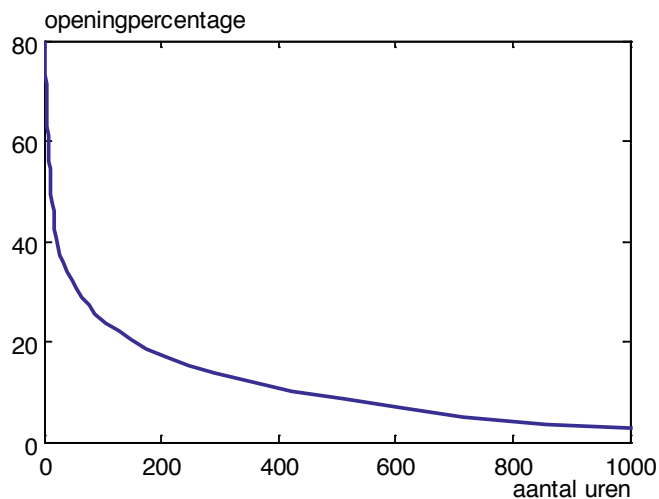


Figuur 5.2. Verloop van de gemiddelde, minimale en maximale luchtvochtigheid in de DaglichtKas over de proefperiode van 2011.



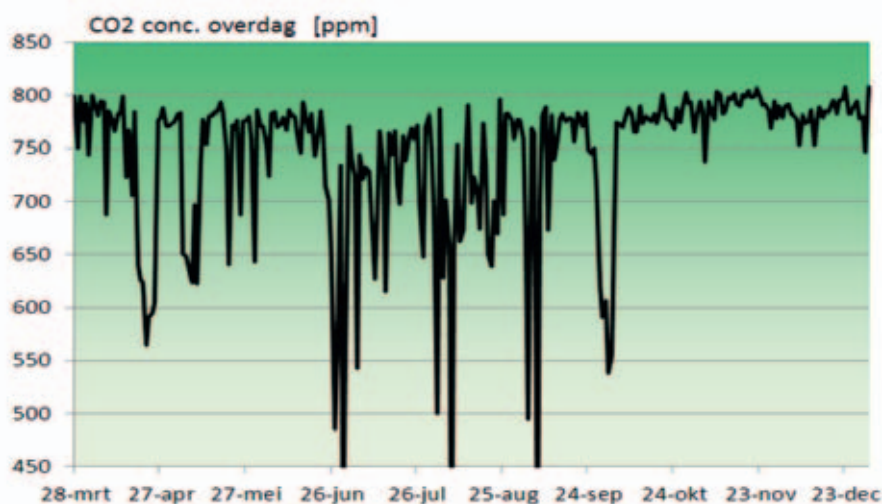
Figuur 5.3. Gemiddeld verloop van de luchtvochtigheid over het etmaal in een zomerse week (15-22 juni) en in een najaarsweek (15-22 november).

Door de onttrekking van een substantiele hoeveelheid warmte aan de kas, de lage stralingsbelasting op het gewas in de lichtrijke dagen (zie paragraaf 5.2) en de hoge enthalpie van de kaslucht (een hoge temperatuur en vochtigheid) hoeft de DaglichtKas slechts weinig te ventileren. Figuur 5.4. toont de belastingduurkromme van het openingspercentage van de ramen. De ramen hebben over de hele proefperiode, waarin de volledige zomerperiode viel, slechts 15 uur voor meer dan 50% open gestaan en slechts 150 uur voor meer dan 20%.



Figuur 5.4. Belastingduurkromme van de raamopening in de shuiframen van de DaglichtKas over de proefperiode.

Door de geringe ventilatiebehoefte kon de CO₂-concentratie hoog worden gehouden met slechts een geringe CO₂-doseercapaciteit. Figuur 5.5. laat de gemeten gemiddelde CO₂-concentratie over de dagperiode zien, waarbij het gemiddelde alleen berekend is over de uren waarop de lichtintensiteit boven de 50 W/m² was. De nachturen, waarop de concentratie vaak kan oplopen tot waarden boven de 1000 ppm zijn in de berekening dus niet meegenomen.



Figuur 5.5. Verloop van de CO₂-concentratie in de DaglichtKas over de proefperiode van 2011. Met de dagperiode worden de uren bedoeld waarop de buitenstraling meer dan 50 W/m² bedraagt.

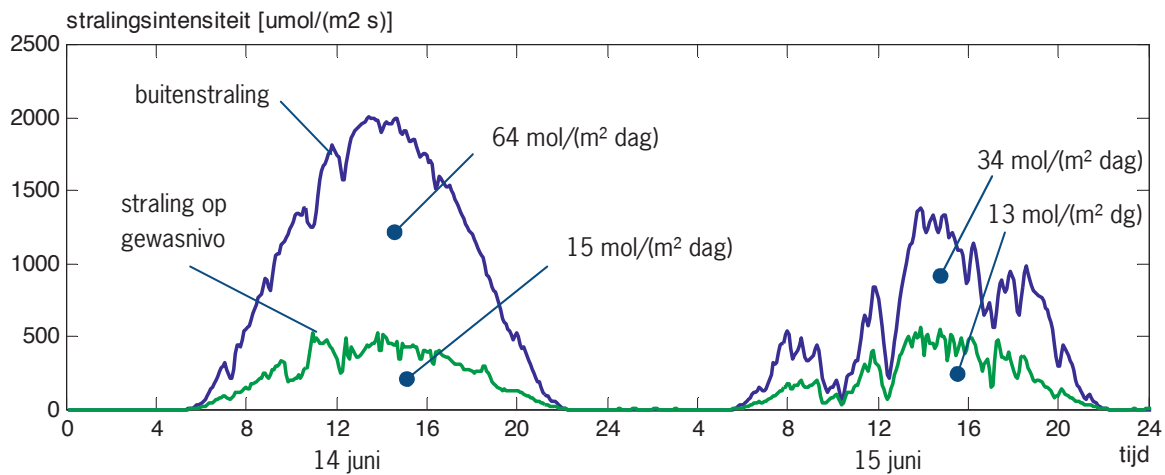
De concentratie in de kas wordt geregeld op 800 ppm. In een groot deel van het jaar wordt dit overdag goed gerealiseerd, maar hartje zomer zakt de gemiddelde concentratie richting 700 ppm. De CO₂-dosering staat op die dagen de hele dag aan met een capaciteit van 70 kg/(ha uur), maar deze doseercapaciteit is op die dagen onvoldoende om daadwerkelijk de gewenste 800 ppm te realiseren.

Figuur 5.5. laat een paar keer een scherpe piek naar beneden zien. Dit zijn dagen waarop de centrale CO₂-voorziening op het IDC niet gefunctioneerd heeft door problemen in de aanvoer. Het IDC ligt in het OCAP-verzorgingsgebied (CO₂-distributie vanuit het Botlek) en in 2011 is deze voorziening een aantal malen geplaagd door leveringsproblemen. Het jaarverbruik aan CO₂ is niet gemeten, maar gegeven de beperkte doseercapaciteit kan dit niet meer dan 30 kg/m² per jaar bedragen.

5.2 Lichtregime in de kas

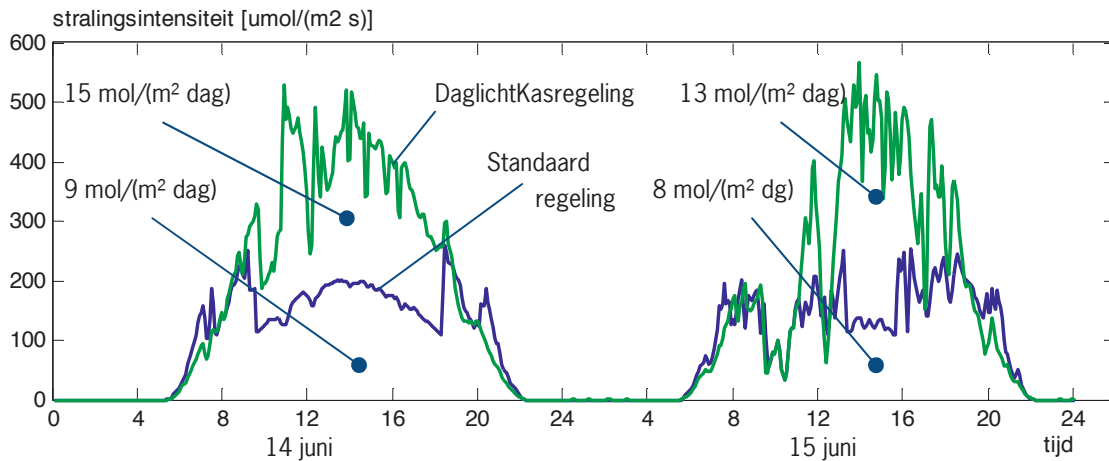
Zoals uitgelegd in paragraaf 2.3 is regeling van de lichtintensiteit in de kas door middel van de plaatsing van de collector één van de belangrijkste eigenschappen van de DaglichtKas.

Onderstaande grafiek laat zien dat de selectieve schaduwwerking van de collector ertoe leidt dat bij hoge lichtintensiteiten de kas een lage lichtdoorlatendheid heeft. Op een mooie dag, zoals 14 juni waar er buiten 64 mol staling werd gemeten komt er in de kas minder dan een kwart daarvan op gewasniveau. Een dag later, een dag met bijna half zoveel buitenstraling levert in de kas slechts 20% minder licht in de kas.



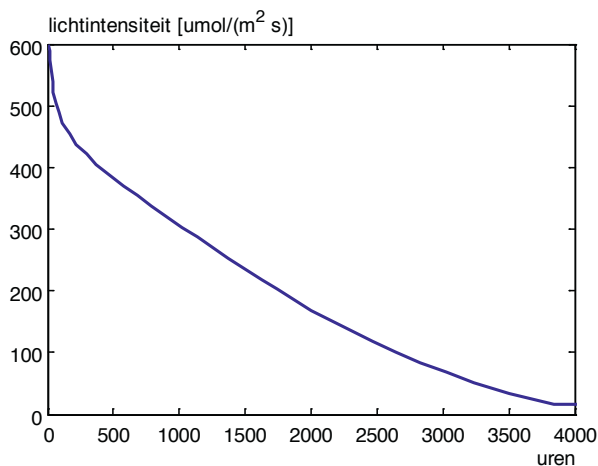
Figuur 5.6. Verloop van de lichtintensiteit buiten de kas en binnen in de kas op gewashoogte op twee successievelijke dagen in juni.

Overigens is de lighthoeveelheid die op deze dagen in de kas binnenkomt erg hoog in vergelijking met de hoeveelheid die door praktijktuinders voor de gewassen die in de DaglichtKas worden gekweekt wordt toegelaten. Gangbare tuinders accepteren op dit soort dagen zo'n 3-7 mol/(m² dag) en maximale momentane intensiteiten rond de 100-300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$. Het lichtprofiel gedurende de dag ziet er in de DaglichtKas anders uit dan in een gangbare kas. Dit blijkt uit Figuur 5.7. waar het verloop van het lichtniveau in de DaglichtKas wordt vergeleken met een gesimuleerd verloop van het lichtniveau in een standaardkas waar boven een bepaalde buitenlichtintensiteit het schaduwscreen wordt dichtgetrokken. In dit voorbeeld is gewerkt met een situatie waar boven een lichtintensiteit van 200 W/m² een scherm met 50% schaduw wordt dichtgetrokken en boven de 500 W/m² een tweede scherm met een 60% schaduwfactor wordt dichtgetrokken. Het gevolg van het gebruik van zo'n scherm is dat er bij het openen en sluiten van die schermen scherpe lichtintensiteitsveranderingen optreden. De grafiek laat ook zien dat met een dergelijk schermgebruik in een standaardkas lagere maximale intensiteiten zullen optreden en ook lagere dagsommen. Overigens is er in de proefperiode in de DaglichtKas niet geregeld op lichtintensiteit en ook niet op lighthoeveelheid. De collector is altijd zo goed mogelijk in de focus geplaatst en er is dus feitelijk altijd met de maximale schermfactor gewerkt. Als de verstrooiing door de Frensnellenzen minder was geweest zou de kas een preciezere en/of hogere schermfactor hebben kunnen realiseren (zie ook paragraaf 2.3).

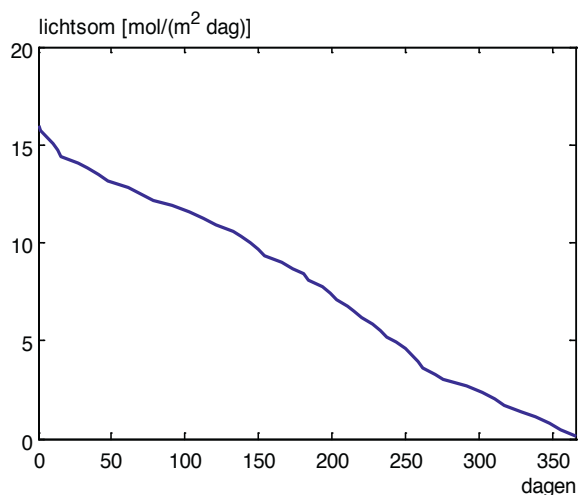


Figuur 5.7. Verloop van de lichtintensiteit binnen in de kas zoals waargenomen in de DaglichtKas en zoals die in een standaard potplantekas met twee schermen zou zijn geweest. Uitgangspunt voor de schermregeling is dat het eerste scherm, met 50% wordt gesloten boven 200 W/m^2 buitenstraling en het tweede scherm, met 60% schaduwwerking wordt gesloten bij een buitenintensiteit van meer dan 500 W/m^2 straling. De grafiek geldt voor dezelfde dagen als gebruikt voor Figuur 5.6.

Figuur 5.6. en 5.7. laten zien dat de lichtintensiteit af en toe oploopt tot bijna $600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$. Figuur 5.8. geeft aan dat er op jaarbasis zo'n 50 uur zijn waarop de intensiteit boven de $500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ uitkomt en dat er zo'n 500 uur een intensiteit van meer dan $400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ is gemeten. Dit zijn voor potplantenteelten hoge waarden en de resulterende daglichtsommen (Figuur 5.9.) zijn daarom ook hoog. De maximale lichthoeveelheid in de kas is op een paar dagen meer dan $15 \text{ mol}/(\text{m}^2 \text{ dag})$, wat ongeveer het dubbele tot drievoudige is van wat gebruikelijk is in de potplantensector.

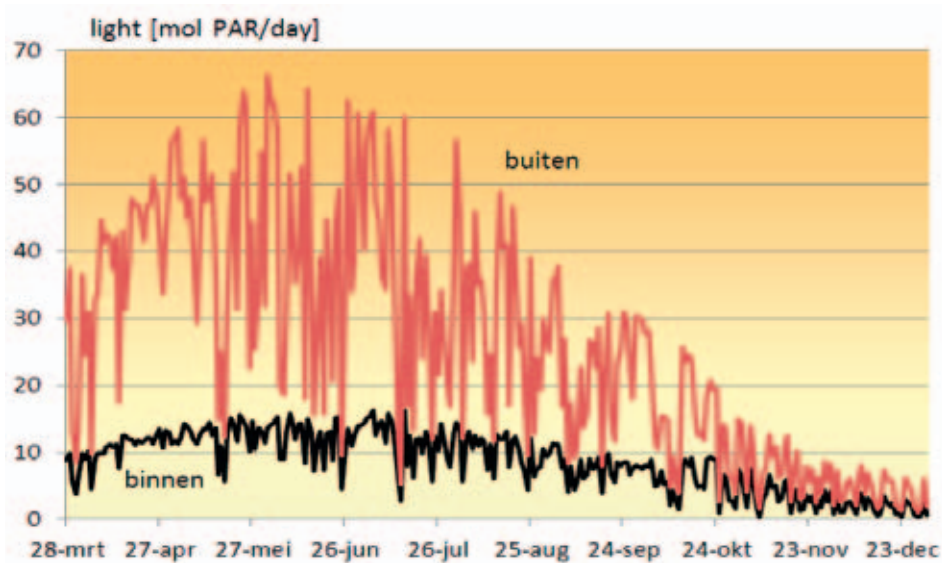


Figuur 5.8. Jaarbelastingduurkromme van de lichtintensiteit in de DaglichtKas over 2011. De intensiteiten voor de uren buiten de meetperiode (1 jan t/m 27 mrt en 15 nov t/m 31 dec) zijn berekend met een simulatiemodel dat getuned is aan de metingen in de proefperiode.



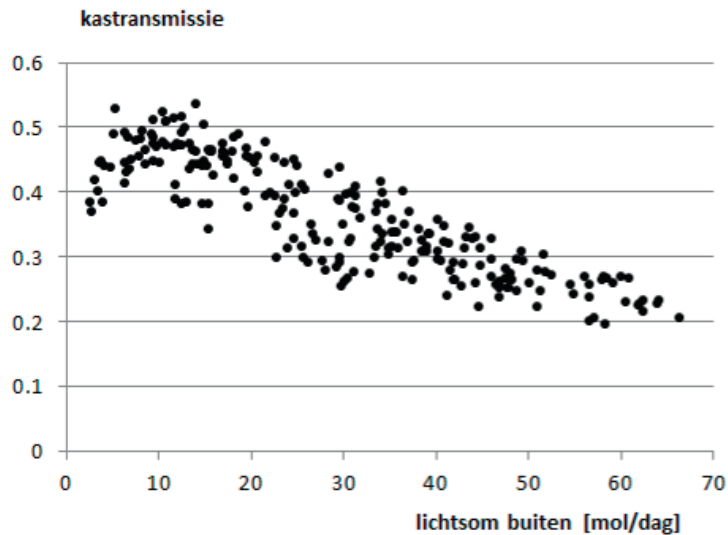
Figuur 5.9. Jaarbelastingduurkromme van de lichtsommen per dag in de DaglichtKas in 2011. De intensiteiten voor de dagen buiten de meetperiode (1 jan t/m 27 mrt en 15 nov t/m 31 dec) zijn berekend met een simulatiemodel dat getuned is aan de metingen in de proefperiode.

Onderstaande figuur laat de hoeveelheid licht zien die in de proefperiode buiten de kas is gemeten en binnen in de DaglichtKas op gewashoogte. Door de schaduwwerking van de collector voor direct licht en het feit dat variaties in lichtsom over de dag vooral in de directe straling zitten verlopen de dagelijkse lichthoeveelheden in de kas veel gelijkmatiger dan de lichthoeveelheden buiten de kas.



Figuur 5.10. Verloop van de lichthoeveelheid buiten en de binnen in de kas in de proefperiode.

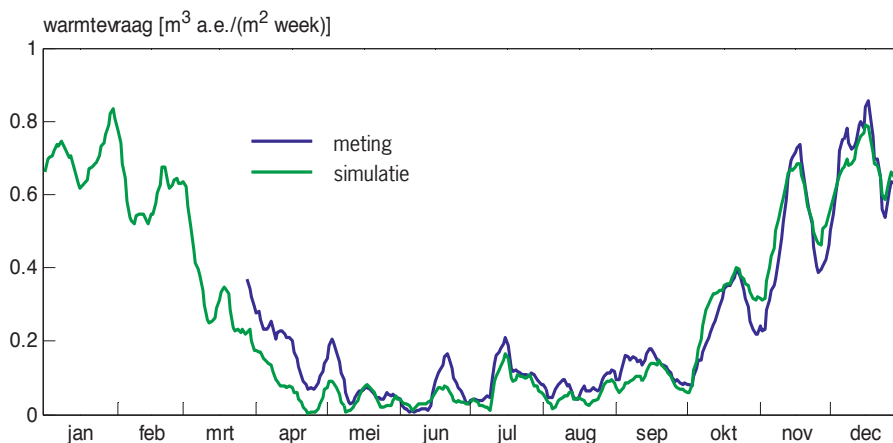
Door de selectieve beschaduwing van de kas voor direct licht en het feit dat de variatie in lichtintensiteit vooral in de hoeveelheid directe straling zit heeft de kas feitelijk een lage overall lichttransmissie op lichte dagen en een veel hogere lichttransmissie op donkere dagen. Dit wordt getoond in Figuur 5.11. waar de gemiddelde lichttransmissie per dag is berekend door voor elke dag de lichtsom op gewasniveau te delen door de lichtsom buiten de kas.



Figuur 5.11. Daggemiddelde kastransmissie van de DaglichtKas, uitgezet tegen de lichtsom per dag buiten de kas.

5.3 Energiehuishouding

Het uiteindelijke doel van kassen zoals de DaglichtKas is de realisatie van een klimaatneutrale tuinbouw, en in dit geval een klimaatneutraal concept voor de potplantenteelt. Daartoe verzamelt de kas gedurende de zomer een overschot aan warmte en elektriciteit, wat in de koude periode van het jaar gebruikt kan worden voor de verwarming van de kas. Omdat de DaglichtKas bedoeld is voor het potplantensegment zonder assimilatiebelichting bestaat de energievraag van de kas praktisch gesproken uitsluitend uit een warmtevraag. Onderstaande figuur toont de warmtevraag over 2011. Omdat de proefperiode pas in april begon is voor het eerste deel van het jaar gebruik gemaakt van een simulatiemodel Zoals te zien in Figuur 5.12. is de overeenstemming van het gemeten en berekende warmteverbruik over de meetperiode goed, zodat er kan worden aangenomen dat het verbruik over de rest van het jaar ook goed beschreven wordt.

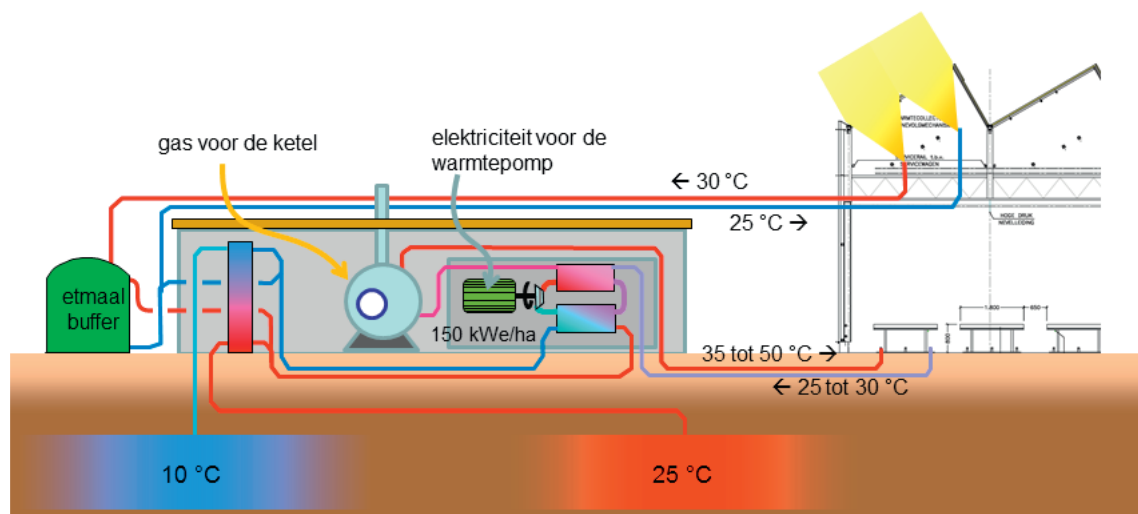


Figuur 5.12. Gemeten warmteverbruik van de DaglichtKas over de meetperiode en het jaarrond gesimuleerde verbruik, beide uitgedrukt in m^3 aardgas equivalenten. Om de Figuur minder grillig te maken zijn de dagwaarden via een voortschrijdend gemiddelde filter afgevlakt tot weekgemiddelden.

Het totale warmteverbruik van de kas is met 16 m^3 aardgas equivalenten per m^2 kas per jaar erg laag. Dit lage verbruik wordt gerealiseerd doordat het kasdek geheel uit isolatieglas bestaat en daarnaast ook nog iedere nacht het energiescherm wordt gesloten. Ook het feit dat in de koude periode van het jaar de stooklijn op $18 \text{ }^\circ\text{C}$ staat helpt mee aan een laag verbruik.

Het warmteverbruik is echter nog altijd aanmerkelijk hoger dan de hoeveelheid warmte die in 2011 verzameld is, namelijk ruim 11 m^3 a.e. per m^2 per jaar. Daarbij komt nog dat de warmte verzameld is op een temperatuurniveau rond de $28 \text{ }^\circ\text{C}$ en opgeslagen is in een aquifer. Bij het oppompen van water uit de warme bron van het doublet zal de temperatuur waarop de warmte beschikbaar is voor verwarmingsdoeleinden dus rond de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ liggen en aan het eind van het stookseizoen teruggezaakt zijn naar waarden rond de $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Deze temperaturen zijn veel te laag voor de verwarming van de kas zodat er gebruik gemaakt moet worden van warmtepomp die de energie uit het seizoensopslagsysteem in temperatuur opvoert naar een niveau dat gebruikt kan worden in het standaard verwarmingssysteem dat in de kas ligt.

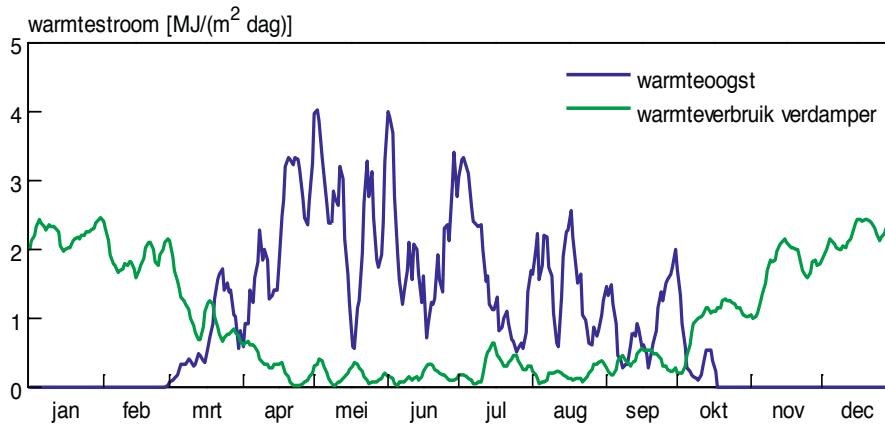
Figuur 5.13. toont een installatie waarmee dit kan worden gerealiseerd. In de zomer wordt water uit de koude bron gepompt voor de koeling van de zonnecollector als die in het brandpunt van de fresnellenzen hangt. Door een mengregeling (niet in de figuur afgebeeld) kan ervoor worden gezorgd dat de aanvoertemperatuur van het koelwater dat naar de collector stroomt iets boven het dauwpunt van de kaslucht ligt zodat er geen problemen met condensatie ontstaan. Het water stroomt met een groot debiet door de collector (max $400 \text{ m}^3/(\text{ha uur})$) zodat het uitstromende water op maximaal $30 \text{ }^\circ\text{C}$ kan worden gehouden. Dit om de zonnecellen die (in het DaglichtKas-concept) op de collector zijn gemonteerd te kunnen koelen. In de schets is een etmaalbuffer getekend die ervoor zorgt dat de opslag van warmte die over de dagperiode verzameld is over een 24 uurs-periode kan plaatsvinden. Hierdoor is een uitwisselingsdebiet van $30 \text{ m}^3/(\text{ha uur})$ tussen de koude en warme bron voldoende. Dit debiet lijkt op het eerste gezicht onwaarschijnlijk veel lager dan het circulatiedebiet door de collectoren. Het aquiferdebiet is echter niet alleen zo klein vanwege de etmaalbuffer, maar ook vanwege het drie keer grotere temperatuurverschil tussen de warme en de koude bron, dan het temperatuurverschil in de collector.



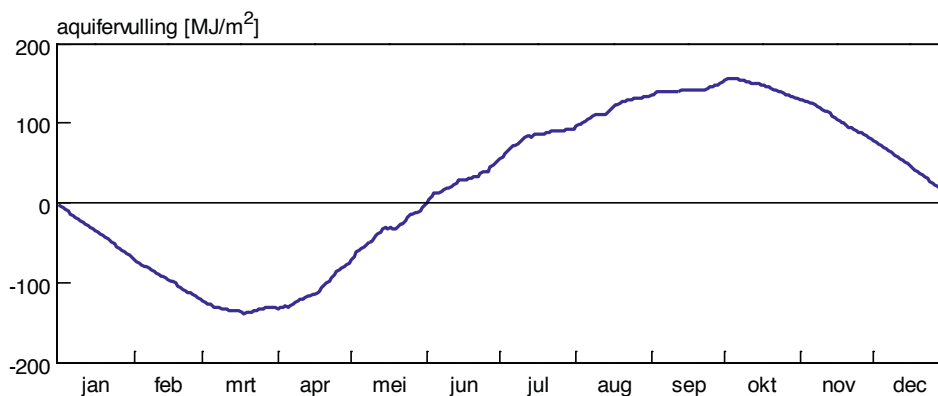
Figuur 5.13. Schets van het warmtetechnische systeem waarmee in de zomer warmte uit de zonnecollector kan worden opgelagen en in de winter de kas deels met zonneenergie kan worden verwarmd.

Gegeven de warmtevraag van de kas en het warmte-aanbod uit de collector is het vermogen van de warmtepomp zodanig gekozen dat er op jaarbasis een balans is tussen warmte-onttrekking en regeneratie van het warmteopslagsysteem. Bij deze exercitie bleek een warmtepomp met een elektrische vermogen van 150 kW_e per ha goed aan deze eis te kunnen voldoen. Bij de gekozen temperatuurtrajecten (een verdampertemperatuur van $8 \text{ }^\circ\text{C}$ en een maximale condensortemperatuur van $45 \text{ }^\circ\text{C}$) levert deze warmtepomp zo'n 600 kW thermisch vermogen per ha. Op koude dagen is dit vermogen iets te klein om aan de warmtevraag van de kas te voldoen. Op die dagen springt de ketel bij.

Deze verbruikt daarvoor overigens slechts 0.6 m³ aardgas per m² per jaar. In Figuur 5.14. is de resulterende warmtevraag van de verdamper getoond (een berekende curve), samen met de gemeten warmte-oogst in 2011. Door de warmtevraag van de verdamper wordt de aquifer ontladen en als er op een dag meer warmte wordt geoogst dan dat er door de verdamper wordt gebruikt, dan wordt de aquifer weer geregenereerd (geladen). De resulterende aquiferlading wordt getoond in Figuur 5.15.



Figuur 5.14. Dagelijkse warmtestroom die door de verdamper van de warmtepomp wordt opgenomen en de warmteproductie met de zonnecollector. Om de lijnen minder grillig te maken zijn de dagwaarden afgevlakt via een 5-daags voortschrijdend gemiddelde filter.



Figuur 5.15. Netto effect op de energie-inhoud van het aquiferdoublet van de warmte-onttrekking aan de verdamper van de warmtepomp en de warmte-oogst met de zonnecollector. Aan het eind van het jaar is er vrijwel net zoveel warmte in de aquifer opgeslagen als dat er aan onttrokken is.

In Figuur 5.14. is te zien dat vanaf half maart de warmteproductie door de collector groter is dan de warmtevraag van de condensor zodat op dat moment van het jaar de aquiferlading weer begint op te lopen. Vanaf oktober is het dagelijkse energieverbruik van de verdamper groter dan de energie-oogst en neemt de aquiferlading weer af. Het feit dat het eindpunt van de curve (praktisch) op 0 ligt betekent dat de aquifer in balans is.

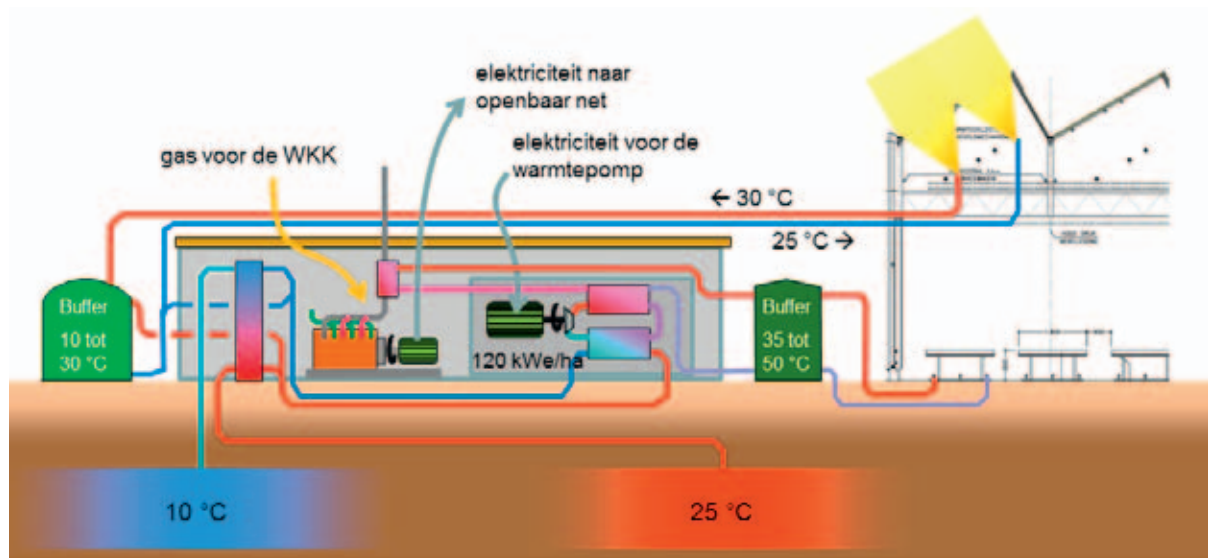
Het jaarlijks elektriciteitsverbruik van de warmtepomp komt uit op 36 kWh/m². Als hier het overige elektriciteitsverbruik bij op wordt geteld (watercirculatie door de collectorbuis, beweging van de collector en het verpompen van water over het opslagsysteem) komt de verwachting voor het totale elektriciteitsverbruik van de DaglichtKas op 45 kWh/(m² jaar).

Op grond van de metingen die aan de test-PV-panelen zijn gedaan (zie paragraaf 4.2) kan worden vastgesteld dat de collector van de DaglichtKas in de uitvoering van 2011 jaarlijks ongeveer 15 kWh elektriciteit per m² kas had kunnen voortbrengen. Het netto energieverbruik van de kas bedraagt daarmee 30 kWh en 0.6 m³ aardgas voor de ketel tijdens piek-voormogens.

Wanneer het elektriciteitsverbruik wordt uitgedrukt in aardgas-equivalenten komt een verbruik van 30 kWh overeen met een gasverbruik van 8.1 m³ (bij een omzettingsrendement van 43%). Het uiteindelijke energieverbruik van de DaglichtKas blijft daarmee iets onder de 9 m³ per m² per jaar.

5.4 Alternatieve energievoorziening met kleine WKK

De vorige paragraaf laat zien dat de DaglichtKas zoals die in 2011 heeft gefunctioneerd een mooi gebalanceerd aquifersysteem oplevert, maar via de toch nog benodigde elektriciteitsinkoop een aanzienlijk beslag op fossiele brandstof oplevert. Dit komt doordat de productie van de ingekochte elektriciteit met aanzienlijke verliezen gepaard gaat. Deze situatie kan gemakkelijk worden verbeterd wanneer er een kleine WKK-installatie in de DaglichtKas zou worden gebruikt. Het ketelhuis zou er dan uit komen te zien zoals getoond in Figuur 5.16.



Figuur 5.16. Ketelhuis voor de DaglichtKas op basis van een kleine Warmte/Kracht installatie in combinatie met een warmtepomp.

Uitgaande van een WK-installatie met een elektrisch vermogen van 35 kW per ha (dat is dus meer dan 10 keer zo klein als gebruikelijke WK-installaties) die 6300 draaiuren per jaar maakt zal de kas 6 m³ aardgas per m² per jaar verbruiken. Hierbij is uitgegaan van een elektrisch rendement van 42%.

De warmteproductie van deze WKK bedraagt 105 MJ/(m² jaar) zodat de warmtepomp minder warmte hoeft te leveren. Gegeven het feit dat er in de situatie zonder WKK een evenwicht was tussen warmteproductie door de collectoren en de warmte-onttrekking door de warmtepomp betekent een extra warmte-input van 105 MJ per m² per jaar dat er een warmte-overschot ontstaat. Door dit feit hoeft de aquifer vanuit energetisch oogpunt niet langer thermisch neutraal te zijn. Indien de vergunningverlener accepteert dat het opslagsysteem niet in balans is kan ervoor gekozen worden om de koude brontemperatuur hoger te kiezen, waardoor de warmtepomp in de winter met een hogere COP kan werken. Het gecombineerde effect van de lagere warmteproductie van de warmtepomp en de hogere COP maakt dat het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp in deze alternatieve inrichting van het ketelhuis daalt van de eerder genoemde 36 kWh/m² per jaar naar 28 kWh/m² per jaar. Deze daling met 8 kWh/(m² jaar) betekent dat de DaglichtKas met de alternatieve ketelhuisinrichting op jaarbasis 37 kWh/m² zal verbruiken.

Deze hoeveelheid elektriciteit is precies gelijk aan de gezamenlijke elektriciteitsproductie van de WKK (die uit 6 m³ aardgas 22 kWh produceert) en de 15 kWh die middels de zonnecellen voortgebracht worden.

Toepassing van een kleine WKK in het ketelhuis van de DaglichtKas maakt de kas dus elektrisch neutraal op jaarbasis en reduceert het energieverbruik naar 6 m³ aardgas per m² per jaar.

5.5 Conclusie

Het kasklimaat in de DaglichtKas kon in 2011 naar alle tevredenheid geregeld worden en bleek zeer groeizaam voor het gewas (zie ook verderop in hoofdstuk 6). De verneveling zorgde voor een hoge luchtvochtigheid en de combinatie van warmte-onttrekking door de collector en een hoog gekozen ventilatielijn maakten dat de kas erg weinig hoefde te luchten. Hierdoor kon de CO₂-concentratie hoog gehouden worden bij een beperkte doseercapaciteit.

De Fresnellenzen werkten in combinatie met een collector in de brandlijn als een bijzonder scherm. Hoge stralingsintensiteiten uit het directe licht werden trefzeker onderschept en het 'langsglippende' licht had een diffuus karakter. De resulterende lichtintensiteiten in de kas waren hoog in vergelijking met gangbare potplantenteelten, maar het gewas heeft hier voor de meeste soorten niet onder geleden (zie ook hoofdstuk 6). Het lijkt er op dat hoge lichtintensiteiten geen probleem zijn zolang het licht een diffuus karakter heeft en zolang de overige kasklimaataspecten (met name de luchtvochtigheid) goed geregeld blijven.

De warmtevraag van de kas is met 16 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar erg laag, zeker afgezet tegen de gemiddeld hoge kasluchttemperatuur. Deze warmtevraag is echter nog altijd aanzienlijk hoger dan de 11 m³ aardgas equivalenten die middels de koeling van de collector in de brandlijn per m² per jaar worden verzameld. Het feit dat de verwarming in de kas watertemperaturen nodig heeft die veel hoger zijn dan de 25 °C waarop de warmte is opgeslagen maakt dat er een warmtepomp nodig is om de verzamelde warmte te kunnen benutten. De noodzakelijke warmtepomp maakt dat er aandrijf-energie aan het kassysteem wordt toegevoegd, wat een aanvulling is op de energievoorziening van de kas. In geval de DaglichtKas wordt verwarmd met een warmtepomp en een ketel voor de piek-momenten blijkt dat er op jaarbasis netto 30 kWh elektriciteit moet worden ingekocht en 0.6 m³ aardgas door de ketel wordt verbruikt. Hierbij is al rekening gehouden met het feit dat 15 kWh van de 45 kWh die op jaarbasis verbruikt wordt door de eigen PV-installatie kan worden opgewekt. Als de elektriciteitsinput via het gemiddelde centralerendement wordt omgerekend in aardgasequivalenten dan betekent dit een totale energie behoefte van iets minder dan 9 m³ aardgas (equivalenten) per m² per jaar.

In plaats van een grote netto elektriciteitsinkoop kan er ook gebruik gemaakt worden van een kleine WKK-installatie die een compensatie vormt voor het stroomverbruik van de warmtepomp. In dat geval zakt het gasverbruik van de DaglichtKas naar 6 m³/m² per jaar en is het elektriciteitsverbruik op jaarbasis 0.

6 Gewasgroei

6.1 Onderzoeksopzet

Gewaskeuze

Voor dit onderzoek is gekozen voor de volgende gewassen: Anthurium, Bromelia, Calathea, Ficus, Areca en verschillende groene gewassen die door Bunnik Plants geteeld worden. Anthurium, Bromelia en Ficus zijn gekozen als vertegenwoordigers van belangrijke potplanten vanuit de top 10 qua omzet, waarbij Ficus een voorbeeld is van een gewas dat veel licht aan moet kunnen en Anthurium en Bromelia die relatief snel blad- en groeiproblemen laten zien. Areca is gekozen als gewas dat erg snel problemen geeft bij het toelaen van meer licht en Calathea is gekozen omdat vanuit eerder onderzoek is gebleken dat Calathea meer licht aan kan bij hogere vochniveau's, maar wel behoorlijk bladproblemen kan hebben onder invloed van een verkeerde licht/vocht combinatie (Noort et.al., 2011)³. Op kleinere schaal zijn ook nog enkele andere soorten planten in de DaglichtKas gevolgd. Aan deze planten is echter niet gemeten (afkweek Phalaenopsis, Spathiphyllum, Zamioculcas), maar is er alleen gevolgd of er schade optrad of niet.

Timing

Er is gekozen voor versprongen teelten, dat wil zeggen dat de helft van alle tafels in week 10 is volgezet met planten en de tweede helft in week 16. Het voordeel van deze versprongen teelt is dat er in één proefperiode verschillende soorten planten bestudeerd kunnen worden.

De twee partijen zijn tot week 40 gevolgd (eind september). Daarna zijn er twee nieuwe teelten in de kas gestart om de kasprestatie en groei van potplanten tijdens de winterperiode te monitoren. De resultaten van dit winter-experiment worden echter in de voorliggende tussenrapportage meegenomen maar behandeld in het eindrapport.

Kasomstandigheden

De DaglichtKas heeft in oppervlakte van 500 m² bruto, waarin 36 tafels staan van 1.6 m breed en 4.5 m lang. Er is geen assimilatiebelichting aanwezig. De kas is uitgerust met hogedrukverneveling, waardoor overdag de luchtvochtigheid tussen de 75 en 80% kan worden gehouden.

Er kan in de DaglichtKas slechts één soort gietwater worden gegeven, dus is er voor de voedingsoplossing naar een grootste gemene deler gezocht. Vanwege het groeiende klimaat bleek dat de voedingsoplossing een opvallend hoge EC nodig had (een EC van 3 mS) om voldoende nutriënten aan te kunnen leveren.

Kasklimaat

Op voorhand is gekozen op de principes van Het Nieuwe Telen Potplanten aan te houden. Dat houdt in dat de stooklijn in de winter was ingesteld op 18°C, en de luchtlijn op 28 °C. In de zomer is de stooklijn verhoogd naar 19 tot 20 °C omdat bleek dat de planten een wat hogere etmaaltemperatuur nodig hadden om niet te zwaar te groeien, maar voldoende lengte te maken, vooral bij Anthurium. De luchtvochtigheid werd geregeld tussen de 75% (ondergrens) en 90% (bovengrens). Het CO₂-niveau was ingesteld op 800 ppm en de doseercapaciteit was maximaal 70 kg/(ha uur). Van 15 maart tot 15 oktober is de collector van het zonne-oogst systeem zoveel mogelijk in de focus gehouden zodat direct zonlicht maximaal wordt tegengehouden zodra de zon achter het wolkendek tevoorschijn komt. In de resterende periode van het jaar wordt alle zonlicht (direct of diffuus) zo veel mogelijk doorgelaten, tenzij het erg koud is, want dan bleef het energiescherm dicht. Als beveiliging voor het geval dat de er direct licht invalt terwijl de collector niet in de focus staat kon het energiescherm worden dichtgetrokken, waarmee een 25% lichtreductie in de kas kon worden aangebracht. Deze mogelijkheid is in 2011 100 uur gebruikt in verband met onderhoud of aanpassingen aan de zonnecollector.

3 Noort, F van., Kempkes, F., Zwart, Feije de. 2011. Het Nieuwe Telen Potplanten - meer licht toelaten bij wijdere temperatuurgrenzen bij een hogere luchtvochtigheid. Wageningen UR Glastuinbouw.

Metingen

Eens in de 6 weken zijn lengte, aantal scheuten, aantal bloemen, bladoppervlak, vers- en drooggewicht van de verschillende potplanten gemeten. Op die momenten zijn er ook substraatanalyses gemaakt om op basis daarvan een zo goed mogelijke bemesting te geven. Voor een tweetal gewassen (Calathea en Guzmania) was het mogelijk de partijen uit de DaglichtKas te vergelijken met een vergelijkbare partij in de praktijk. Voor de andere plantensoorten was er geen referentiepartij.

Een aantal gewassenmerken is ook vastgelegd met de plantalyzer, een door Wageningen UR ontwikkeld camerasysteem om plantkenmerken objectief mee vast te leggen.

6.2 Resultaten

Voor de gekozen gewassen bleek de DaglichtKas nog beter te presteren dan verwacht. Het doorvallende (meest) diffuse licht had een hogere intensiteit dan verwacht, soms meer dan $500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{s})$, zie Figuur 5.8.

Het verzamelen en omzetten van direct licht (en dus ook warmte), gaf een lagere warmtebelasting in de kas zodat er minder geventileerd hoefde te worden. Hierdoor konden de luchtvochtigheid en de CO_2 -concentratie gemakkelijk op een hoog niveau worden gehouden. Dit klimaat gaf veel groei zonder grote bladschade problemen.

Onderstaande tabel toont een aantal gewassenmerken van de intensief gevolgde gewassen zoals die bepaald zijn voor het gewas dat bij een praktijkbedrijf is geteeld en voor hetzelfde gewas na teelt in de DaglichtKas.

Calathea (wk 10)	Lengte (cm)	Aantal bladeren	Aantal zijscheut	Blad opp. (cm^2)	Versgewicht (g)	Drooggewicht (g)	% Droge stof
praktijkbedrijf (6 juni)	53.5	27.2	9.1	4270	202	21	10.3
DaglichtKas (31 mei)	49.7	37.6	12.9	5519	273	33	12.2
verschil in %	-8	28	30	23	26	40	16
Guzmania (wk 10)							
praktijk (6 juni)	27.2	39.0		438	34	4.3	12.4
DaglichtKas (31 mei)	27.3	43.3		713	51	7.2	14.0
verschil in %	1	10		39	34	41	11
Guzmania (wk 16)							
praktijk (6 juni)	22.5	33.1		199	20	2.1	10.9
DaglichtKas (15 juni)	25.3	37.4		294	29	3.6	12.4
verschil in %	11	12		32	33	41.4	12

De goede groeiomstandigheden hebben bij deze gewassen geleid tot erg grote groeiverschillen, zonder kwaliteitsverlies. Zowel bij Guzmania (Figuur 6.1.) als bij Calathea (Figuur 6.2.) hadden de planten uit de DaglichtKas meer blad, meer zijscheuten, meer bladoppervlak, meer versgewicht, meer drooggewicht en dus meer droge stof.



Figuur 6.1. Verschil tussen de Guzmania uit de DaglichtKas (links) en praktijk (rechts) van oppotweek 10 op moment van bloei (week 33).



Figuur 6.2. Verschil tussen de Calathea's uit de DaglichtKas (links) en praktijk (rechts) van oppotweek 10 op moment van bloei (week 33).

Opvallend was dat bij de Calathea de extra groei niet tot uiting kwam in de lengte van de plant, maar vooral in het aantal scheuten, dus meer in de breedte. Voor Calathea wordt dit als een verbeterde kwaliteit gezien.

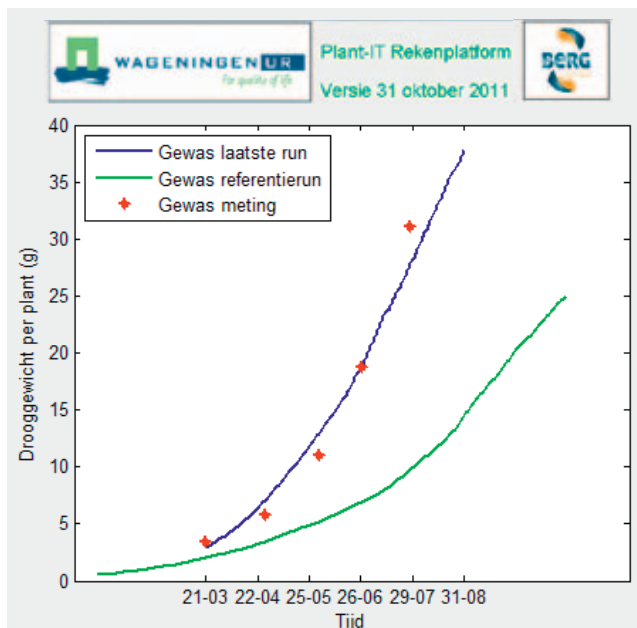
Ook de andere gewassen zoals Anthurium, Ficus, Asplenium (nestvaren), Phlebodium 'Blue Star' (varen) groeiden erg snel en zwaar, maar is er geen vergelijk met praktijkgewassen. Het positieve oordeel over de groei van deze planten is gebaseerd op de constatering door de begeleidingsgroep van kwekers. De bloemkleur bij Anthurium (te rose) en de bladkleur bij Asplenium (te lichtgroen) liet wel iets te wensen over. Hiervan wordt verwacht dat dit met aangepaste voeding en met iets meer schermen (misschien alleen in de afkweek) op te lossen zou zijn. De eerste twee teelten bij Areca gaf nog wel problemen met bladpunten en bladvergeling, daarom is bij de 3^e en 4^e teelt gebruik gemaakt van jonger materiaal (blad nog niet ontvouwen). Dat gaf beduidend minder problemen, maar dit kan ook veroorzaakt zijn door het lichtniveau dat bij de 3^e en 4^e teelt gemiddeld lager lag. Voor de Areca is er dus nog geen duidelijke conclusie te trekken.

Ook de potanthurium is intensief gevolgd. In Figuur 6.3. is te zien dat deze planten ondanks het hoge lichtniveau totaal geen problemen met bladschade of bladpunten hebben gehad.



Figuur 6.3. Anthuriumplanten gekweekt in de DaglichtKas.

De mooie kwaliteit ging gepaard met een snelle groei. In onderstaande figuur wordt het verloop van het drooggewicht van Anthuriumplanten in de DaglichtKas en Anthuriumplanten in de praktijk getoond.



Figuur 6.4. Verschil in drooggewicht bij Anthurium tussen de referentiepartij uit de praktijk (groen) en een partij in de DaglichtKas (blauw). De getrokken lijnen zijn afkomstig van simulatieberekeningen aan de hand van de licht- en temperatuurniveaus in de DaglichtKas en in een referentiekas. Voor de DaglichtKas zijn ook metingen voor handen. Die zijn als rode punten in de grafiek getekend.

In Figuur 6.4. is vooral de snelle toename van droge stof bij de planten in de DaglichtKas opvallend. Dit is vooral ontstaan door het hoge lichtniveau.

6.3 Conclusie

De algemene conclusie naar aanleiding van de observatie van de gewasgroei in de DaglichtKas is dat de gekozen gewassen erg goed groeiden en goed van kwaliteit waren. In de zomer werd bij Anthurium, Bromelia en Calathea een teeltversnelling van 20 tot 30% waargenomen door snellere en zwaardere groei. Op jaarbasis zou dit een teeltversnelling van 10 tot 20% betekenen.

Er waren drie gewassen waar de teelt nog wel wat te wensen overliet. De bloem bij de Anthurium en de bladkleur bij Asplenium was wat te licht en de Areca had problemen met bladpunten en bladvergeling. Bij de eerste twee gewassen zou een iets andere voeding (een hogere EC) wellicht tot een verbetering leiden, maar voor de Areca wordt vermoed dat voor deze plant de lichtintensiteiten gewoon te hoog waren. Bij de teelt van Areca zou er dus af en toe nog wat additioneel geschermd moeten worden.

Een belangrijk resultaat uit de metingen in de DaglichtKas is echter dat er veel aanleiding is om ervan uit te gaan dat potplanten bij hogere lichtomstandigheden kunnen worden opgekweekt dan gebruikelijk, maar dat dit waarschijnlijk onder de voorwaarde is dat dit licht een sterk diffuus karakter heeft.

7 Tuinders over de DaglichtKas

Gedurende de proefperiode is de teelt gevolgd door een aantal potplantentelers. Deze groep mensen kwam regelmatig langs en spraken dan over de resultaten en de betekenis daarvan. In dit hoofdstuk zijn een aantal van hen aan het woord gelaten om iets aan te geven over de betekenis van het experiment in de DaglichtKas.

Frans Bunnik, Bunnik Plants

Wij hebben het afgelopen jaar de groei in de DaglichtKas gevolgd en vergeleken met de groei in onze eigen kas. Wij waren verrast over de kwaliteit en de grofheid van de planten, zeker wanneer je bedenkt hoeveel licht ze hebben gekregen. De DaglichtKas was niet voor alle planten super en we weten nog niet hoe de kas in de winter werkt, maar toch denk ik dat hier de toekomst ligt voor de potplantenteelt. De energiewinning is een essentieel onderdeel van de kas. Die heb je nodig om het plaatje rond te kunnen rekenen. Wij denken op dit moment na over de bouw van 1 ha volgens dit principe. We zijn daarover in overleg met Bode Project- en Ingeniebureau en Technokas en Wageningen UR Glastuinbouw.

Peter de Vreede, Calathea-ekwerker

Ik vind het experiment in de daglichtkas interessant, omdat het de teeltopbrengst fors verbetert en tegelijkertijd niet-benutbare zonne-energie omzet in benutbare warmte en elektriciteit. De grenzen van het huidige telen worden verlegd en het energieverbruik daalt. De technieken zijn nog zeer vernieuwend en moeten bedrijfszeker worden gemaakt. Daarnaast moet de nieuwe plantinformatie uit het experiment worden begrepen en gekeken hoe het beter benut kan worden.

Marco Koolhaas, Bromeliakwerker

Voor de bromelia kwekers is de DaglichtKas erg interessant. De bromelia staat te boek als een schaduw-minnend gewas, maar komt dat doordat de plant weinig licht kan verdragen of gaan het vooral om het nivo van het directe zonlicht. Het laatste lijkt na de proeven de afgelopen zomer waar. In de kas waar geen direct zonlicht binnenkomt maar wel een voor bromelia kwekers hoge lichtintensiteit, zien we geen schade aan de plant en meer groei (zware kwaliteit plant met grote bloem). Wel ontstonden een paar problemen zoals vervuiling aan de voet van de plant en een blad- en bloemkleur die niet optimaal was. Er was ook ongewenste scheutvormig. Dit willen we voor sommige soorten juist voorkomen maar misschien zijn meer scheuten juist wel goed als er een andere plantvorm ontstaat waar meer bloemen in kunnen komen. Ook moet nog duidelijk worden welke invloed het meer licht heeft op het spontaan in bloei komen van bepaalde soorten.

Er is een vervolg nodig om te kijken hoe de problemen die we tegengekomen kunnen worden opgelost en om te kijken hoe de teeltduur verkort kan worden zonder kwaliteitsverlies. Verder ben ik ook nog benieuwd naar het totaalplaatje voor de kas. Past er assimilatiebelichting in, of buitenluchtaanzuiging. En kan de kas ook nog goedkoper gebouwd worden, waarbij de prestaties hetzelfde blijven.

Raymond van der Knaap, Phalaenopsyskwerker

Het experiment is voor ons belangrijk om in de toekomst minder afhankelijk te zijn van fossiele brandstoffen. Als daarmee ook nog eens de teeltomstandigheden verbeteren heeft dit een grote kans van slagen. Betere planten produceren met minder kosten, dat is waar het om gaat. Alleen energie besparen is vaak te riskant als omdat het mogelijk risico's geeft voor de teelt.

8 Conclusies

De experimenten die in 2011 in de DaglichtKas zijn uitgevoerd hebben laten zien dat het principe dat eerder op zeer kleine schaal was uitgevoerd op semi-praktijkschaal goed blijkt te werken.

De toevoeging van lenzen in het kasdek maakt het mogelijk om direct zonlicht selectief af te vangen en de kas levert een zeer groeizaam klimaat. Bouwkundige complicaties zijn in het ontwerptraject goed opgelost en mogelijke problemen met brandveiligheid zijn in overleg met de grootste tuinbouwverzekeraar (Sterpolis) ondervangen middels geschikte materiaalkeus en ontwerp.

De duurzame warmteproductie van de kas is lager dan bij aanvang van het project werd verwacht. Er is geen 21 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar verzameld maar iets meer dan de helft daarvan. Toch is dit voldoende om de warmtepomp waarmee de kas in de winter verwarmd wordt van laagwaardige warmte te voorzien doordat de kas maar weinig warmte nodig heeft. De metingen duiden op een jaarverbruik van 16 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar. De lagere warmteproductie komt voor een belangrijk deel door de gebruikte lens, die meer verstrooiing geeft dan de lens waar de eerste experimenten zijn uitgevoerd. Ook zijn de gebruikte profielen zwaarder gekozen, waardoor er meer beschaduwing optreedt. Een derde oorzaak van de lagere warmteproductie dan verwacht is het feit dat het gebruikte glas weliswaar een zeer hoge lichtdoorlatendheid heeft in het PAR-gebied, maar slechts een lage doorlatendheid in het NIR-gebied. Voor de gewasgroei is dit dus een prima glassoort (GroGlass), maar voor energie-verzameling is dit minder gunstig.

Aangezien de lagere warmteproductie veroorzaakt wordt door het lagere lichtaanbod dan waarvan in de aanloop naar dit project is uitgegaan pakt de potentiële elektriciteitsproductie ook ongeveer de helft lager uit dan verwacht. Op grond van metingen aan prototypes voor full-scale zonnecollectoren zal een kas als de DaglichtKas ongeveer 15 kWh per m² per jaar produceren, of liever gezegd; 30 kWh per strekkende meter PV-collector, aangezien het aantal meters collector de bepalende grootte is voor de stroomproductie.

De warmtepomp wordt elektrisch aangedreven, maar de stroomproductie van de DaglichtKas is niet voldoende om in de gehele elektriciteitsbehoefte van de kas te voorzien. De warmtepomp, de circulatiepompen, bronpompen en de overige motoren in de kas leiden tot een verbruik van ongeveer 45 kWh/m² per jaar zodat 2/3 van het elektriciteitsverbruik moet worden ingekocht.

Als de benodigde 30 kWh/m² netto inkoop wordt omgerekend naar primair energieverbruik bij het gemiddelde Nederlandse centralerendement van 43% dan betekent dit een energiebeslag van ruim 8 m³/m² per jaar. Bij gebruik van een warmtepomp zal er ook nog een kleine ketel worden toegepast voor de piek-momenten zodat het uiteindelijke energieverbruik van de DaglichtKas in dat geval op bijna 9 m³/m² jaar uit zou komen. Er kan ook gebruik gemaakt worden van een kleine WKK-installatie (35 kW per ha) die op jaarbasis voldoende stroom produceert om de kas elektrisch neutraal te maken (net zoveel stroom verkoop in de zomer als stroom inkoop in de winter). In dat geval daalt het energieverbruik van de DaglichtKas naar 6 m³/(m² jaar).

De DaglichtKas is hiermee niet energieneutraal, maar er kan wel gesteld worden dat het energieverbruik in vergelijking met de gangbare praktijk zeer laag is.

Behalve in hoge mate energiebesparend bleek de DaglichtKas tot een belangrijke productietoename te kunnen leiden. Het effect van de kas op gewasgroei is bestudeerd door de teelt van een 7-tal potplanten te volgen (Anthurium, Areca, Asplenium, Bromelia, Calathea, Ficus en Varen 'Blue Star') en een drietal potplanten oriënterend in de proef te betrekken (Phalaenopsis, Spathiphyllum en Zamiculcas). Al deze gewassen bleken goed te groeien en voor Bromelia en Calathea kon een groeiversnelling van 10 tot 20% ten opzichte van de praktijk worden vastgesteld hoger. De Anthurium (lichte blad- en bloemkleur), Asplenium (lichte bladkleur) en de Areca (bladschade in oude blad) die uit de DaglichtKas kwamen vertoonden evenwel een wat mindere kwaliteit door een te lichte blad- en bloemkleur. Hiervan wordt verwacht dat aanpassingen in de voeding dit probleem zou kunnen oplossen. De groei van Areca voldeed in de zomer ook niet aan de kwaliteitseisen. Voor dit gewas zou er wellicht nog wat aanvullend moeten worden geschermd met een horizontaal scherm om de lichtintensiteiten op het midden van de dag iets te temperen.

De goede resultaten, zowel qua teelt als qua energiehuishouding, hebben ertoe geleid dat potplantentelers enthousiast zijn over deze nieuwe ontwikkelingen en het experiment met belangstelling volgen. In 2012 worden de demonstratie en experimenten in de DaglichtKas vervolgd. Hierbij wordt er 80 meter PV-cellen op de PV-collector gemonteerd en wordt de technische installatie uitgebreid met een systeem dat de geproduceerde stroom daadwerkelijk aan het elektriciteitsnet levert. Ook wordt het glas waartussen de lenzen zijn opgesloten vervangen door een ander glastype dat een groter deel van het zonnenspectrum doorlaat.

Behalve de uitgebreide metingen aan de energiehuishouding zal de DaglichtKas ook een onderdeel gaan vormen van uitgebreide proeven omtrent lichtregimes in de potplantenteelt. De ervaringen met de goede groei van potplanten ondanks de hoge lichtintensiteiten hebben nieuwe stimulans gegeven aan de teelttechnische ontwikkelingen in de potplantenteelt in de richting van het toelaten van meer zonlicht om daarmee het aandeel van natuurlijk licht voor de groei van planten te verhogen.

9 Publiciteit

De DaglichtKas is in 2011 door veel bezoekers bezocht. Het is qua kassenbouwtechniek een hoogstandje en op zonnige dagen is het een bijzondere ervaring om van buiten naar binnen te lopen en te zien dat het binnen volledig diffuus is. Er zijn dan praktisch geen schaduwen te zien. De publicitaire aandacht is dan ook groot. Zo is er door TuinbouwTV een filmpje van de kas gemaakt (<http://www.youtube.com/watch?v=JXnX80tuvFU>) en is er ook een Engelstalig videofragment gemaakt (<http://www.thesustainabilityinitiative.org/content/asymmetrical-greenhouse-roofs>).

Daarnaast zijn er een tweetal wetenschappelijke publicaties over de kas opgesteld.

- Sonneveld P.J, Swinkels, G.L.A.M, van Tuijl B.A.J, Janssen, Zwart, H.F. de, 2011, Static Linear Fresnel Lenses as LCPV System in a Greenhouse, Proceedings of the CPV5 congress, Las Vegas, In Press
- Sonneveld P.J, Swinkels, G.L.A.M, van Tuijl B.A.J, Janssen, 2011, Up Scaling and Test Results of an advanced Fresnel Greenhouse, Proceedings of the Greensys Symposium, Halkidiki, In Press

Ook zijn er publicaties geweest in vakbladen

- Bezemer, J., 2011, Goed perspectief voor ingenieus concept zelfvoorzienende kas, Onder glas 6 (2011)
- Slegers, J., 2011, DaglichtKas verrent potplanten, Vakblad voor de bloemisterij 36 (2011)
- Een artikel is in Nieuwe Oogst van 26 november.
- Joeri van der Kloet, 2011, De DaglichtKas, Glastuinbouwtechniek Magazine 04 (2011)



10 Dankwoord

De realisatie van een innovatief project zoals de DaglichtKas leidt tot veel onverwachte complicaties. Er was daarom een grote mate van flexibiliteit, inventiviteit en doorzettingsvermogen nodig om alle installaties werkend te krijgen. Een welgemeend dankwoord is dan ook op zijn plaats, allereerst voor Technokas en Bode Project- en Ingenieursbureau die de kas hebben ontworpen en gebouwd. In zo'n compleet andere kas dan normaal moeten allerlei uitvoeringsdetails regelmatig weer gewijzigd worden en het is prijzenswaardig dat Hans van Tilborgh, Peter Zwinkels en Tom Waasdorp daar steeds weer met begrip aan werd meegewerkt.

Voor de aansluiting van de technische installatie die de beweging van het zonvolgmechaniek mogelijk maakt is met veel inzet en volharding gewerkt door de technici van Wageningen UR. Hennie van Dorland, Chris Terbart en Hans Janssen hebben veel uren in de warmte en het felle zonlicht gewerkt aan een installatie die uiteindelijk zonder noemenswaardige storingen heeft gewerkt. Dit ook dankzij de uitstekende software van Gert-Jan Swinkels die voor elk moment van het jaar wist waar de collector moest komen te staan om de brandlijn te onderscheppen.

Bart van Tuijl heeft een grote inzet getoond in de werkzaamheden aan het eerste prototype voor de CPVT-collector. Zijn vaste hand bij de soldeerwerkzaamheden en zijn grote werkprecisie waren hierbij onmisbaar.

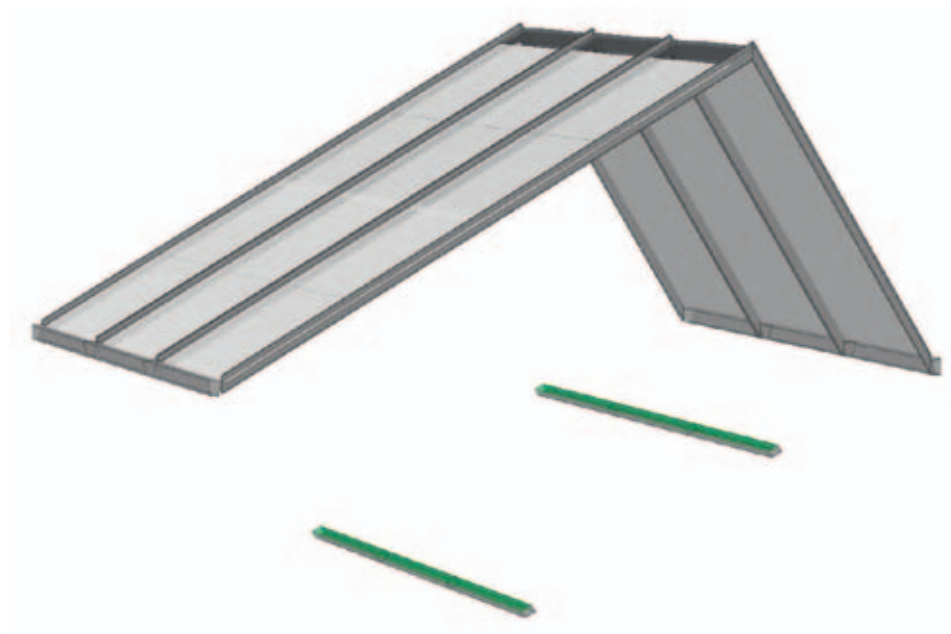
En tenslotte is een woord van dank op zijn plaats voor de mensen die in Bleiswijk de teelt verzorgen en het onderhoud aan de installatie plegen. Piet Koornneef, Rob Pret, Kees Scheffers, Bram van Haaster en Hans Schuttler hebben veel vakkennis en toewijding ingebracht, waardoor de potentie van de DaglichtKas goed over het voetlicht is gekomen.

Bijlage I Het lenssimulatiemodel

Ten behoeve van de inschatting van de effecten van allerlei varianten voor de DaglichtKas (dakhelling, aantal lenzen, brandpuntsafstand) en ten behoeve van de bepaling van de optimale collectorpositie voor ieder moment van de dag is een lenssimulatiemodel gemaakt. Het model is gebaseerd op RayPro, het ray-tracing model van Wageningen UR glastuinbouw. In RayPro kan een willekeurig aantal oppervlakken in een 3D ruimte worden gedefinieerd, waarbij voor elk oppervlak wordt vastgelegd wat de transmissie, reflectie of absorptie van licht is als functie van de hoek van inval. Bij elke intersectie van een lichtstraal met een oppervlak wordt berekend welke fractie wordt gereflecteerd en wordt getransmitteerd. Voor de reflecterende lichtstraal wordt de richting bepaald middels de hoek van intrede = gespiegelde hoek van uitrede regel. Voor het getransmitteerde licht wordt de richtingsverandering van die lichtstraal berekend in afhankelijkheid van het verschil in brekingsindex aan de verschillende zijden van dat oppervlak.

Door het directe licht voor te stellen als een verzameling van 100.000 parallelle lichtstralen en deze lichtstralen op hun pad door het kasdek te volgen, zowel qua richting als qua intensiteit, kan bepaald worden hoeveel licht er uiteindelijk in het brandpunt verzameld wordt.

Onderstaande tekening toont het kasdek-model wat bij deze berekeningen is gebruikt en het lensmodel.



Figuur I.1. Het kasdek-model en de collectoren wat gebruikt is voor de ray-tracing.

In het model bestaat het zuiddek uit twee glasplaten waartussen de lens ligt. De lens is gemodelleerd als 'prismatjes' in de gootrichting van het model. Van deze prisma's maakt het bovenvlakje een hoek ten opzichte van het ondervlak, zodanig dat de verzameling van die prisma's het licht naar een brandlijn concentreren. Onderstaande figuur geeft een schetsmatige weergave van de gebruikte fresnellens.



Figuur I.2. Dwarsdoorsnede van de lens. Ter vereenvoudiging van de illustratie zijn de afmetingen en focusafstand niet in overeenstemming met de lens die in het model is gebruikt. De lens in het model bestaat, net als in de DaglichtKas uit tweehonderd vlakjes per lens.

