



Bouwconstructies en -Systemen  
Van Mourik Broekmanweg 6  
Postbus 49  
2600 AA Delft

www.tno.nl

T 015 276 30 00

F 015 276 30 16

**TNO-rapport**

**2004-BC-R0060**

**Optimaal Kasdek**

Datum mei 2006

Auteur(s) Ir. E.G.O.N. Janssen  
Ing. H. Oversloot  
Ir. W.D. van der Wiel  
Drs. L. Zonneveldt

Exemplaarnummer  
Oplage  
Aantal pagina's 79  
Aantal bijlagen  
Opdrachtgever Produktschap Tuinbouw  
Mevr. A. Jolman  
Postbus 280  
2700 AG Zoetermeer

Ministerie van LNV  
Leo Oprel  
Postbus 482  
6710 BL Ede

Projectnaam Optimaal Kasdek PT 11936  
Projectnummer 006.44239/01.01

**Produktschap  Tuinbouw**



Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksoopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

© 2006 TNO

## Samenvatting

Bij het kiezen van het type kasbedekking is de mate van lichtdoorlatendheid van groot belang. Omdat die lichttransmissie gedurende het jaar niet steeds dezelfde is, kan de tuinder voor zijn teelt nagaan in welke periode van het jaar de lichttransmissie prioriteit heeft. Dan is te bepalen welke kasbedekking bij die teelt past.

Met de in dit onderzoek gebruikte technieken kan een tuinder laten doorrekenen welk kasdek materiaal de grootste lichttransmissie heeft, op de momenten dat hij dat belangrijk vindt, welke dekhelling voor zijn situatie het meest gunstig is en in welke richting de kas gebouwd moet worden. Als de tuinder weet welke tijd van het jaar, of zelfs tijd van de dag voor zijn teelt de hoeveelheid licht het meest belangrijk is, zou hij met deze berekende gegevens de bouw en materiaalkeuze daar op kunnen afstemmen. Als die prioriteiten er niet zijn, dan kan hij kiezen voor de gemiddeld beste optie.

### Nieuwe meetmethode

Voor het onderzoek is een meetmethode opgesteld. Deze methode komt er op neer dat lichtbundels vanuit diverse hoeken door te testen kasdek materiaal in een grote bol worden gestuurd. In de bol worden ze gemeten als diffuse lichttransmissie. De hoek waaronder het licht binnenvalt wordt bepaald door het tijdstip van de dag en het tijdstip van het jaar. Zo kan gemeten worden wat het verschil is in licht dat wordt doorgelaten door kasbedekkingsmateriaal bijvoorbeeld rond twaalf uur in de middag vergeleken bij 's middags vier uur

### Elk materiaal een eigen curve

In een grafiek kunnen de lijnen van twee of meer verschillende kasbedekkingen met elkaar vergeleken worden. Te zien is bijvoorbeeld dat in de zomer bij bijna loodrechte lichtinval de ene kasbedekking een hogere transmissie heeft dan de andere. Wordt nu die hoek kleiner, in bijvoorbeeld maart, dan blijkt de andere kasbedekking een voor die omstandigheden grotere transmissie te hebben.

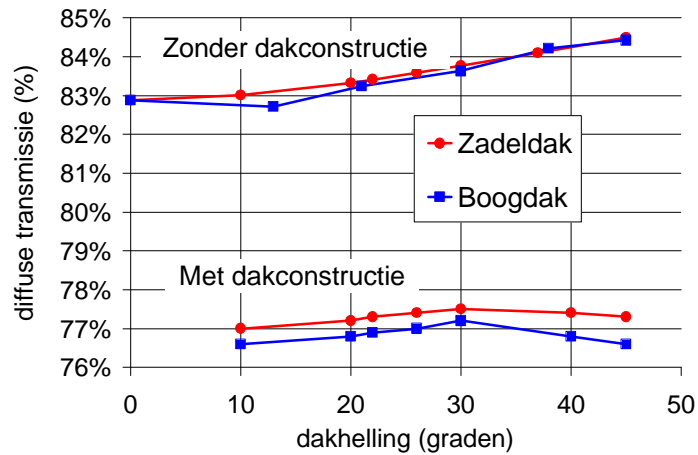
Als een lijn van een bepaald soort kasdek in zijn geheel hoger ligt, dan is het duidelijk: op alle momenten van het jaar levert dat materiaal meer lichtwinst op. Wanneer lijnen elkaar kruisen, zijn er perioden waarin het ene kasdek beter voldoet dan het andere. Er zijn nieuwe veelbelovende materialen op de markt gekomen waarvan de curve vergeleken met standaard glas over het geheel hoger ligt. Meerlaags gecoat glas en glas voorzien van gecoate folies lijken zonder meer 5% meer lichtwinst te kunnen boeken. Het is belangrijk te beseffen dat in de donkere maanden absoluut gezien de hoeveelheid licht niet groot is. Doorgaans wordt gesteld dat een procent licht in die periode extra waardevol is. Indien in die maanden veel kunstlicht gebruikt wordt stelt een procent meer lichttransmissie van het kasdek dan in absolute zin minder voor.

### Zadeldek heeft meer licht

Door te kunnen berekenen hoe groot de lichttransmissie is wanneer het licht onder een bepaalde hoek het kasdek materiaal binnen komt is ook de ideale dakhelling, de richting waarin de kas gebouwd zou moeten worden en de vorm van het dek (zadeldek, boogdek of sheddak) bepaald.

In figuur 1 zijn de gegevens te zien van berekeningen bij verschillende dakhellingen, met normaal floatglas. De bovenste lijnen geven aan dat wanneer in de simulaties

gerekend wordt zonder kasconstructie onderdelen, er slechts geringe verschillen zijn tussen zadeldak en boogkas.



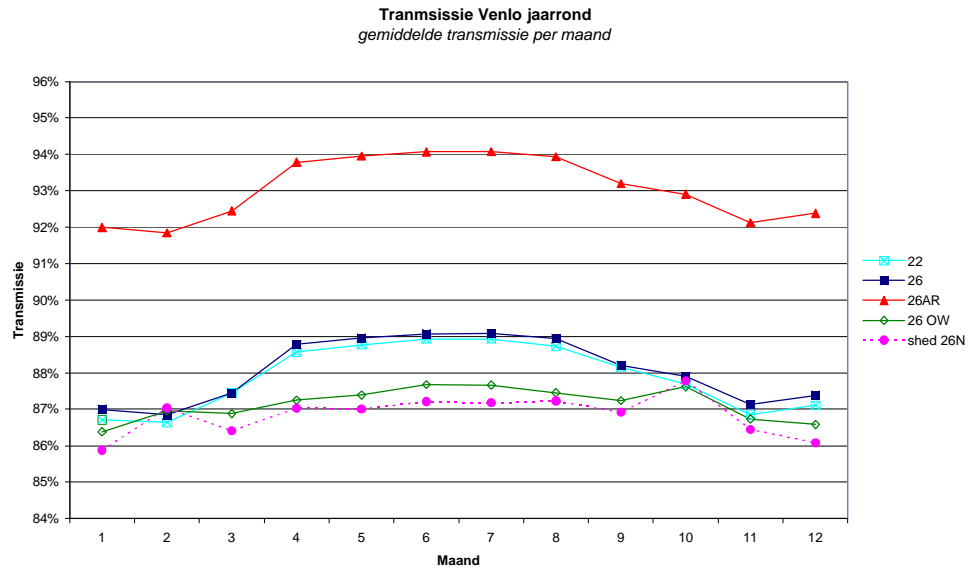
Figuur 1: Transmissie kasdek met en zonder kasdekprofielen

Wanneer echter de kasconstructie wordt meegenomen in de berekeningen, blijkt de lichttransmissie van het zadeldak over de gehele lijn hoger te zijn dan van het boogdak. Uit de grafiek is tevens aan het verschil tussen beide lijngroepen af te lezen hoeveel licht wordt weggenomen door de kasconstructie.

De berekening van de kasconstructie is gedaan aan de hand van de zogenaamde IDT methode, waarbij volgens de verbeterde halve omtrekmethode ook rekening gehouden wordt met reflecties van de materialen en de beschaduwning.

### 26° dekhelling is optimaal

Bij het bepalen van de juiste dekhelling is niet alleen gekeken naar de lichttransmissie, maar ook of vuil kan wegspoelen bij regen, ARBO regels en constructiemogelijkheden. Uit figuur 2 is af te lezen dat een dekhelling van 26° over de hele lijne de hoogste transmissie heeft. Door gebruik van meer materiaal zullen de kosten van een dergelijk dek hoger liggen.



Figuur 2: Verloop van de transmissie van de diverse Venlo en Sheddakvormen over het jaar heen. De uurlijkse transmissies zijn gemiddeld tot een dagelijks gemiddelde. Deze grafiek geeft een beeld van de overall performance van de kasdekken. Te zien is dat de Venlo met 22 en 26 graden hoog scoort.

### Samenvatting

Van elk kasbedekkingsmateriaal kan over de dag en over het jaar bepaald worden hoe groot de lichtdoorlatendheid is. Er kan advies op maat komen als de tuinder aangeeft welke periode voor zijn teelt de lichttransmissie prioriteit heeft. Een normaal Venlo dek met een helling van 26° heeft over de hele lijne de hoogste transmissie.

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>8</b>
1.1	Achtergrond.....	8
1.2	Doelstelling.....	9
1.3	Structuurbeschrijving rapport.....	9
1.3.1	Meetprotocol.....	9
1.3.2	Kasdekvorm en diffuus licht.....	9
1.3.3	Kasdekvorm jaarrond .....	10
1.3.4	Alternatieve omhullingsmaterialen.....	10
<b>2</b>	<b>Meetprotocol voor diffuse transmissie.....</b>	<b>11</b>
2.1	Inleiding.....	11
2.2	Lichttransmissie en normen.....	11
2.3	Diffuse straling .....	13
2.3.1	Principes voor de bepaling van de diffuse transmissie .....	14
2.4	Methoden voor de diffuse transmissie.....	14
2.5	Meetmethode: Integrerende bol met draaibare lichtbundel .....	15
2.5.1	Dimensionering integrerende bol .....	15
2.5.2	Reflectie.....	15
2.5.3	Beperkingen.....	16
2.5.4	Berekening van de diffuse transmissie .....	17
2.5.5	Meetmethode: ASTM D 1494 .....	18
2.5.6	Meetmethode: Twee integrerende bollen .....	19
2.6	Materiaalontwikkelingen.....	20
2.7	Keuze meetmethode .....	21
2.8	Verslag uitgevoerde metingen en resultaten .....	22
2.9	Beschrijving protocol .....	22
2.10	Aanbevelingen.....	23
<b>3</b>	<b>Kasdekvorm en diffuus licht.....</b>	<b>24</b>
3.1	Inleiding.....	24
3.2	Werking Radiance .....	25
3.3	Aanpak berekeningen .....	25
3.3.1	Transmissie (verticale richting):.....	28
3.3.2	Transmissie (alle richtingen): .....	28
3.4	Keuze Radiance lichtmeetmethode.....	29
3.5	Resultaten diffuse lichttransmissie kasdek zonder profielen.....	29
3.6	Invloed kasconstructie .....	30
3.7	Optimalisatie per leverancier .....	32
3.8	Overige eigenschappen kasdakconstructies.....	32
3.8.1	Vervuiling.....	32
3.8.2	Condensafvoer .....	33
3.8.3	Maakbaarheid .....	33
3.8.4	ARBO .....	33
3.8.5	Teeltaspecten .....	34
3.8.6	Kosten.....	34
3.9	Integrale beoordeling kasdekvarianten voor diffuus licht .....	34
3.10	Conclusies m.b.t. diffuus licht .....	35
<b>4</b>	<b>Kasdekvorm Jaarrond .....</b>	<b>36</b>

4.1	Inleiding.....	36
4.2	Aanpak.....	36
4.3	Uitgangspunten.....	37
4.4	Uitgevoerde simulaties .....	38
4.5	Resultaten .....	38
4.6	Bespreking van de resultaten.....	42
4.6.1	Sheddak .....	43
4.7	Validatie .....	43
4.7.1	Transmissie glas .....	43
4.7.2	Literatuur .....	44
4.8	Conclusies.....	44
4.9	Aanbevelingen.....	44
<b>5</b>	<b>Alternatieve omhullingsmaterialen.....</b>	<b>46</b>
5.1	Inleiding.....	46
5.2	Relevante materiaal eigenschappen.....	46
5.2.1	PAR transmissie direct .....	47
5.2.2	PAR transmissie diffuus .....	47
5.2.3	U-waarde (isolatie) .....	47
5.2.4	Vervuiling en duurzaamheid.....	47
5.2.5	Technology Readiness Level (TRL).....	47
5.2.6	Uiteindelijke kostprijs.....	47
5.3	Eisen aan de materiaaleigenschappen.....	47
5.4	Alternatieve omhullingsmaterialen.....	48
5.5	Shortlist alternatieve materialen .....	49
5.5.1	AR multilaags gecoat glas .....	50
5.5.2	AR enkellaags gecoat glas.....	50
5.5.3	Geëët glas .....	50
5.5.4	ETFE folie .....	51
5.5.5	Zigzag enkel .....	52
5.6	Beleidsmatige aandachtspunten.....	53
5.7	Verdere materiaalontwikkeling .....	55
5.7.1	Meerlaags gecoat glas.....	55
5.7.2	Glas met gecoate folies.....	56
5.8	Conclusies.....	56
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen.....</b>	<b>58</b>
6.1	Meetprotocol.....	58
6.2	Diffuus licht .....	58
6.2.1	Alleen glas .....	58
6.2.2	Met kasdekprofielen .....	58
6.2.3	Algemeen.....	59
6.3	Jaarrondberekeningen .....	59
6.3.1	Aanbevelingen.....	59
6.4	Alternatieve omhullingsmaterialen.....	60
	<b>Literatuur .....</b>	<b>61</b>

### Bijlage(n)

A Onderzoeksvoorstel Optimaal kasdek

B Rekenmethode Energie III

- C Berekening invloed profielen
- D Transmissie metingen
- E Resultaten berekeningen Radiance - Zadeldak
- F Resultaten berekeningen Radiance - Boogdak
- G Gegevens omhullingsmaterialen
- H Volledige grafieken jaarrond berekeningen

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Lichtdoorlating van kassen is in de kassenbouw altijd een belangrijk onderwerp geweest. Meer licht in de kas betekent meer groei van het gewas en dus een hogere opbrengst per vierkante meter. Bestaande maatregelen voor het verhogen van de lichtopbrengst in de kas zijn onder meer:

- het toepassen van grotere glasplaten (waardoor minder lichtonderscheppende ondersteunende constructies nodig zijn);
- het toepassen van een smallere goot en compactere profielen;
- het regelmatig schoonhouden van het kasdek, etc.

Onderzoek richt zich sedert jaren tevens op de minimalisatie van de lichtonderschepping van kassen, waarbij het meest lichtdoorlatende omhullingsmateriaal, de beste kasoriëntatie en de beste kasdevorm in beschouwing wordt genomen. Dikwijls wordt er echter bij deze onderzoeken slechts gekeken naar één afzonderlijk aspect, bijvoorbeeld bepaalde zonnstanden (slechts direct licht) bij de kasdevorm of slechts loodrechte transmissie bij een nieuw omhullingsmateriaal.

Recente ontwikkelingen in beglazingsmaterialen boren echter nieuwe mogelijkheden aan voor de constructie en uitvoering van kasdekken. We doelen hier op:

1. glas met oppervlaktestructuur;
2. oppervlaktebehandelingen;
3. (dubbelwandige) kunststof platen van speciale constructie;
4. nieuwe kunststof folies.

In Energie III [7] is een nieuwe meetmethode ontwikkeld om op eenduidige wijze de transmissie van omhullingsmaterialen te bepalen. Deze meetmethode is echter nog niet geschikt voor de bovengenoemde omhullingsmaterialen.

Naast de gepropageerde hogere lichtdoorlating bieden nieuwe omhullingsmaterialen door hun dubbelwandige constructie soms ook betere U-waarden (isolatie). Vaak echter gaan deze nieuwe omhullingsmaterialen gepaard met hogere kosten terwijl niet van meet af aan duidelijk is of dit ook leidt tot hogere lichtopbrengst en/of dat de verbetering in de isolatie wordt gecompenseerd door lagere stookkosten.

In het kader van energie III zijn oriënterende hoekafhankelijke berekeningen gedaan aan verschillende kasdekmaterialen en hun lichtdoorlating op basis van meetgegevens van zowel materiaal als uurlijkse klimaatdata. Dit gaf reeds een inzicht in het gedrag van verschillende materialen over het jaar en laat toe de invloed van zowel de oriëntatie als de dekhelling van de kas te bestuderen. Niet onderzocht in Energie III is de invloed van de kasoriëntatie en de invloed van de kasdevorm. Parallel aan Energie III is door TNO het onderzoek Nieuw licht op Groei uitgevoerd [8]. Hierbij is een krachtige rekentool ontwikkeld om verschillende kasdevormen te vergelijken. Op basis van beide onderzoeken wordt het mogelijk om een kasdek te ontwikkelen dat geoptimaliseerd is op het opvangen van licht uit de hemelkoepel.



## 1.2 Doelstelling

### Technische doelstellingen

1. Er zal er een meetmethode beschikbaar komen voor niet vlakke en/of homogene omhullingsmaterialen, zoals gewalst glas, kanaalplaten ed. (Spin off Energie III). Deze opstelling zal ook na het project op verzoek van leveranciers gebruikt kunnen worden.
2. Met behulp van de meetgegevens uit de nieuwe meetmethode wordt op basis van de in Energie III en Nieuw licht op groei ontwikkelde gereedschappen van de meest optimale kasdekform en -oriëntatie de totale jaarlijkse lichtsom bepaald. Hierbij wordt rekening gehouden met de lichtverdeling direct/difffuus over een standaard jaar.

### Energiedoelstellingen

Huidige omhullingsmaterialen hebben een diffuse transmissie van circa 83 procent. Op basis van de resultaten van Nieuw licht op Groei wordt verwacht dat over het hele jaar bekeken een additionele lichtsom van 5% mogelijk moet zijn. Dit dient te worden bereikt door een andere kasvorm enerzijds en alternatieve omhullingsmaterialen anderzijds.

### Nevendoelstellingen

Het project moet voor de tuinder inzichtelijk maken wat de effecten zijn op de lichttransmissie door het jaar heen van diverse kasdekvormen. Verder moet voor de tuinder inzichtelijk worden gemaakt in welke gevallen en onder welke omstandigheden toepassing van de nieuwe materialen zinvol is.

## 1.3 Structuurbeschrijving rapport

### 1.3.1 *Meetprotocol*

De opbouw van dit rapport is als volgt. In hoofdstuk 2 wordt in een analyse bekeken welke meetmethode het meest geschikt is voor het bepalen van de diffuse transmissie van omhullingsmaterialen. Dit gebeurt op basis van een uiteenzetting van de theoretische achtergrond van deze meetmethoden. Tevens zijn drie metingen van “moeilijke” omhullingsmaterialen opgenomen. Het betreft de volgende materialen:

1. EMP 16 mm Macrolux kanaalplaat met dubbele spouw;
2. GEP 60 mm kunststof zigzag plaat,
3. Gewalst glas

### 1.3.2 *Kasdekform en difffuus licht*

In hoofdstuk 3 wordt vervolgens de kasdekform geoptimaliseerd. Dit gebeurt met behulp van diverse kasdekmodellen in het rekenprogramma Desktop Radiance, in combinatie met de IDT methode [7] voor de invloed van de kasdekprofielen. Het hoofdstuk eindigt met een beoordelingstabel van diverse kasdekvormen, waarin de tuinder een keuze kan maken voor zijn persoonlijke optimale kasdekform. Dit hoofdstuk is volledig gebaseerd op difffuus licht. In het vervolg wordt ook een jaarrond analyse meegenomen.

### 1.3.3 Kasdekvorm jaarrond

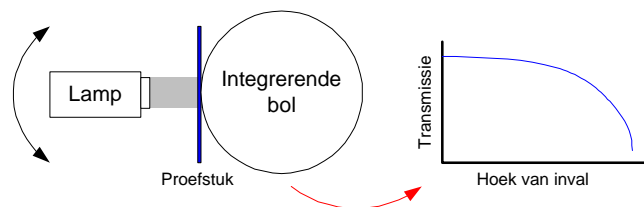
In Hoofdstuk 4 worden jaarrond berekeningen uitgevoerd met behulp van Desktop Radiance. Op deze manier wordt het verloop van de lichttransmissie van het kasdek bepaald gedurende het hele jaar. Er zijn analyses uitgevoerd van kassen met diverse dekhellingen. Verder zijn zowel Venlo kassen als boogkassen beschouwd.

### 1.3.4 Alternatieve omhullingsmaterialen

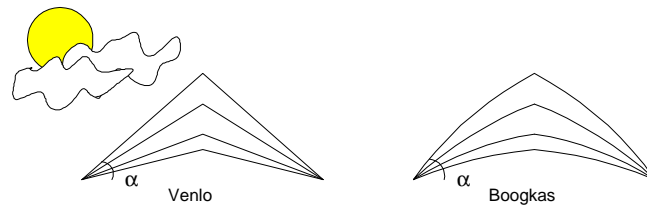
In hoofdstuk 5 worden alternatieve omhullingsmaterialen beschouwd. Eerst wordt bepaald welke eigenschappen relevant zijn voor toepassing in de glastuinbouw. Vervolgens is een analyse gemaakt waar de meest veelbelovende materialen gezocht worden.

In hoofdstuk 6 tenslotte, worden de conclusies en aanbevelingen opgesomd. Hieronder is het gevolgde stappenplan weergegeven.

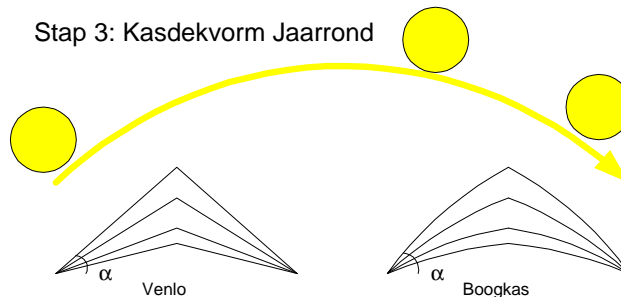
#### Stap 1: Meetprotocol voor diffuse transmissie



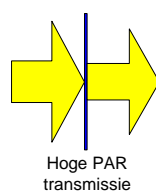
#### Stap 2: Kasdekvorm en diffuus licht



#### Stap 3: Kasdekvorm Jaarrond



#### Stap 4: Alternatieve materialen

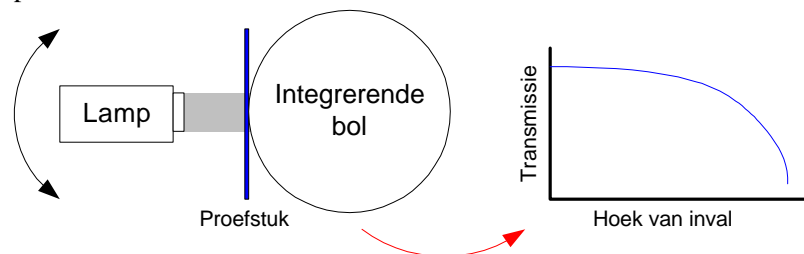


Figuur 3: Stappenplan optimaal kasdek studie

## 2 Meetprotocol voor diffuse transmissie

### 2.1 Inleiding

In dit werkpakket is een universeel meetprotocol opgesteld voor de diffuse transmissie van kasomhullingsmaterialen. De methode dient behalve voor vlakke materialen ook geschikt te zijn voor niet vlakke en/of homogene omhullingsmaterialen. Ten behoeve van dit protocol zijn verschillende kasdekmaterialen op hun 3 dimensionale lichtdoorlating en reflectie voor PAR lichtdoorlating bemeaten bij verschillende hoeken van invallende straling. Omhullingsmaterialen kennen een hoekafhankelijke transmissie. Bij anisotrope materialen moet het gedrag van de plaat in meerdere richtingen gemeten worden teneinde de eigenschappen te kunnen vastleggen. Tevens is de diffuse licht transmissie voor translucente materialen voor tuinbouwtoepassingen bepaald.



Figuur 4: Ontwerp van een meetprotocol voor loodrechte en diffuse transmissie van omhullingsmaterialen

### 2.2 Lichttransmissie en normen

Alle normen voor het meten van licht en straling zijn gebaseerd op een genormaliseerd zonnenspectrum. Dit spectrum is rekenkundig gegenereerd met fysische modellen die de absorptie en verstrooiing in de atmosfeer beschrijven voor verschillende condities. De invoer van het model is gebaseerd op een nauwkeurig gemeten buitenaards spectrum. De modellen en verschillende condities zijn uitvoerig beschreven in [1] en [2]. De huidige internationale normen zijn gebaseerd op de spectra in [2] en maken gebruik van airmass 1.5 spectra. Deze aanduiding 'airmass 1.5' voor 'spectra' geeft de invloed weer van het filterende effect van de afgelegde weg door de luchtmassa. Hierin vindt absorptie door gassen en ook verstrooiing aan stofdeeltjes plaats. Hierdoor worden bepaalde stralingscomponenten meer of minder tegengehouden en ontstaat een grillig spectrum in plaats van het mooie gladde spectrum dat wordt uitgestraald door een theoretische lichtbron met hoge temperatuur.

Voor het verrichten van optische metingen voor gebouwtoepassingen bestaan er een aantal relevante normen:

- EN 410; Europese norm voor beglazing;
- ISO 9050; internationale norm voor beglazing;
- ISO 15099; internationale norm voor zonwering;
- NEN 2675; Nederlandse norm voor tuinbouwglas.

**EN 410**

Voor standaard bouwkundige toepassingen in Nederland en binnen Europa is de EN410 in gebruik. Deze norm wordt gehanteerd voor productspecificaties van glas en kunststof beglazingen. Merkwaardigerwijs maakt deze norm gebruik van het airmass 1.0 spectrum wat niet in Europa voorkomt.

**ISO 9050**

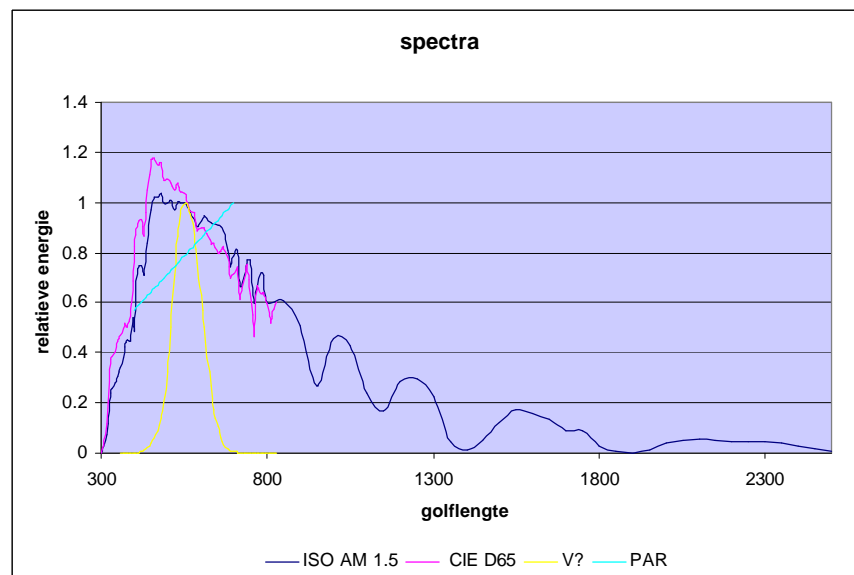
Van breder belang is verder de internationale norm ISO 9050, die de vrijheid laat om zowel het airmass 1.5, als het airmass 2.0 spectrum te gebruiken. Ook deze norm richt zich op de toepassing van glas voor gebouwen. Op het spectrum na zijn beide normen van gelijke strekking voor wat betreft de meetvoorschriften. Voor de bouwkundige toepassing spelen zowel de doorlating en reflectie van materialen zoals glas. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in energetische doorlating en de visuele doorlating. Dit zijn verschillende waarden omdat het menselijk oog slechts een deel van de straling visueel waarneemt. Daar waar het zonnenspectrum een bandbreedte van 300-2500 nm beslaat, neemt het menselijk oog slechts het deel tussen 380-780 nm waar, dit is het zichtbaar licht. Deze ooggevoeligheid is vastgelegd in standaarden van het CIE [3] en is in alle relevante normen identiek overgenomen. Voor de berekening van de lichtdoorlating wordt gebruik gemaakt van een andere door de CIE gedefinieerde lichtbron namelijk de D65. Dit is een lichtspectrum waarvan de kleurtemperatuur 6500 K bedraagt. Dit is in het algemeen veel witter dan natuurlijk zonlicht. Figuur 5 geeft de verschillende spectra weer.

**ISO 15099**

Deze ISO-norm is met name bedoeld voor zonweringmaterialen en mate name interessant opdat deze norm diep ingaat op de thermische effecten die een rol spelen in de energetische transmissie. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen directe straling en diffuse straling alsmede de hoek van de zon op de beglazing. Deze norm sluit het beste aan op de in Nederland traditioneel gebruikte bepalingmethode voor de ZTA (ZTA = zontoetreding absoluut).

**NEN 2675**

Voor planten wordt niet zoals bij de ooggevoeligheid gebruik gemaakt van een gemeten gevoeligheidskromme. Hier wordt uitgegaan van het principe dat alle straling evenredig aan de groei bijdraagt en er vindt een energetische weging plaats. Aangezien de energie inhoud van fotonen omgekeerd evenredig is aan de golflengte van het foton wordt dit een gelineariseerd verband. De golflengteband die als actief wordt aangemerkt ligt tussen 400-700 nm. Het gebruikte lineaire verband is derhalve gefixeerd op 1 bij 700 nm. Dit verband is tegenwoordig bekend onder PAR straling hetgeen staat voor Photosynthetically Active Radiation. In de Nederlandse NEN 2675 wordt dit verband gebruikt in combinatie met de D65 voor het bepalen van de lichtdoorlating van tuinbouwglas. De stralingsdichtheid wordt niet uitgedrukt in lux zoals voor zichtbaar licht maar in aantal fotonen per m<sup>2</sup>. Aantallen fotonen worden hierbij uitgedrukt via het getal van Avogadro in mol.



Figuur 5 Verschillende lichtspectra

### 2.3 Diffuse straling

Naast de directe straling van de zon bereikt straling ons ook langs andere wegen. Dit is het diffuse aandeel van de straling op een object. De verhouding tussen directe en diffuse straling is sterk variabel en afhankelijk van de omstandigheden. Er zijn twee belangrijke bronnen: naast de reeds genoemde verstrooiing is er namelijk ook de reflectie aan de grond. Onder heldere omstandigheden bedraagt het diffuse lichtaandeel slechts 25% van het totaal op een stralingontvangend vlak. In Nederland wordt de ZTA van beglazing gedefinieerd als 74% directe straling invallend onder 45 graden en 13% diffuus komend van de hemelkoepel en 12% diffuus gereflecteerde straling. De ZTA (ZTA = zontoetreding absoluut) wordt gebruikt bij het dimensioneren van gebouwen. De diffuse bijdrage van de hemelkoepel is niet homogeen verdeeld. Er bestaan verschillende modellen om de hoeveelheid zonlicht op verschillende vlakken te berekenen. Deze zijn veelal in gebruik bij simulatieberekeningen om uit standaard uurlijks meteorologische meetwaarden op een horizontaal vlak de straling op een specifiek georiënteerd vlak te berekenen. Het best gedocumenteerde en gevalideerde model hiervoor is het Perez model. In bijvoorbeeld het Perez model wordt de diffuse bijdrage in een drietal zones opgedeeld te weten, de horizon, een halo rond de zon en de middenzone. In zonne-energie toepassingen wordt het deel van de halo meestal identiek behandeld als de directe lichtcomponent. Met behulp van een dergelijk model zijn berekeningen te maken op uurlijkse tijdstap.

Voor een bedekte hemel is de diffuse bijdrage heel groot en direct licht kan zelfs volledig ontbreken. Diffuus licht wordt gedefinieerd als licht waarin alle richtingen zijn vertegenwoordigd. Dit betekent dat de instraling komt van een hemisfeer rond het betreffende object, een hemelkoepel dus. Voor een licht vanuit een egaal verdeelde hemel is de diffuse doorlating te berekenen door integratie over alle hoeken. Voor isotrope materialen betekent dit dat indien de doorlating gemeten wordt tussen 0 en 90 graden inval de diffuse transmissie eenvoudig te berekenen is via een weegfunctie (product van sinus en cosinus). Dit is een symmetrische functie rond 45 graden waarbij de hoeken van 0 en 90 graden een weegfactor 0 hebben. Hieruit is onmiddellijk te zien

dat de diffuse doorlating voor gangbare materialen altijd lager ligt dan de transmissie langs de normaal op het materiaal. Dit vormt dan ook de achtergrond dat de ZTA is gebaseerd op de doorlating onder 45 graden. Dit levert een reëel beeld op voor de doorlating voor de meest gangbare condities.

Voor veel materialen zoals bijvoorbeeld floatglas en helder gladde kunststoffen is de hoekafhankelijk doorlating te benaderen met de formules opgesteld door Fresnel. Dit gaat niet meer op als er sprake is van structuren aan oppervlakte of intern. Indien reflecties en verstrooiingen in materialen optreden is vaak geen algemene benadering toegestaan. Voor specifieke structuren zoals de translucente isolerende beglazing bestaande uit heldere rietjes loodrecht langs de normaal zijn afgeleide modellen opgesteld. Dit zijn echter geen algemeen geldende modellen.

### 2.3.1 *Principes voor de bepaling van de diffuse transmissie*

Voor niet-isotrope materialen zoals bijvoorbeeld de zigzag plaat en kanaalplaten voor de gevels zijn twee hoofdrichtingen te onderscheiden.

1. Een eerste benadering is de materialen langs deze hoofdrichtingen te bemeten namelijk parallel aan de structuren en loodrecht op de structuren. Door middeling kan dan wederom een samenstelling worden gemaakt. Het effect van het feit dat in werkelijkheid de hemelkoepel niet egaal is verdeeld wordt op deze wijze niet meegenomen. Dit is echter een tweede orde effect.
2. Voor een betere benadering zijn door de CIE een aantal standaard hemelkoepel gedefinieerd. In specifieke gevallen zal een volledige 3-dimensionale doorrekening van het probleem door met een Raytracking model de aangewezen methode zijn. In de praktijk valt te verwachten dat deze categorie materialen minder geschikt zullen zijn voor gebruik in tuinbouwkassen.

## 2.4 **Methoden voor de diffuse transmissie**

Zoals in de voorgaande paragraaf geschetst bestaat er een theoretische methode voor het bepalen van de diffuse transmissie indien de hoekafhankelijkheid van het materiaal bekend is. In de praktijk komt dit dus neer op het bepalen van de doorlating als functie van de hoek. Voor andere methoden is een literatuurscan verricht naar bestaande normen voor het bepalen van de diffuse doorlating. In praktische zin heeft dit alleen de ASTM D1494 [6] opgeleverd. Daarnaast bestaan normen voor het bepalen van de verstrooiing aan optische componenten en fotografische materialen en een groot aantal vervallen normen. Daarnaast bestaat er een methode voor het bepalen van de directionele doorlating met behulp van een fotogoniometer. Deze methode kan met bij TNO aanwezige meetinstrumentatie, maar is echter prijstechnisch alleen interessant voor heel specifieke projecten waar dit gerechtvaardigd is door bijvoorbeeld ingebouwde specifieke directionele eigenschappen (bijv. lasercut panels, holografische structuren) gezien de benodigde meettijd. Een laatste mogelijkheid die niet wordt meegenomen is de standaard spectrofotometer. Spectrofotometers werken in het algemeen met bundelafmeting van in de orde van 4 x 9 mm. Met dergelijke bundelafmetingen zijn materialen met zelfs kleine oppervlakte structuren niet te behandelen.

Hieronder staan de volgende drie meetmethoden voor de bepaling van de diffuse transmissie beschreven:

1. Integrerende bol met draaibare lichtbundel
2. ASTM D 1494
3. Twee integrerende bollen

De volgende methoden worden niet beschouwd:

1. Fotogoniometer (meettijd te lang)
2. Spectrofotometer (te kleine lichtbundel)

## 2.5 Meetmethode: Integrerende bol met draaibare lichtbundel

De eerder genoemde normen zijn in het algemeen gebaseerd op standaard meetinstrumentatie. Dit is veelal een commerciële spectrofotometer voorzien van integrerende bol. Het doel van de integrerende bol is het opvangen van het licht dat in alle richtingen kan worden uitgestraald na doorgang of treffen van een sample. Deze integrerende bol staat ook bekend als bol van Ulbricht. Een dergelijk bol is aan de binnenzijde voorzien van een witte oppervlaktelaag die het licht diffuus reflecteert waardoor een homogeen lichtniveau in de bol ontstaat. Deze bolcoating kan bestaan uit bijvoorbeeld Bariumsulfaat of de nieuwere teflonachtige materialen bekend onder verschillende merknamen. De teflonachtige materialen hebben met name in het infrarode gebied een aanzienlijke hogere reflectie. In dit gebied speelt met name absorptie door watermoleculen die aan de coating hechten een negatieve rol.

### 2.5.1 *Dimensionering integrerende bol*

Uitgangspunt is dat de meetmethode geschikt dient te zijn voor praktisch alle voorkomende (en nieuw te ontwikkelen) kasomhullingsmaterialen. Voor het bepalen van de dimensies van de meetinstrumentatie zijn een aantal vuistregels van belang. Voor het meten aan materialen met grote structuren dient de bundelafmeting minimaal 4 maar liefst veel meer structuren te beslaan. Dit betekent voor bijvoorbeeld de gebruikelijke 16mm kanaalplaten dat gedacht moet worden aan afmetingen van minimaal 10 cm of meer voor bijvoorbeeld de ingangspoorten van de bol. Aangezien voor een goede meetnauwkeurigheid de totale oppervlakte aan openingen niet groter dan 3% dient te worden gekozen leidt dit tot integrerende bollen van 50 cm of groter. Aangezien de bundeldiameter groter dient te zijn dan de opening in de bol zijn forse verlichtingsinstallaties nodig. Voor het doen van hoekafhankelijke metingen dient dus bol met sample in het vlak van de meetopening te worden gerooteerd. Dit kan ook door het verplaatsen van de lichtbron.

### 2.5.2 *Reflectie*

Voor het meten van de hoekafhankelijke reflectie is een Edwards opstelling nodig. Hierbij bevindt het monsters zich in zijn geheel in de integrerende bol. Alternatief kan in plaats van de reflectie eventueel de absorptie van het monster op deze wijze bepaald worden.

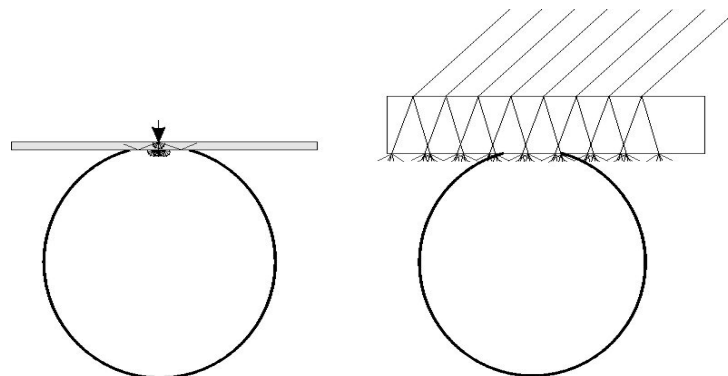
Om het oppervlak van de openingen zo beperkt mogelijk te houden wordt in deze opstellingen meestal gewerkt volgens het single beam concept. In commerciële spectrofotometers wordt de bundel gesplitst in twee componenten waarbij 1 deel van de bundel als referentie aan de bol wordt toegevoerd. In een single beam mode wordt de 100% referentiedoorlating bepaald zonder monster. Dit betekent dat geen automatische

correctie aanwezig is voor de reflectie van het licht in de bol aan het binnenoppervlak van de bol. Dit betekent dat hiervoor afzonderlijk dient te worden gecorrigeerd. Een sluitende procedure hiervoor is ontwikkeld in IEA 18 onderzoeksverband en gepubliceerd in [4]. Een alternatieve methode met extra openingen wordt beschreven in PREN 14500 [10].

### 2.5.3 *Beperkingen*

Naast deze algemene zaken voor het werken met integrerende bollen kunnen we voor het uitvoeren van hoekafhankelijke metingen nog nadere restricties opstelling die de resultaten kunnen beïnvloeden. Deze hebben voornamelijk te maken met de bundelafmetingen, monsterdikte, hoek van inval en meetopening in de bol.

Omdat de afwijkingen in de metingen meestal worden veroorzaakt doordat een deel van de doorgelaten straling niet terechtkomt in het monster is de relatie tussen monsterdikte en bundelafmeting van groot belang. Bij monsters met kleine structuren en lage verstrooiing kan gebruik worden gemaakt van een grote meetopening ten opzichte van de bundeldiameter. In dat geval komt alle afgebogen straling nog ruimschoots in de bol terecht. Grote structuren echter, die bundels van 10 cm of meer vergen leiden tot afmetingen van de integrerende bol van enkele meters. De oplossing is hier het gebruik van een zeer grote (parallele) bundel ten opzichte van de meetopening. Hierbij wordt het deel dat aan de rechterzijde buiten de meetopening valt gecompenseerd door dat wat ter linkerzijde wel wordt mee gemeten. Deze fout wordt relatief groot naarmate de aanvang van het vlak van verstrooiing verder weg ligt van de meetopening. Dit betekent dat voor zeer dikke monsters grote bundelafmetingen noodzakelijk zijn. Hierbij dient de bundel diameter enkele malen die diameter van de meetopening te bedragen (figuur 6).



Figuur 6: Meting met nauwe bundels en relatief grote opening ten opzichte van brede bundel en kleine relatief kleine bolopening. Het laatste is een must voor sterk verstrooiende dikke monsters.

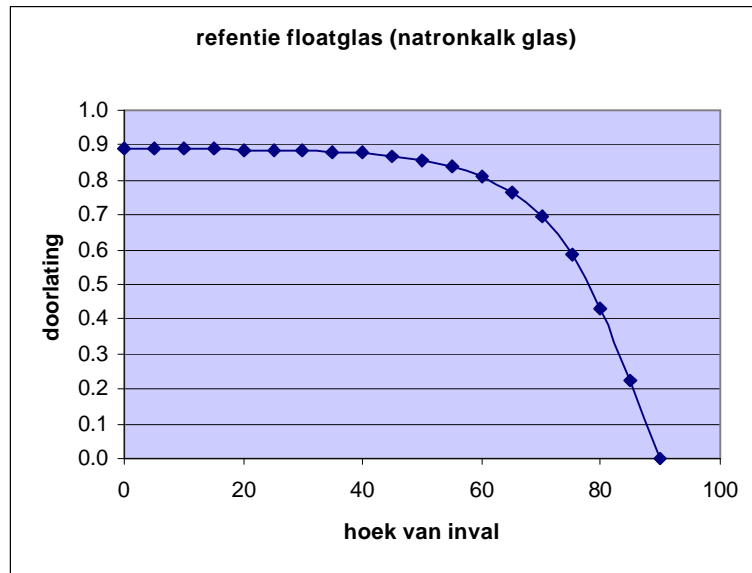
De huidige TNO opstelling levert geen problemen voor materialen tot een dikte van circa 40mm. Daarboven dient een lichtbron met grotere afmetingen te worden gebruikt zoals voor GEP echter met een ander spectrum en dus beperkingen. bij de ontwikkeling van kasomhullingsmaterialen ligt het overigens niet voor de hand om te werken naar dikkere materialen, gezien de consequenties voor de ondersteunende profielen, deze worden namelijk ook groter en gaan daardoor meer licht onderscheppen.

Structuren boven 50 mm eisen een grotere bol, in principe kan TNO hiervoor gebruik maken van een 3 m bol ( Kenniscentrum Eindhoven). Bij voldoende vraag of voor rekening van de opdrachtgever kan worden geïnvesteerd in instrumentatie zonder de huidige beperkingen.



#### 2.5.4 Berekening van de diffuse transmissie

De berekening van de diffuse transmissie laat zich eenvoudig illustreren aan de hand van een voorbeeld. In figuur 7 is op basis van literatuurgegevens [5] allereerst onder gebruikmaking van de verschillende polarisatie-richtingen de spectrale doorlating voor p en s bundel berekend. Uit deze p en s polarisatie is de totale doorlating voor verschillende hoeken energetisch gewogen met de PAR kromme. De doorlating uitgezet tegen de hoek levert figuur 7 op.



Figuur 7: hoekafhankelijke doorlating voor PAR straling van standaard glas [5]

Tabel 3 geeft de getalsmatige uitkomst van deze berekening voor 3 verschillende spectra namelijk (1) de kolom zon voor 'airmass 1.5' zonlicht, (2) Licht voor D65 en de ooggevoeligheid en (3) tuinbouw voor PAR straling.

De diffuse doorlating wordt nu verkregen door het gewogen product tussen kolom 2 (sincos) en de betreffende hoekafhankelijke doorlating. Duidelijk is te zien dat de doorlating voor PAR straling zoals verwacht dicht tegen de doorlating voor zichtbaar licht ligt. De doorlating voor zon is wat lager ten gevolge van de licht hogere absorptie van de infrarode straling. Omdat het in het algemeen lastig is om in simulatieprogramma's te werken met tabellarische waarden is deze kromme gefit met een bepaalde relatie ontwikkeld voor zonne-energie doeleinden. Deze relatie geeft altijd waarden tussen 0 en 1 en beschrijft daarnaast met name de hoekafhankelijk in het deel boven 60 graden correct (ook voor samengestelde materialen.) Deze relatie heeft de volgende samenstelling:  $T(\phi) = T(0) * (a - \exp(b * \cos(\phi) ^c))$ .

Dit betekent dat met 3 coëfficiënten de kromme beschreven kan worden. De relatie laat zich snel en doeltreffend fitten met de Solver functie in Microsoft Excel doormiddel van het minimaliseren van chikwadraat.

Tabel 1: de hoekafhankelijke doorlating van glas voor 3 spectra en het fitten van een benaderingsrelatie.

referentie data 3.85 mm glas					t u i n b o u w				
					di f f u s	t a u 0	a	b	c
					0.816	0.889	1	-5.707647	1.2264648
hoek	si n c o s	z o n	l i c h t	t u i n b o u w	r e l a t i e f i t	chi s q r			
0	0.0000	0.8234	0.8941	0.889	1.000	0.997	0.000		
5	0.0868	0.8233	0.8941	0.889	1.000	0.997	0.000		
10	0.1710	0.8228	0.8939	0.888	1.000	0.996	0.000		
15	0.2500	0.8221	0.8937	0.888	0.999	0.996	0.000		
20	0.3214	0.8209	0.8931	0.887	0.999	0.995	0.000		
25	0.3830	0.8191	0.8922	0.887	0.999	0.994	0.000		
30	0.4330	0.8165	0.8905	0.885	0.996	0.992	0.000		
35	0.4698	0.8127	0.8877	0.882	0.992	0.989	0.000		
40	0.4924	0.8071	0.8832	0.877	0.987	0.984	0.000		
45	0.5000	0.7987	0.8758	0.870	0.979	0.976	0.000		
50	0.4924	0.7862	0.8641	0.858	0.966	0.964	0.000		
55	0.4698	0.7674	0.8456	0.839	0.945	0.944	0.000		
60	0.4330	0.7387	0.8163	0.810	0.912	0.913	0.000		
65	0.3830	0.6950	0.7705	0.765	0.860	0.863	0.000		
70	0.3214	0.6283	0.6994	0.694	0.781	0.784	0.000		
75	0.2500	0.5281	0.5918	0.587	0.660	0.663	0.000		
80	0.1710	0.3838	0.4362	0.432	0.486	0.487	0.000		
85	0.0868	0.1925	0.2293	0.226	0.254	0.249	0.000		
90	0.0000	0	0	0	0	0	0		
di f f u s		0.748	0.822	0.816		0.815	0.000		

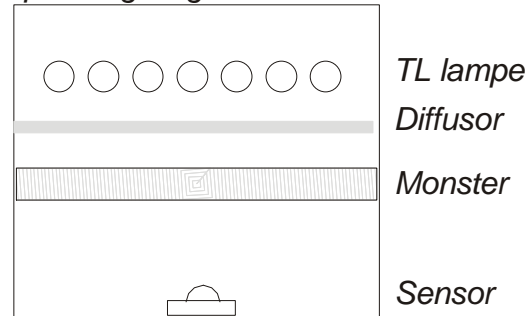
De tweede helft van deze tabel toont deze relatie en laat zien dat een uitstekend fitresultaat wordt behaald.

Door het gebruik van een dergelijke fitrelatie is snel en doeltreffend de diffuse doorlating te berekenen uit slechts een beperkt aantal meetpunten. Hierdoor kan worden vermeden dat iedere 5 graden een meetpunt aanwezig dient te zijn. Al dient wel een kanttekening te worden geplaatst dat er een meetpunt boven de 60 graden aanwezig dient te zijn. Met behulp van 4 meetpunten bijvoorbeeld 0,45,60 en 75 graden mag dan een redelijke benadering van de diffuse doorlating van een materiaal worden verwacht.

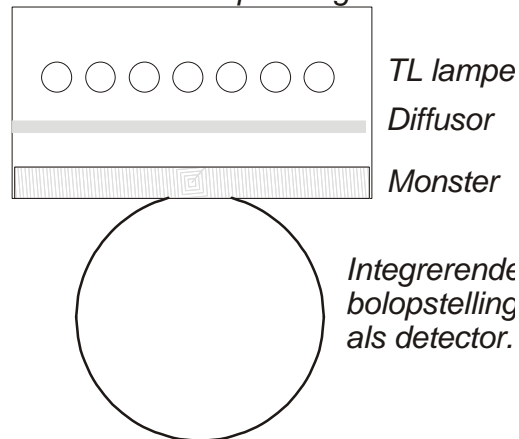
### 2.5.5 Meetmethode: ASTM D 1494

De ASTM D 1494 beschrijft een Amerikaanse testmethode voor het bepalen van de diffuse lichttransmissie factor van versterkte kunststof panelen [6]. Deze methode gaat uit van een lichtbak in combinatie met een diffuserend paneel. De meting geschiedt met een separate fotosensor en meetinstrument in daaronder staande bak. Het door te meten paneel wordt tussen lichtsensor en diffusor ingebracht. De afstand tussen beide bedraagt circa 20 cm. Het diffuserende paneel is opgegeven als een 4.8 mm dikke plaat Plexiglas in kleur W7328 (opaal), vermoedelijk een kunststof equivalent van melkglas. De afmetingen van de lichtbak zijn 610 x 610mm en er wordt gebruik gemaakt van 12 TL buizen voor de verlichting.

Deze methode lijkt zonder meer geschikt voor monsters met niet al te grote inwendige structuren, zeker indien weer gemeten wordt in combinatie met een integrerende bol. Wel dient bekeken te worden of de zichthoek van de sensor (bolopening) zodanig groot is dat ook licht dat diffuse plaat onder zeer grote hoek verlaat gemeten wordt. Dit is te bereiken door het verkleinen van de afstand tussen monster en diffuse plaat en het vergroten van de afmetingen van de lichtbak tot 1.20m x 1.20 m (figuur 8 en figuur 9).

*Opstelling volgens ASTM D 1494*

Figuur 8 Opbouw van de opstelling zoals geschetst in ASTM 1494. De 'meetkist' is bedoeld voor monsters met afmetingen van circa 60cm vierkant.

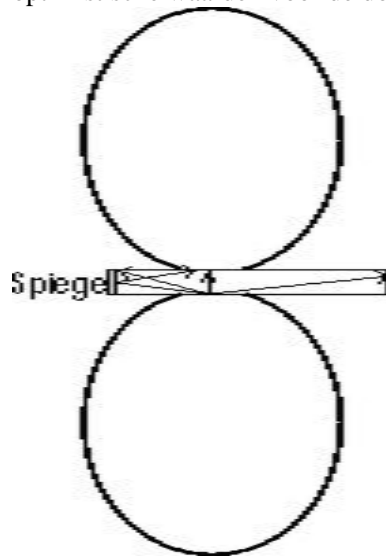
*Verbeterde opstelling*

Figuur 9 Een praktische uitwerking van de ASTM variant voor dikke monsters in combinatie met een integrerende bol. De afmeting voor de lichtbak kan het best gebaseerd worden op TL buizen van 1.20m lang.

### 2.5.6 Meetmethode: Twee integrerende bollen

Een bekende methode is het gebruik van een integrerende bol als bron voor diffuus licht. Deze methode is echter beperkt bruikbaar en alleen geschikt voor dunne materialen. Figuur 10 illustreert de tekortkomingen van deze methode die in hoofdzaak neerkomt op de beperkingen opgelegd door de openingen in de integrerende bollen. Om zeker te zijn dat alle invalshoeken evenredig vertegenwoordigd zijn bij dikke monsters dient de bol voor de lichtproductie een zeer grote uittredeopening te hebben. Om echter te waarborgen dat alle richtingen aanwezig zijn dient de diameter veel groter gekozen te worden dan de meetbol. Indien dit niet het geval is zullen de sterk zijdelings gerichte lichtstralen niet aanwezig zijn en dus nooit worden gemeten. Ten dele is de beperking van deze methode op te vangen door het monster te voorzien van spiegelende randen zodat door (meervoudige) reflecties deze lichtstralen de meetbol kunnen bereiken. De methode wordt ongeschikt geacht voor materialen voor meer dan 10mm dikte. Met name de lichtcomponenten boven de 60 graden invalshoek spelen een rol bij het diffuus

licht en het gevaar dat deze niet aanwezig zijn is sterk aanwezig. Dit leidt tot te optimistische waarden voor de doorlating voor diffuus licht.



Figuur 10 Dubbele integrerende bol

## 2.6 Materiaalontwikkelingen

Zowel in de utiliteitsbouw als in de glastuinbouw zijn er allerlei ontwikkelingen op het gebied van transparante omhullingsmaterialen. Voor de tuinbouw wordt gezocht naar een materiaal met een hoge transmissie in PAR gebied, een goede isolatiewaarde. Verder zijn er bepaalde specifieke gewas- en seizoensafhankelijke gewenste eigenschappen zoals UV filtering, NIR filtering, etc. Ontwikkelsporen in materialengebied zijn onder andere:

- Hoogtransparante folies, als dan niet dubbellaags met evt een vulling
- Beglazingen met inwendige en uitwendige structuren,
- Coatings (AR, low-E, UV, NIR, diffuserend, etc)
- Regelbare coatings
- Gasvullingen,
- Schuimvullingen
- Tijdelijke (gekleurde) schuimvulling

Voor de meetmethode betekent dit dat een toename in dubbelwandige omhullingsmaterialen verwacht kan worden, al dan niet met een medium ertussen en coatings aan de buitenzijde. Concreet betekent dit dat de meetmethode geschikt dient te zijn voor dikkere omhullingsmaterialen (max ca. 40 mm) en uitwendige structuren (Zoals bijv Zigzag).

## 2.7 Keuze meetmethode

Op grond van het geschetste in voorgaande paragrafen is een beoordelingstabel opgesteld om de verschillende meetmethoden te vergelijken en te komen tot een keuze.

Er zijn de volgende criteria opgenomen:

- 1 Meetnauwkeurigheid diffuse transmissie
- 2 Meetsnelheid, een snelle meting is doorgaans gunstig voor de kosten van een enkele meting
- 3 Geschiktheid oppervlaktestructuren, zoals gewalst of gehamerd glas
- 4 Geschiktheid niet homogene materialen, zoals Zigzag dek of kanaalplaten
- 5 Geschiktheid dikke materialen
- 6 Kosten meetopstelling, voor fabrikanten is het aantrekkelijk om zelf een opstelling aan te schaffen in het kader van de productontwikkeling, een kostbare opstelling is een extra drempel.
- 7 Mogelijkheid om hoekafhankelijke resultaten uit de meting te krijgen, voor koppeling aan de IDT methode.

Tabel 2: Beoordeling van de onderzochte methoden voor het bepalen van de diffuse transmissie van omhullingsmaterialen

criterium	Integrerende met lichtbundel	bol met draaibare lichtbundel	ASTM D 1494	Twee integrerende bollen
Meetnauwkeurigheid	8	8	7	8
Meetsnelheid	6	6	9	9
Geschiktheid oppervlaktestructuur	8	8	8	8
Geschiktheid niet homogene materialen	7	7	7	7
Geschiktheid dikke materialen	7	7	8	6
Kosten opstelling	7	7	8	7
Hoekafhankelijke resultaten	8	8	4	4
Totaal	51	51	51	49
-De schaalverdeling loopt van 1 (zeer slecht) tot 10 (uitmuntend)				
-Er is geen weging gehanteerd				
-De waarden zijn bepaald door een expert panel				

Op basis van bovenstaande tabel blijkt dat de meetmethoden allen door hun eigen voor en nadelen dicht bij elkaar scoren. Er is besloten de metingen uit te voeren volgens de "Integrerende bol met draaibare lichtbundel" methode omdat deze aanpak de meeste informatie over het product levert benodigd voor de berekening aan de kasdekken (meest veelzijdig).

## 2.8 Verslag uitgevoerde metingen en resultaten

In het kader van dit onderzoek is van twee typen kunststof platen en een glassoort met oppervlakte structuur de hoekafhankelijke transmissie bepaald en vervolgens de doorlating voor diffuus licht. Dit betrof:

- 1 EMP 16 mm Macrolux kanaalplaat met dubbele spouw. De EMP plaat is een standaard product en wordt als isolerende lichtdoorlatende plaat in kaswanden gebruikt. De steekmaat van de kanalen in deze plaat bedroeg 20 mm.
- 2 GEP 60 mm kunststof zigzag plaat. Dit is een specifiek voor de glastuinbouw ontwikkelde tweelaags polycarbonaat plaat met een zigzagstructuur bedoeld om de lichttransmissie te verbeteren.
- 3 Luxa glad gewalst glas. Dit is glas dat volgens het wals procédé wordt vervaardigd. Hierbij wordt het glas door twee walsrollen "uitgerold". Door op de rollen een textuur aan te brengen ontstaat er een patroon op het glas, waardoor het een diffuserende werking krijgt. De laatste jaren is dit materiaal sterk in opkomst in de glastuinbouw, vanwege de diffuserende werking. Hierdoor dringt het licht dieper door tot onderin het gewas.

In bijlage D zijn de meetgegevens opgenomen. Iedere meting bestaat uit een tabel met de gemeten transmissies onder verschillende hoeken. Deze worden vervolgens in een grafiek uitgezet. Aan de hand van deze grafiek wordt de diffuse transmissie bepaald. In de onderstaande tabel worden de resultaten weergegeven. Tevens zijn de resultaten van het standaard floatglas opgenomen in de tabel.

Tabel 3: Overzicht met de resultaten van de loodrechte en diffuse transmissie van de onderzochte kasdekmaterialen.

Omhullingsmateriaal	Loodrechte transmissie PAR [%]	Diffuse transmissie PAR [%]
Standaard floatglas	88.9	81.6
EMP 16 mm Macrolux kanaalplaat	72.8	59.6
GEP 60 mm kunststof Zigzag plaat	88.0	74.3
Luxa glad gewalst glas	88.9	71.4

## 2.9 Beschrijving protocol

Het meetprotocol bestaat uit het volgende stappenplan:

- 1 Meting van de hoekafhankelijke transmissie bij voldoende aantal hoeken van inval (minimaal 0,45,60 en 75 graden), voor anisotropische materialen indien nodig langs beide assen;
- 2 Fitprocedure met spreadsheet voor het bepalen van de coëfficiënten (eventueel de verschillende richtingen vooraf fitten);
- 3 Berekenen van de hoekafhankelijke transmissie met behulp van de fitcoëfficiënten;
- 4 Berekenen van de diffuse doorlating;
- 5 Toepassen van fitcoëfficiënten en diffuse doorlating in Energie III programma.
- 6 Voor de jaarrond analyse wordt de curve uit punt 3 (of beide curven) opgenomen in het Radiance model.

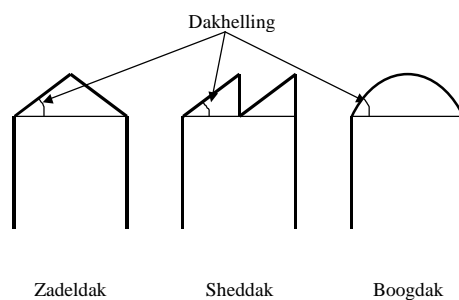
## 2.10 Aanbevelingen

- De meetmethode is in principe ingericht om spectraal te meten, zodat per golflengteband een (hoekafhankelijke) transmissie kan worden bepaald. Dit kan voor bepaalde gewassen interessant zijn.

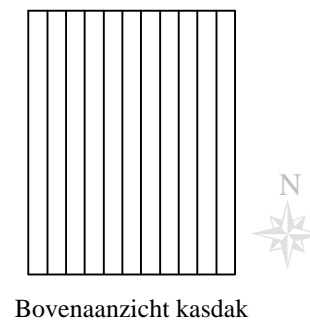
## 3 Kasdekvorm en diffuus licht

### 3.1 Inleiding

In dit werkpakket is een vergelijkende studie uitgevoerd naar de kasdakconstructie met de hoogste diffuse lichttransmissie waarbij variatie in dakconstructie (zadeldak, boogdak, sheddak), dekhelling en oriëntatie van de kas is geanalyseerd (figuur 11<sup>1</sup> en figuur 12). Hierbij is gebruik gemaakt van hoekafhankelijke transmissie en reflectie eigenschappen van deze materialen.



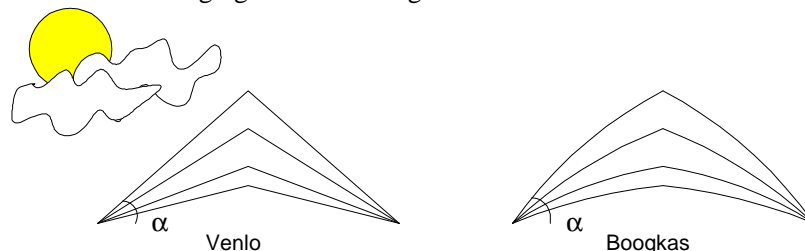
Figuur 11 Kasdakconstructie en dekhelling.



Figuur 12 Oriëntatie kasdak.

Oorspronkelijk was het plan om met behulp van het in Energie III [7] ontwikkelde benaderende rekenmodel meerdere dekhellingen van verschillende kasdakconstructies te beoordelen op hun diffuse lichttransmissie. Van de meest veelbelovende combinatie van kasdakconstructie en dekhelling zou dan in het uitgebreidere 'Radiance'-model de invloed van de oriëntatie worden bepaald en tevens de lichtopbrengst gedurende een heel jaar.

Bij de uitvoering bleek echter dat het in Energie III [7] ontwikkelde benaderende model niet geschikt is voor deze optimalisatie vanwege het negeren van tweede orde effecten met betrekking tot de transmissie (nadere uitleg in appendix B). Als gevolg hiervan is in het project al in een eerder stadium gebruik gemaakt van het uitgebreidere 'Radiance'-model als vervanging voor het Energie III model.



Figuur 13: Bepaling van de diffuse transmissie van diverse kasdekvormen

<sup>1</sup> de bepaling van de dekhelling van het boogdak is niet eenduidig. Hier wordt in de volgende paragraaf nader op in gegaan



### 3.2 Werking Radiance

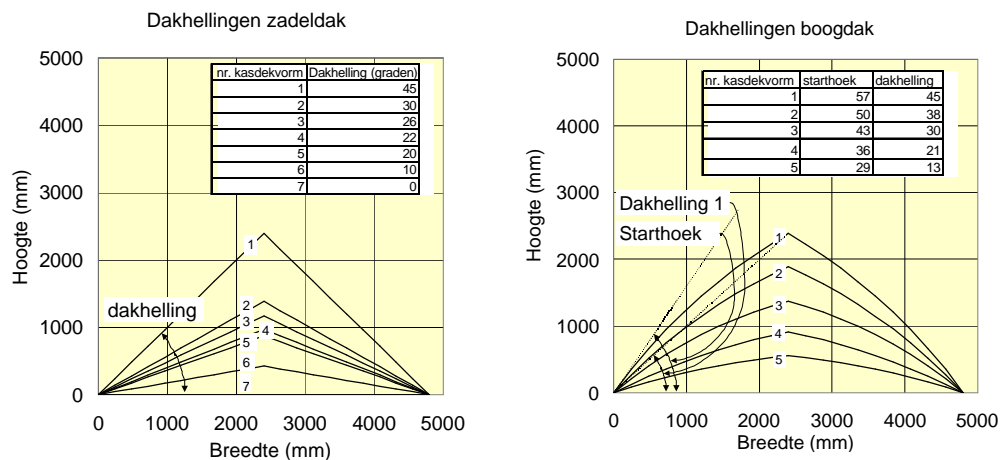
Radiance is een software pakket dat gebaseerd is op Raytracking. Raytracking is een vorm van Raytracking waarbij vanuit een bepaald punt gekeken wordt naar lichtstralen die vanuit een hemelkoepel worden “afgevuurd” op een 3D model. Raytracking is een methode bedoeld om fotorealistische afbeeldingen te maken met behulp van een computer. Raytracking software modelleert lichtstralen die zich voortbewegen in een virtuele wereld en daar reflecteren en breken voordat ze in de lens van een denkbeeldige camera terechtkomen. Op deze manier wordt een realistische afbeelding verkregen waarin de reflectie van licht en de schaduw te zien is. Bij Raytracking is het uitgangspunt niet de lichtstralen die vanuit de hemelkoepel op het voorwerp schieten, maar de hoeveelheid licht die in een bepaald punt terechtkomt.

Radiance bestaat uit programma's die licht in een bepaald ontwerp in een bepaald punt zichtbaar kunnen maken en kunnen analyseren. Het berekent diffuse, spiegelde reflectie en lichtdoorlating van een bepaalde willekeurige omgeving. In het project 'Nieuw Licht op Groei' [8] wordt een Venlo kas inclusief kasdekprofielen geheel doorgerekend met behulp van Radiance. Gebleken is dat Radiance een goede methode is voor de berekening van lichtonderschepping van een kas.

In het kader van dit project is gekozen om diverse dakvormen door te rekenen met Radiance. Hierbij wordt enkel het glas meegenomen en geen kasdekprofielen. Dit is gedaan om een koppeling te kunnen maken met het IDT lichtprogramma zoals beschreven in Energie III [7]

### 3.3 Aanpak berekeningen

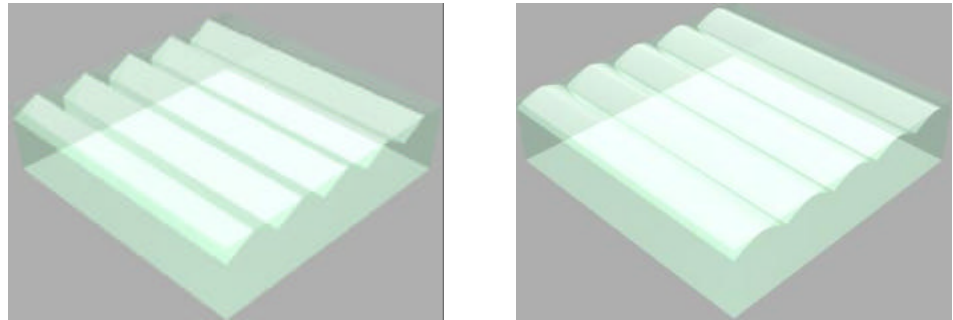
De diffuse lichttransmissie van het zadeldak en het boogdak worden in het programma 'Radiance' voor verschillende dekhellingen berekend (zie figuur 14). Het shed dak is voor de bepaling van de diffuse transmissie niet meegenomen, het voordeel van dit dek komt pas tot zijn recht als er jaarrond gekeken wordt. De dekhelling van het boogdek wordt bepaald door een rechte lijn te trekken tussen de goot en de nok en daarvan de helling te nemen.



Figuur 14 Berekende dekhellingen voor zadeldak (links) en boogdak

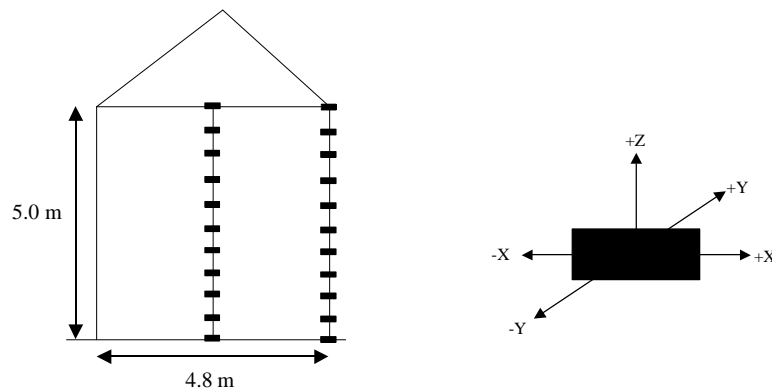
De opzet van de berekeningen in 'Radiance' is als volgt:

1. Het stramien van het kasdeksysteem is 4800 mm (zie figuur 14, breedte van de kap);
2. De totale kas bestaat uit 5 kappen, waarmee een vierkante kas wordt gevormd van 5 x 4800 mm bij 5 x 4800 mm (24 x 24 m). Bij deze afmetingen zijn de randeffecten middenin de kas (waar gemeten wordt, zie punt 4) niet meer merkbaar. In figuur 15 staat deze kas (met een zadeldak en boogdak) weergegeven zoals deze in 'Radiance' wordt ingevoerd;



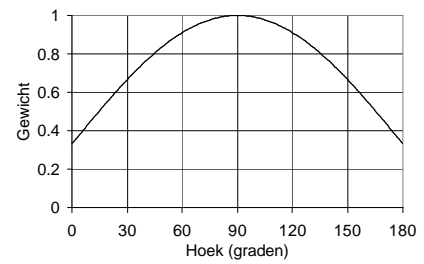
Figuur 15 Kas ingevoerd in 'Radiance': zadeldak (links) en boogdak.

3. De onderkant van de dakconstructie bevindt zich 5 m boven maaiveld.
4. In het midden van de kas (van figuur 15) staan zogenaamde 'meetkubussen' opgesteld volgens het stramien in figuur 16: onder de nok zijn 11 meetkubussen regelmatig verdeeld over de hoogte van 5 m. Tevens is een zelfde set van 11 meetkubussen onder de goot geplaatst. Een meetkubus heeft vijf verschillende 'kijkrichtingen', namelijk één verticale kijkrichting (+Z) en vier horizontale kijkrichtingen (+X, -X, +Y, -Y). In een kijkrichting wordt een cirkelboog van 180 graden opgevangen.



Figuur 16 Plaatsing meetsensoren in de kas (links) en kijkrichtingen meetsensor

5. Als verdeling van de lichtintensiteit van de hemelkoepel wordt de 'CIE overcast sky' aangehouden (figuur 17) waarbij lichtintensiteit van de verticale stralen drie maal zo groot is als de lichtintensiteit van de horizontale stralen.



Figuur 17 Lichtintensiteit CIE overcast sky

6. De bodemreflectie in de kas wordt constant verondersteld op 20%;
7. Er wordt in beginsel verondersteld dat de kasdakconstructies louter uit glas bestaan. De invloed van de profielen wordt later meegenomen in het eerder ontwikkelde IDT lichtprogramma dat in het kader van Energie III ontwikkeld is [7]. Op deze manier kon de invoer in 'Radiance' relatief eenvoudig gehouden worden, waardoor de rekentijd beperkt blijft. Bovendien sluit de Radiance methode zo goed aan op de bestaande IDT methode. Opgemerkt wordt dat de resultaten van de simulaties kunnen afwijken indien gekozen wordt voor alternatieve omhullingsmaterialen. Dit wordt veroorzaakt doordat Radiance gebruik maakt van de hoekafhankelijke transmissie van het materiaal. In hoofdstuk 4 wordt hier verder op ingegaan.

Vervolgens wordt de lichtintensiteit in de kas gemeten. De resultaten voor 1 dakconstructie (zadel- of boogdak) en 1 dekhelling ziet er dan als volgt uit (tabel 4):

Tabel 4 Lichtmetingen voor zadeldak met dekhelling van 30 graden voor verschillende sensoren en kijkrichtingen (+Z, +X, -X, +Y, -Y)

Hoogte sensor[m]	Lichtmeting sensoren onder nok [Lumen]					Lichtmeting sensoren onder goot [Lumen]				
	+Z	+X	-X	+Y	-Y	+Z	+X	-X	+Y	-Y
0,0	8474	3358	3362	3344	3339	8472	3376	3359	3341	3342
0,5	8448	3393	3398	3369	3370	8458	3423	3388	3368	3370
1,0	8433	3419	3426	3389	3384	8445	3457	3421	3392	3386
1,5	8423	3430	3433	3399	3395	8424	3471	3440	3398	3397
2,0	8422	3436	3447	3409	3405	8401	3489	3455	3399	3388
2,5	8432	3449	3452	3415	3414	8346	3486	3462	3380	3372
3,0	8456	3486	3484	3429	3428	8288	3485	3454	3358	3359
3,5	8497	3517	3519	3441	3443	8224	3473	3447	3330	3330
4,0	8494	3537	3539	3438	3438	8146	3452	3426	3300	3296
4,5	8501	3561	3564	3436	3433	8049	3408	3379	3254	3251
5,0	8490	3583	3584	3438	3441	7980	3380	3349	3231	3228

Om de transmissie te kunnen berekenen worden dezelfde metingen verricht, maar dan zonder kas (overigens wél met een ondergrond met een reflectie van 20%). Hiervan staan de resultaten weergegeven in tabel 5.

Tabel 5 Resultaten 'Radiance'-som zonder kas maar met reflecterend (20%) grondvlak

Hoogte sensor m]	Lichtmeting sensoren onder nok [Lumen]				
	+Z	+X	-X	+Y	-Y
0,0	10000	3890	3895	3895	3890
0,5	10000	3946	3944	3944	3946
1,0	10000	3986	3991	3991	3986
1,5	10000	4021	4023	4023	4021
2,0	10000	4047	4053	4053	4047
2,5	10000	4070	4074	4074	4070
3,0	10000	4095	4098	4098	4095
3,5	10000	4118	4118	4118	4118
4,0	10000	4138	4143	4143	4138
4,5	10000	4156	4159	4159	4156
5,0	10000	4176	4177	4177	4176

Vervolgens is op twee manieren de transmissie van de kas berekend:

### 3.3.1 *Transmissie (verticale richting):*

Dit houdt in dat alleen de metingen in de '+Z'-richting van alle sensoren wordt beschouwd. De transmissie wordt dan als volgt berekend:

Transmissie (verticale richting) = 'Lichtmeting met kas'/'Lichtmeting zonder kas',

waarin,

- Lichtmeting met kas' = gemiddelde lichtmeting van alle sensoren in Z+-richting (het gemiddelde van de gearceerde kolommen in tabel 4);
- 'Lichtmeting zonder kas' = gemiddelde lichtmeting van alle sensoren in Z+-richting (het gemiddelde van de gearceerde kolom in tabel 5).

Transmissie (verticale richting) = 8377/10000 = 83,7%.

### 3.3.2 *Transmissie (alle richtingen):*

Dit houdt in dat de metingen in alle richtingen van alle sensoren wordt beschouwd. De transmissie wordt dan als volgt berekend:

Transmissie (alle richtingen) = 'Lichtmeting met kas'/'Lichtmeting zonder kas',

waarin,

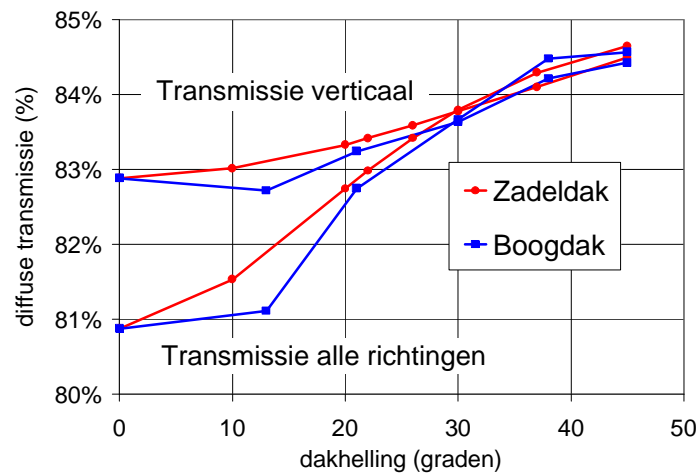
- Lichtmeting met kas' = gemiddelde lichtmeting van alle sensoren in alle richtingen (het gemiddelde van alle kolommen in tabel 4);
- 'Lichtmeting zonder kas' = gemiddelde lichtmeting van alle sensoren in alle richting (het gemiddelde van alle kolommen in tabel 5).

Transmissie (alle richtingen) = 4406/5257 = 83,8%.

Deze berekeningen worden uitgevoerd voor de kasdakconstructies en bijbehorende dekhellingen zoals weergegeven in figuur 14.

### 3.4 Keuze Radiance lichtmeetmethode

Zoals in paragraaf 3.3 besproken kan in het Radiance model de lichtonderschepping van het kasdek worden bepaald met behulp van een verticale meting en meting in alle richtingen. Figuur 18 toont voor het zadeldak en het boogdak de diffuse lichttransmissie waarbij de transmissie op twee manieren berekend is, gebruikmakend van (1) de verticale richting en (2) alle richtingen (zie tevens uitleg paragraaf 3.3). Wat opvalt is dat in het gebied waarin in Figuur 18 de optimale lichtopbrengst valt (gebied tussen 25 en 45 graden) er nauwelijks verschil bestaat tussen de twee berekeningsmethoden.

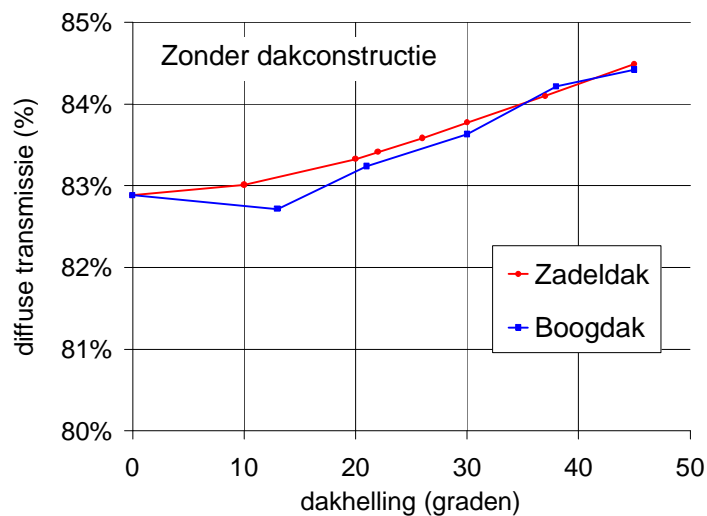


Figuur 18 Diffuse lichttransmissies vergeleken (paragraaf 3.3 voor uitleg)

Aangezien de verticale meting goed aansluit bij de meting zoals die nu in kassen gebeurt met een meetcel is gekozen om deze methode over te nemen. Als in de toekomst meer bekend is over de optimale lichtverdeling over de plant kunnen de richtingsafhankelijke gegevens nader bestudeerd worden.

### 3.5 Resultaten diffuse lichttransmissie kasdek zonder profielen

Figuur 19 toont de resultaten voor de (verticale) diffuse lichttransmissie voor de zadeldak- en boogdakconstructie voor verschillende dekhellingen zonder invloed van de constructie.

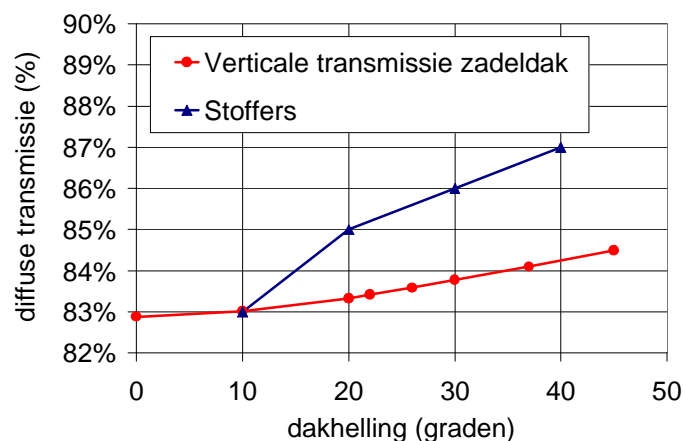


Figuur 19 Transmissie zonder kasdekprofielen

De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- De lichttransmissie neemt toe met de dekhelling, het verschil tussen de gangbare dekhelling van 21 graden en 45 graden is circa 1%
- De lichttransmissie van het zadeldak over het algemeen iets hoger dan die van het boogdak;

Het valt op dat de diffuse lichttransmissie toeneemt met toenemende dekhelling. Een dergelijke trend was reeds in 1968 voorspeld door berekeningen van Stoffers [9]. Zijn berekening zijn weliswaar gedaan onder andere aannamen (o.a. uniforme verdeling van de lichtintensiteit over de hemelkoepel) en met een andere rekenmethode, toch is de stijgende trend zichtbaar. Volgens deze trend zou de maximale diffuse lichttransmissie bij de grootste dekhelling liggen.



Figuur 20 Diffuse lichttransmissie zadeldak zonder dakconstructie vergeleken met Stoffers [20]

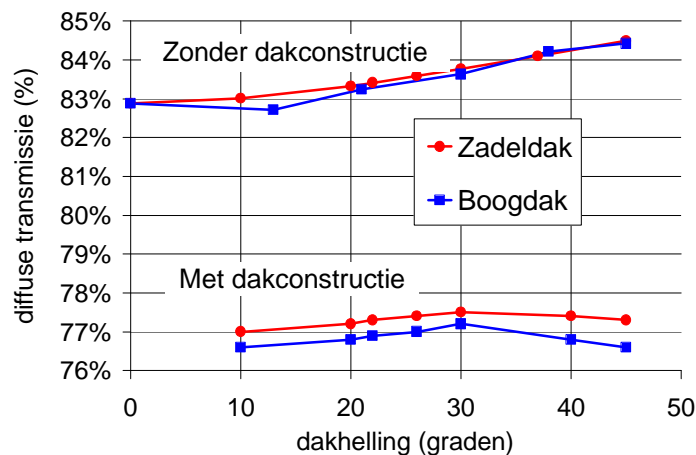
### 3.6 Invloed kasconstructie

Interessant is de transmissie van het kasdek inclusief kasdekprofielen. Met een toenemende dekhelling neemt namelijk ook de lengte van de dekroede en de

opdrukstang toe, wat een negatief effect heeft op de lichtonderschepping. Dit is bepaald door het resultaat van de Radiance berekening in te bouwen in de IDT methode ter bepaling van de totale lichtonderschepping van het kasdek, dus inclusief profielen. Hiervoor is een referentiekasdek samengesteld, zoals hieronder weergegeven ( Tabel 6). Voor de berekening van de invloed van de profielen wordt verwezen naar bijlage C. Uit Figuur 21 blijkt dat de stijgende trend bij zowel het zadeldak als ook het boogdak ombuigt bij een dekhelling van rond de 30 graden.

Tabel 6 Invoer in IDT-methode

Type kas	Venlo kas	Boogkas
Kapmaat	4,8 m	4,8 m
Vakmaat	4,5 m	4,5 m
Poothoogte	5,5 m	5,5 m
Glasbreedte	1,125 m	1,125 m
Luchtraam	2 ruits	2 ruits
Opdruckers	3 stuks 19 mm	3 stuks 19 mm
Goot	Stalen kokergoot	Stalen kokergoot
Leverancier	Divers	Divers



Figuur 21: Transmissie kasdek met en zonder kasdekprofielen

#### Opmerkingen bij de tabel:

- Te zien valt dat de dakconstructie bij alle dekhellingen 5 a 6% licht onderscheept;
- De lichtwinst bij een compleet kasdek incl profielen door de dekhelling te vergroten is slechts enkele tienden procent. De beoogde lichtwinst uit de doelstelling zal bereikt kunnen worden door alternatieve omhullingsmaterialen of een alternatieve kasconstructie.
- Met constructie blijkt de lichttransmissie van het boogdak over de gehele lijn hoger te zijn dan die van het zadeldak;
- De hoogste diffuse lichttransmissie inclusief het lichtonderscheppend effect van de kapconstructie, wordt zowel bij het zadeldak als bij het boogdak bereikt bij een dekhelling van ongeveer 30 graden, waarbij het zadeldak nog een iets hogere lichtopbrengst heeft dan het boogdak.
- Kasdekken worden m.b.v. de IDT methode vergeleken op basis van de diffuse lichttransmissie. Om onder die omstandigheden te komen tot een kasdek met

optimale lichtonderschepping kan gekozen worden voor een grotere dekhelling. In paragraaf 3.8 wordt er dieper ingegaan op de andere aspecten die meespelen bij de keuze voor een kasdekvorm en helling.

### 3.7 Optimalisatie per leverancier

De invloed van de kasconstructie op de lichtonderschepping (uitgezet tegen de dekhelling) hangt in zekere zin af van het kastype. Iedere leverancier kan met behulp van de Radiance resultaten die ingebouwd zijn in de IDT methode zelf bepalen welke dekhelling optimaal is voor zijn kasdeksysteem. Men kan dan ook rekening houden met de benodigde sterkte van de (langer wordende) profielen en de toenemende windbelasting. Hieronder is in een tabel een analyse weergegeven zoals uitgevoerd door Boal Systemen BV. Geconcludeerd kan worden dat voor dit type kasdek 26 graden een economisch optimum is tussen lichtwinst en kosten. Sinds eind 2004 wordt de IDT methode gebruikt door alle toonaangevende systeemleveranciers, mede voor het bepalen de Groenlabel punten (GLK). Er kan gesteld worden dat het afgelopen jaar de kasdekken geoptimaliseerd zijn op lichtdoorlaat door de leveranciers. De behaalde lichtwinst is afhankelijk van de leverancier, maar gemiddeld genomen ca. 1%.

Tabel 7 Dekhelling studie Boal kasdekken m.b.v. de IDT methode

Dekhelling [graden]	Roede [hxb]	Roelengte [mm]	Lichtonderschepping [%]
21.6	45x23	2110	23.3
26	45x23	2180	23.0
30	45x23	2265	22.9
30	50x23	2265	23.0
Kapbreedte 4000mm			
Vakmaat 5000 mm			
Ruitbreedte 1667 mm			
Luchtraam 1-ruits gehard			

### 3.8 Overige eigenschappen kasdakconstructies

In het voorgaande is enkel gekeken naar een optimalisatie van het kasdek op basis van de transmissie van diffuus licht. Andere parameters bij het bepalen van de kasdekvorm zijn:

#### 3.8.1 *Vervuiling*

Vervuiling van het kasdek is ongewenst aangezien dit de lichttransmissie belemmert. Vervuiling op glas wordt tegengegaan door (regen)water dat het vuil meevoert naar de goot. Naarmate de dekhelling toeneemt wordt deze werking beter. In [11] is onderzoek gedaan naar de invloed van de dekhelling op de vervuiling van glasmonsters. Hieronder is de opzet van de proefopstelling te zien (figuur 22). Op basis van de resultaten kan gesteld worden dat vanaf 5 graden voldoende afspoelend effect optreedt voor de reiniging van het glas (tabel 8).





Figuur 22 Proefopstelling uit [11]

Tabel 8 Lichttransmissie floatglas na buitenexpositie voor 12 maanden onder diverse hoeken, op basis van [11]

hellingshoek	Transmissie
2	0.830
5	0.853
8	0.856
15	0.856
20	0.839
36	0.849
90	0.860
Nieuw monster	0.860

### 3.8.2 *Condensafvoer*

Bij de afvoer van condenswater is het belangrijk dat de druppels naar beneden stromen via het glas en niet losraken van het glas en op het gewas vallen. Door Prof. Elsner in Hannover is hier onderzoek naar gedaan. Hieruit volgt dat vanaf een hoek van ca. 20 graden er geen druppels losraken van het glasoppervlak.

### 3.8.3 *Maakbaarheid*

Het kasdek bestaat uit een modulair systeem van goten, roeden, nok en luchtraamprofielen. De keuze voor de dekhelling kan in principe per project gemaakt worden en heeft consequenties voor enkele voorbereidingen (o.a. het zagen van de roeden). In principe maakt het voor de maakbaarheid niet uit welke dekhelling een kasdek heeft. Anders wordt het bij de keuze voor een gebogen kasdek. In dat geval komt er een extra handeling bij, namelijk het buigen van de roede.

### 3.8.4 *ARBO*

Kasdekken worden doorgaans vanaf een werkplateau op een “rups” gemonteerd. Het dek wordt in elkaar geschoven, d.w.z. de ruit wordt in een roede geschoven en vervolgens wordt er weer een andere roede tegenaan geschoven. De dekhelling heeft nauwelijks invloed op de ARBO omstandigheden tijdens montage. Wel is het zo dat zodra de helling groter wordt het hoogteverschil tussen nok en goot groter wordt. Hierdoor moet men verder reiken (hoger en lager)

### 3.8.5 *Teeltaspecten*

Voor de teelt heeft de dekhelling invloed op de totale ruimte boven het gewas en op de ruimte boven het scherm. Hoe groter de dekhelling des te meer zal er gestookt moeten worden om de gewenste temperatuur te behalen in de winter. Bovendien is de mate van kouval bij het openen van het scherm groter aangezien er meer lucht boven het scherm zit. Aan de andere kant biedt de grotere dekhelling in de zomer mogelijkheden omdat er meer ruimte is boven het gewas (beter schoorsteeneffect). Er wordt geen verschil verondersteld tussen de boogkas en de Venlo kas. Verondersteld wordt dat de negatieve en de positieve effecten elkaar opheffen. Hierdoor scoren alle varianten hetzelfde op dit onderdeel.

### 3.8.6 *Kosten*

Kwalitatief kan gesteld worden dat een kasdek duurder wordt naarmate de dekhelling toeneemt. Er is namelijk steeds meer glas en aluminium (voor de roeden) nodig. Daar komt bij dat de roede ook zwaarder uitgevoerd dient te worden naarmate de dekhelling toeneemt. Voor de boogkas geldt dat de roede iets lichter uitgevoerd kan worden, vanwege de gunstige boogvorm.

## 3.9 **Integrale beoordeling kasdekvarianten voor diffuus licht**

Met de bovenstaande overwegingen is het mogelijk om de diverse typen kasdekken integraal af te wegen. Er is gekozen voor een kwalitatieve beoordeling, waarbij cijfers worden gegeven tussen 1 en 5 voor de diverse aspecten, waarbij 5 de meest gunstige waarde is. Er zijn geen weegfactoren toegepast. Het kasdek met de hoogste score is het meest optimaal.

Tabel 9 Integrale kwalitatieve beoordeling kasdekvarianten

Kasdek	Licht	Vervuiling	Condens	Maakbaarheid	Arbo	teeltaspecten	Kosten	<b>Totaal</b>
Venlo 0	1	1	1	2	2	1	5	<b>13</b>
Venlo 10	2	3	2	2	2	1	5	<b>17</b>
Venlo 20	3	2	3	2	2	1	4	<b>17</b>
<b>Venlo 26</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>19</b>
Venlo 45	3	3	3	2	1	1	3	<b>16</b>
Boog 13	1	3	2	1	2	1	3	<b>13</b>
Boog 21	2	2	3	1	2	1	2	<b>13</b>
Boog 30	3	3	3	1	2	1	2	<b>15</b>
Boog 38	2	3	3	1	1	1	1	<b>12</b>
Boog 45	1	3	3	1	1	1	1	<b>11</b>

### 3.10 Conclusies m.b.t. diffuus licht

#### Alleen glas

- De lichttransmissie neemt toe met de dekhelling, het verschil tussen de gangbare dekhelling van 21 graden en 45 graden is circa 1%, uitgaande van de CIE overcast sky.
- De lichttransmissie van het zadeldak over het algemeen iets hoger dan die van het boogdak;

#### Met kasdekprofielen

- Te zien valt dat de dakconstructie bij alle dekhellingen 5 a 6% licht onderscheept;
- De lichtwinst bij een compleet kasdek incl profielen door de dekhelling te vergroten is slechts enkele tienden procent. Door de optimalisatie van de kasdekken door de leveranciers is het afgelopen jaar gemiddeld 1% lichtwinst bereikt.
- De beoogde lichtwinst uit de doelstelling van 5% zal bereikt kunnen worden door naast een geoptimaliseerde constructie te kiezen voor alternatieve omhullingsmaterialen (zie hoofdstuk 5).
- Met constructie blijkt de lichttransmissie van het boogdak over de gehele linie hoger te zijn dan die van het zadeldak;
- De hoogste diffuse lichttransmissie inclusief het lichtonderscheppend effect van de kapconstructie, wordt zowel bij het zadeldak als bij het boogdak bereikt bij een dekhelling van ongeveer 30 graden, waarbij het zadeldak nog een iets hogere lichtopbrengst heeft dan het boogdak.
- Kasdekken worden m.b.v. de IDT methode vergeleken op basis van de diffuse lichttransmissie. Om onder die omstandigheden te komen tot een kasdek met optimale lichtonderschepping kan gekozen worden voor een grotere dekhelling. In paragraaf 3.8 wordt er dieper ingegaan op de andere aspecten die meespelen bij de keuze voor een kasdekvorm en helling.

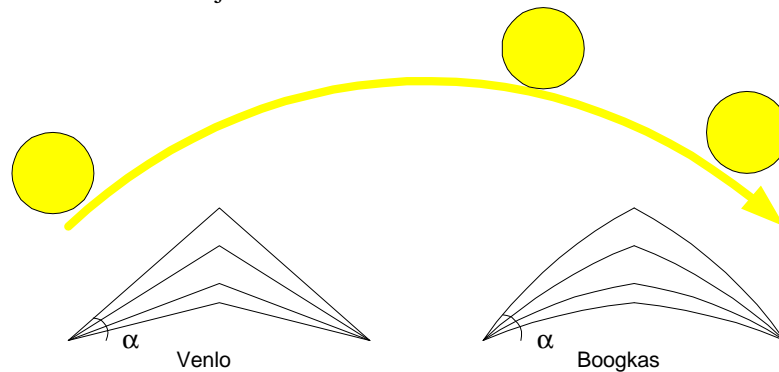
#### Algemeen

- Uitgaande van diffuus licht geldt dat naarmate de dekhelling toeneemt er meer licht in de kas valt. Het verschil tussen 0 en 45 graden is echter minder groot dan in 1968 door Stoffers bepaald, onder andere vanwege de keuze voor de CIE overcast sky, waarbij er een verdeling over het diffuse licht zit (bovenin de hemel meer dan aan de horizon).
- Bij lagere dekhellingen (onder de 20 graden) ontstaat er een verschil tussen de verticale lichtdoorlating en de lichtdoorlating in alle richtingen. Dit heeft mogelijk gevolgen voor de tuinder indien duidelijk is waar men het licht wil hebben op het gewas.
- Vanaf 5 graden dekhelling treedt er voldoende afspoelend effect op om het glas te reinigen. Om afvallend condens te voorkomen is minimaal ca. 20 graden benodigd.
- Een eerste kwalitatieve integrale beoordeling van de diverse kasdekvarianten zonder weegfactoren geeft aan dat het Venlo dek met een ietwat grotere dekhelling dan tegenwoordig gangbaar is optimaal is (26 graden). Indien de tuinder een weging aanbrengt voor de diverse criteria kan dit optimum verschuiven.
- Het Boogdek lijkt over de gehele linie minder optimaal dan het Venlo dek. Voor alternatieve omhullingsmaterialen kan het optimum anders liggen.

## 4 Kasdevorm Jaarrond

### 4.1 Inleiding

In het voorgaande hoofdstuk is het kasdek geoptimaliseerd op diffuus licht. Voor de tuinder kan het echter interessant zijn om het kasdek te optimaliseren op direct licht. Jaarrond gezien bestaat het lichtaanbod namelijk uit een direct aandeel en een diffuus aandeel. Het directe aandeel varieert over de dag gezien in richting en intensiteit. Over de seizoenen verandert ook nog eens de hoek van inval. De verdeling direct / diffuus en de invalshoeken zijn beschreven in diverse standaard datasets.



Figuur 23: Jaarrond analyse van direct en diffuus licht voor diverse kasdevormen

Door de hoek van inval van het daglicht te combineren met de kasdekgeometrie (helling en oriëntatie) en de eigenschappen van het kasdek materiaal zoals gemeten met het voorgestelde hoekafhankelijke meetprotocol zijn de volgende zaken voor de tuinder te optimaliseren (te presenteren in tabellen):

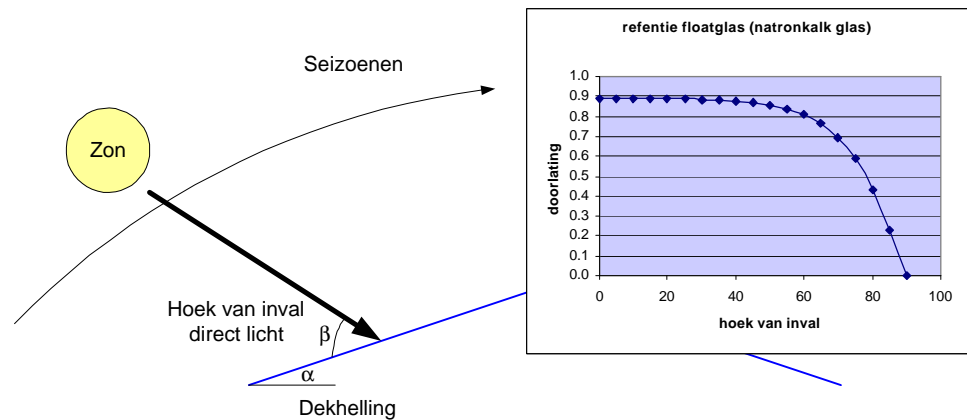
- Effect van alternatieve omhullingsmaterialen op de totale jaarlijkse lichtsom
- Effect van de kasoriëntatie op de lichtsom in de kas
- Effect van de dekhelling op de lichtsom in de verschillende seizoenen. Het is mogelijk om de kas te optimaliseren op voor-, najaar en winter, aangezien het licht in die periode zeer waardevol kan zijn.

### 4.2 Aanpak

Het proces is hieronder in een stappenplan en visueel weergegeven:

- 1 Modelleer het kasdek driedimensionaal. De aluminium profielen worden niet meegenomen om rekentijd te besparen. Het glas krijgt als eigenschap de hoekafhankelijke transmissie mee, zoals bepaald in hoofdstuk 2.
- 2 Neem uurlijks de lichtsituatie (zonnestand, en aandeel direct en diffuus licht)
- 3 Verdeel de hemelkoepel rondom het kasdek in een aantal vlakken met een bepaalde helderheid. Deze helderheid wordt bepaald door de uurlijkse lichtsituatie
- 4 Modelleer een aantal lichtsensoren onder het kasdek
- 5 Bepaal met behulp van de Raytracking methode de lichtdoorlaat van de kas op dat moment. Deze wordt bepaald door de meetwaarde op de sensor te vergelijken met de meetwaarde van een sensor in een "lege" hemelkoepel (vrije veld)
- 6 Bepaal de jaarlijkse lichtsom op basis van de uurlijkse waarden

- 7 Bepaal het verloop van de lichtdoorlaat afhankelijk van de seizoenen en presenteer dit samen met de absolute lichtsom over de seizoenen.



Figuur 24: Schematische weergave van de jaarrondberekeningen. Aan de hand van de datasets met zonnestanden en direct/difffuus verhouding wordt uurlijks de lichtsituatie doorgerekend.

### 4.3 Uitgangspunten

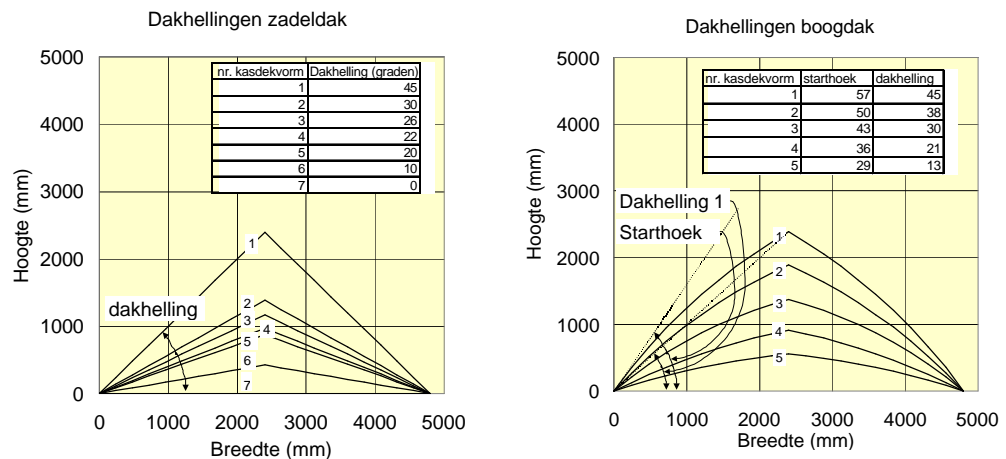
De volgende uitgangspunten zijn gehanteerd bij de jaarrondsimulaties

- 1 Alleen het glas van het kasdek is gemodelleerd, voornamelijk om rekentijd te besparen.
- 2 Het kasdek bestaat uit 13 kappen en 13 vakken, waarbij in het midden gemeten wordt. Op deze manier worden randeffecten geminimaliseerd
- 3 De oriëntatie van de kassen is Noord-Zuid (gootrichting). Om het verschil in oriëntatie mee te nemen is ook één Oost-West simulatie uitgevoerd.
- 4 Er is geen gewas opgenomen in de kas, aangezien hiervoor geen geschikte 3D modellen gevonden zijn. Bovendien zal de rekentijd sterk toenemen indien een gewas wordt gemodelleerd.
- 5 De grondreflectie is gesteld op 20%, wat een inschatting is van een kas met gewas.
- 6 Er is gebruik gemaakt van de gemiddelde KNMI dataset 1990-2000, met daarin de uurlijkse gegevens van de totale instraling, aandeel direct en diffuus.
- 7 De hemelkoepel is opgedeeld in 180 elementen, gelijkmatig verdeeld.
- 8 Er zijn lichtmeetpunten gedefinieerd onder de nok en onder de goot, beide in het midden van de kas. De punten hebben de volgende hoogtes boven het maaiveld: 0, 1, 2, 3, 4 en 5 m. Er wordt zowel de horizontale als de verticale verlichtingssterkte gemeten, waarbij de verticale in vier richtingen wordt gemeten (voor, achter, links en rechts).
- 9 In de verdere analyse wordt verder gerekend met de horizontale verlichtingssterkte, zoals omschreven in paragraaf 3.4.
- 10 Er is ook een jaarrond simulatie gemaakt van een hemelkoepel zonder kas. Deze simulatie stelt de situatie in het vrije veld voor. Aan de hand van de metingen in de kas en in het vrije veld wordt de fractie bepaald van het licht dat daadwerkelijk in de kas komt.

11 De tijdstappen van het model zijn 5 minuten. De data wordt uurlijks gepresenteerd in de vorm van lichtsommen. Op deze manier kan behalve de uurlijkse transmissie tevens de uurlijkse lichtsom worden bepaald.

#### 4.4 Uitgevoerde simulaties

Voor de jaarrond simulaties zijn dezelfde kasdek vormen beschouwd als in hoofdstuk 3. Hieronder zijn de kasdek vormen weergegeven:



Figuur 25: Onderzochte kasdekvormen

In aanvulling op de bovenstaande kasdekvormen zijn de volgende aanvullende kasdekvormen meegenomen:

- 1 VENLO 26 graden met Oost-West nokoriëntatie
- 2 Sheddak met een dekhelft van 26 graden op het Zuiden en een dekhelft met een helling van 80 graden op het Noorden
- 3 Sheddak met een dekhelft van 26 graden op het Noorden en een dekhelft van 80 graden op het Zuiden.
- 4 VENLO 26 graden met AR gecoat glas

#### 4.5 Resultaten

De simulaties resulteren in tabellen met daarin de gemiddelde uurlijkse lichttransmissie gedurende het jaar. Om deze data handelbaar te maken is gekozen om te middelen over alle dagen van de maand. Op deze manier blijft voor iedere maand 1 gemiddelde dag over met daarbij de uurlijkse lichttransmissie. Met deze data kunnen de volgende grafieken worden gemaakt:

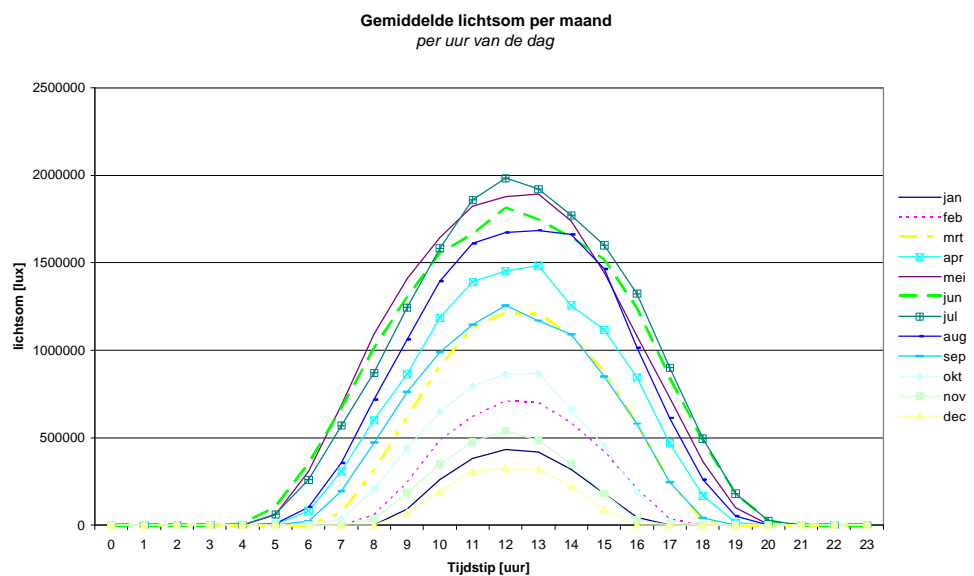
- 1 Uitzetten van de gemiddelde transmissie over het jaar heen om diverse kasdekken te vergelijken. Hierbij worden de uurlijkse gegevens gemiddeld tot een dagelijkse transmissie.
- 2 Vergelijken van de diverse kasdekken gedurende een specifieke dag. Gekozen is om februari en juni te nemen. De tuinder kan aan de hand van deze grafieken bekijken welke kasdekvorm het beste aansluit op zijn wensen. Zo kan in sommige gevallen meer transmissie in het voorjaar belangrijker zijn dan de transmissie in de zomer.

- 3 Vergelijken van de diverse kasdekken op een bepaald tijdstip voor alle maanden van het jaar. Gekozen is om de transmissie om 12 uur 's middags over de maanden heen te monitoren.

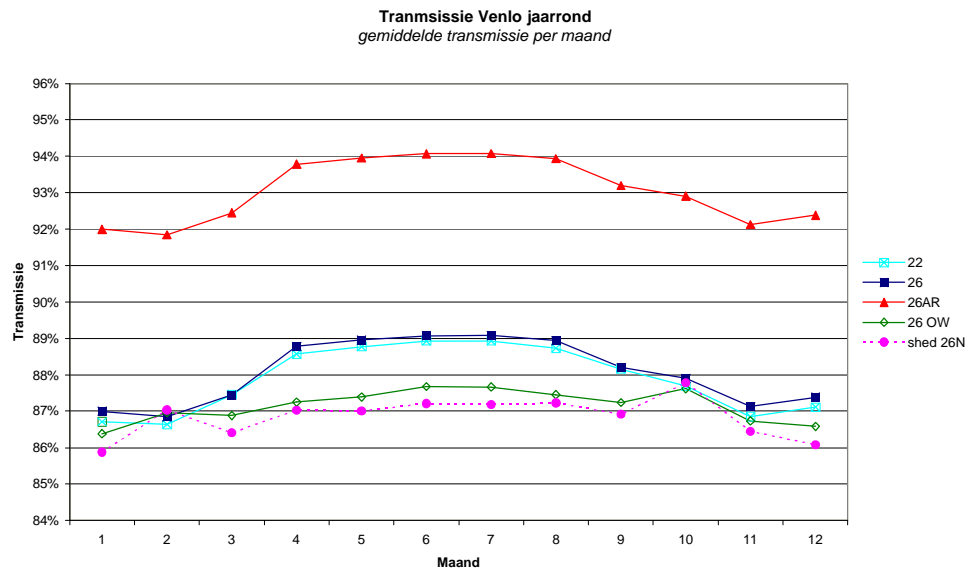
Hieronder zijn de volgende grafieken weergegeven

1. Gemiddelde lichtsom per maand
2. Transmissie Venlo jaarrond
3. Transmissie boogkas jaarrond
4. Transmissie Venlo 12 uur 's middags
5. Transmissie Venlo Februari
6. Transmissie Venlo Juni

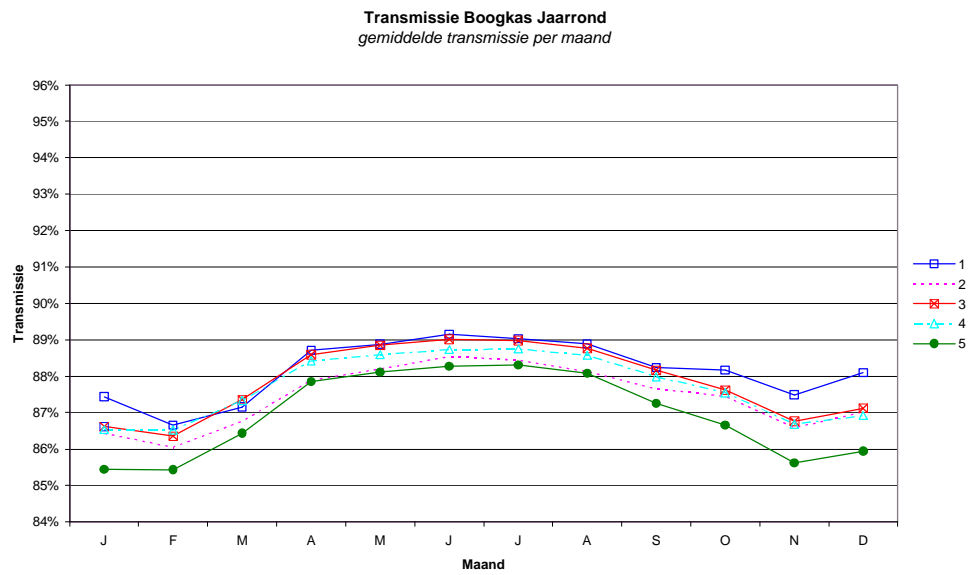
In de grafieken 2, 4, 5 en 6 zijn de lijnen van de 5 meest veelbelovende daken weergegeven, dit om de resultaten overzichtelijk te houden. De volledige grafieken staan in bijlage H.



Figuur 26: Overzicht van de lichthoeveelheden gedurende de dag. Per maand is een lijn gegeven die de lichthoeveelheid per uur weergeeft. Te zien is dat rond het middaguur in de zomermaanden ca. 4x zoveel lichtaanbod is dan in de wintermaanden. Vroeger op de dag wordt de verhouding nog extremer.

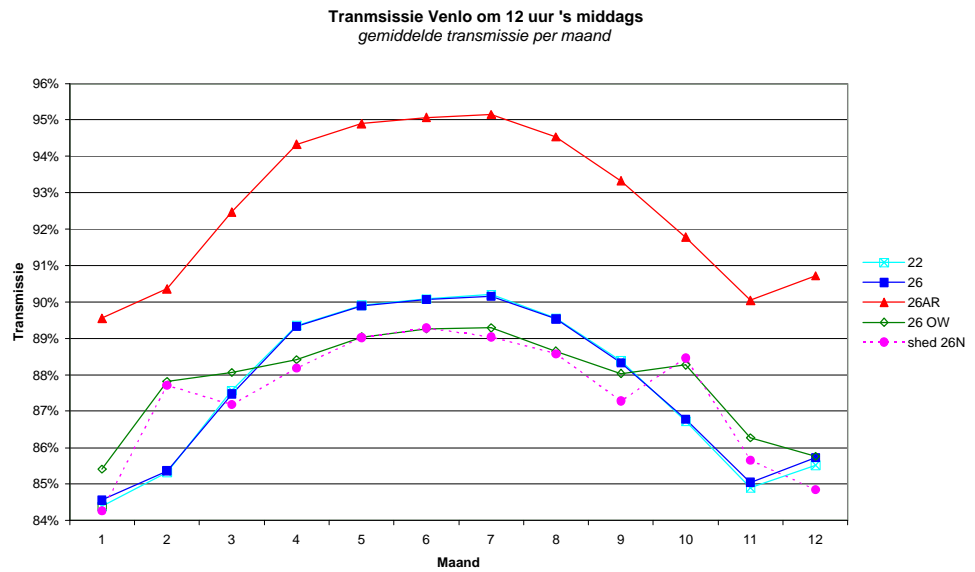


Figuur 27: Verloop van de transmissie van de diverse Venlo en Sheddakvormen over het jaar heen. De uurlijkse transmissies zijn gemiddeld tot een dagelijks gemiddelde. Deze grafiek geeft een beeld van de overall performance van de kasdekken. Te zien is dat de Venlo met 22 en 26 graden hoog scoort.

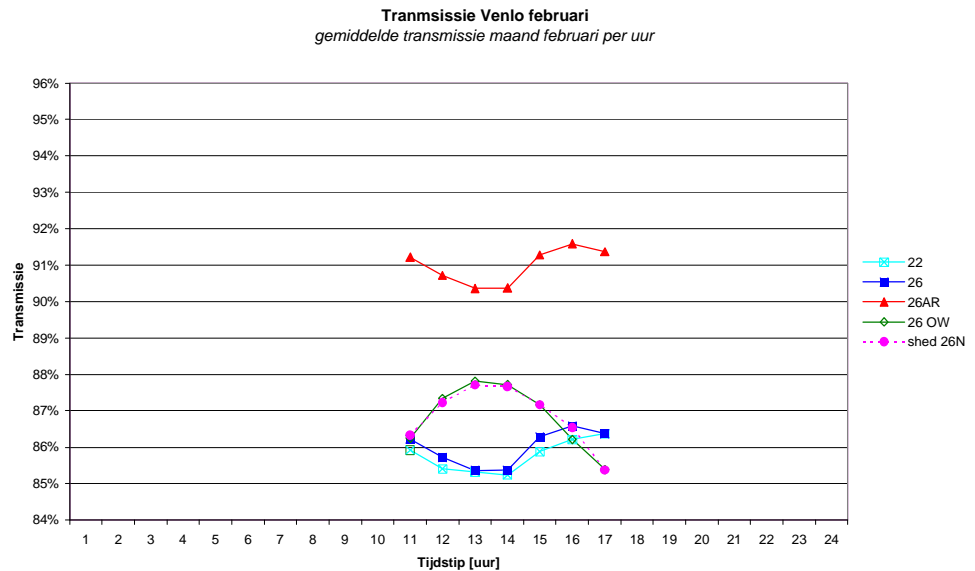


Figuur 28: Verloop van de transmissie van de diverse Boogkasdekken over het jaar heen. De uurlijkse transmissies zijn gemiddeld tot een dagelijks gemiddelde. Deze grafiek geeft een beeld van de overall performance van de kasdekken. Te zien is dat de steilste boogkas het beste scoort (Boog 1).

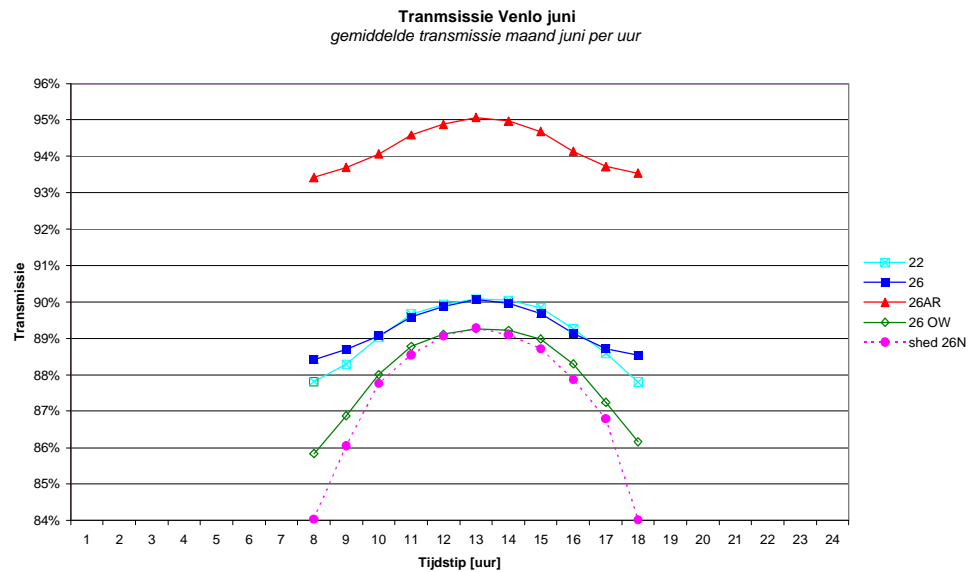




Figuur 29: Verloop van de transmissie van de diverse Venlo en sheddak kasdekken over het jaar heen. Van iedere maand is de situatie om 12.00u gegeven. Te zien is dat in de zomer de transmissie rond het middaguur voor alle kastypen hoger is dan in de winter. Verder valt op dat de Venlo 22 en 26 graden weliswaar hoog scoren in de zomer, maar dat in het voorjaar een Oost West georiënteerde Venlo of een sheddak hoger scoren.



Figuur 30: Verloop van de transmissie van de diverse Venlo en sheddak kasdekken gedurende de gemiddelde februari dag. Te zien is dat het korte dag betreft. Verder valt op dat de Venlo 26 Oost West en het Sheddak Noord gedurende de dag ca. 1-3% grotere transmissie hebben dan de Noord Zuid georiënteerde Venlo daken.



Figuur 31: Verloop van de transmissie van de diverse Venlo en sheddak kasdekken gedurende de gemiddelde dag in juni. Te zien is dat de Venlo daken met dekhellingen van 22, 26 en 30 graden gedurende de gehele dag het beste scoren.

#### 4.6 Bespreking van de resultaten

Net als in hoofdstuk 3 valt op dat het Venlo kasdek met 26 graden gemiddeld het beste presteert. Zoals verwacht kunnen wel de nodige nuances worden aangegeven m.b.t. de seizoensinvloeden:

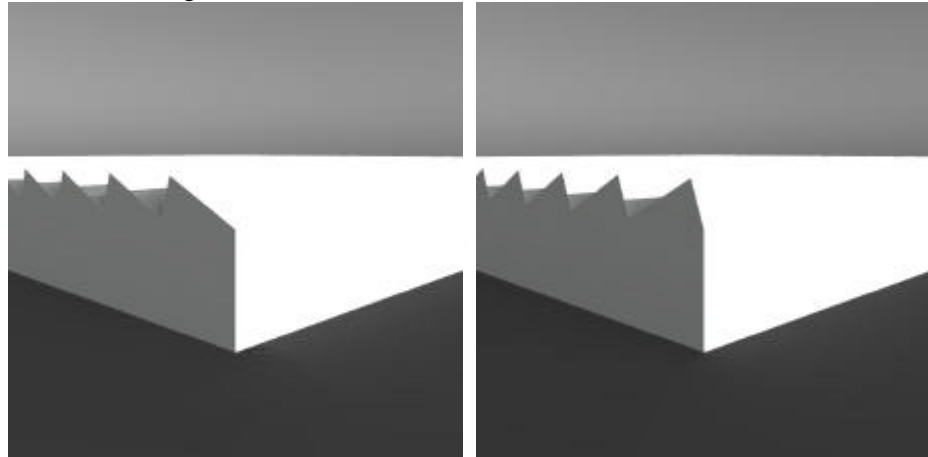
- De winterperiode wordt gekenmerkt door een hoger aandeel diffuus licht. Verder zijn de zonnestanden daar lager dan in de zomerperiode. Dit veroorzaakt dat de transmissie in de zomer hoger is dan in de winterperiode.
- Het valt op dat in februari een Oost-West nokrichting aanzienlijk beter presteert dan een Noord-Zuid richting. Ook het sheddak Noord scoort hier goed. Lichtwinst tot 3% is mogelijk (in februari). Het is aan de tuinder om aan te geven in welke situatie het licht voor hem het belangrijkste is. Op basis van de resultaten kan hij dan bepalen welke kasdekvorm in zijn situatie ideaal is.
- De boogkas levert vergelijkbare resultaten met de Venlo dekken met vergelijkbare dekhelling.
- De berekeningen met diffuus licht zoals uitgevoerd in hoofdstuk 3 geven een overeenkomstig beeld als de gemiddelde resultaten van de jaarrond berekening. In hoofdstuk 3 werd geconcludeerd dat voor diffuus licht geldt dat hoe hoger de dekhelling, des te beter de transmissie. Er werd wel een praktische grens gesteld bij 26 graden aangezien bij hogere dekhellingen de materiaalkosten en de lichtonderschepping van de profielen een overheersende rol gaan spelen. Kijkend naar de jaarrond berekeningen valt op dat de hogere dekhellingen geen voordeel opleveren. In feite onderstrepen deze berekeningen de conclusies van hoofdstuk 3. Dat de hogere dekhellingen geen voordelen opleveren wordt verklaard door de slechtere prestatie m.b.t. direct licht, die niet meer opweegt tegen de winst m.b.t. diffuus licht.
- Als gekeken wordt naar het verloop van de transmissie over het jaar heen dan kan gesteld worden dat de bandbreedte hierin aanzienlijk is. Het Venlo Noord Zuid 26

graden kasdek heeft bijvoorbeeld een maximale transmissie van 90% (juni, 12 uur 's middags). De minimale transmissie is 85,3% (februari, 12 uur 's middags).

- Als de jaarrond transmissie vergeleken wordt met de diffuse transmissie uit hoofdstuk 3 valt op dat deze aanzienlijk hoger is. Zo heeft het Venlo 26 graden kasdek een jaarrond transmissie van 85,3 – 90 %. De diffusie transmissie van dit dek is 83,6%. Dit wordt veroorzaakt door het aandeel directe licht wat efficiënter de kas binnenkomt dan het diffuse licht.
- Het alternatieve omhullingsmateriaal (AR gecoat glas) levert over de gehele linie een voordeel op van ca. 5%. Dit is verklaarbaar door de hoekafhankelijke transmissie van dit materiaal die voor alle hoeken ca. 5% hoger is t.o.v. standaard floatglas.

#### 4.6.1 *Sheddak*

Opvallend is dat het sheddak met het vlakke gedeelte op het Zuiden slechter presteert dan het sheddak met het steile gedeelte op het Zuiden. Aan de hand van onderstaande afbeeldingen is te zien dat het steile gedeelte op het Zuiden minder schaduwwerking heeft. Overigens is voor deze afbeeldingen gekozen voor een opaal materiaal om de schaduwwerking beter zichtbaar te maken.



Figuur 32: Gesimuleerd sheddak in december om 12 uur 's middags. Te zien is dat in het linkerplaatje alleen de meest rechter kap volledig aangestraald wordt. De andere kappen liggen grotendeels in de schaduw. Bovendien zal een groot gedeelte van het licht door meerdere kappen moeten vallen om onderin de kas te geraken. In het rechterplaatje is de situatie gunstiger.

## 4.7 **Validatie**

De resultaten van de jaarrond berekeningen zijn vergeleken met de transmissie eigenschappen van glas en met literatuurgegevens.

### 4.7.1 *Transmissie glas*

Door de simulatie van het vlakke kasdek te vergelijken met de directe en diffuse transmissie eigenschappen van het glas kan bekeken worden of de resultaten binnen de bandbreedte vallen. Het gehanteerde glas heeft een directe transmissie van 90% en een diffuse transmissie van 82%. Als gekeken wordt naar de resultaten in februari valt op dat de transmissie varieert tussen de 82,3% en de 89,4% (respectievelijk februari 12 uur en juni 12 uur). Dit ligt in lijn met de verwachting aangezien februari een groot aandeel diffuus combineert met lage zonnestand en juni een groot aandeel direct licht combineert met een hoge zonnestand.

#### 4.7.2 *Literatuur*

Stoffers [9] heeft in 1968 analytisch soortgelijke simulaties uitgevoerd. Hierbij is echter enkel gekeken naar volledig diffuus licht (dus niet de CIE overcast sky) en volledig direct licht. Hoewel in de uitgevoerde simulaties steeds een combinatie van direct en diffuus is meegenomen is het interessant om een vergelijking te maken. Zo komt Stoffers voor een dekhelling van 30 graden O-W op 29 januari om 12.00u op 88%. De Raytracking methode levert bij 26 graden O-W in februari om 12.00u 87,7% op. Opvallend is dat de Noord-Zuid waarden niet overeenkomen. Hier komt Stoffers op 63% terwijl de Raytracking simulaties op 85%. Dit wordt verklaard doordat gedurende dat tijdstip het directe licht onder een ongunstige hoek invalt. Wanneer al het licht uit die richting wordt verondersteld zal de transmissie rond 12u slecht uitvallen. Door de gehele hemelkoepel te beschouwen wordt het minder extreem. Dit wordt bevestigd door de berekeningen van Stoffers die op de bewuste dag voor de N-Z kas de volgende transmissies vindt om resp 10u, 11u en 12u: 79%, 73%, 63%.

### 4.8 **Conclusies**

- Aan de hand van het lichtaanbod over het jaar heen kan de tuinder voor zichzelf bepalen in welke situatie licht voor hem het belangrijkste is en het kasdek daarop optimaliseren.
- Gemiddeld genomen heeft het Venlo 26 graden Noord Zuid dek de beste transmissie.
- Voor maximale lichttransmissie ongeacht seizoen is een Venlo Noord Zuid kasdek met dekhelling van minimaal 26 graden te adviseren.
- Als indicatie is de diffuse transmissie zoals besproken in hoofdstuk 3 een goede grootheid om kassen te vergelijken.
- De transmissie op een vast tijdstip (bijv. 12 uur) is in de zomer hoger dan in het voorjaar.
- De gemiddelde transmissie over de dag heen is in de zomer eveneens hoger dan in het voorjaar. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het hogere aandeel direct licht in de zomer.
- De onderzocht boogvorm levert geen lichtwinst op
- Alternatieve omhullingsmaterialen kunnen ook worden opgenomen in het 3D model.
- Het onderzochte Anti Reflex gecoate glas levert onder elke invalshoek een lichtwinst van ca. 5%. Daarom geeft dit materiaal eenzelfde karakteristiek als standaard floatglas, alleen met een hogere transmissie.

### 4.9 **Aanbevelingen**

- Door het gewas op te nemen in het model kan ook de lichtverdeling in de kas beter bestudeerd worden. Nu is gerekend met een lege kas met daarin een grid van "lichtmeetcellen". Door het gewas te modelleren en op ieder blad een meetcel op te nemen kan in samenwerking met de plantdeskundigen bekeken worden wat de beste lichtverdeling oplevert.
- De bovenstaande aanpak leent zich met name voor onderzoek naar diffuserende dekmaterialen en toepassing van kunstlicht in de kas.
- Voor nieuwe alternatieve omhullingsmaterialen die een ander hoekafhankelijk gedrag hebben dan glas biedt de gehanteerde methode voordelen om de sterke en zwakke punten van het materiaal in kaart te brengen en de kasdevorm te optimaliseren op het product.

- Andersom kan op basis van de gewenste lichtsituatie in de kas de ideale materiaaleigenschappen worden bepaald voor de kasomhulling. Te denken valt bijvoorbeeld aan een materiaal dat in het voor- en najaar juist optimaal presteert, maar dat gedurende de middagen in de zomer juist minder licht doorlaat.

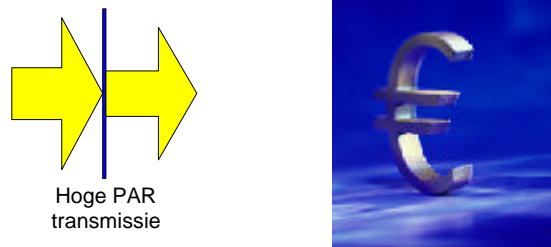
## 5 Alternatieve omhullingsmaterialen

### 5.1 Inleiding

De belangrijkste energiedoelstelling van deze studie is een additionele lichtsom bereiken van ca. 5%, ten opzichte van standaard floatglas. Uit hoofdstuk 3 en 4 blijkt dat de kasdekvorm, oriëntatie en profielkeuze de jaarlijkse lichtsom beïnvloeden. De gewenste doelstelling van 5% kan hiermee echter niet worden bereikt, wel kan een stijging van 1% worden bereikt door een combinatie van hogere dekhelling en lichtgeoptimaliseerde profielkeuze. In dit hoofdstuk worden de mogelijkheden van alternatieve omhullingsmaterialen beschreven, met het oogmerk om de resterende 4% lichtwinst te behalen. Er is gekozen voor de volgende aanpak:

1. Welke eigenschappen zijn van belang voor het omhullingsmateriaal
2. Welke alternatieven zijn er voor standaard floatglas
3. Bepaling van de meest interessante materialen die momenteel beschikbaar zijn
4. Benoemen van knelpunten die een succesvolle toepassing in de weg staan (o.a. terugverdientijd)
5. Bepaling van de meest interessante materiaalontwikkelingen

In het rapport “optimaal gebruik van natuurlijk licht in de glastuinbouw” (Hemming, 2004) is een uitgebreid overzicht opgenomen van relevante optische eigenschappen en ontwikkelingen op materiaalkundig gebied. Dit onderzoek is met name gericht op het vergelijken van bestaande materialen en het in kaart brengen van de potentie van nieuwe materialen.



Figuur 33: Inzetten van alternatieve omhullingsmaterialen teneinde de lichttransmissie te verbeteren, met een realistische terugverdientijd.

### 5.2 Relevante materiaal eigenschappen

In eerste instantie is de transparantie van het omhullingsmateriaal een belangrijke parameter om de energiedoelstelling te bereiken. Er zijn echter meerdere parameters die voor de tuinder van belang zijn. Hieronder is een lijst met eigenschappen weergegeven. De lijst is een verdere uitwerking van de lijst zoals opgenomen in “Optimaal gebruik van natuurlijk licht in de glastuinbouw” (Hemming, 2004)

1. PAR transmissie direct
2. PAR transmissie diffuus
3. U-waarde (isolatie)
4. Vervuiling en duurzaamheid
5. Technology Readiness Level (TRL)
6. Uiteindelijke kostprijs

Hieronder worden de materiaaleigenschappen kort toegelicht.

#### 5.2.1 *PAR transmissie direct*

De directe transmissie geeft aan welk deel van het loodrecht invallend licht doordringt in de kas. De directe transmissie is vrij eenvoudig te bepalen en van de meest gangbare materialen bekend. Het is belangrijk dat de tuinder niet alleen afgaat op de directe transmissie. De diffuse transmissie is zeker zo waardevol.

#### 5.2.2 *PAR transmissie diffuus*

De diffuse transmissie wordt bepaald door de transmissie van diverse lichtbundels onder verschillende invalshoeken te middelen. In hoofdstuk 2 zijn de diverse meetmethoden voor de diffuse transmissie behandeld. Aangezien er maar een klein gedeelte van het licht loodrecht de kas binnenvalt geeft de diffuse transmissie doorgaans een beter beeld van de prestatie van het omhullingsmateriaal.

#### 5.2.3 *U-waarde (isolatie)*

Behalve de lichttransmissie is de isolatiewaarde van het omhullingsmateriaal van groot belang. Doorgaans betekent een betere isolatiewaarde automatisch een slechtere lichttransmissie, de zigzagplaten van General Electric zijn hier een uitzondering op.

#### 5.2.4 *Vervuiling en duurzaamheid*

Bekend is dat door vervuiling de eigenschappen van omhullingsmaterialen sterk kunnen teruglopen. Standaard floatglas kan regelmatig gereinigd worden teneinde de terugloop van de eigenschappen te minimaliseren. Bij alternatieve omhullingsmaterialen is het belangrijk na te gaan hoe gevoelig ze zijn voor vervuiling, wat de levensduur (garantie) is van het materiaal en welke mogelijkheden er zijn om ze eventueel te reinigen.

#### 5.2.5 *Technology Readiness Level (TRL)*

Een belangrijke eigenschap is de mate waarin een product is uitontwikkeld. Er zijn de volgende stadia denkbaar waarin een omhullingsmateriaal zich kan bevinden:

1. Idee of principe
2. Laboratoriumschaal
3. Pilotschaal
4. Industriële schaal
5. Uitontwikkeld product

Eenzijds heeft een uitontwikkeld product minder risico's aangezien er al ervaring mee opgebouwd is. Anderzijds biedt een innovatief product dat bijvoorbeeld in de pilotschaal zit de mogelijkheid om een voorsprong te bereiken t.o. v. de concurrentie.

#### 5.2.6 *Uiteindelijke kostprijs*

De kostprijs van het omhullingsmateriaal bepaalt uiteindelijk of het materiaal rendabel is toe te passen. Doorgaans wordt het principe van de terugverdientijd gehanteerd, waarbij de extra investering wordt afgezet tegen de verwachte kostenbesparing of meeropbrengst.

### 5.3 **Eisen aan de materiaaleigenschappen**

De eisen die t.b.v. een succesvolle toepassing van de hoogtransparante materialen worden gesteld aan de omhullingsmaterialen zijn hieronder weergegeven. De minimale is dat het materiaal beter presteert dan standaard floatglas, met een terugverdientijd onder de vier jaar. Gewenst is hogere transparantie, waarbij geen concessie wordt

gedaan aan de terugverdientijd. De keuze voor de terugverdientijd is subjectief, deze zal anders liggen voor iedere tuinder en mede afhangen van de omvang van de investering en de risicoperceptie van de tuinder. De overheid kan door stimuleringsregelingen bijdragen aan het (tijdelijk) verkorten van de terugverdientijd. Door aan te sturen op een terugverdientijd van 4 jaar wordt verwacht dat voldoende tuinders “over de streep” getrokken worden. Het risico dat de tuinder “ziet” kan verminderd worden door pilot projecten, zodat de tuinder het materiaal in een praktijktoepassing kan beoordelen.

Tabel 10 Gewenst en minimale eisen die gesteld worden aan de diverse materiaaleigenschappen van hoogtransparante omhullingsmaterialen.

<b>Materiaaleigenschap:</b>	<b>Minimale eis</b>	<b>gewenst</b>
PAR transmissie direct	>90%	>94%
PAR transmissie diffuus	>82%	>86%
U-waarde (isolatie)	<7,5 m <sup>2</sup> /KW	<7,5 m <sup>2</sup> /KW
Minimale levensduur	15 jr	>15 jr
Technology Readiness Level (TRL)	pilotschaal	Industriële schaal
Uiteindelijke kostprijs	Terugverdientijd < 4jr	Terugverdientijd <4 jr

#### 5.4 Alternatieve omhullingsmaterialen

De volgende alternatieve omhullingsmaterialen zijn inmiddels beschikbaar voor toepassing in de glastuinbouw. Glas wordt doorgaans als vlakke plaat geleverd, met hoogstens een minimaal walsprofiel (textuur). De harde kunststof platen zijn verkrijgbaar in vlakke enkellaags platen, enkellaags golfplaten en meerlaagse platen. Meerlaagse platen zijn bijvoorbeeld twee of meerlaags kanaalplaten of zigzag platen. Folies kunnen eveneens als enkellaags of meerlaags worden toegepast.

Glas:

1. Gehard glas
2. Gewalst glas(\*)
3. Wit glas (ijzerarm, diamantglas)
4. Hortiplus glas, met een lagere emissiecoëfficiënt
5. Anti reflex (AR) gecoat glas
6. Geëtst glas met een anti reflex werking (Sunarc)

Harde kunststof platen

7. Enkel- of dubbellaags PMMA
8. Enkel- of dubbel laags PC
9. Enkel- of dubbel laags PC-Zigzag

Folies

10. PE folie
11. PE-IR folie
12. EVA folie
13. PVC folie
14. PVDF folie
15. ETFE folie
16. PET folie
17. TPU folie

(\*) Gewalst glas is de laatste jaren sterk in opkomst vanwege de diffuserende werking. Hierdoor wordt een egalere lichtverdeling bereikt in de kas. De optische eigenschappen hangen sterk af van het gebruikte “motief”. Het voordeel van diffuserend glas zit dus



meer in de diepere indringing van het licht in de kas. Dit is in dit onderzoek niet meegenomen, aangezien het gewas niet is opgenomen in het kasmiddel. Het A&F onderzoek "Diffuus licht" gaat dieper in op de werking en voordelen van diffuus licht.

Hieronder zijn de materiaaleigenschappen weergegeven van de bovenstaande materialen. Voor een beschrijving van de materialen wordt wederom verwezen naar "Optimaal gebruik van natuurlijk licht in de glastuinbouw" (Hemming, 2004)

Tabel 11 Overzicht van beschikbare alternatieve omhullingsmaterialen vergeleken met standaard floatglas  
De tabel is afkomstig uit "Optimaal gebruik van natuurlijk licht in de glastuinbouw" (Hemming, 2004).

<b>Materiaal</b>	<b>PAR transmissie direct</b>	<b>PAR transmissie diffuus</b>	<b>Levensduur</b>	<b>Prijs</b>
	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>	<b>[jaar]</b>	<b>[Euro / m<sup>2</sup>]</b>
Floatglas(*)	89	82	25	5
Gehard glas	89-91	82	25	10
Gewalst glas(*)	89	71	25	10
"wit" glas	90-92	84	25	10
Hortiplus glas	84	69	25	10
AR multilaags gecoat glas	95-98	86-88	?	?
AR enkellaags gecoat glas	95-98	86-88		>20
Geëtst glas	94-96	?	?	?
PMMA dubbel	89	76	15	20-25
PC dubbel(*)	73	60	15	13-18
Zigzag dubbel(*)	88	74	15	?
Zigzag enkel	94	88	15	?
PE	89-91	81	1-5	0,50-0,80
PE-IR	89-91	81	4-5	0,60-0,80
EVA	90-91	82	4-5	0,70-0,90
PVC	87-91	10-15	0,70	
PVDF	93-94	85	12	10
ETFE	93-94	88	15-20	10-12
PET	89	40-60	1	
TPU	91	5	6	

(\*) meting TNO

## 5.5 Shortlist alternatieve materialen

De volgende materialen kunnen voldoen aan de gewenste eisen:

- 1 Multilaags AR gecoat glas
- 2 Enkellaags AR gecoat glas
- 3 Geëtst glas
- 4 ETFE folie
- 5 Zigzag enkel

Hieronder wordt per materiaal de knelpunten weergegeven die brede toepassing in de weg staat.

#### 5.5.1 *AR multilaags gecoat glas*

Dit glas is aan beide zijden gecoat met meerdere lagen van verschillende materialen met afwisselend lage en hoge brekingsindex en kan verwerkt worden als standaard glas. Het is dus niet nodig om de kasconstructie aan te passen op het materiaal. Er is verder uitgebreide ervaring met de productie van AR gecoat glas, in andere toepassingen als winkelruiten en brillenglazen. In bijlage G is een voorbeeld opgenomen van de hoekafhankelijke transmissie van AR gecoat glas. Opvallend is dat het materiaal over alle invalshoeken een betere transmissie oplevert. Dit resulteert in een integrale verbetering t.o.v. floatglas in de jaarrondberekeningen (zie hoofdstuk 4). Er worden de volgende knelpunten onderscheiden:

- 1 De prijs per vierkante meter is momenteel vrij hoog. Met de huidige technieken worden terugverdientijden gehaald van ca 5 jaar. Dit betekent dat de tuinder in eerste instantie een groot financieel risico loopt, gezien de hoge verwachte meeropbrengst. Er zijn wel diverse initiatieven gaande om de kostprijs verder naar beneden te brengen. Een pilot project in de glastuinbouw kan ertoe bijdragen dat men overstapt op dit materiaal.
- 2 De duurzaamheid van het glas is voor toepassing in de glastuinbouw nog niet bewezen. Uitgangspunt in de glastuinbouw is dat het glas ca. 6x per jaar gereinigd moet kunnen worden.

#### 5.5.2 *AR enkellaags gecoat glas*

Dit glas is aan beide zijden gecoat met een dunne poreuze SiO<sub>2</sub> laag waarmee een brekingsindex van circa 1.25 kan worden gehaald. Ook dit glas kan verwerkt worden als standaard glas. De duurzaamheid is beduidend minder dan het AR meerlaags gecoat glas.

#### 5.5.3 *Geëts glas*

Geëts glas is voorzien van een microstructuur die een antireflectie werking heeft (het oppervlak is door het etsen zodanig gemodificeerd zodat een poreuze laag ontstaat met een brekingsindex van circa 1.25). De aandachtspunten zijn overeenkomstig met die bij AR enkellaags gecoat glas hoewel de weerbestendigheid beter schijnt te zijn. Het geëtste glas wordt momenteel toegepast in zonnecollectoren. Verder wordt er momenteel een kas gebouwd met dit materiaal. In bijlage G is een hoekafhankelijke transmissie opgenomen van het materiaal. Hierin is te zien dat het geëtste glas over alle invalshoeken een hogere transmissie heeft. De winst is bij het schuin invallend licht het grootst. Een nadeel van dit product is dat ook het infrarode deel van de zonnestraling beter wordt doorgelaten (toename zonnewarmte in de kas).



Figuur 34: Toepassing van Microstructuur glas t.b.v. zonnecollectoren (bron: www.sunarc.net)

#### 5.5.4 *ETFE folie*

ETFE folie wordt al meer dan 15 jaar toegepast in Japan, ook in de glastuinbouw. In die zin is het al het stadium van “pilot project” voorbij, in ieder geval wat betreft duurzaamheid. De volgende knelpunten zijn van belang:

- 1 Hoge vierkante meter prijs. Gezien de bescherming met patenten ziet het er voorlopig nog niet naar uit dat de prijs zal zakken.
- 2 Opspannen van de folie. Om klapperen te voorkomen dient de folie te allen tijde strak opgespannen te staan. Hiervoor zijn door enkele leveranciers (bijv. P.L.J. Bom BV) opspanmechanismen bedacht. Probleem hierbij is dat de folie niet teveel onder spanning mag komen, aangezien de folie dan gaat “kruipen” (oprekken).
- 3 Hagelbestendigheid. De folie kan - afhankelijk van de dikte en voorspanning - gevoelig zijn voor hagelschade. In eerste instantie worden deuken of “kuiltjes” veroorzaakt in de folie. Er is dan sprake van optische schade, de folie blijft wel waterdicht.
- 4 Handelbaarheid van de folie. In Japan wordt de folie toegepast in kleine panelen die met folie omspannen worden (als schilderijen). Deze panelen worden vervolgens op dezelfde wijze als ruiten toegepast in de kas. Vanwege de lichtonderschepping van de panelen is deze variant niet ideaal. Gestreefd dient te worden naar toepassing van de folie in lange ononderbroken banen in gootlengte. De praktische uitvoerbaarheid is hierbij een aandachtspunt.
- 5 Moeilijkheid om luchtramen op te nemen in het kasdek. Hierdoor wordt de opspanning van de folie verder bemoeilijkt. Een mogelijke oplossing is het zogenaamde cabrio kas principe, waarbij het gehele dek vanuit de nok opent.
- 6 Beperkte baanbreedte van de folie (ca. 2 m). Hierdoor zal de folie gelast dienen te worden tot bredere banen.

Naast toepassing van ETFE folie in “Venlo achtige” constructies is het materiaal ook zeer geschikt voor toepassing in dubbelwandige “kussens”. Een voorbeeld hiervan is bijvoorbeeld de overkapping van Burgers Bush of de Gardens of Eden (zie foto op volgende pagina). Onderzoek van Huijbregts en Offermans [12] geeft aan dat met name de onderbouw van het luchtkussensysteem cruciaal is m.b.t. de lichtonderschepping van

de totale kas. Bij het uitgewerkte ontwerp werd de lichtwinst van het materiaal weer teniet gedaan door de extra constructieve elementen. Dit heeft echter ook te maken met de gehanteerde uitgangspunten.



Figuur 35: Toepassing van ETFE kussens in project Gardens of Eden



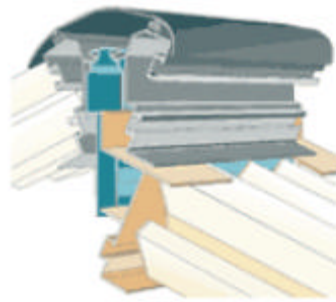
Figuur 36: Ontwerp van Huijbregts en Offermans voor een ETFE luchtkussen kas.

#### 5.5.5 *Zigzag enkel*

General Electric heeft in samenwerking met A&F het polycarbonaat Zigzag materiaal ontwikkeld. Dit materiaal is in eerste instantie als een dubbelwandige plaat op de markt gebracht die op die manier een goede isolatiewaarde koppelt aan een lichttransmissie vergelijkbaar aan standaard floatglas. Nadelen waren in eerste instantie de hoge prijs van het materiaal en de lichtonderschepping van de kasdeconstructie. Door de grote hoogte van het zigzagprofiel zijn ook grote aluminiumprofielen nodig in de nok en bij het luchtraam. De dubbellaags zigzag kas verkeert momenteel in het pilot stadium.

Door een enkellaags zigzag plaat toe te passen verbetert de transmissie van de plaat, terwijl de prijs daalt. Dit gaat dan wel ten koste van de isolatiewaarde, maar die kan in veel gevallen met energieschermen gecompenseerd worden. Aandachtspunten van de enkellaags zigzagplaat zijn:

- 1 De prijs van de platen in relatie tot de terugverdientijd.
- 2 De inpassing van de platen in de kasconstructie, zoals ervaren met de dubbellaags plaat. Door een enkellaags plaat toe te passen kan bekeken worden of de platen aan de uiteinden plat (en eventueel omgezet) uitgevoerd kunnen worden, zodat ze eenvoudig in de constructie kunnen worden ingepast als ruiten. Het voordeel van het roedeloos koppelen van de platen kan eventueel behouden blijven.



Figuur 37: Nokprofiel voor de dubbellaags zigzagkas ontworpen door Alcoa

## 5.6 Beleidsmatige aandachtspunten

De hiervoor genoemde materialen zijn allen in principe beschikbaar, maar worden mede vanwege het hoge financiële risico nog niet toegepast. Door de hoogtransparante omhullingsmaterialen te waarderen in bijvoorbeeld de Groenlabel kas systematiek (GLK) kan een extra motivatie ontstaan (financieel voordeel) om over te stappen op deze materialen.

Sinds 1 januari 2005 is de IDT methode opgenomen in de GLK systematiek. Tuinders kunnen GLK punten verdienen door het kiezen voor een kasconstructie met een goede lichtdoorlatendheid en een gunstige isolatiewaarde. De bandbreedte tussen de lichtdoorlaat van een “standaard” Venlo kasdek en een geoptimaliseerd dek is ca. 2 a 3% (75% t.o.v. 72% lichtdoorlaat). Gebleken is dat mede door de opname van de lichtdoorlaat van het kasdek in de GLK systematiek de kasdekken door de kasdekleveranciers beter zijn geoptimaliseerd op lichtdoorlaat. De IDT methode is met enkele aanpassingen ook geschikt te maken voor alternatieve omhullingsmaterialen.

## TRANSMISSIE VENLO-KAS

Rekenmethode Energie-Indicatoren versie 2004

Invoer	Lichtberekening kasdek volgens de 'IDT methode' (IMAG/DLV/TNO)
Fabrikant	: <b>Leverancier</b>
Kastype	: <b>Venlo</b>
Profiel database	: <b>Profiel Venlo TNO v2.xls</b>
Kapbreedte	: <b>4000 mm</b>
Vakmaat	: <b>4500 mm</b>
Roede afstand	: <b>1125 mm</b>
Roede lengte	: <b>2109 mm</b>
Glaslengte	: <b>2119 mm</b>
Gehard luchtraam	: <b>nee</b>
Luchtraam diepte	: <b>1200 mm</b>
Luchtraam breedte (aantal ruiten)	: <b>2 x</b>
Aantal opdrukstangen	: <b>2 x</b>
Gemiddelde lengte opdrukkers	: <b>1821 mm</b>
Gemiddelde diameter opdrukstangen	: <b>19 mm</b>
Verlaging trek-duw buis	: <b>60 mm</b>
Dakhelling	: <b>23.0°</b>
Maximale openingshoek luchtraam	: <b>46.0°</b>
Omhuilingsmateriaal	: <b>GLK glas Venlo IDT 2004 4mm</b>
<b>Overige gegevens</b>	
Percentage gerecycled aluminium	: 35. % (bron: rapport "Aluminium bouwt duurzaam, 1992)
Lichtmeting vanaf fundatiehoogte	: 1500 mm
transmissie diffuus	: 82.86 % Luchtraam: 82.86 %
Reductie lichtinval (gv gehard raam)	: 0. % nvt
Reflectie verzinkt staal	: 20. % standaard 20%
Reflectie aluminium	: 45. % standaard 45%
Reflectie witcoating	: 70. % standaard 70%
Lichtverdeling	: 50. % standaard 50%
<b>Berekening</b>	
Sommatie lichtonderschepping:	
GLK glas Venlo IDT 2004 4mm	: 16.23 %
Nok xxxx	: 0.43 %
Scharnier xxxx ; incl. nok; enkelzijdig	: 0.58 %
Zijstijl xxxx	: 0.34 %
Tussenstijl xxxx	: 0.19 %
Dorpel xxxx	: 0.75 %
Roe xxxx	: 1.70 %
Roeden; onder zijstijl en tussenstijl	: 0.17 %
Roeden; onder het luchtraam uitsteekt	: 0.44 %
Nokklem	: 0.03 %
Luchtmechaniek; opdrukkers	: 0.24 %
Goot xxxx	: 3.07 %
lichtonderschepping :	24.1 %
Lichtonderschepping dek	: <b>24.1 %</b>
Lichtdoorlatendheid dek	: <b>75.9 %</b>
GLK basiseis	: <b>voldoet</b>
Punten keuzemaatregel	: <b>0</b>

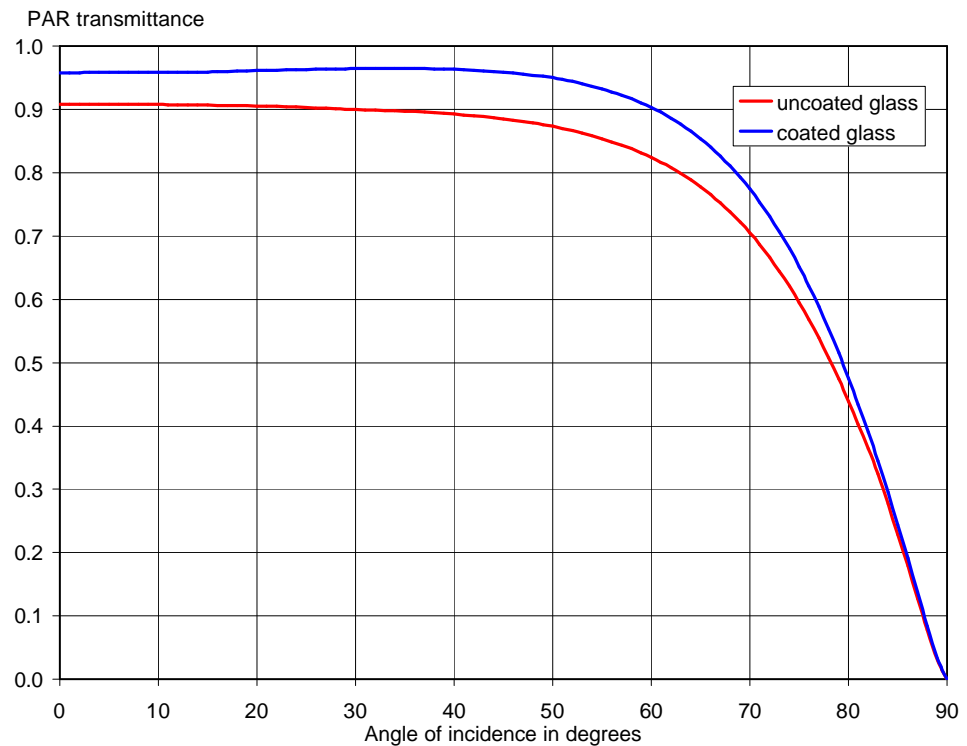
Figuur 38: Voorbeeldberekening van de IDT methode t.b.v. het bepalen van de lichtdoorlatendheid van het kasdek

## 5.7 Verdere materiaalontwikkeling

In het voorgaande is gekeken naar materialen die al beschikbaar zijn voor toepassing in de glastuinbouw. De volgende veelbelovende principes kunnen worden uitgewerkt voor een toepassing in de glastuinbouw, om de gewenste doelstelling te bereiken. De technieken genoemd in het rapport “Optimaal gebruik van natuurlijk licht in de glastuinbouw” (Hemming, 2004) zijn besproken met een materiaalexpert en een daglichtdeskundige binnen TNO, alsmede een leverancier van omhullingsmateriaal en een tuinder. Op basis van de reacties op de longlist van mogelijke technieken komen de volgende technieken naar voren die mogelijk interessant zijn voor de glastuinbouw.

### 5.7.1 Meerlaags gecoat glas

Het huidig in de handel verkrijgbare AR meerlaags gecoate glas is geoptimaliseerd voor loodrecht invallend voor het menselijk oog zichtbaar licht. Deze producten zijn doorgaans gericht op het verkrijgen van een zo laag mogelijke reflectie en de keuze van de materialen en coating processen leidt hierbij veelal tot een toename van absorptieverliezen. Momenteel wordt in samenwerking met TNO een speciaal voor de glastuinbouw geoptimaliseerde meerlaags gecoat glas ontwikkeld (Groglass) dat een gemiddelde lichtwinst van 8% voor diffuus licht oplevert. Onderstaande figuur geeft de hoekafhankelijke PAR transmissie van dit glas in vergelijking met ongecoat glas. Dit project is momenteel in een vergevorderd stadium. De kwaliteits- en duurzaamheidstesten van de eerste monsters van dit product geproduceerd met een pilot machine worden nu opgestart. De bouw van de coating machine voor grootschalige industriële productie van dit glas is reeds in gang gezet en de verwachting is dat de productie eind 2006 op gang komt.



Figuur 39: Hoekafhankelijke transmissie van Multilaags gecoat glas (Groglass) vergeleken met standaard floatglas.

### 5.7.2 *Glas met gecoate folies*

Glas met gecoate folies kunnen mogelijk interessant zijn, er worden dan bijvoorbeeld anti reflex coatings of solar control coating (die de warmtestraling buitenhouden) op een dunne folie aangebracht. Deze folie wordt vervolgens op het glas aangebracht.

Bijkomend voordeel is dat het glas daarmee beschermd wordt bij breuk. De grote glasmaten van de huidige Venlo kassen (1,67 x 2,14 m) lopen namelijk kans om naar binnen te vallen bij breuk. De folie houdt bij breuk de scherven bij elkaar. Dit betekent een voordeel ten opzichte van gehard glas, dat bij breuk in kleine stukjes naar binnen valt en naast een gat in het dek ook vervuiling van het gewas veroorzaakt. Al met al kan verwacht worden dat van folie voorzien glas de veiligheid in de kas verhoogt en daarmee de verzekeringspremie verlaagt.

Tenslotte kan een dergelijke folie ook achteraf aangebracht worden, wat het toepassingsgebied veel groter maakt (bestaande bouw). De vraag is echter of deze bijkomende voordelen samen met de lichtwinst opwegen tegen de kosten. De prestaties kunnen namelijk wat minder zijn dan indien het glas tijdens het productieproces gecoat wordt., hiertegenover staat dat folie eenvoudiger te coaten is dan glas.

Behalve het direct op het glas aanbrengen van folie is nog een andere toepassing denkbaar. Folies kunnen ook gebruikt worden om de U-waarde van het kasdek aanzienlijk te verhogen. Voor een maximaal effect dient de folie te worden opgespannen op een afstand van circa 1 cm vanaf het glas (om convectieve warmteoverdracht te minimaliseren). Zo'n folie kan van AR coatings worden voorzien om lichtverlies te beperken. Een bijkomend voordeel van een dergelijke folie is dat condensatie op de ruit kan worden tegengegaan.

## 5.8 **Conclusies**

- Er zijn diverse alternatieven voor standaard floatglas waarbij lichtwinst kan worden bereikt. De in de uitgangspunten gestelde 5% lijkt zonder meer mogelijk. De volgende materialen kunnen voldoen aan de doelstelling:
  1. Meerlaags en enkellaags AR gecoat glas, aandachtspunt is hierbij de prijs en de duurzaamheid. Er zijn ontwikkelingen op het gebied van voor tuinbouw geoptimaliseerd glas (Groglass).
  2. Geëts glas (bijv. Sunarc), aandachtspunt is de duurzaamheid en de chemische resistentie.
  3. ETFE folie, aandachtspunten zijn het opspannen van de folie in relatie met het "kruip" gedrag van de folie en de hagelbestendigheid. Dit materiaal is vooral geschikt voor kassen zonder luchtramen.
  4. Enkellaags Zigzag materiaal, Aandachtspunten zijn de prijs en de inpassing in het kasdeksysteem.
- De toepassing van hoogtransparante omhullingsmaterialen kan gestimuleerd worden door opname van de glaseigenschappen in de Groenlabel kas (GLK) systematiek. Verwacht wordt dat implementatie van het omhullingsmateriaal in de GLK systematiek een soortgelijk effect teweegbrengt als gebeurd is met de ontwikkeling van kasdekken.



- Op het gebied van materiaalontwikkeling zijn twee ontwikkelingen interessant voor hoogtransparante omhullingsmaterialen, meerlaags gecoat glas en glas voorzien van gecoate folies.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Meetprotocol

Het meetprotocol bestaat uit het volgende stappenplan:

- 1 Meting van de hoekafhankelijke transmissie bij voldoende aantal hoeken van inval (minimaal 0,45,60 en 75 graden), voor anisotropische materialen indien nodig langs beide assen;
- 2 Fitprocedure met spreadsheet voor het bepalen van de coëfficiënten (eventueel de verschillende richtingen vooraf fitten);
- 3 Berekenen van de hoekafhankelijke transmissie met behulp van de fitcoëfficiënten;
- 4 Berekenen van de diffuse doorlating;
- 5 Toepassen van fitcoëfficiënten en diffuse doorlating in Energie III programma.
- 6 Voor de jaarrond analyse wordt de curve uit punt 3 (of beide curven) opgenomen in het Radiance model.

De meetmethode is in principe ingericht om spectraal te meten, zodat per golflengteband een (hoekafhankelijke) transmissie kan worden bepaald. Dit kan voor bepaalde gewassen interessant zijn.

### 6.2 Diffuus licht

#### 6.2.1 *Alleen glas*

- De lichttransmissie neemt toe met de dekhelling, het verschil tussen de gangbare dekhelling van 21 graden en 45 graden is circa 1%, uitgaande van de CIE overcast sky.
- De lichttransmissie van het zadeldak over het algemeen iets hoger dan die van het boogdak;

#### 6.2.2 *Met kasdekprofielen*

- Te zien valt dat de dakconstructie bij alle dekhellingen 5 a 6% licht onderschept;
- De lichtwinst bij een compleet kasdek incl profielen door de dekhelling te vergroten is slechts enkele tienden procent. Door de optimalisatie van de kasdekken door de leveranciers is het afgelopen jaar gemiddeld 1% lichtwinst bereikt.
- De beoogde lichtwinst uit de doelstelling van 5% zal bereikt kunnen worden door naast een geoptimaliseerde constructie te kiezen voor alternatieve omhullingsmaterialen (zie hoofdstuk 5).
- Met constructie blijkt de lichttransmissie van het boogdak over de gehele linie hoger te zijn dan die van het zadeldak;
- De hoogste diffuse lichttransmissie inclusief het lichtonderscheppend effect van de kapconstructie, wordt zowel bij het zadeldak als bij het boogdak bereikt bij een dekhelling van ongeveer 30 graden, waarbij het zadeldak nog een iets hogere lichtopbrengst heeft dan het boogdak.
- Kasdekken worden m.b.v. de IDT methode vergeleken op basis van de diffuse lichttransmissie. Om onder die omstandigheden te komen tot een kasdek met optimale lichtonderschepping kan gekozen worden voor een grotere dekhelling. In paragraaf 3.8 wordt er dieper ingegaan op de andere aspecten die meespelen bij de keuze voor een kasdevorm en helling.

### 6.2.3 *Algemeen*

- Uitgaande van diffuus licht geldt dat naarmate de dekhelling toeneemt er meer licht in de kas valt. Het verschil tussen 0 en 45 graden is echter minder groot dan in 1968 door Stoffers bepaald, onder andere vanwege de keuze voor de CIE overcast sky, waarbij er een verdeling over het diffuse licht zit (bovenin de hemel meer dan aan de horizon).
- Bij lagere dekhellingen (onder de 20 graden) ontstaat er een verschil tussen de verticale lichtdoorlating en de lichtdoorlating in alle richtingen. Dit heeft mogelijk gevolgen voor de tuinder indien duidelijk is waar men het licht wil hebben op het gewas.
- Vanaf 5 graden dekhelling treedt er voldoende afspoelend effect op om het glas te reinigen. Om afvallend condens te voorkomen is minimaal ca. 20 graden benodigd.
- Een eerste kwalitatieve integrale beoordeling van de diverse kasdekvarianten zonder weegfactoren geeft aan dat het Venlo dek met een ietwat grotere dekhelling dan tegenwoordig gangbaar is optimaal is (26 graden). Indien de tuinder een weging aanbrengt voor de diverse criteria kan dit optimum verschuiven.
- Het Boogdek lijkt over de gehele linie minder optimaal dan het Venlo dek. Voor alternatieve omhullingsmaterialen kan het optimum anders liggen.

## 6.3 **Jaarrondberekeningen**

- Aan de hand van het lichtaanbod over het jaar heen kan de tuinder voor zichzelf bepalen in welke situatie licht voor hem het belangrijkste is en het kasdek daarop optimaliseren.
- Gemiddeld genomen heeft het Venlo 26 graden Noord Zuid dek de beste transmissie.
- Voor maximale lichttransmissie ongeacht seizoen is een Venlo Noord Zuid kasdek met dekhelling van minimaal 26 graden te adviseren.
- Als indicatie is de diffuse transmissie zoals besproken in hoofdstuk 3 een goede grootheid om kassen te vergelijken.
- De transmissie op een vast tijdstip (bijv. 12 uur) is in de zomer hoger dan in het voorjaar.
- De gemiddelde transmissie over de dag heen is in de zomer eveneens hoger dan in het voorjaar. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het hogere aandeel direct licht in de zomer.
- De onderzocht boogvorm levert geen lichtwinst op
- Alternatieve omhullingsmaterialen kunnen ook worden opgenomen in het 3D model.
- Het onderzochte Anti Reflex gecoat glas levert onder elke invalshoek een lichtwinst van ca. 5%. Daarom geeft dit materiaal eenzelfde karakteristiek als standaard floatglas, alleen met een hogere transmissie.

### 6.3.1 *Aanbevelingen*

- Door het gewas op te nemen in het model kan ook de lichtverdeling in de kas beter bestudeerd worden. Nu is gerekend met een lege kas met daarin een grid van "lichtmeetcellen". Door het gewas te modelleren en op ieder blad een meetcel op te nemen kan in samenwerking met de plantdeskundigen bekeken worden wat de beste lichtverdeling oplevert.
- De bovenstaande aanpak leent zich met name voor onderzoek naar diffuserende dekmaterialen en toepassing van kunstlicht in de kas.
- Voor nieuwe alternatieve omhullingsmaterialen die een ander hoekafhankelijk gedrag hebben dan glas biedt de gehanteerde methode voordelen om de sterke en

zwakke punten van het materiaal in kaart te brengen en de kasdekform te optimaliseren op het product.

- Andersom kan op basis van de gewenste lichtsituatie in de kas de ideale materiaaleigenschappen worden bepaald voor de kasomhulling. Te denken valt bijvoorbeeld aan een materiaal dat in het voor- en najaar juist optimaal presteert, maar dat gedurende de middagen in de zomer juist minder licht doorlaat.

#### **6.4 Alternatieve omhullingsmaterialen**

- Er zijn diverse alternatieven voor standaard floatglas waarbij lichtwinst kan worden bereikt. De in de uitgangspunten gestelde 5% lijkt zonder meer mogelijk. De volgende materialen kunnen voldoen aan de doelstelling:
  5. Meerlaags en enkellaags AR gecoat glas, aandachtspunt is hierbij de prijs en de duurzaamheid. Er zijn ontwikkelingen op het gebied van voor tuinbouw geoptimaliseerd glas (Groglass).
  6. Geëts glas (bijv. Sunarc), aandachtspunt is de duurzaamheid en de chemische resistentie.
  7. ETFE folie, aandachtspunten zijn het opspannen van de folie in relatie met het “kruip” gedrag van de folie en de hagelbestendigheid. Dit materiaal is vooral geschikt voor kassen zonder luchtramen.
  8. Enkellaags Zigzag materiaal, Aandachtspunten zijn de prijs en de inpassing in het kasdeksysteem.
- De toepassing van hoogtransparante omhullingsmaterialen kan gestimuleerd worden door opname van de glaseigenschappen in de Groenlabel kas (GLK) systematiek. Verwacht wordt dat implementatie van het omhullingsmateriaal in de GLK systematiek een soortgelijk effect teweegbrengt als gebeurd is met de ontwikkeling van kasdekken.
- Op het gebied van materiaalontwikkeling zijn twee ontwikkelingen interessant voor hoogtransparante omhullingsmaterialen, meerlaags gecoat glas en glas voorzien van gecoate folies.

## Literatuur

- [1] CIE 85 publicatie , 1989, solar spectral irradiance , ISBN 3 900 734 22 4
- [2] ISO 9845-1 Solar energy- reference solar spectral irradiance at the ground at different receiving conditions- part 1: Direct normal and hemispherical solar irradiance for air mass 1.5
- [3] ISO/CIE 10527: CIE standard colorimetric observer
- [4] microclimate book Elsevier
- [5] Solar Energy nr 40
- [6] ASTM D 1494-97 (2001) *Standard Test Method for Diffuse Light Transmission Factor of Reinforce Plastics Panels*. <http://www.astm.com>
- [7] Janssen, E.G.O.N., Bentum, C.A. van, Hart, H. 't, Oldengarm, J., *Energie III Eindrapportage*. Delft: TNO Bouw, 2004
- [8] Zonneveldt, L., Aarts, M.P.J., Janssen, E.G.O.N., Sools, F., *Eindrapport Nieuw Licht op Groei*. Delft: TNO Bouw, 2004.
- [9] Stoffers, J.A., *Licht en dekhelling van warenhuizen*, Wageningen, 1968
- [10] PREN 14500 (voorlopige europese norm)
- [11] Oversloot, H.P., *Invloed vervuiling op de energieopbrengst van PV panelen*, Delft 2003
- [12] Huijbregts C.J.A.M. en Offermans P.A.M., *The Hottest Hothouse*, Eindhoven, februari 2005

## A Onderzoeksvoorstel Optimaal kasdek

### ONDERZOEKSVOORSTEL

#### *Optimaal kasdek*

Subsidieaanvragen in het kader  
van het energieprogramma

Ministerie van LNV - Productschap  
Tuinbouw

### A.1 Algemene projectgegevens

Titel:	Optimaal kasdek
Thema energieprogramma:	Kassystemen
Aanvangsdatum project:	juli 2004
Looptijd project:	7 maanden

### A.2 Gegevens subsidieaanvrager

#### A.2.1 *Gegevens organisatie*

Naam:	TNO Bouw
Bezoekadres:	van Mourik Broekmanweg 6, Delft
Postadres:	Postbus 49, 2600 AA Delft
Rechtsvorm:	bij wet opgericht
Gegevens KvK:	nvt
SBI-code:	nvt
Bankrekeningnr:	p 693061

#### A.2.2 *Gegevens contactpersoon*

naam:	Ir. E.G.O.N. Janssen
functie:	Projectleider
telefoon/fax/email:	015 2763473, 015 2763016, e.janssen@bouw.tno.nl

### A.3 Financiële gegevens

#### A.3.1 *Overzicht*

Totale projectkosten:	€68.000
Bijdrage Productschap Tuinbouw/LNV:	€58.000
Eigen bijdrage:	
Bijdrage derden:	€10.000 (Boal systemen BV, Glasmij BV)

BTW situatie: kan de aanvrager de BTW die derden aan hem in rekening brengen voor dit project verrekenen met de belastingdienst?

- ◆ Ja
- Nee
- deels (15% kan niet verrekend worden)

#### A.3.2 *Begroting*

Bedragen in

- ◆ Euro
- Gulden

## A.4 **Projectbeschrijving**

### A.4.1 *Probleemstelling*

Sedert jaren wordt er onderzoek gedaan naar het meest lichtdoorlatende omhullingsmateriaal en de beste kasoriëntatie en kasdekform. Dikwijls wordt er bij deze onderzoeken gekeken naar één aspect, bijvoorbeeld bepaalde zonnestand (enkel direct licht) of enkel loodrechte transmissie bij een nieuw omhullingsmateriaal. Recente ontwikkelingen in beglazingsmaterialen boren nieuwe mogelijkheden aan voor de constructie en uitvoering van kasdekken. We doelen hier op:

5. glas met oppervlaktestructuur,
6. oppervlaktebehandelingen
7. (dubbelwandige) kunststof platen van speciale constructie.
8. Nieuwe (dubbellaags) kunststof folies

In Energie III is een nieuwe meetmethode ontwikkeld om op eenduidige wijze de transmissie van omhullingsmaterialen te bepalen. Deze methode is echter nog niet geschikt voor de bovengenoemde omhullingsmaterialen.

Naast de gepropageerde hogere lichtdoorlating bieden ze door hun dubbelwandige constructie soms ook betere U-waarden. Vaak echter gaan deze nieuwe beglazingsmaterialen gepaard met hogere kosten terwijl niet van meet af aan duidelijk is of dit ook leidt tot hogere lichtopbrengst en/of dat de verbetering in de U-waarde wordt gecompenseerd door lagere stookkosten.

In het kader van energie III zijn oriënterende hoekafhankelijke berekeningen gedaan aan verschillende kasdekmaterialen en hun lichtdoorlating op basis van meetgegevens van zowel materiaal als uurlijkse klimaatdata. Dit gaf reeds een inzicht in het gedrag van verschillende materialen over het jaar en laat toe de invloed van de oriëntatie en de dekhelling van de kas te bestuderen. Niet onderzocht in Energie III is de invloed van de kasoriëntatie en de invloed van de kasdekform. Parallel aan Energie III is door TNO het onderzoek Nieuw licht op Groei uitgevoerd. Hierbij is een krachtige rekentool ontwikkeld om verschillende kasdekvormen te vergelijken. Op basis van beide onderzoeken wordt het mogelijk om een kasdek te ontwikkelen dat geoptimaliseerd is op het opvangen van licht uit de hemelkoepel.

#### A.4.2 *Doelstelling*

##### Technische doelstellingen

3. Er zal er een meetmethode beschikbaar komen voor niet vlakke en/of homogene omhullingsmaterialen, zoals gewalst glas, kanaalplaten ed. (Spin off Energie III) Deze opstelling zal ook na het project op verzoek van leveranciers gebruikt kunnen worden.
4. Met behulp van de meetgegevens uit de nieuwe meetmethode wordt op basis van de in Energie III en Nieuw licht op groei ontwikkelde gereedschappen van de meest optimale kasdekform en -oriëntatie de totale jaarlijkse lichtsom bepaald. Hierbij wordt rekening gehouden met de lichtverdeling direct/difffuus over een standaard jaar.

##### Energiedoelstellingen

Huidige omhullingsmaterialen hebben een diffuse transmissie van circa 83 procent. Op basis van de resultaten van Nieuw licht op Groei wordt verwacht dat over het hele jaar bekeken een additionele lichtsom van 5% mogelijk moet zijn. Dit dient te worden bereikt door een andere kasvorm enerzijds en alternatieve omhullingsmaterialen anderzijds.

##### Nevendoelstellingen

Het project moet voor de tuinder inzichtelijk maken wat de effecten zijn op de lichttransmissie door het jaar heen van diverse kasdekvormen. Verder moet voor de tuinder inzichtelijk worden gemaakt in welke gevallen en onder welke omstandigheden toepassing van de nieuwe materialen zinvol is.

#### A.4.3 *Inpassing*

In het lopende project Energie III is een herziene meetmethode ontwikkeld voor het bepalen van de diffuse transmissie van omhullingsmaterialen. Deze methode heeft als beperking dat meerlaagse diffuserende omhullingsmaterialen moeilijk te vergelijken zijn met de standaard omhullingsmaterialen. Dit onderwerp wordt in de voorliggende studie onderzocht.

Het voorgestelde project volgt direct uit onderzoeksvragen uit de lopende projecten Energie III en Nieuw licht op groei. In Energie III is een methode ontwikkeld om de invloed van de kasgeometrie op de lichtinval in de kas te bepalen. Deze kennis zal in dit onderzoek gebruikt worden om de optimale kasdekform te vinden. Hierbij zal tevens aangesloten worden bij de rekenmethodieken zoals ontwikkeld in Nieuw licht op groei. Gezien de grotere rekentijden van dit model, zal de voorselectie gebeuren met de Energie III rekentool en de meest veelbelovende varianten zullen worden berekend met het in Nieuw licht op Groei bepaalde model.

Bij de kennisoverdracht wordt samengewerkt met het project Energie efficiënt ventileren, het betreft hier het volgen van minimaal twee tuinders met nieuwbouwplannen. Hiervoor wordt ook gebruik gemaakt van de kennis en rekentools van Energie III.



#### A.4.4 *Randvoorwaarden*

- Beschikbaarheid van de resultaten van Energie III en Nieuw licht op groei
- Beschikbaarheid van diverse omhullingsmaterialen, en hun prijzen
- Er wordt uitgegaan van de resultaten van het door A&F uitgevoerde onderzoek “Optimaal gebruik van natuurlijk licht in de glastuinbouw”. Op basis van dit rapport wordt het spectrum vastgesteld voor enkele veel voorkomende groente en sierteeltgewassen. Navraag bij A&F leert dat dit rapport nog vertrouwelijk is. Er wordt vanuit gegaan dat de opdrachtgever het rapport verstrekt.
- Er wordt uitgegaan van een diffuse hemelkoepel

#### A.4.5 *Risico's*

- Meewerken van toeleveranciers van omhullingsmaterialen. In het project Energie III is gebleken dat toeleveranciers terughoudend kunnen zijn met het meewerken aan het onderzoek, aangezien de resultaten openbaar gemaakt worden. Door van tevoren duidelijke afspraken te maken en een brede groep leveranciers te benaderen kan dit risico worden beperkt.
- In het project wordt aansluiting gezocht tussen twee verschillende rekenmethodieken voor de bepaling van de lichtonderschepping van de kas. Enerzijds is er de in Energie III ontwikkelde IDT methode en anderzijds het nieuwe Radiance model uit Nieuw licht op groei. Dit laatste model werkt nauwkeuriger dan de IDT methode, maar is bewerkelijker en kost veel rekentijd. Tevens is het Radiance model nog in ontwikkeling (zie voorstel 3D gewasmodel). In het kader van het voorgestelde project wordt het Radiance model niet verder ontwikkeld, er zal gerekend worden met het State of the art model.

#### A.4.6 *Werkzaamheden, werkwijze(n)*

##### WP 10 Meetprotocol

Het opstellen van een meetprotocol voor niet vlakke en/of homogene omhullingsmaterialen, dat vergelijkbaar is met de huidige methoden, zoals bepaald in Energie III en een goede aansluiting heeft bij de praktijk. Het bemeten van verschillende kasdekmaterialen op hun 3 dimensionale lichtdoorlating en reflectie (BRTF, bidirectional transmittance and reflectance function) voor PAR lichtdoorlating bij verschillende hoeken van invallende straling. Omhullingsmaterialen kennen een hoekafhankelijke transmissie, bij anisotrope materialen moet het gedrag van de plaat in meerdere richtingen gemeten worden teneinde de eigenschappen te kunnen vastleggen (3 dimensionaal). Dit vastleggen gebeurt in een BRTF, waarbij bi-directionaal voor de richting van het licht staat (naar binnen of naar buiten).

##### WP 20 Optimalisatie

Het uitvoeren van een vergelijkende studie naar meest geschikte kasconstructies wat betreft dekhelling en oriëntatie van deze helling voor verschillende kasdekmaterialen. (bijv. ook sheddak constructies) voor werkelijk optredende condities met gebruik van hoekafhankelijke transmissie en reflectie eigenschappen van de materialen. Tevens worden andere eigenschappen meegenomen zoals vervuiling, condensafvoer, maakbaarheid, ARBO, teeltaspecten, kosten, etc. Bekeken zullen in ieder geval worden:

- a. Standaard dek met diverse hellingen en oriëntaties
- b. Sheddak constructie
- c. Boogkasconstructie

#### WP 30 Radiance

Het inzichtelijk maken van de optredende luminanties op gewasniveau met behulp van visualisatie programma's zoals Radiance voor de standaard lichtsituatie (hemelkoepel), zoals bepaald in Nieuw licht op groei. Het model zoals ontwikkeld in Nieuw licht op groei zal worden aangepast op basis van de meest optimale kasdekgeometrieën zoals bepaald in WP 20 (minimaal twee geometrieën).

#### WP 40 Economie

Het beoordelen van de economie van de betrokken materialen en kasconstructies op basis van berekende lichtopbrengst en energiebesparing over het jaar en materiaalverbruik en kostprijs. Bekeken worden in ieder geval een glasdek, een Polycarbonaat dek, PMMA dek, Zigzag dek en een gewalst glasdek. Al deze materialen worden toegepast in de –voor het betrokken materiaal- meest optimale kasdekvorm zoals bepaald in WP 20. Bij de evaluatie worden ook onderhoudskosten en andere operationele kosten meegenomen.

#### WP 50 Rapportage

Rapportage van de bevindingen. In het project is voorzien in de volgende rapportagevormen:

- Kwartaalverslagen met de voortgang van het project
- Mid term Review (MTR) met de opdrachtgever, hierbij worden de werkzaamheden t/m WP 20 gepresenteerd en globaal gerapporteerd. De MTR dient tevens als GO/NO GO moment. De criteria voor een GO zijn het aanwezig zijn van een goed hanteerbare meetmethode voor de betrokken kasdekmaterialen en zicht op een additionele lichtsom van 5%.
- Conceptrapportage
- Definitieve rapportage

#### WP 60 Kennisoverdracht

- Persartikel
- SWOT analyse
- Begeleiden van minimaal twee tuinders met nieuwbouwplannen. Boal Systemen levert de tuinders aan en begeleidt deze. Indien het project Energie efficiënt ventileren ook doorgaat zullen de daarin ontwikkelde inzichten gecombineerd worden, om versnippering te voorkomen.

A.4.7 *Tijdsplanning*

## Planning Optimaal kasdek

Onderdeel	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Jan
WP 10 meetprotocol							
WP 20 Variantenstudie							
Mid term Review			X				
WP 30 Radiance modelstudie							
WP 40 Economie							
WP 50 Conceptrapportage							
Eindpresentatie							X
WP 60 kennisoverdracht							
WP 51 Definitieve rapportage							

A.4.8 *Subcontractanten*

Boal Systemen BV  
Dhr. G.J.M. van Holsteijn  
Postbus 150  
2690 AC 's Gravenzande

Boal Systemen is een belangrijke toeleverancier van kasdeksystemen en neemt deel aan het onderzoek om enerzijds actief te kunnen meedenken over de nieuwe kasdekvormen en anderzijds een voorsprong te creëren ten opzichte van concurrerende toeleveranciers.

Glasmij Venlo BV  
Dhr. T. Janssen  
Postbus 3078  
5930 AB Tegelen

Glasmij Venlo BV introduceert momenteel Gerrisol glas op de Nederlandse markt. Dit is een gewalst glas, dat een hoog aandeel diffuus licht bevat.

A.4.9 *Overleg en samenwerkingsstructuur*

De coördinatie van het project is in handen van TNO Bouw. Binnen TNO zijn diverse groepen actief die zich bezig houden met verschillende aspecten (constructie, thermisch, verlichting) van het gebruik van kassen. De coördinator van dit project onderhoudt dan ook regelmatige contacten met de projectleiders van de andere gerelateerde projecten.

## Overleg met de opdrachtgever

Fase 1 en 2 zijn relatief kortlopende activiteiten. Na afronding van deze onderdelen is er een overleg met de opdrachtgever waarbij de resultaten doorgenomen zullen worden en de definitieve planning van de derde fase wordt opgesteld.

#### A.4.10 Resultaten en Rapportage

Het onderzoek resulteert in de volgende zaken:

1. Meetprotocol voor niet vlakke en of homogene omhullingsmaterialen, geschikt voor kanaalplaten, (meerlaagse) folies en glas met oppervlaktebehandelingen.
2. Rapportage met conclusies en aanbevelingen voor kasdekform en kasoriëntatie
3. Meetgegevens van de nieuwe omhullingsmaterialen, waaruit ontwerpaanbevelingen gedestilleerd worden t.b.v. de leveranciers van omhullingsmaterialen
4. Persartikel in de van belang zijnde vakbladen gericht op de tuinder.

#### A.4.11 Kennisoverdracht

- Middels een persartikel zullen de resultaten kenbaar worden gemaakt aan de tuinders. Hiertoe behoort tevens een samenvatting voor de doelgroep (tuinders en kassenbouwers)
- Samen met Boal zullen tenminste twee tuinders met nieuwbouwplannen gezocht worden die een advies krijgen op basis van de in dit project opgedane kennis (en de beschikbare kennis uit Energie III). Er zal overlegd worden met de vakbladen of dit interessant is voor een artikelenserie.
- SWOT analyse tbv een succesvolle introductie.

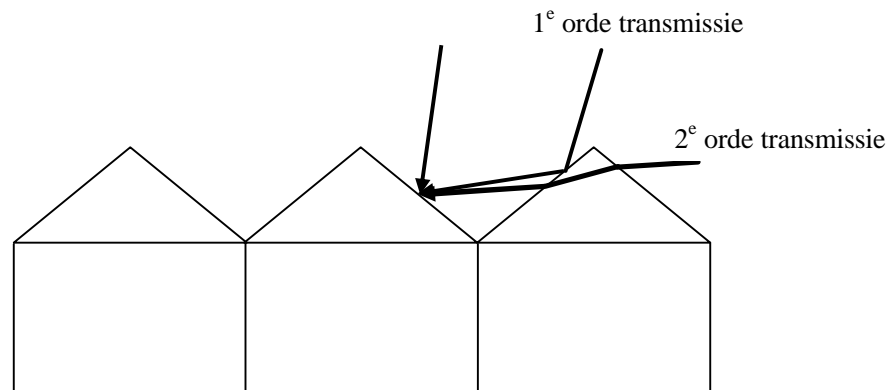
#### A.4.12 Begroting

Specificatie van de kosten

Onderdeel	Uren	Tarief (Excl BTW)	Totaal (EUR)
WP 10 meetprotocol	150	107	€16.050,00
WP 20 Variantenstudie	150	107	€16.050,00
WP 50 Conceptrapportage	20	107	€2.140,00
Mid term Review (GO/NO GO)			
WP 30 Radianc modelstudie	120	107	€12.840,00
WP 40 Economie	60	107	€6.420,00
WP 50 Conceptrapportage	20	107	€2.140,00
Eindpresentatie			
WP 60 kennisoverdracht	90	107	€9.630,00
WP 51 Definitieve rapportage	20	107	€2.140,00
Diversen (repro/reiskosten ed)			€590,00
Totaal			€68.000,00

## B Rekenmethode Energie III

In het project 'Energie III' [7] is een benaderende rekenmethode ontwikkeld om de diffuse lichttransmissie van kasdekken te berekenen. Deze methode was niet geschikt bevonden voor de optimalisatie in dit project vanwege het feit dat de 2<sup>e</sup> orde reflectie (weergegeven in figuur 40) niet in dit benaderende model is verdisconteerd.



Figuur 40 Eerste en tweede orde reflectie in rekenmethode 'Energie III'

## **C      Berekening invloed profielen**

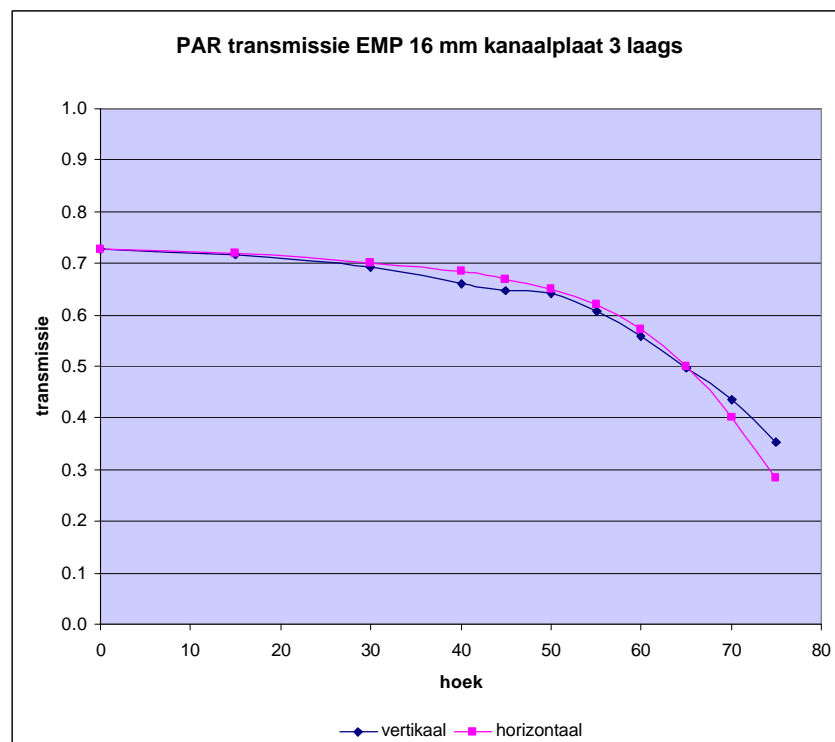
## D Transmissie metingen

### D.1 EMP 16 mm Macrolux kanaalplaat met dubbele spouw

De metingen zijn verricht met de integrerende bol opstelling van TNO. In standaard configuratie bestaat dit uit een bol van 65 cm een 1 kW Oriol Xenon lamp met airmass filters. De bundeldiameter is 13 cm, door middel van diafragma's kan de opening van de bol worden aangepast aan de vereiste omstandigheden. Voor de zigzagplaat is deze bundel echter te klein. Hier zijn de metingen verricht met een 2.5 kW HMI lamp en lensstelsel. De metingen zijn uitgevoerd met een bundel van 50x50 cm waarbij de divergentie is gereduceerd door diafragma's tot circa 2.5 graad.

De PAR metingen zijn uitgevoerd met Lycor PAR sensor. Met behulp van een spectrofotometer op de bol is voor langs de normaal invallend licht deze meter gecheckt en in orde bevonden.

De plaat is anisotropisch echter blijkt hiervan slechts weinig uit de metingen (resultaten weergegeven figuur 41 en tabel 12). Indien men loodrecht op de kanalen meet ontstaat een niet gehele vloeiende kromme doordat interne reflecties een rol spelen. Deze is eveneens terug te vinden in de reflectie metingen (niet geïllustreerd). Voor een eerste orde benadering zijn de verschillen tussen beide kromme's te verwaarlozen en mag men de resultaten eenvoudig middelen.



Figuur 41 PAR transmissie EMP plaat

Tabel 12 PAR transmissie EMP plaat

hoek	weeg fakt or	zon vert i kaal	zon hor i zont a	par vert i kaal	par hor i zont a	par agem	zon gem
0	0.000	0.721	0.721	0.728	0.728	0.728	0.721
15	0.250	0.714	0.714	0.717	0.720	0.719	0.714
30	0.433	0.690	0.699	0.692	0.700	0.696	0.695
40	0.492	0.659	0.684	0.661	0.683	0.672	0.672
45	0.500	0.634	0.672	0.647	0.668	0.658	0.653
50	0.492	0.629	0.656	0.642	0.650	0.646	0.643
55	0.470	0.587	0.625	0.607	0.621	0.614	0.606
60	0.433	0.542	0.578	0.559	0.571	0.565	0.560
65	0.383	0.498	0.506	0.498	0.500	0.499	0.502
70	0.321	0.419	0.409	0.435	0.402	0.418	0.414
75	0.250	0.340	0.293	0.352	0.284	0.318	0.316
90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
di f f uus		0.584	0.601	0.594	0.597	0.596	0.592

Toelichting op de tabel:

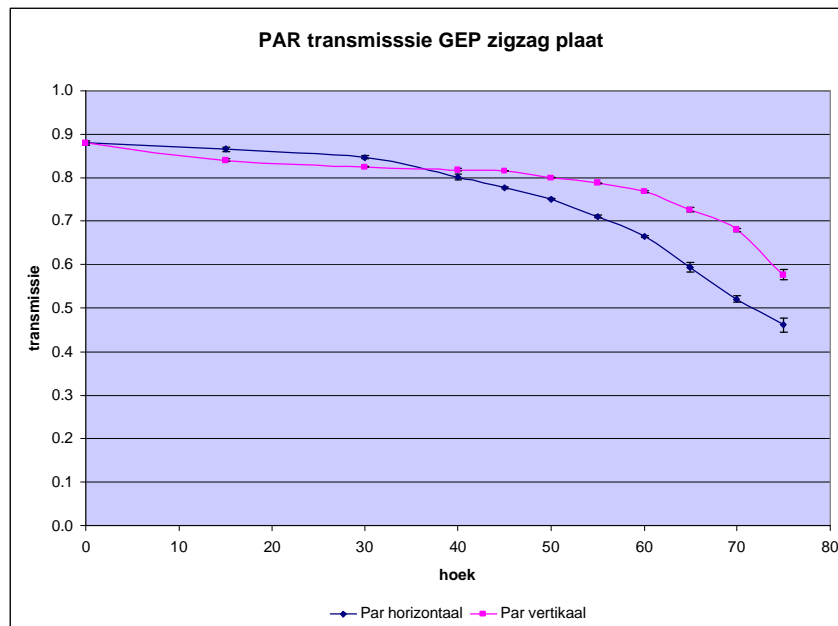
- *Hoek*: de hoek van inval ten opzichte van de normaal op de doorsnede. (N.b. Bij de zigzag plaat is dit het vlak over de toppen zigzagplaat.);
- *Weegfactor*: de hoekafhankelijke factor voor de berekening van het diffuus doorgelaten licht;
- *Zon*: energetische doorlating betrokken op het airmass 1 spectrum;
- *PAR*: energetische doorlating betrokken op de photosynthetically active radiation;
- *Vertikaal*: rotatie kanaalstructuur loodrecht op vlak van lichtbundel;
- *Horizontaal*: rotatie kanaalstructuur in het vlak van lichtbundel.

## D.2 Resultaten GEP Zigzag plaat

De resultaten van de metingen aan de zigzag plaat (weergegeven in figuur 43 en tabel 14) laten duidelijk een groot verschil zien van de effecten van de kanalen. Met name loodrecht op de kanalen ontstaat een veel hogere transmissie. Het lijkt raadzaam hier voor specifieke gevallen rekening mee te houden voor wat betreft het gebruik in de praktijk. Met name de diffuus licht doorlating scheelt vele procenten in de verticale richting. Vergelijking met gewoon floatglas laat zien dat de doorlaat voor normaal licht vergelijkbaar is. Voor zontoe toepassingen is de energetische transmissie beter dan van glas, dit geldt echter niet voor de PAR straling. Hier valt de diffuse doorlaat tegen, daar staat echter een betere isolatiewaarde tegenover.

De gemeten waarden voor de doorlating langs de normaal komt goed overeen met de door de fabrikant GEP opgegeven waarde van .906. (Ter informatie de metingen zijn aan dezelfde plaat verricht). Echter vergelijking met de door de fabrikant opgegeven waarde voor diffuus licht laat forse verschillen zien. De fabrikant geeft hier voor de NEN 2675 een waarde van 0.8359 op. Deze waarde is gemeten met een opstelling volgens de dubbele integrerende bol methode. Zelfs de meest optimistische doorlating voor de verticale richting zit hier met 0.80 nog behoorlijk onder. Mogelijk wordt dit verschil veroorzaakt door onvoldoende aandacht voor de in paragraaf 2.3 geschetste meetproblematiek en/of mogelijke tekortkomingen in de opstelling waardoor licht onder grote hoeken niet correct wordt gemeten. Hierdoor kan een te optimistisch beeld van de doorlating ontstaan.





Figuur 42 PAR transmissie GEP plaat

Tabel 13 PAR transmissie GEP plaat

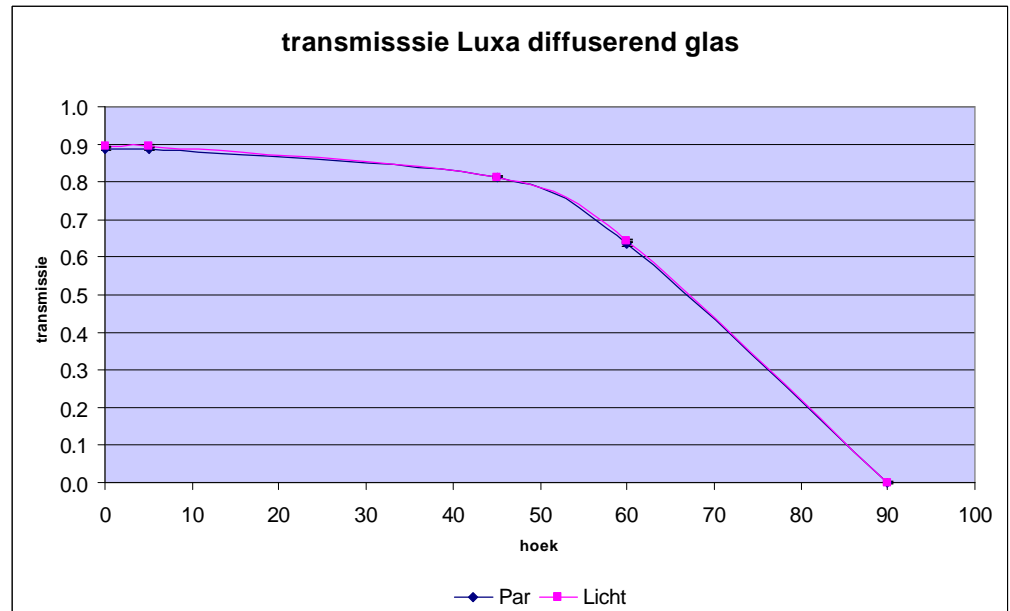
hoek	weeg fakt or	zon ver t i kaal	zon hor i zont aal	Par ver t i kaal	Par hor i zont aal	Par gem	zon gem
0	0.000	0.900	0.901	0.880	0.880	0.880	0.900
15	0.250	0.857	0.880	0.840	0.866	0.853	0.869
30	0.433	0.840	0.865	0.825	0.847	0.836	0.852
40	0.492	0.837	0.811	0.817	0.801	0.809	0.824
45	0.500	0.841	0.790	0.815	0.777	0.796	0.816
50	0.492	0.830	0.770	0.800	0.751	0.776	0.800
55	0.470	0.818	0.726	0.787	0.711	0.749	0.772
60	0.433	0.800	0.688	0.768	0.665	0.717	0.744
65	0.383	0.765	0.622	0.726	0.594	0.660	0.693
70	0.321	0.729	0.563	0.680	0.521	0.600	0.646
75	0.250	0.638	0.457	0.577	0.461	0.519	0.547
90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
di f f uus		0.804	0.730	0.774	0.713	0.743	0.767

Toelichting op de tabel:

- *Hoek*: de hoek van inval ten opzichte van de normaal op de doorsnede. (N.b. Bij de zigzag plaat is dit het vlak over de toppen zigzagplaat.);
- *Weegfactor*: de hoekafhankelijke factor voor de berekening van het diffuus doorgelaten licht;
- *Zon*: energetische doorlating betrokken op het airmass 1 spectrum;
- *PAR*: energetische doorlating betrokken op de photosynthetically active radiation;
- *Vertikaal*: rotatie kanaalstructuur loodrecht op vlak van lichtbundel;
- *Horizontaal*: rotatie kanaalstructuur in het vlak van lichtbundel.

### D.3 Luxa diffuserend glas

Het Luxa gewalst glas is op vijf verschillende hoeken doorgemeten op lichttransmissie. Hieronder is de hoekafhankelijke transmissie van het materiaal weergegeven.



Figuur 43 Hoekafhankelijke transmissie van Luxa glad gewalst glas

Tabel 14 Hoekafhankelijke en diffuse transmissie van het Luxa glad gewalst glas

Hoek	Weegfactor	PAR	Licht
0	0	0.889	0.894
5	0.086	0.889	0.894
45	0.5	0.812	0.813
60	0.533	0.635	0.642
90	0	0	0
Diffuus		0.714	0.716

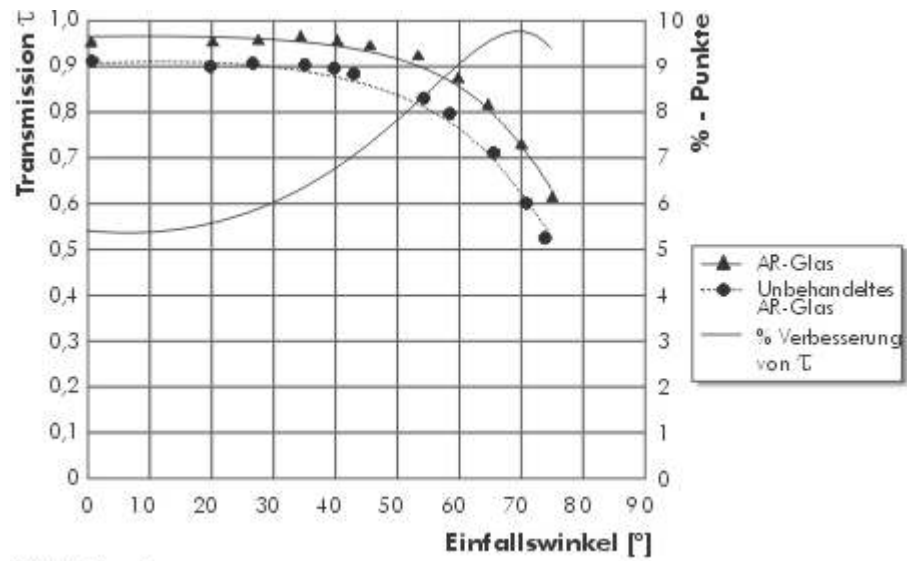
## E Resultaten berekeningen Radiance - Zadeldak

Dekhelling	Hoogte	Nok					Dal					Dekhelling	Hoogte	Nok					Dal				
		Sensor [m]	+Z	+X	-X	+Y	-Y	+Z	+X	-X	+Y			-Y	Sensor [m]	+Z	+X	-X	+Y	-Y	+Z	+X	-X
0 Graden	0	8446	3302	3308	3308	3302	8456	3349	3270	3308	3305	26 graden	0	8452	3340	3347	3338	3331	8468	3371	3348	3333	3331
	0.5	8414	3318	3315	3315	3318	8423	3377	3274	3322	3324		0.5	8424	3382	3383	3359	3360	8443	3412	3371	3363	3365
	1	8381	3327	3328	3328	3327	8389	3386	3278	3335	3330		1	8414	3403	3410	3373	3373	8431	3448	3404	3382	3376
	1.5	8346	3306	3313	3313	3306	8350	3372	3263	3320	3313		1.5	8404	3408	3412	3388	3380	8414	3462	3419	3389	3385
	2	8302	3288	3294	3294	3288	8310	3355	3243	3298	3288		2	8395	3414	3429	3388	3385	8397	3473	3439	3390	3382
	2.5	8266	3261	3262	3262	3261	8269	3323	3219	3268	3269		2.5	8397	3425	3425	3399	3394	8347	3479	3448	3372	3363
3	8232	3232	3230	3230	3232	8236	3293	3187	3233	3235	3	8421	3451	3449	3404	3402	8283	3471	3435	3344	3345		
3.5	8210	3190	3189	3189	3190	8217	3248	3154	3192	3197	3.5	8473	3488	3491	3423	3420	8208	3455	3421	3307	3311		
4	8191	3160	3158	3158	3160	8194	3202	3123	3160	3160	4	8482	3518	3517	3420	3422	8118	3416	3390	3265	3266		
4.5	8182	3126	3127	3127	3126	8183	3167	3101	3132	3130	4.5	8488	3540	3544	3416	3414	8012	3366	3335	3219	3213		
5	8173	3130	3131	3131	3130	8173	3162	3106	3132	3130	5	8477	3561	3562	3416	3419	7940	3325	3288	3184	3185		
10 graden	0	8446	3303	3314	3314	3309	8454	3354	3280	3317	3311	30 graden	0	8474	3358	3362	3344	3339	8472	3376	3359	3341	3342
	0.5	8408	3327	3326	3328	3326	8422	3385	3296	3334	3335		0.5	8448	3393	3398	3369	3370	8458	3423	3388	3368	3370
	1	8386	3336	3338	3334	3332	8391	3393	3298	3341	3336		1	8433	3419	3426	3389	3384	8445	3457	3421	3392	3386
	1.5	8357	3324	3326	3332	3327	8359	3385	3305	3335	3334		1.5	8423	3430	3433	3399	3395	8424	3471	3440	3398	3397
	2	8316	3322	3322	3311	3310	8325	3376	3295	3322	3316		2	8422	3436	3447	3409	3405	8401	3489	3455	3399	3388
	2.5	8299	3302	3304	3302	3298	8291	3359	3296	3298	3290		2.5	8432	3449	3452	3415	3414	8346	3486	3462	3380	3372
3	8264	3288	3293	3279	3278	8261	3352	3282	3272	3271	3	8456	3486	3484	3429	3428	8288	3485	3454	3358	3359		
3.5	8277	3271	3269	3263	3268	8219	3330	3264	3235	3239	3.5	8497	3517	3519	3441	3443	8224	3473	3447	3330	3330		
4	8324	3291	3293	3261	3258	8139	3279	3217	3185	3181	4	8494	3537	3539	3438	3438	8146	3452	3426	3300	3296		
4.5	8351	3332	3332	3267	3266	8031	3165	3096	3098	3097	4.5	8501	3561	3564	3436	3433	8049	3408	3379	3254	3251		
5	8344	3329	3329	3250	3252	7964	3064	2996	3044	3041	5	8490	3583	3584	3438	3441	7980	3380	3349	3231	3228		
20 graden	0	8446	3326	3332	3323	3325	8452	3348	3319	3323	3319	37 graden	0	8498	3375	3376	3356	3348	8496	3390	3378	3353	3347
	0.5	8415	3362	3367	3350	3347	8430	3397	3346	3352	3350		0.5	8471	3409	3406	3383	3383	8483	3444	3413	3381	3384
	1	8401	3381	3387	3356	3356	8415	3412	3365	3365	3360		1	8460	3432	3439	3408	3400	8466	3474	3448	3408	3404
	1.5	8378	3387	3389	3366	3361	8394	3432	3380	3371	3367		1.5	8452	3450	3453	3418	3415	8442	3491	3462	3409	3406
	2	8354	3378	3395	3359	3354	8372	3439	3388	3371	3362		2	8466	3463	3475	3432	3429	8407	3496	3472	3411	3404
	2.5	8337	3385	3381	3356	3350	8341	3453	3402	3353	3347		2.5	8482	3485	3490	3444	3447	8372	3502	3480	3403	3397
3	8355	3382	3388	3352	3350	8289	3450	3399	3330	3330	3	8511	3519	3521	3458	3456	8325	3508	3483	3389	3386		
3.5	8396	3412	3416	3365	3367	8209	3418	3367	3284	3287	3.5	8504	3531	3531	3454	3454	8274	3505	3475	3369	3373		
4	8451	3471	3470	3385	3384	8104	3361	3323	3227	3227	4	8510	3552	3556	3458	3455	8203	3492	3463	3348	3349		
4.5	8451	3479	3484	3371	3371	7982	3279	3246	3158	3153	4.5	8505	3567	3569	3451	3454	8125	3460	3433	3320	3319		
5	8445	3502	3501	3367	3369	7904	3218	3174	3117	3114	5	8499	3591	3593	3459	3460	8066	3446	3425	3304	3303		
22 graden	0	8451	3332	3337	3325	3327	8459	3353	3329	3325	3321	45 graden	0	8513	3379	3380	3368	3361	8547	3410	3396	3376	3372
	0.5	8419	3371	3374	3352	3350	8435	3401	3353	3355	3356		0.5	8497	3414	3411	3390	3395	8527	3449	3421	3406	3406
	1	8404	3394	3396	3361	3358	8420	3429	3383	3371	3364		1	8494	3447	3449	3426	3419	8505	3479	3448	3422	3419
	1.5	8383	3393	3395	3372	3368	8397	3441	3392	3376	3374		1.5	8499	3460	3464	3438	3433	8478	3492	3462	3430	3429
	2	8368	3392	3405	3367	3361	8381	3452	3414	3380	3372		2	8516	3482	3492	3456	3451	8449	3500	3471	3436	3429
	2.5	8358	3400	3400	3368	3368	8348	3463	3422	3358	3356		2.5	8534	3503	3507	3465	3458	8413	3505	3479	3436	3427
3	8374	3407	3409	3371	3371	8291	3461	3413	3338	3335	3	8520	3511	3514	3463	3460	8378	3507	3477	3423	3422		
3.5	8425	3440	3442	3390	3391	8205	3435	3387	3288	3294	3.5	8512	3524	3523	3460	3459	8324	3509	3472	3411	3412		
4	8467	3490	3490	3399	3401	8108	3379	3347	3244	3242	4	8506	3534	3534	3462	3462	8271	3499	3464	3401	3399		
4.5	8466	3501	3505	3387	3389	7984	3307	3274	3173	3170	4.5	8503	3538	3540	3453	3454	8215	3487	3454	3383	3379		
5	8457	3523	3524	3385	3388	7913	3253	3216	3136	3133	5	8501	3564	3565	3463	3463	8176	3490	3465	3378	3374		

## F Resultaten berekeningen Radiance - Boogdak

Boognr	Minder	Hoogte	Nok					Dal				
			+Z	+X	-X	+Y	-Y	+Z	+X	-X	+Y	-Y
5 Boog	Steil	0	8409	3284	3287	3287	3277	8408	3329	3263	3289	3283
		0.5	8393	3306	3310	3295	3298	8391	3351	3280	3304	3308
		1	8361	3310	3321	3317	3311	8370	3359	3302	3316	3314
		1.5	8323	3303	3309	3296	3291	8341	3363	3305	3310	3304
		2	8293	3299	3294	3292	3287	8305	3365	3307	3295	3285
		2.5	8291	3287	3295	3283	3282	8269	3353	3299	3267	3267
		3	8316	3298	3298	3278	3281	8218	3351	3297	3236	3242
		3.5	8366	3327	3324	3278	3278	8112	3292	3243	3171	3170
		4	8394	3395	3397	3302	3303	7932	3165	3113	3074	3071
		4.5	8354	3375	3379	3264	3264	7659	2873	2802	2887	2890
		5	8271	3220	3222	3166	3164	7659	2873	2802	2887	2890
4 Boog		0	8450	3325	3332	3328	3328	8463	3360	3326	3328	3326
		0.5	8419	3362	3368	3349	3348	8436	3402	3350	3358	3358
		1	8403	3381	3390	3362	3362	8417	3423	3376	3370	3364
		1.5	8394	3394	3396	3378	3374	8398	3442	3387	3375	3372
		2	8377	3393	3405	3374	3368	8385	3446	3402	3381	3370
		2.5	8355	3393	3393	3369	3368	8348	3463	3411	3360	3354
		3	8360	3397	3396	3364	3365	8298	3466	3415	3337	3338
		3.5	8406	3416	3421	3376	3377	8221	3443	3397	3294	3297
		4	8466	3482	3482	3401	3402	8085	3382	3345	3227	3229
		4.5	8473	3507	3514	3396	3397	7908	3278	3247	3144	3138
		5	8451	3526	3526	3386	3388	7616	3030	3001	2988	2987
3 Boog		0	8489	3358	3361	3350	3347	8480	3379	3359	3350	3344
		0.5	8458	3400	3400	3377	3379	8462	3426	3388	3372	3374
		1	8439	3421	3428	3398	3392	8447	3459	3422	3396	3392
		1.5	8426	3431	3431	3406	3403	8426	3473	3438	3404	3398
		2	8424	3435	3443	3416	3412	8406	3493	3459	3400	3395
		2.5	8419	3439	3444	3421	3422	8357	3500	3465	3390	3385
		3	8445	3472	3474	3427	3420	8291	3496	3462	3366	3361
		3.5	8501	3509	3512	3448	3448	8214	3479	3449	3334	3334
		4	8513	3540	3545	3456	3456	8132	3448	3425	3301	3296
		4.5	8514	3558	3561	3451	3450	7989	3383	3353	3233	3231
		5	8503	3584	3584	3452	3456	7654	3195	3155	3102	3105
2 Boog		0	8512	3385	3387	3371	3363	8522	3404	3385	3376	3367
		0.5	8487	3419	3415	3399	3398	8513	3454	3423	3403	3408
		1	8474	3442	3449	3421	3417	8496	3487	3457	3425	3422
		1.5	8465	3458	3463	3437	3433	8474	3504	3469	3433	3428
		2	8466	3471	3481	3451	3445	8450	3510	3482	3437	3431
		2.5	8485	3492	3494	3462	3462	8421	3517	3486	3433	3426
		3	8516	3519	3524	3475	3469	8373	3516	3488	3418	3413
		3.5	8514	3537	3534	3475	3470	8310	3511	3473	3397	3397
		4	8513	3550	3552	3472	3472	8240	3496	3464	3378	3373
		4.5	8510	3556	3561	3463	3466	8141	3467	3430	3344	3340
		5	8510	3591	3592	3473	3473	7879	3361	3329	3256	3253
1 Boog	Steil	0	8517	3379	3381	3370	3362	8550	3406	3390	3379	3380
		0.5	8500	3413	3410	3393	3395	8536	3449	3418	3411	3412
		1	8499	3444	3446	3428	3420	8513	3479	3445	3430	3428
		1.5	8494	3455	3458	3437	3434	8485	3492	3459	3438	3436
		2	8511	3475	3488	3455	3451	8461	3499	3467	3443	3436
		2.5	8532	3498	3501	3466	3462	8429	3502	3475	3441	3433
		3	8524	3509	3511	3468	3465	8391	3506	3472	3429	3430
		3.5	8511	3516	3516	3463	3463	8330	3504	3467	3419	3417
		4	8499	3523	3521	3463	3461	8273	3497	3460	3407	3401
		4.5	8498	3524	3526	3453	3452	8200	3478	3446	3381	3376
		5	8505	3561	3564	3464	3467	7972	3405	3375	3321	3318

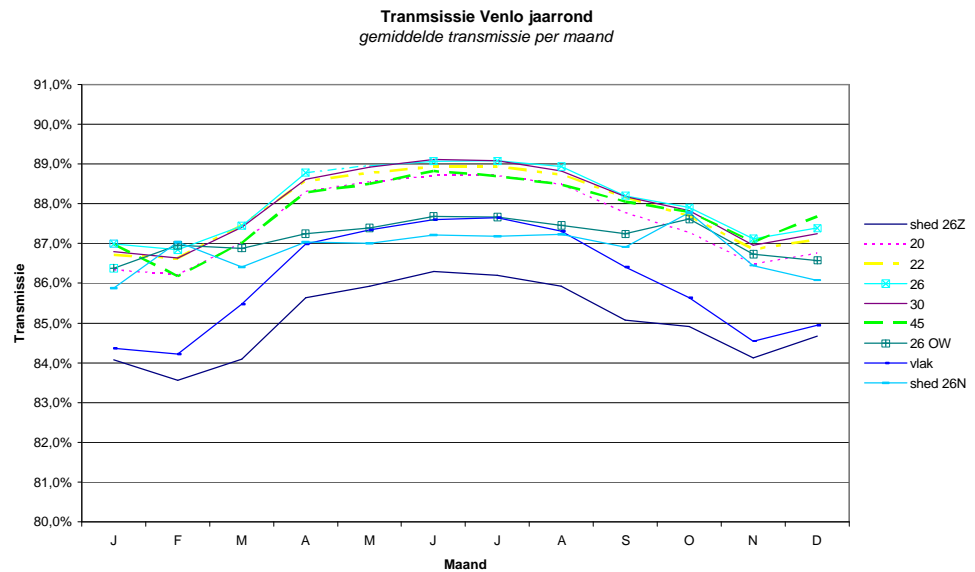
## G Gegevens omhullingsmaterialen



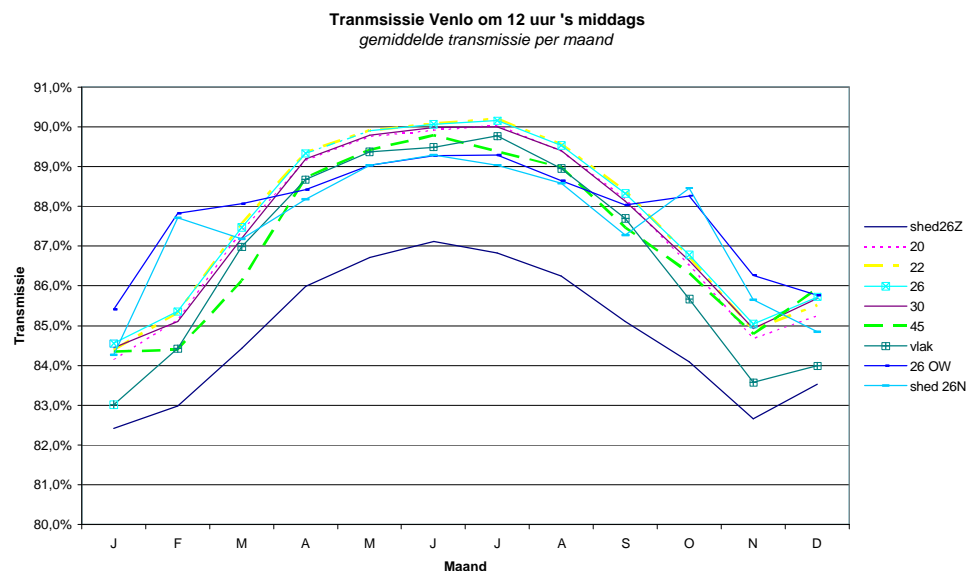
DTU Lyngby, Danmark

Figuur 44: Hoekafhankelijke transmissie Sunarc geëtst glas ([www.sunarc.net](http://www.sunarc.net))

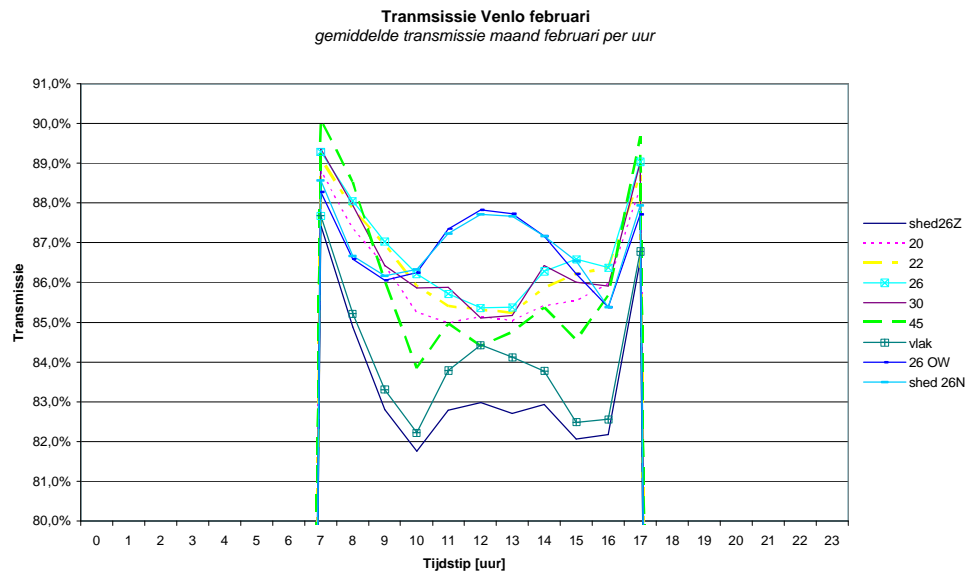
## H Volledige grafieken jaarrond berekeningen



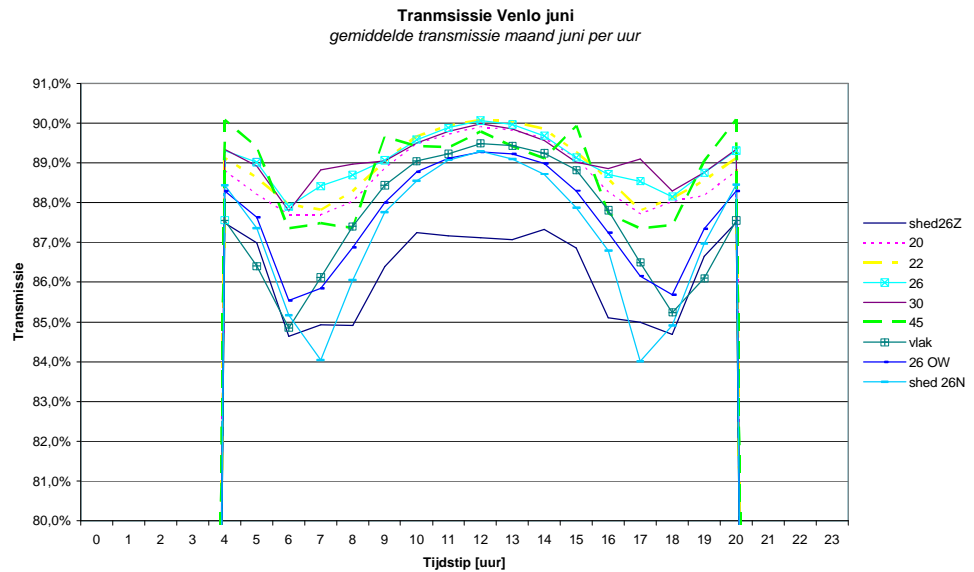
Figuur 45: Verloop van de transmissie van de diverse Venlo en Sheddakvormen over het jaar heen. De uurlijkse transmissies zijn gemiddeld tot een dagelijks gemiddelde. Deze grafiek geeft een beeld van de overall performance van de kasdekken. Te zien is dat de Venlo met 22 en 26 graden hoog scoort.



Figuur 46: Verloop van de transmissie van de diverse Venlo en sheddak kasdekken over het jaar heen. Van iedere maand is de situatie om 12.00u gegeven. Te zien is dat in de zomer de transmissie rond het middaguur voor alle kastypen hoger is dan in de winter. Verder valt op dat de Venlo 22 en 26 graden weliswaar hoog scoren in de zomer, maar dat in het voorjaar een Oost West georiënteerde Venlo of een sheddak hoger scoren.



Figuur 47: Verloop van de transmissie van de diverse Venlo en sheddak kasdekken gedurende de gemiddelde februari dag. Te zien is dat het korte dag betreft. Verder valt op dat de Venlo 26 Oost West en het Sheddak Noord gedurende de dag ca. 1-3% grotere transmissie hebben dan de Noord Zuid georiënteerde Venlo daken.



Figuur 48: Verloop van de transmissie van de diverse Venlo en sheddak kasdekken gedurende de gemiddelde dag in juni. Te zien is dat de Venlo daken met dekhellingen van 22, 26 en 30 graden gedurende de gehele dag het beste scoren.