



PV-cellen op de ZonWindKas

H.F. de Zwart
H.J.J. Janssen



© 2011 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

Wageningen UR Glastuinbouw

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

Inhoudsopgave

Abstract		5
Samenvatting		7
1	Inleiding	9
2	Effect lichtinval op PV cellen	11
3	Effect temperatuur op elektrisch rendement PV cellen	17
4	Verificatie modelberekeningen met metingen	19
5	Betekenis van de onderzoeksresultaten	21
6	Conclusies	23
7	Literatuur	25
Bijlage I	Bepaling van het elektrisch geleverd vermogen	27

Abstract

The 'ZonWindKas' is one of the demonstration greenhouses of the Innovation and Demonstration centre in Bleiswijk. The greenhouse is developed by ThermoTech and Gakon as one of the designs in the contest on the development of energy producing greenhouses. The greenhouse has turnable lamellas in the south facing roof segment which are turned perpendicular to the sun as the intensity of solar radiation exceeds a certain threshold. Originally, the lamellas were meant to collect solar heat, but when these lamellas are covered with PV-cells, they could provide electricity as well.

This report discusses the results obtained from measurements and modelling on the perspective of solar energy collection from PV-cells mounted on the lamellas of the 'ZonWindKas'.

The model takes account for the geometry of the greenhouse, the material properties of the greenhouse cladding and the way of operation of the lamellas. The operation of the lamellas is parameterized by the radiation intensity at which the lamellas are closed. The current system keeps the lamellas open as long as the radiation is below 200 W/m^2 . This means that the PV-cells at the lamellas do not produce any electricity on dull days.

The model computes local light intensity densities and therefore it can be computed that due to shading effects, roof-sections near the gutter will produce significantly less electricity than roof-sections near the ridge. Measurements on the electricity production of a number of small PV-panels at different locations on the roof confirmed the model results.

Assuming an efficiency of 15% for the PV-cells at reference conditions, the computed yearly amount of electricity from the upper roof segments will be 100 kWh per m^2 of PV-cell. In the middle section of the south facing roof segment of a greenhouse with the geometry of the 'ZonWindKas' will produce 90 kWh per m^2 of PV-cell per year. The production drops further towards 55 kWh per m^2 PV-cell per year at the bottom most roof section.

Besides the production at the lamellas of the solar collector, the model computes the electricity production of a PV-panel outside or beside the greenhouse for the given light conditions and cell properties as well. This computation shows a 40% increment of an outside PV-cell in comparison to PV-cells at the best locations at the lamella's. The largest part of this increment comes from the fact that the outside panel is not covered by the greenhouse cladding. Another large fraction of the extra electricity production (35%) comes from the fact that a fixed, outside panel is not turned out of the sun at low light intensities. So in all occasions where the lamellas are opened to let sunlight entering the greenhouse, the PV-cells at the lamellas do not produce electricity, whereas the outside PV-panels do.

15% Of the extra electricity production of the outside PV-panels comes from the higher conversion efficiency of a panel in the open air. The higher conversion efficiency comes from the significantly lower temperature of outside panels. The PV-cells at the lamellas become hot as it is the purpose of the ZonWindKas to produce hot water ($65 \text{ }^\circ\text{C}$).

In financial terms, it is concluded that electricity produced by PV-cells at the lamellas is at least 1.6 times more expensive in comparison to the solar electricity from panels with comparable PV-material mounted on ordinary roofs. This is because of the 40% higher electricity output per unit of PV-surface and because of the higher costs of the fixing of the small strips of PC-material on the lamellas.

The experiment and computations show that it is very well possible to produce an equal amount of solar power with PV-cells on the lamella's in te top section of the roof as the yearly electricity consumption of the ZonWindKas greenhouse (around $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ year})$). Thus it is shown to be realistic that the ZonWindKas can operate completely carbon neutral, as it was shown already that the thermal energy demand could be harvested with the thermal heat collection function of the lamellas.

Samenvatting

De ZonWindKas is als één van de demonstratiekassen in het Innovatie en Demo Centrum in Bleiswijk ontwikkeld door ThermoTech en Gakon. De ZonWindKas bestaat uit een systeem van lamellen in de zuidkant van het kasdek die in de zon gedraaid kunnen worden op het moment dat de zon boven een bepaalde stralingsintensiteit schijnt. Deze lamellen dienden oorspronkelijk voor de productie van warm water, dat na opslag in een zeer goed geïsoleerde buffer kan worden gebruikt voor de verwarming in de winter. Deze lamellen zouden kunnen worden voorzien van PV-cellen voor de productie van elektriciteit.

In dit onderzoeksproject is via metingen en een model berekend wat de potentie is van PV-cellen op de lamellen. Het model houdt rekening met de geometrie van de kas, de eigenschappen en positie van kasconstructiematerialen, de gebruikswijze van de lamellen en de buitenlichtcondities. De resultaten geven aan hoe de elektriciteitsopbrengst afhangt van de vorm van de kas, maar ook hoe de elektriciteitsopbrengst over het kasdek verdeeld is. Het blijkt dat de opbrengst van de PV-cellen in daksecties dicht bij de goot bijna de helft minder elektriciteit per jaar produceren dan PV-cellen in de bovenste daksecties.

Het model is geverifieerd met metingen die zijn uitgevoerd door kleine PV-paneeltjes op verschillende plaatsen in het dakvlak op de lamellen te monteren en de stroomproductie te meten in de periode van 18 juni tot 1 oktober 2010. De metingen kwamen goed overeen met de verwachtingen van het model. Daarom kunnen er algemene uitspraken op grond van berekeningen met dit model worden gemaakt.

Uitgaande van een PV-cel met een rendement van 15% onder standaard-omstandigheden berekent het model een jaarproductie van 100 kWh per m² PV-cel per jaar voor de gunstigste locatie op het dak. Dit ligt in de bovenste 2 van de 5 daksecties van de ZonWindKas. Voor de middelste daksectie is de elektriciteitsproductie 90 kWh per m² per jaar. De 4e daksectie produceert 75 kWh per m² per jaar en de onderste sectie, die het dichtst bij de goot ligt, zou in de ZonWindKas 55 kWh per m² PV-cel per jaar produceren.

Verdere modelberekeningen hebben uitgewezen dat deze verschillen aanzienlijk kleiner worden indien de kas meer symmetrisch zou zijn geweest met een kleinere dakhelling.

Het model berekent ook de elektriciteitsproductie van een soortgelijke PV-cel wanneer die buiten de kas wordt geplaatst. Eenzelfde PV-cel buiten de kas produceert 40% meer elektriciteit dan PV-cellen op de lamellen in de kas. De helft van deze meeropbrengst komt doordat er geen extra glasruit boven ligt. 35% Van de meeropbrengst komt doordat een PV-cel buiten niet door het lamellensysteem uit de zon wordt gedraaid bij weinig zonlicht en de resterende 15% extra komt door het hogere rendement van de PV-cel die buiten koeler blijft.

Behalve een hogere stroomproductie zullen PV-cellen die op een oppervlak buiten de kas worden geplaatst ook goedkoper kunnen worden gemaakt. De bedrading is immers veel eenvoudiger en de unit-afmetingen veel groter.

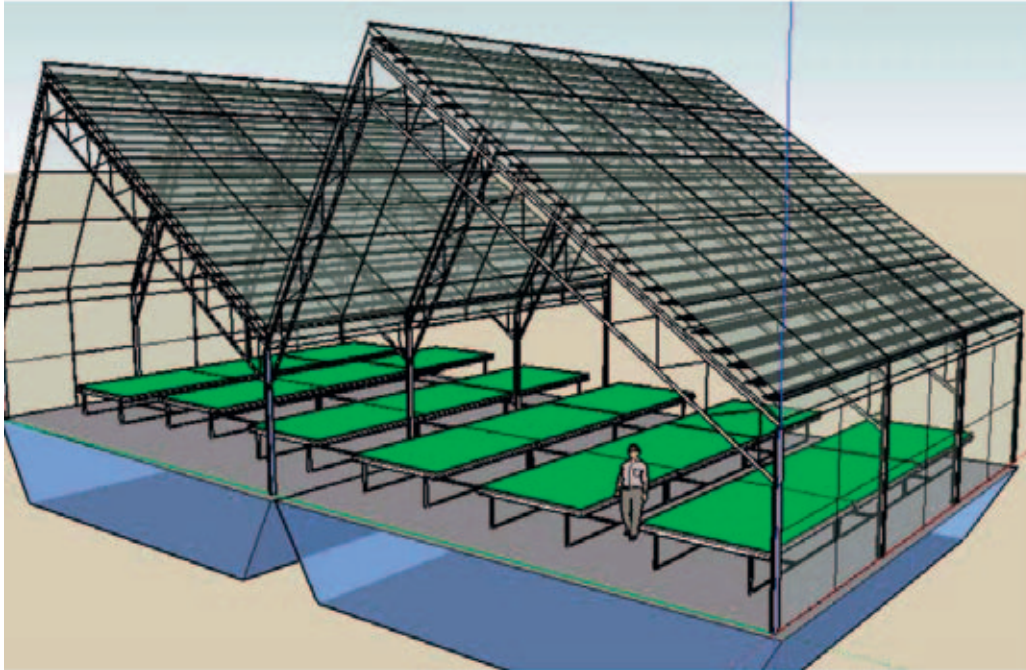
De aanbeveling van dit rapport is dan ook dat PV-cellen in eerste instantie op de dakvlakken moeten worden gelegd die niet lichtdoorlatend zijn (denk bijvoorbeeld aan de bedrijfsruimte). Pas in tweede instantie zouden PV-cellen op de lamellen van kassystemen zoals de ZonWindKas kunnen worden gemonteerd. De kostprijs van deze stroom zal 1.6 maal zo hoog zijn als de kostprijs van stroom uit standaard zonnepanelen.

Als alleen de lamellen in de bovenste sectie van het dakvlak van de ZonWindkas van PV-cellen zou worden voorzien zou de opbrengst 12 kWh per m² kas per jaar bedragen. Dit is genoeg voor de compensatie van het jaarlijkse stroomverbruik van de kas zodat de ZonWindKas niet alleen warmtetechnisch energieneutraal zou worden, maar ook elektrisch energieneutraal zou kunnen functioneren.

1 Inleiding

De ZonWindKas is één van de demonstratiekassen in het Innovatie en Demo Centrum in Bleiswijk. De kas is ontwikkeld door Thermotech en Gakon in het kader van de ontwerpwedstrijd Kas als Energiebron, welke gefinancierd is door het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van Economie, Landbouw en Innovatie.

Onderstaande figuur toont een schets van deze kas.



Figuur 1. Schets van de ZonWindKas Het zuidvlak is voorzien van draaibare lamellen waarop PV-cellen gemonteerd zouden kunnen worden.

De kas heeft een asymmetrisch kasdek, waarbij de zuidkant een zeer lang paneel is en de noordkant (daardoor) een kort, steil dakvlak vormt. In het lange zuidwaarts gerichte dek zitten draaibare lamellen die op het moment dat de zon boven een bepaalde stralingsintensiteit komt dichtgedraaid kunnen worden. Op deze manier wordt de hoeveelheid licht op gewasniveau geregeld en kan warmte worden verzameld. Eerder onderzoek van Wageningen UR Gluinbouw heeft aangetoond dat het lichtoverschot in kassen waar schaduwminnende gewassen worden geteeld goed kan worden geregeld en gelijktijdig een substantiële hoeveelheid warmte op 65 °C kan worden verzameld.

Eerdere metingen laten een warmteproductie van 20 tot 25 m³ aardgas equivalenten per m² kas zien bij een zeer gering elektriciteitsgebruik (de Zwart, 2010). De kas zal minder dan 10 kWh per m² per jaar verbruiken (exclusief eventuele belichting). De elektriciteit kan zoals in de oorspronkelijke plannen van het consortium bedacht via windmolens worden opgewekt (vandaar de naamgeving van de kas), maar zou ook via PV-cellen op de lamellen kunnen worden gegenereerd. Belangrijke factoren voor de elektriciteitsproductie van de PV cellen op de ZonWindKas zijn natuurlijk het elektrisch rendement van de PV-cellen en de hoeveelheid licht die op de cellen valt. Het celrendement hangt af van de technische uitvoering, maar ook van de temperatuur van de cel. De lichtafhankelijkheid is afhankelijk van de geometrie van de kas, de positie van de cellen op het dek, de hoeveelheid, afmetingen en positie van kasconstructiedelen en dekmaterialen, het gebruik van de lamellen en de buitenstralingscondities.

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op het effect van de geometrie van het kasdek en de roeden op de lokale lichthoeveelheid die op de PV cellen valt en wordt aangegeven hoe dit doorwerkt op de hoeveelheid zonlicht die voor de elektriciteitsproductie beschikbaar is. Deze effecten worden berekend met een model dat voor elke plek op het zuidvlak de stralingsintensiteit berekent in afhankelijkheid van de positie van de zon en de stand van de lamellen en uitrekent of die plek dan in de schaduw ligt of niet.

Hoofdstuk 4 gaat in op het effect van de koeling van de PV-cellen door het water in de lamellen. Als de lamellen worden gebruikt wordt er water van 25 °C aan de onderkant aangevoerd en wordt het bovenaan op 65 °C afgetapt. PV-cellen die op de onderste lamellen zijn gemonteerd hebben dus een temperatuur van ongeveer 25 °C en die aan de bovenkant worden gemonteerd werken bij een temperatuur van 65 °C. Uit de literatuur wordt een karakteristiek voor de relatie tussen temperatuur en rendement opgesteld.

Door deze rendementskarakteristiek te combineren met de lichtverdeling die in hoofdstuk 2 is bepaald wordt de verwachte elektriciteitsproductie in afhankelijkheid van plaats op het kasdek verkregen.

In dit onderzoek is een reken model opgesteld van het werkingsprincipe van de ZonWindKas om de boven genoemde factoren van licht en temperatuur te onderzoeken en scenario's door te kunnen rekenen. Ter verificatie van de berekeningen zijn in de periode 18 juni t/m 1 oktober 2010 continue metingen aan kleine zonnecellen verricht. De zonnecellen waren op een negental plaatsen op de lamellen van de ZonWindKas gemonteerd. In de gemeten elektriciteitsproductie van deze cellen zijn alle effecten van kasgeometrie, beschaduwing door dakconstructiedelen en het gebruik van de lamellen samengevat. Hierdoor kan dus goed worden gekeken naar de vergelijking tussen de berekende en gemeten elektriciteitsproductie. De resultaten van deze vergelijking zijn beschreven in hoofdstuk 5.

Hoofdstuk 7 geeft de conclusies uit dit onderzoek.

2 Effect lichtinval op PV cellen

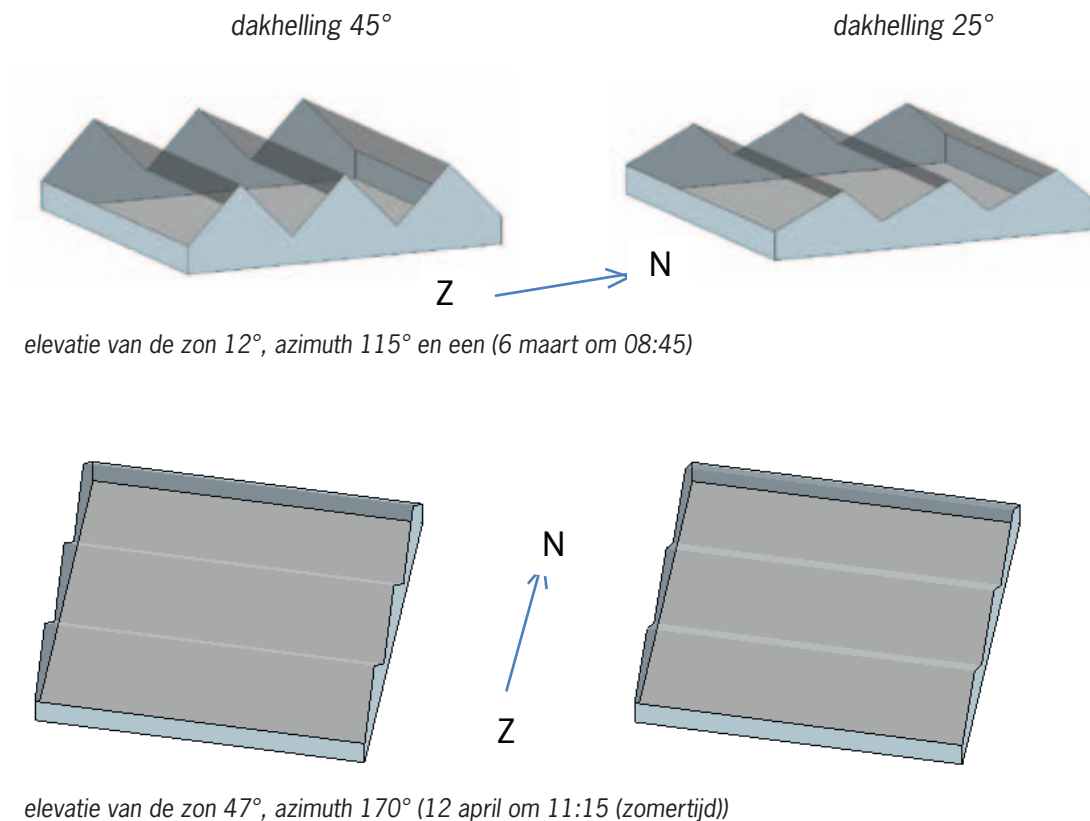
Belangrijke factoren voor de elektriciteitsproductie van de PV cellen op de ZonWindKas zijn de hoeveelheid licht die op de cellen valt, afhankelijk van de geometrie van de kas, de positie van de cellen op het dek, de hoeveelheid, afmetingen en positie van kasconstructiedelen en dekmaterialen, het gebruik van de lamellen en de buitenstralingscondities.

Effect van kasgeometrie

Een karakteristieke eigenschap van een moderne kas in vergelijking tot de meeste andere gebouwen is het repeterende karakter van het kasdek. Indien er in de zuidwaarts gerichte dakvlakken zonnecollectoren en/of PV-cellen worden opgenomen vormt het gezamenlijk collectoroppervlak een 'veld' van collectoren. Gezien vanuit de invalrichting van het zonlicht vormt dit oppervlak, afhankelijk van de geometrie van het kasdek en afhankelijk van de zonpositie, een gebied waarin de oppervlakken elkaar gedeeltelijk overlappen of uit collectoroppervlak dat afgewisseld wordt met dunne stroken dakvlak zonder collectoren (de noordwaarts gerichte dakvlakken)

Ter illustratie hiervan zijn er in Figuur 2. twee dakvormen getekend, gezien onder twee verschillende invalshoeken voor het zonlicht.

In de linker kolom is het dak symmetrisch en staat het dak onder een helling van 45° . In de rechterkolom is het zuidwaarts gerichte dak precies even groot, maar staat het onder een hoek van 25° . Het dak wordt in dat geval asymmetrisch.



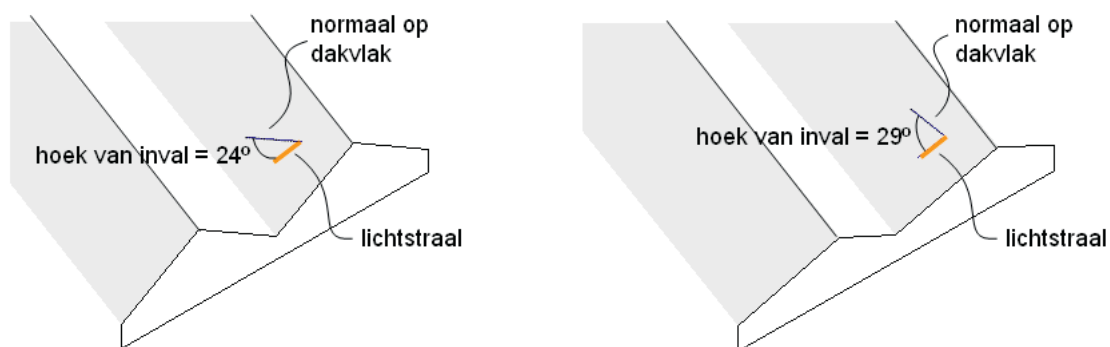
Figuur 2. Twee uitvoeringsvormen van een kas met een zuidvlaklengteratio van 0.71. Dit betekent dat de lengte van het zuidvlak 0.71 maal de goot-afstand bedraagt. Bij een dakhelling van 45° levert dit een gelijke lengte van het noord- en zuidvlak op. Bij andere dakhellingen levert dit een asymmetrisch dak, zoals in de rechter Figuur goed is te zien. De twee bovenste figuren tonen de beschaduwing van zuidvlakken door de ervoor liggende kappen (relevant bij lage zons-hoogten) en de onderste figuren tonen de invloed van de dakhelling op het geprojecteerde oppervlak in de richting van de zon. Dit is in de linker Figuur een beetje kleiner dan in de rechter Figuur (te zien aan het dikkere lichtere streepje, een stukje van het noordwaarts gerichte dakvlak).

Indien de randeffecten buiten beschouwing worden gelaten (het voorste dakvlak in de figuren ondervindt geen beschaduwing van een voorliggende kap en de eerste meters in de gootrichting evenmin) is de totale hoeveelheid licht waar de collectoren aan blootgesteld worden bij lage zonshoogten niet afhankelijk van de dakhelling. De dakhelling bepaalt dan alleen de mate waarin dakvlakken elkaar overlappen. Zo kan in de bovenste regel van Figuur 2. worden gezien dat vanuit de getoonde hoek van inval in de linker Figuur 30.% van de zuidwaarts gerichte 2e en 3e dakvlak in de schaduw van het ervoor liggende dak ligt, terwijl dat in de rechter Figuur slechts 20% is.

In de tweede regel van Figuur 2., geldend voor zonshoogte die groter is dan de dakhelling is er wel een invloed van de dakhelling op de hoeveelheid licht die door de collector onderschept kan worden. In dit voorbeeld is het in de richting van de zon geprojecteerde dakoppervlak bij het steile zuidvlak wat groter dan bij het vlakke dak. Het verschil is echter klein.

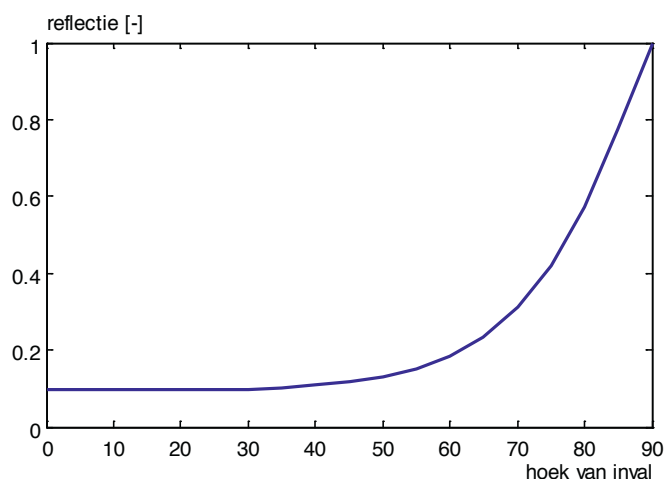
Effect eigenschappen kasdek materiaal

Naast de effecten die te maken hebben met de projectie van het zuidvlak in de richting van de zon speelt er een effect van de hoek-afhankelijke reflectie van zonlicht op het dakvlak. In onderstaande Figuur is uitgebeeld hoe deze hoek van inval afhangt van de dakhelling.



Figuur 3. Verschil in hoek van inval bij gelijke zonspositie (azimuth 145° , elevatie 42° , geldend op 12 april om 10:00 zomertijd), maar verschillende dakhellingen. In de linker Figuur is de dakhelling 45° en is de hoek van inval 24° , terwijl in de rechterfiguur, geldend voor een dakhelling van 25° , is de hoek van inval 29° .

De reflectie neemt toe bij vergroting van de hoek van inval. Dit wordt getoond in onderstaande Figuur die geldt voor standaard tuinbouwglas.

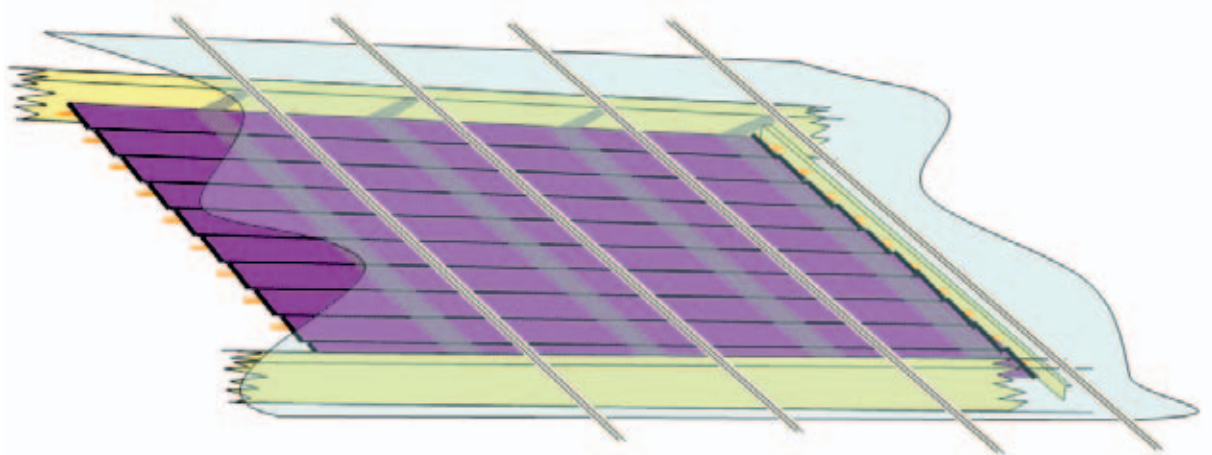


Figuur 4. Reflectie van zonlicht op een glasplaat als functie van de hoek van inval.

De Figuur laat zien dat de reflectie over een behoorlijk bereik klein is (10%), maar bij hoeken van inval die groter zijn dan 60° snel toeneemt.

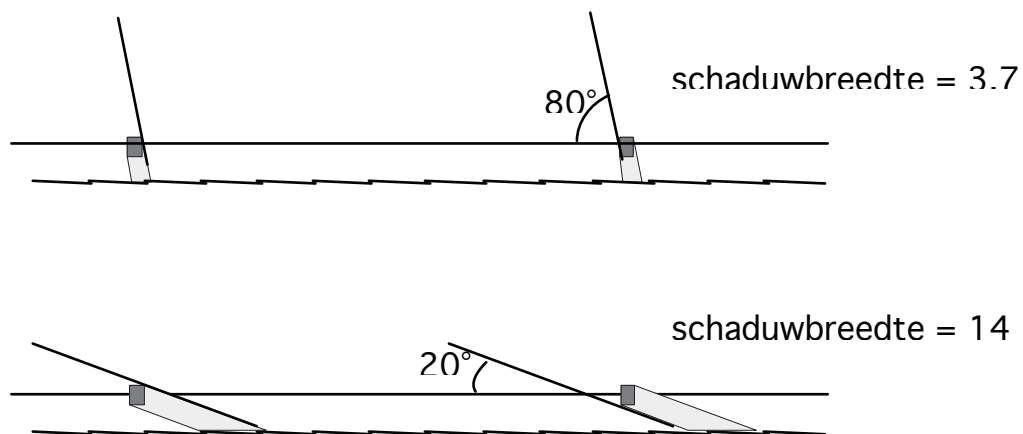
Effect kasdeconstructiedelen

Voor de bepaling van de voor de energieverzameling beschikbare hoeveelheid zonlicht is er nog een derde effect dat in de beschouwing meespeelt en dat is het feit dat een dakvlak glasroeden heeft waarin de afdekkende glasplaten omvat worden. Figuur 5. toont een schets van de licht-onderschepping die deze constructie-elementen opleveren.



Figuur 5. *Schaduwbanen door glasroeden*

De glasroeden zorgen voor scherpe schaduwen. Afhankelijk van de hoogte en breedte van de roeden en de hoek die het zonlicht met die roeden maakt is de breedte van de schaduw minimaal 3 cm, maar kan die oplopen tot wel 15 cm wanneer de zon een kleine hoek ten opzichte van het dakvlak maakt.



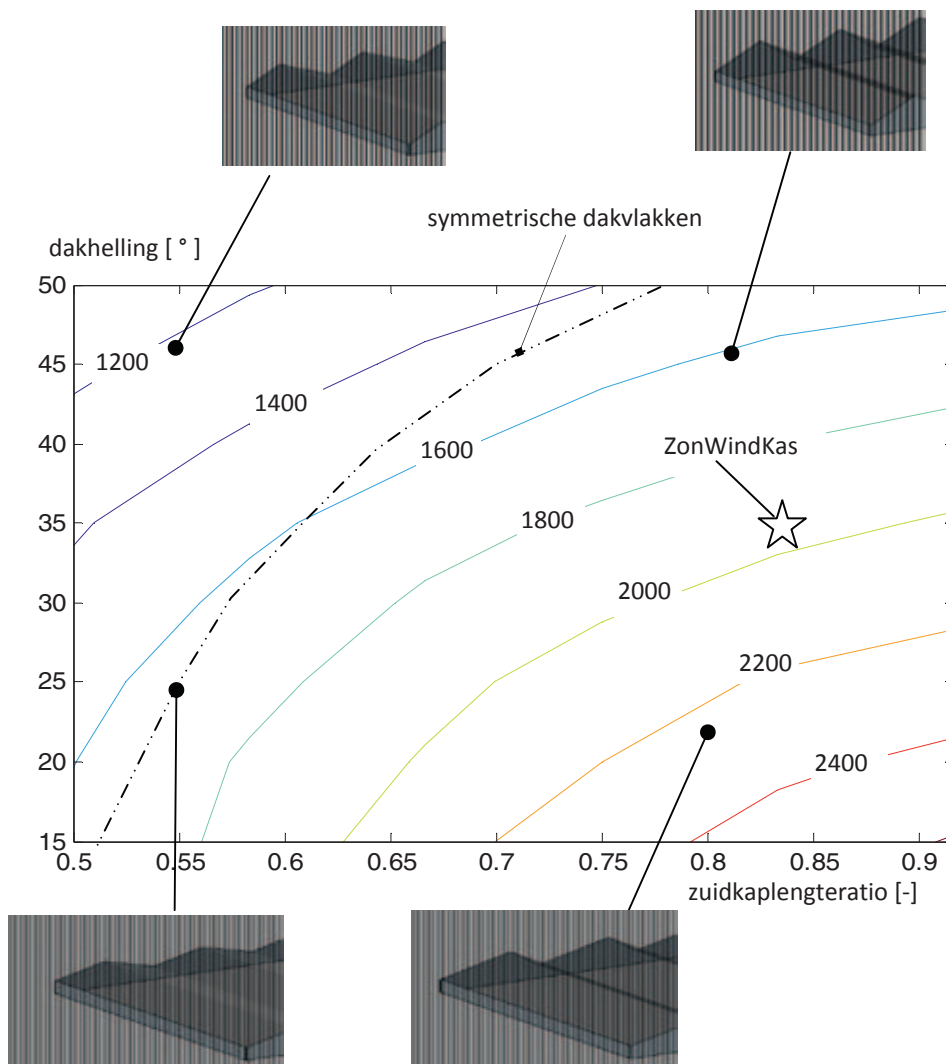
Figuur 6. *Breedte van de schaduwbanen door glasroeden als functie van de hoek die het zonlicht met het dakvlak maakt. De glasroeden zijn 3 cm breed en 4 cm hoog*

Effect gebruik lamellen

Voor de omzetting van zonlicht in elektriciteit vormt de beschikbaarheid van licht uiteraard de belangrijkste bepalende factor. Behalve de geometrie en afmeting van het dakvlak, de transmissie door de bovenste glasplaat en de beschaduwing door roeden heeft de ZonWindKas nog de extra eigenschap dat de zonne-energie collecterende lamellen alleen worden gebruikt als er meer dan een bepaalde hoeveelheid zonlicht is. In de huidige gebruikswijze ligt deze grens in het voor- en najaar op 250 W/m^2 globale straling, en in de zomer wordt 200 W/m^2 globale straling aangehouden. Is de lichtintensiteit lager dan worden de lamellen zoveel mogelijk uit de zon geraaid om een maximum aan zonlicht ten behoeve van de gewasgroei binnen te krijgen.

Resultaat

Als de factoren kas geometrie, transmissie kasdek materiaal, beschaduwings effecten door de kasdekconstructiedelen én de gebruikswijze van de lamellen worden samen genomen, kan de onderstaande grafiek worden gemaakt waarin de hoeveelheid licht die voor de conversie van zonlicht naar elektriciteit beschikbaar is wordt getoond in afhankelijkheid van de dakhelling en de zuidkaplengteratio.

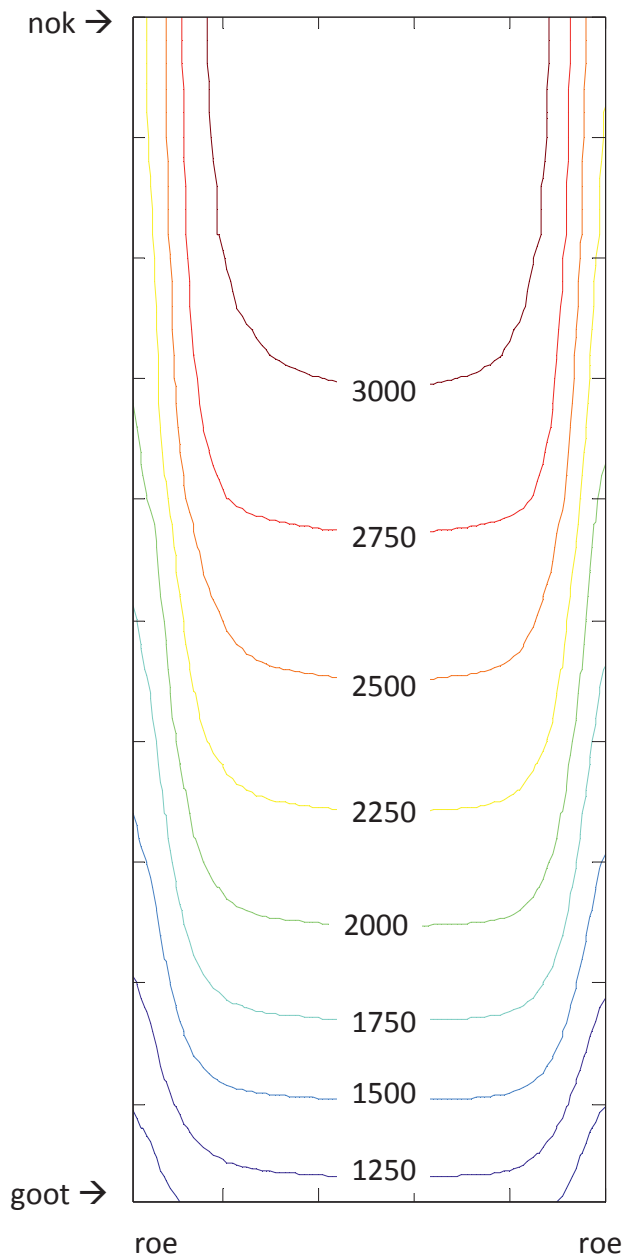


Figuur 7. Totale hoeveelheid licht die in een Nederlands jaar (2010) op het zuidwaarts gerichte collectoroppervlak valt als functie van de dakhelling en de zuidkaplengteratio. Er is uitgegaan van glasroeden van 3 bij 4 cm en de lamellen worden bij een stralingsintensiteit van meer dan 200 W/m^2 globale straling gesloten. De weergegeven waarden zijn MJ lichtenergie dat door de collector (met het daarbij behorende rendement) in nuttige energie omgezet zou kunnen worden, uitgedrukt per m^2 kasoppervlak

De ZonWindKas die op het IDC is gebouwd heeft een dakhelling van 35° en een zuidkaplengteratio van 0.83. Deze geometrie is in Figuur 7. gemarkeerd met een ster.

Figuur 7. laat zien dat de hoeveelheid zonlicht die voor elektriciteitsproductie beschikbaar is groter wordt naarmate de dakhelling lager wordt en uiteraard naarmate de zuidkap langer wordt (dus de zuidkaplengteratio groter wordt). Het algemene idee dat een zonnecollector het beste werkt bij een helling van 37° gaat in dit geval niet op omdat het hier niet om een enkele collector gaat (zoals bij de bekende collectoren op woonhuizen) maar om een repeterend collectorveld. De invloed van de dakhelling wordt groter bij een grotere zuidkaplengteratio omdat de collector dan steeds vaker in de schaduw van de voorliggende collector komt te liggen.

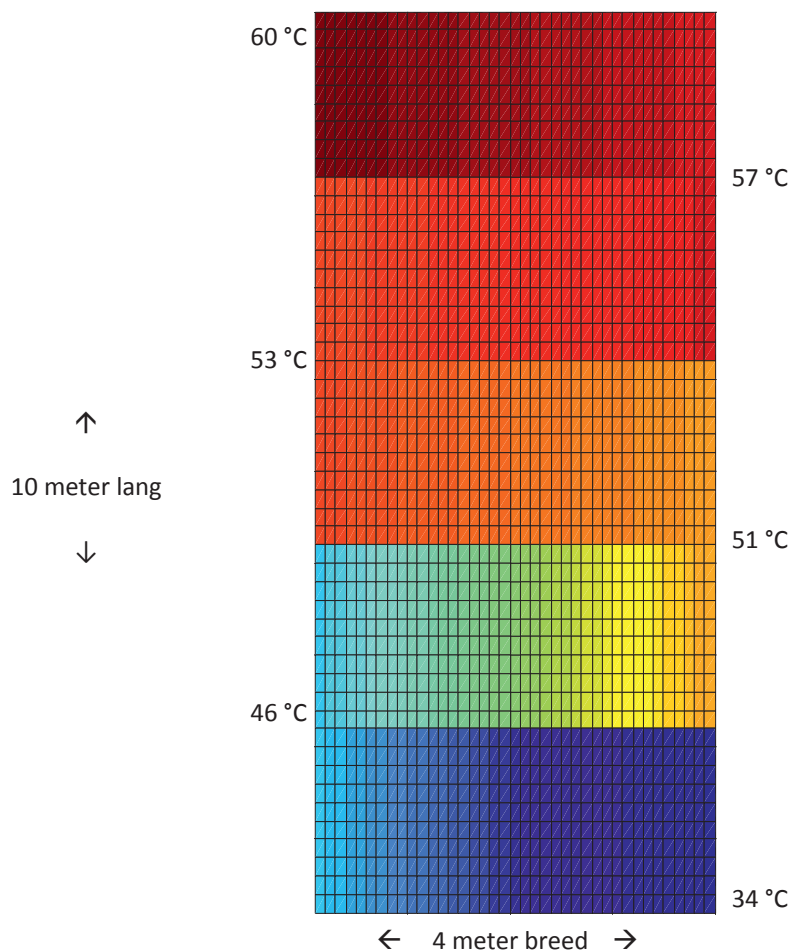
Figuur 7. heeft betrekking op de hoeveelheid licht die gemiddeld door de collectoren onderschept worden. Binnen het dakvlak is er variatie ten opzichte van dit gemiddelde. Onderstaande Figuur toont de contourplot van de jaarlijkse lichthoeveelheid op het zuidvlak van de ZonWindKas tussen twee roeden in een strook vanuit de goot tot aan de nok. Door de variatie in de hoeveelheid licht is het raadzaam om bij een gedeeltelijke bedekking van de lamellen met zonnecellen deze cellen vooral bovenin de dakvlakken en ruim tussen de roeden te plaatsen.



Figuur 8. Verdeling van de hoeveelheid licht over het dakvlak tussen twee roeden vanuit de goot naar de nok bij een geometrie zoals die bij de ZonWindKas is gebruikt. De Figuur heeft niet dezelfde lengte-breedte verhouding als het echte dakvlak. De afstand van roe naar roe is 1 meter, terwijl de afstand van goot naar nok 10 meter is. De weergegeven waarden zijn MJ/m² lichtenergie dat door de collector met het desbetreffende rendement omgezet zou kunnen worden.

3 Effect temperatuur op elektrisch rendement PV cellen

Fotovoltaïsche cellen laten een verlaging van het elektrisch rendement zien bij toename van de temperatuur. Dit temperatuur-effect verschilt per fabrikant en hangt af van het soort PV-cel. Voor een gemiddelde mono-kristallijne PV-cel ligt de reductie van het vermogen als functie van de temperatuur op 0.5% per °C. Voor PV-cellen van amorf silicium daalt de verlaging van het elektrisch rendement wat minder snel met de temperatuur; 0.3% per °C. Deze percentages gelden ten opzichte van het elektrisch vermogen bij standaard omstandigheden, dat wil zeggen een cel-temperatuur van 25 °C. De temperatuur van het water in lamellen loopt vanuit de goot naar de nok op. Onderin loopt water met een temperatuur van gemiddeld 34 °C het paneel binnen en de uitstroomtemperatuur was in de betreffende meetperiode gemiddeld 60 °C. De beoogde opwarming in het ZonWind-concept was overigens van 25 naar 65 °C maar door onnauwkeurigheden en veiligheidsmarges in de regeling waren de temperaturen vaak wat anders dan bedoeld. Het kasdek is in 5 vlakken verdeeld waardoor er in de hoogte-richting 5 temperatuur-niveaus aanwezig zijn. Bovendien stroomt het water beurtelings van links naar rechts en van rechts naar links waardoor er over een dakvlak van 4 meter breed en 10 meter hoog het volgende temperatuur-beeld zal ontstaan.

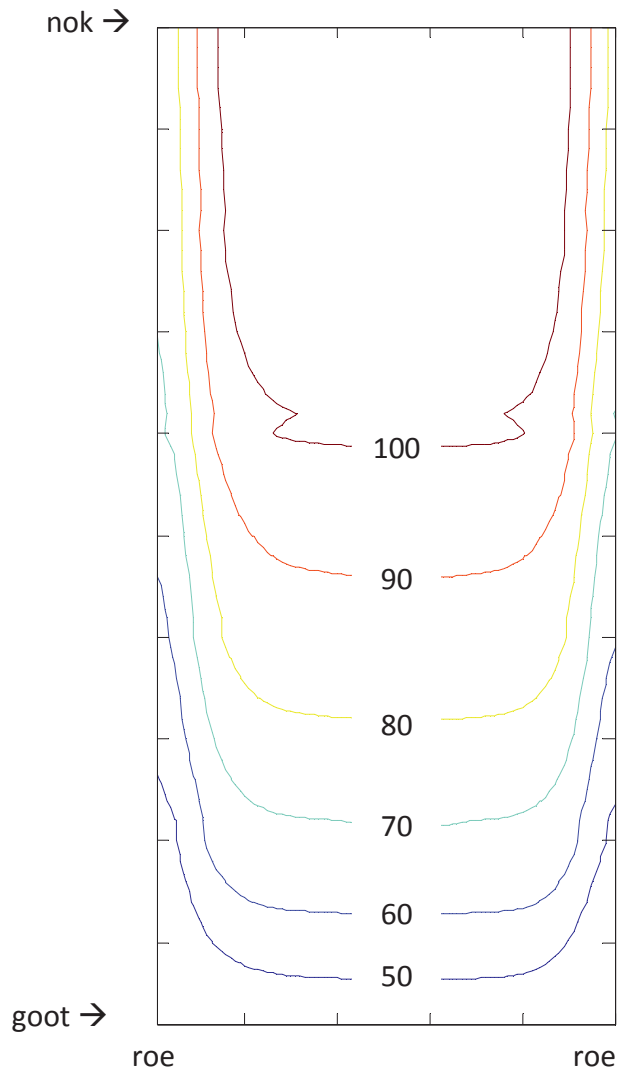


Figuur 9. Typische temperatuurverdeling op het dakvlak van de ZonWindKas tijdens de warmte-oogst.

Wanneer de in de literatuur genoemde temperatuur-afhankelijkheid van het elektrisch rendement op deze typische temperatuurverdeling wordt toegepast dan is bij gebruik van mono-kristallijne cellen het elektrisch rendement in het onderste segment 90% van het rendement in standaard omstandigheden. Gaande naar boven loopt dit rendement terug via 87%, 86% en 84% naar 83% voor het bovenste (het warmste) segment. Bij gebruik van amorf silicium is de rendementsafname kleiner (maar is ook het rendement onder standaard omstandigheden kleiner).

Resultaat

Uitgaande van een PV-cel met een rendement van 15% onder standaard-omstandigheden, levert de combinatie van de lichtbeschikbaarheid die in Figuur 8. is afgebeeld met de daling van het elektrisch rendement ten gevolge van de temperatuur-opbouw tot de onderstaande contourplot, waarin de lijnen weergegeven binnen welke contouren 100, 90, 80 enz. kWh elektrisch.



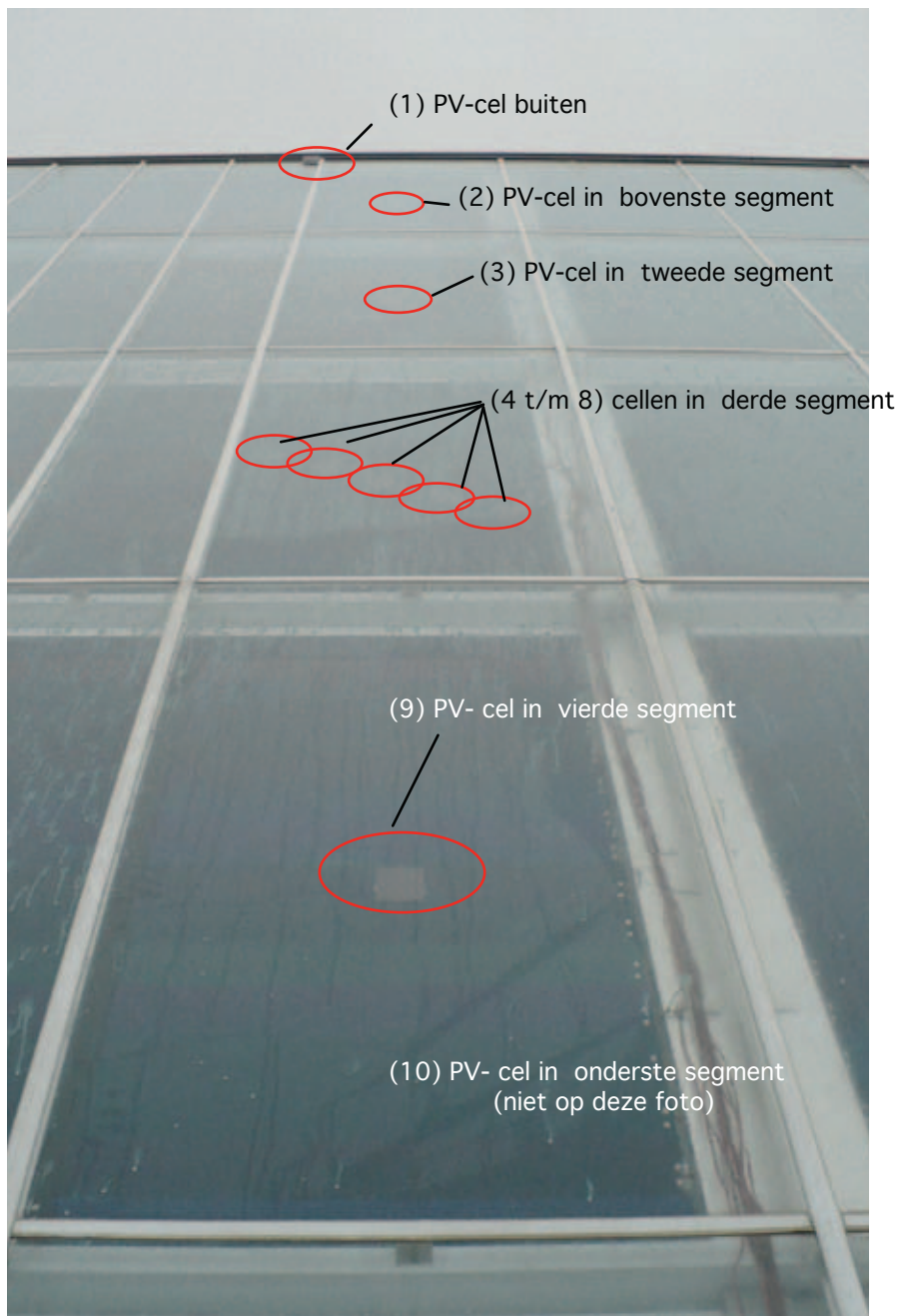
Figuur 10. Verdeling van de hoeveelheid elektriciteit die over het dakvlak tussen twee roeden vanuit de goot naar de nok kan worden geproduceerd. Er is uitgegaan van het gebruik van mono-kristalijne zonnecellen met een rendement van 15% onder standaard omstandigheden en van de geometrie van de ZonWindKas. De Figuur heeft niet dezelfde lengte-breedte verhouding als het echte dakvlak want de afstand van roe naar roe is 1 meter, terwijl de afstand van goot naar nok 10 meter is. De weergegeven contourlijnen zijn kWh elektriciteit per m² zonnecel.

Wanneer Figuur 10. wordt vergeleken met het beeld van Figuur 8. blijkt dat het gebied met de hoogste opbrengst zich wat verder in de richting van de goot uitstrekt dan dat je op grond van de beschikbaarheid van licht zou verwachten. Dit komt doordat de lagere lichtbeschikbaarheid in lagere regionen van het dakvlak gedeeltelijk gecompenseerd wordt door het hogere celrendement dat door de lagere watertemperaturen wordt gerealiseerd.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat het hoogste rendement van de PV cellen bij de nok van het kasdek wordt gehaald, ondanks de hogere PV-cel temperatuur. Bij een kas met de geometrie zoals de ZonWindKas is de jaarlijkse elektriciteitsproductie bij de goot tot 40% lager dan bij de nok. De lagere celtemperatuur weegt niet op tegen het kleinere lichtaanbod.

4 Verificatie modelberekeningen met metingen

De resultaten beschreven in hoofdstuk 3 en 4 zijn resultaten van modelberekeningen die gebaseerd zijn op de geometrie van de ZonWindKas, de gebruikswijze van de lamellen en de lichtomstandigheden in Nederland (data 2010). Ter verificatie van deze berekeningen zijn er op een aantal plaatsen op het dek van de ZonWindKas kleine zonnecellen geplaatst waarvan in de periode van half juni tot eind september de elektriciteitsproductie is gemonitord. Er is ook zo'n zonnecel bovenaan de nok van de kas gemonteerd, die dus de elektriciteitsproductie van een standaard zonnecel-configuratie weergeeft. Onderstaande foto geeft een impressie van de plaatsing van deze cellen.



Figuur 11. Impressie van de positionering van de 10 PV-cellen ter verificatie van de metingen

In de periode van 18 juni tot 1 oktober is de elektriciteitsproductie van deze kleine paneeltjes gemeten. De paneeltjes waren 8 cm breed en 10 cm hoog (0.008 m²). De elektriciteitsproductie is gemeten met de schakeling die beschreven is in Bijlage I.

Resultaat

Onderstaande Tabel geeft de gemeten elektriciteitsproductie, maar ook de productie die op die specifieke locaties wordt verwacht door het eerder beschreven model.

Tabel 1. Gemeten elektriciteitsproductie van de 10 PV-paneeltjes op de ZonWindKas. De paneeltjes zijn 80 cm².

Sensor	Locatie	gemeten productie [kWh/paneeltje]	verwachte productie [kWh per paneeltje]	meting t.o.v. verwachting [%]
1	Buiten op nok	0.58	0.59	-1.3
2	Midden bovenste sectie	0.38	0.38	-0.6
3	Midden in 2e sectie	0.38	0.37	0.1
4	In 3e sectie links	0.31	0.33	-6.9
5	3e sectie li. v.h. midd.	0.36	0.36	-0.4
6	In 3e sectie midden	0.36	0.36	-0.0
7	3e sectie re. v.h. midd.	0.36	0.36	-0.5
8	In 3e sectie rechts	0.37	0.34	8.8
9	Midden in 4e ssectie	0.36	0.33	5.8
10	Midden onderste sectie	0.25	0.25	-0.4

De Tabel laat zien dat de metingen goed matchen met de verwachting. Afwijkingen tussen modelberekening en metingen liggen binnen $\pm 10\%$. De grootste afwijkingen zijn te zien bij het paneeltje in de 3e sectie aan de uiterst linker kant (sensor 4 in Figuur 11.). Deze lijkt meer last te hebben van de beschaduwing door de roede dan verwacht en het paneeltje aan de rechter kant (sensor 8 in Figuur 11.) juist minder. Voor sensor 8 zou het een mogelijke verklaring kunnen zijn dat de wit gecoat constructiedelen (zie Figuur 11.) lokaal voor een hogere licht-dichtheid zorgen dan berekend; een factor waar het rekenprogramma geen rekening mee houdt omdat in er in het totale dakvlak maar weinig plaatsen zijn waar dit soort witte constructiedelen voorkomen.

5 Betekenis van de onderzoeksresultaten

Energetisch

Uit berekeningen en metingen kan worden geconcludeerd dat er grote verschillen zitten in de elektriciteitsopbrengst die op verschillende plaatsen van het dek kan worden gerealiseerd. De onderste sectie produceert slechts 66% van de hoeveelheid die in de bovenste sectie van het dakvlak kan worden geproduceerd. Ook laat Tabel 1. zien dat de gunstigste plaats van het kasdek (het midden van de bovenste sectie) slechts 66 % van de hoeveelheid elektriciteit oplevert die eenzelfde paneel buiten de kas produceert.

Met het model kan worden berekend waar die 34% verlies in productiecapaciteit van de gunstigste plek op het dek in vergelijking met buiten door veroorzaakt wordt. Het blijkt dat de helft van dit verschil voortkomt uit reflectieverliezen van het kasdek. 35% van het verschil komt doordat de lamellen bij lage lichtniveau's open gedraaid worden (en de PV-cellen dus vrijwel geen stroom meer produceren). 15% Van het verschil komt doordat het elektrisch rendement van de cellen die op de lamellen gemonteerd zijn lager ligt dan het rendement van een PV-cel buiten. Op de lamellen wordt het immers aanzienlijk warmer dan in de open lucht, juist omdat het ontwerp van de ZonWindKas bedoeld was om warm water te maken.

Met het model kan ook worden berekend wat er verandert wanneer er voor een andere geometrie wordt gekozen. Daar waar bij een geometrie zoals van de ZonWindKas de stroomproductie in het onderste daksectie 40% lager ligt dan in het bovenste segment is dit in een kas met een flauwere dakhelling (de standaard 22%), maar vooral met een kleinere zuidkap-lengteratio (0.54; een symmetrisch dek) slechts 13% lager. De grote zuidkaplengteratio was in de ZonWindKas ook niet zozeer gekozen vanwege het behalen van de hoogste efficiëntie voor wat betreft de lichtonderschepping, maar was een gevolg van de wens om geen direct zonlicht op het noordvlak te krijgen. Immers, als dat niet zo geweest zou zijn, dan had de kas een extra voorziening nodig gehad om schade door direct licht op het gewas door het noordvlak te voorkomen. Overigens is de totale hoeveelheid elektriciteit die met PV-cellen in de zuidkap gerealiseerd zou kunnen worden in een symmetrische kas kleiner dan in een asymmetrische kas, simpelweg omdat een symmetrische kas een kleiner totaaloppervlak aan PV-cellen heeft.

Indien de lamellen in de bovenste 2 secties van de zuidkap van een kas met een geometrie zoals de ZonWindKas van PV-cellen zouden worden voorzien dan heeft de kas $2 \text{ (secties)} \times 2 \text{ (meter per sectie)} \times 0.75 \text{ (cm brede PV-stroken)} \times 90\%$ (er zit een stukje overlap in de lamellen) = 2.7 m^2 PV-paneel in een kapbreedte van 12 meter. Bij een productiepotentieel van 100 kWh per m^2 PV-cel geeft dit dus een 22.5 kWh elektriciteit per m^2 kasoppervlak. Dit is ruimschoots meer dan de elektriciteitsbehoefte van een onbelichte teelt waardoor geconcludeerd kan worden dat een kas zoals de ZonWindKas, na plaatsing van PV-cellen op de lamellen in de bovenste daksecties ruimschoots netto elektriciteitsproducerend zou kunnen zijn.

Overigens betekent de productie van 22.5 kWh elektriciteit dat er dezelfde hoeveelheid minder aan warmte met de lamellen kan worden geproduceerd. In de metingen in 2009 bleek de warmteproductie van de lamellen ruim 22 m^3 aardgas equivalenten. Indien er PV-cellen op de lamellen in de bovenste twee segmenten zouden zijn gemonteerd was deze warmteproductie iets onder de 20 m^3 aardgas equivalenten uitgekomen. Bij gebruik van een goed energiescherm in deze kas zou dit nog steeds voldoende zijn geweest om de ZonWindKas qua warmtevraag energieneutraal te houden.

Financieel

De verschillen in elektriciteitsproductie per m² PV-cel als functie van de plaats in het dakvlak betekent direct dat stroom uit de onderste daksectie 40% duurder is dan stroom uit de bovenste daksectie (of 13% duurder bij een symmetrisch en vlakker dek). Immers de panelen voor de onderste secties zijn net zo duur als de panelen voor de bovenste secties en aangezien de prijs voor zonnestroom geheel bepaald wordt door de investeringskosten is de kostprijs van zonnestroom omgekeerd evenredig met de opbrengst. Dit geldt ook voor de vergelijking tussen de kostprijs van zonnestroom uit de gunstigste daksecties met de kostprijs van stroom uit een PV-cellen die op een standaard dakvlak zijn gemonteerd. De 40% hogere stroomproductie van een PV-paneel buiten de kas werkt direct door in een lagere kostprijs. Daar komt nog bij dat de PV-panelen die op de lamellen van de ZonWindKas geplaatst moeten worden allemaal smalle stroken moeten zijn die onderling elektrisch moeten worden doorgekoppeld. De kosten per m² PV op de lamellen zullen daarom beduidend hoger zijn dan de kosten per m² kant en klaar PV-paneel dat op een dak kan worden geplaatst. Als we aannemen dat een in stroken op de lamellen geplakt en doorgekoppeld zonnepaneel per m² PV-cel 15% duurder is dan een groot standaard-paneel levert de combinatie met de 40% lagere stroomproductie een stroomprijs voor elektriciteit uit de ZonWindKas die 1.6 maal zo duur is als stroom uit een standaard paneel op een standaard dakvlak.

6 Conclusies

Het experiment met PV-cellen op de ZonWindKas heeft laten zien dat het mogelijk is om op de draaibare lamellen PV-cellen te monteren. Parallel aan de praktische metingen aan een negental kleine PV-cellen op de lamellen is een model ontwikkeld dat aan de hand van de geometrie van de kas en de gebruikswijze van de lamellen (bijvoorbeeld het zonlichtcriterium waarop ze gesloten worden) kan berekenen hoeveel elektriciteit er met zulke PV-cellen geproduceerd kan worden. De resultaten van dit model kwamen goed overeen met de metingen.

Voor een kas met een geometrie zoals die van de ZonWindKas blijkt dat bij een cel-rendement van 15% de PV-cellen op de lamellen in de bovenste twee daksegmenten 100 kWh per m² PV-cel per jaar kan worden geproduceerd. Deze PV-cellen moeten een eindje links en rechts uit de roeden vandaan worden gemonteerd. De PV-cellen bedekken dan 75% van de breedte tussen de glasroeden en zijn bij een hart-op-hart afstand tussen de roeden van 1 meter dus 75 cm breed. PV-cellen in het derde dak-segment geven zo'n 90 kWh per m² PV-cel en nog verder naar de goot neemt dit af naar 75 kWh per m² PV-cel voor het 4e segment en 55 kWh per m² PV-cel in het onderste daksegment.

Het verschil in elektriciteitsproductie over het dakoppervlak hangt sterk samen met de geometrie van de kas. Daar waar bij een geometrie zoals van de ZonWindKas de stroomproductie in het onderste daksectie 40% lager ligt dan in het bovenste segment is dit in een kas met een flauwere dakhelling (de standaard 22%) en een kleinere zuidkaplengteratio (0.54; een symmetrisch dek) slechts 13% lager. Een kleinere zuidkaplengteratio geeft dus een hogere efficiëntie voor de PV-cellen in het onderste segment, maar het geeft ook in totaal minder elektriciteit per m² kas. Er is bij kortere zuidkaplengten immers simpelweg minder PV-oppervlak aanwezig.

Het model berekent ook de elektriciteitsproductie van een soortgelijke PV-cel wanneer die buiten de kas wordt geplaatst. Zulke cellen ondervinden geen hinder van het kasdek dat boven de lamellen ligt en worden ook niet uit de zon gedraaid op momenten dat er weinig zon is. Bovendien zal een PV-cel buiten minder warm worden, juist omdat er in het ontwerp van de ZonWindKas alles aan gedaan is om de watertemperatuur in de lamellen hoog op te laten lopen.

Door de grotere lichttoetreding en de lagere celtemperatuur levert eenzelfde PV-cel buiten de kas 40% meer elektriciteit dan PV-cellen op de bovenste lamellen in de kas. De helft van deze meeropbrengst komt doordat er geen extra ruit boven ligt. 35% Van de meeropbrengst komt doordat een PV-cel buiten niet uit de zon wordt gedraaid bij weinig zonlicht en de resterende 15% extra komt door het hogere rendement van de PV-cel die buiten koeler blijft.

Uit deze resultaten moet geconcludeerd worden dat bij de productie van elektriciteit uit zonlicht met gebruik van eenvoudige PV-cellen¹ in eerste instantie dakvlakken moeten worden belegd die niet lichtdoorlatend hoeven te zijn (zoals de bedrijfsruimte). Deze geven immers met dezelfde hoeveelheid kostbaar PV-materiaal 40% meer elektriciteit en dus direct al een groter financieel rendement. Daar komt bij dat PV-cellen die op de lamellen zijn geplaatst per m² PV-cel duurder zullen zijn (smalle stroken die met flexibele bedrading moeten worden doorgekoppeld). Als de meerprijs per m² PV-cel op lamellen op 15% wordt gesteld dan is stroom uit PV-cellen die op de lamellen van de ZonWindKas zijn gemonteerd 1.6 maal zo duur zijn als stroom uit een standaard paneel op een standaard dakvlak. Voor elektriciteit uit PV-cellen in het 3e, 4e en 5e segment loopt de kostprijs voor de elektriciteit nog verder op omdat de investeringskosten voor de PV-cellen gelijk zijn, maar de elektriciteitsproductie per cel afneemt.

¹ Er zijn ook ontwikkelingen in elektriciteitsproductie uit geconcentreerd zonlicht (zgn. CPV, concentrated PhotoVoltaics). Bij deze technologie, waarbij nauwkeurige positioneringssystemen een rol spelen kan de combinatie met de kasconstructie een voordeel opleveren middels het multifunctioneel gebruik van de ondersteunende constructie.

7 Literatuur

De Zwart, HF, 2010.

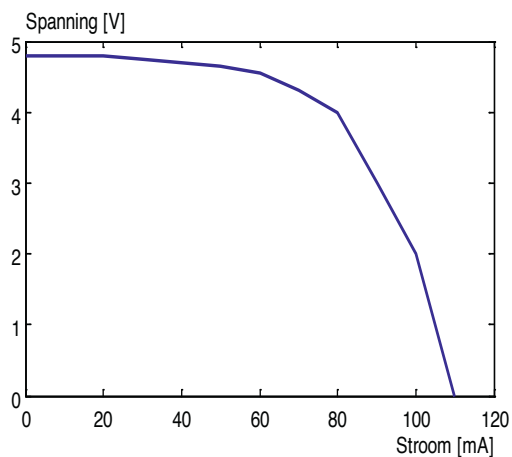
De performance van de drie demo-kassen op het Innovatie en Demo Centrum, Wageningen UR Glastuinbouw, Rapport GTB-1030.

Bijlage I Bepaling van het elektrisch geleverd vermogen

Een zonnecel wekt onder invloed van licht een bepaald potentiaalverschil op (een spanning) en als deze spanning over een belasting wordt geleid zal er een stroom gaan lopen.

Als de stroom klein is blijft de spanning op niveau, maar als de stroom groot is zal de zonnecel niet langer in staat zijn dat oorspronkelijke potentiaalverschil vol te houden en zakt de spanning in. Wordt de cel kortgesloten dan is de stroom maximaal, maar de spanning 0.

Elke zonnecel heeft een karakteristiek verband tussen stroom en spanning. Op grond van metingen aan de PV-cellen die op de ZonWindKas zijn gemonteerd is het onderstaande verband vastgesteld.



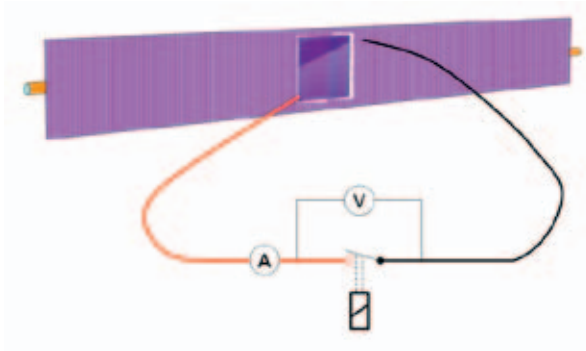
Het door een PV-cel maximaal geleverde vermogen het zgn. maximum power point MPP is het punt op de curve waar het product $U \cdot I$ dus het oppervlak van de rechthoek maximaal is.

In nevenstaande grafiek is dat het punt bij 4 Volt en 80 mA en dit geeft dan 0.32 W.

Commerciële omvormers voor PV-systemen hebben een interne regeling die dit punt opzoekt om op die manier altijd het maximale vermogen met een cel te kunnen opwekken. In het experiment met de PV-cellen op de ZonWindKas is geen omvormer geplaatst omdat de PV-oppervlakken zo klein zijn dat hiervoor geen hoog rendement omvormers beschikbaar zijn.

Om toch het elektrisch rendement van de panelen die op verschillende plaatsen op de lamellen zijn geplaatst te kunnen bepalen wordt gebruik gemaakt van de algemene eigenschap dat het elektrisch vermogen van een PV-cel kan worden bepaald door de kortsluitstroom \times open celspanning \times fill-factor te berekenen, waarbij die fill-factor een celseigenschap is. Voor het bovengetoond voorbeeld is de fill-factor 0.61.

Het maximale vermogen kan dus worden berekend door de open celspanning van 4.8 V (dat is het snijpunt met de y-as) te vermenigvuldigen met kortsluitstroom van 110 mA (dat is het snijpunt met de x-as) en dit te vermenigvuldigen met 0.61.



Gedurende het experiment is continu de open celspanning van 10 kleine PVcellen gemeten en zijn de cellen elke minuut even kortgesloten om de kortsluitstroom te bepalen. Nevenstaande tekening laat deze meetopstelling zien.

