

Van Mourik Broekmanweg 6
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T +31 15 276 30 00
F +31 15 276 30 10
wegwijzer@tno.nl

TNO-rapport

034-DTM-2010-03385

Lichtmeetprotocol Kasdekmaterialen

Datum 7 september 2010
Auteur(s) Jan Ruigrok (TNO Bouw en Ondergrond)
Gert-Jan Swinkels (Wageningen UR Glastuinbouw)

Opdrachtgever Produktschap Tuinbouw
Dennis Medema
Postbus 280
2700 AG Zoetermeer



Ministerie van LNV
Leo Oprel
Postbus 482
6710 BL Ede



Projectnummer 034.78629/01.01
Aantal pagina's 27 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen 1

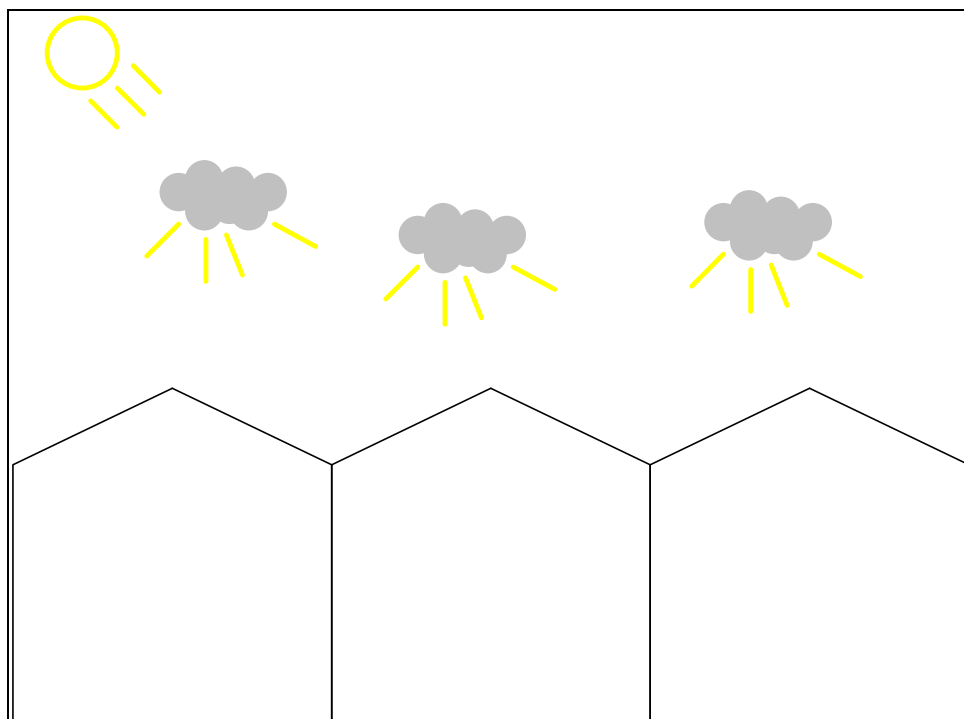
Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

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

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

Samenvatting

Bij het kiezen van het type kasbedekking is de mate van lichtdoorlatendheid van groot belang. Naast de lichtonderschepping van de constructiedelen is de lichttransmissie van het omhullingsmateriaal van grote invloed. Niet voor niets is de lichttransmissie van een kas opgenomen in de GLK-criteria en wordt er bij de aanschaf van een nieuwe kas besloten om ruiten te nemen met een hoge lichttransmissie. Er zijn echter verschillende manieren om de lichttransmissie van een ruit te bepalen en in dit onderzoek is gekeken naar wanneer, welke methode gebruikt kan worden.



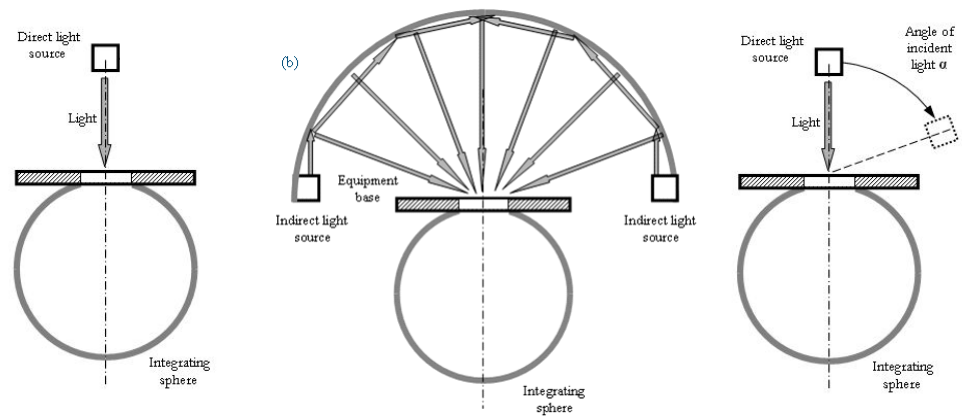
Figuur 1 *Diffuse belichting van een kas door bewolking.*

Een protocol voor het meten van de lichttransmissie van tuindersglas staat beschreven in NEN2675. Volgens dit protocol kan de lichttransmissie van een ruit bepaald worden aan de hand van de loodrechte transmissie. Voor standaard onbewerkt glas is dit evenredig met de hemisferische lichttransmissie (invallend licht onder alle hoeken). In de markt worden innovatieve omhullingsmaterialen steeds meer toegepast. Hierbij valt te denken aan kunststofpanelen of bewerkt of gecoat glas. Het is bij deze materialen niet mogelijk om op dezelfde manier aan de hand van een loodrechtmeting de hemisferische transmissie te bepalen.

In dit onderzoek is gekeken naar drie gebruikelijke meetmethodes voor het vaststellen van de hemisferische lichttransmissie:

1. transmissiebepaling aan de hand van loodrecht meting
2. transmissiebepaling aan de hand van hemisferische meting
3. transmissiebepaling aan de hand van hoekafhankelijke meting

Voor alle meetmethodes is vast gesteld aan welke randvoorwaarde iedere meting moet voldoen.



Figuur 2 Drie meetmethodes voor het bepalen van de lichttransmissie.

Bij een hoekafhankelijke meting wordt er meer informatie verkregen dan wanneer enkel de hemisferische transmissie wordt bepaald. Deze informatie kan gebruikt worden als een kas geoptimaliseerd moet worden voor specifieke situaties. Met behulp van computerprogramma's, zoals bijvoorbeeld Radiance, kan een kas met het dek gesimuleerd worden en berekend worden wat de totale lichttransmissie is in een bepaalde situatie. Dit kan bijvoorbeeld gebruikt worden om de transmissie in de wintermaanden te verhogen.

Naast het vaststellen van meetprocedures voor de hemisferische lichttransmissie is er ook gekeken naar een methode om de HAZE-factor vast te stellen. De HAZE-factor is een maat voor de verstrooiing van het inkomende licht. Volgens onderzoek van WUR naar de effecten van diffuus licht op komkommer heeft het verstrooien een positief effect op de groei van sommige gewassen.

Tenslotte is ook aandacht besteed aan het effect van condensatie op de lichttransmissie. Gedurende een groot deel van het jaar treedt er condensatie op aan de binnenzijde van de kas. Uit onderzoek van Wageningen UR Glastuinbouw is gebleken dat de werking van Anti reflex coatings kan verdwijnen wanneer er condens op de ruiten staat. Een vermindering van de lichttransmissie van 9% is gemeten. Om vast te stellen wat het effect van condens is op de lichttransmissie van het glas is er een meetprocedure ontwikkeld waarmee dit effect kan worden onderzocht. Deze procedure is in dit rapport beschreven.

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	5
1.1	Achtergrond.....	5
1.2	Kasdek materialen	6
1.3	Status protocol lichttransmissie.....	7
2	Meetapparatuur.....	8
2.1	Integrerende bol.....	8
2.2	Spectrometer.....	8
3	Transmissie voor loodrecht licht.....	10
3.1	Meetprincipe.....	10
3.2	Afmetingen monster	10
3.3	Meetnauwkeurigheid	11
4	Transmissie voor hemisferisch invallend licht (diffuse transmissie).....	12
4.1	Meetprincipes	12
4.2	Meetnauwkeurigheid	16
5	Lichtverstrooiing (haze).....	17
5.1	Inleiding	17
5.2	Meetprocedure.....	17
5.3	Meetnauwkeurigheid	19
6	Condensatie.....	20
6.1	Inleiding	20
6.2	Werkwijze	20
	Bijlage(n)	
	A Meetnauwkeurigheden	

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De huidige norm voor het meten van de lichtdoorlatendheid van tuinbouwglas NEN2675 [1] is voornamelijk bedoeld voor productvergelijking. De daarin beschreven methode is gebaseerd op het meten van de PAR-transmissie (zie 1.1.1) voor loodrechte inval (evenwijdig aan de Normaal van het oppervlak). Er is destijds gekozen voor deze meting omdat deze met commercieel verkrijgbare apparatuur goed en relatief eenvoudig is uit te voeren.

In Nederland bestaat de jaarlijkse globale straling echter voor tweederde uit diffuus licht. Daarnaast valt het directe licht gedurende een dag (een jaar) onder veel verschillende invalshoeken op het kasdek zodat gemiddeld genomen een nauwe correlatie bestaat tussen de lichthoeveelheid in de kas en de hemisferische lichttransmissie van het kasomhullingsmateriaal. De hemisferische lichttransmissie is het percentage licht dat door een ruit komt, wanneer het licht onder alle hoeken op de ruit valt. In de praktijk is dan ook vooral de transmissie voor hemisferisch invallend licht bepalend voor de lichtopbrengst in de kas. De NEN2675 maakt hiervoor gebruik van een correlatie tussen de transmissie voor loodrecht invallend licht en die voor hemisferisch invallend licht op basis van de brekingsindex van het materiaal.

Aangezien de brekingsindex van tuinbouwglas van fabrikant tot fabrikant nauwelijks verschilt, biedt de loodrechte transmissie een representatieve waarde op grond waarvan glas van verschillende leveranciers eerlijk kan worden vergeleken. Omhullingmateriaal dat gemaakt is van een ander materiaal of waarbij gebruikt wordt gemaakt van gecoat glas heeft een andere verhouding tussen de loodrechte en de hemisferische transmissie. Om een goede vergelijking van verschillende materialen mogelijk te maken moet de hemisferische transmissie worden bepaald. In dit document wordt o.a. het protocol beschreven voor het meten van de hemisferische lichttransmissie.

1.1.1 *Lichttransmissie*

Van het licht dat op een omhullingsmateriaal valt wordt slechts een gedeelte doorgelaten. Dit wordt de lichttransmissie genoemd. Licht wat niet wordt doorgelaten door het materiaal wordt deels gereflecteerd (terugkaatsen) en deels geabsorbeerd (omzetten in warmte). Omdat er geen energie verloren kan gaan is de som van de transmissie, reflectie en de absorptie is één. De verhouding tussen de drie waardes is afhankelijk van de eigenschappen van het omhullingsmateriaal. Bij verbetering van omhullingsmaterialen zijn alle drie de waardes van belang om te onderzoeken op welke manier het materiaal verbeterd kan worden.

Bij het bepalen van de lichttransmissie van een tuinbouwkas is alleen de lichttransmissie van het omhullingsmateriaal van belang. Omdat dit protocol alleen is bedoeld voor het vast stellen van de lichttransmissie worden met de verschillende meetprotocollen alleen de lichttransmissies bepaald en niet de reflectie- en absorptiewaardes van een materiaal.

1.1.2 *PAR transmissie*

Photosynthetically Active Radiation (PAR) is het gedeelte van het lichtspectrum dat belangrijk is voor fotosynthese van planten en betreft het gebied van 400 – 700 nm. De PAR transmissie is een gewogen gemiddelde van de transmissie over het PAR-gebied waarbij met als gewichtsfunctie het product van de spectrale daglicht energieverdeling

en de spectrale plantgevoeligheid voor PAR (zie ook Appendix A). Anders dan bij transparante materialen voor andere toepassingen dan de glastuinbouw wordt de PAR transmissie bepaald in plaats van de lichttransmissie van 380 tot 700 nm.

We onderscheiden 2 type metingen voor PAR transmissie:

1. Spectrale transmissiemeting

De spectrale transmissie of golflengte afhankelijke transmissie wordt gemeten met behulp van een spectrometer. De PAR transmissie wordt berekend uit de gemeten transmissiespectra.

2. Integrale transmissiemeting

Bij een integrale transmissiemeting wordt de PAR transmissie direct gemeten. Hierbij wordt het monster belicht met alle relevante golflengten ("wit" licht) waarna de intensiteit van het doorgelaten licht door een PAR detector wordt gemeten.

1.1.3 *Temperatuursinvloeden*

De lichttransmissie van omhullingsmateriaal is niet afhankelijk van de temperatuur in de kas. Daarnaast zijn alle gangbare meetapparatuur niet afhankelijk van de temperatuur waarmee gemeten wordt. Hierdoor is deze variabele verder niet besproken in dit rapport.

De temperatuur heeft wel invloed op de condensvorming op ruiten. Om deze reden is de temperatuur wel van invloed wanneer de effecten van condensvorming worden gemeten.

1.2 **Kasdek materialen**

Het kiezen van de juiste meetmethode wordt sterk bepaald door het karakter van het te meten kasdekmateriaal. Hier onderscheiden we 3 klassen van materialen.

1.2.1 *Speculaire isotrope materialen*

Onder speculaire isotrope materialen worden die materialen verstaan waarbij de doorgelaten straling de oorspronkelijke richting van de invallende straling behoudt. Voorbeelden zijn blank onbehandeld vensterglas ("normaal" tuinbouwglas), niet-verstrooiende kunststof folies en platen en soortgelijke materialen voorzien van een niet-verstrooiende coating.

1.2.2 *Lichtverstrooiende isotrope materialen*

Onder lichtverstrooiende isotrope materialen worden niet-speculaire materialen verstaan, die de doorgelaten straling in willekeurige richtingen verstrooit. Voorbeelden hiervan zijn diffuse folies, gezandstraald glas en speculaire materialen voorzien van een diffuse coating.

1.2.3 *Lichtbrekende anisotrope materialen*

Onder lichtbrekende anisotrope materialen worden niet-speculaire materialen verstaan waarbij de doorgelaten straling een andere richting heeft dan die van de invallende straling, waarbij de richting niet-willekeurig is maar door de geometrie van het materiaal wordt bepaald.

Voorbeelden hiervan zijn kunststof kanaalplaten, vlakglas met een ingewalste oppervlakte structuur (ribbel, piramide, enz.), platen met zigzagprofielen, enz..

1.3 Status protocol lichttransmissie

Het in dit document beschreven protocol heeft nog niet dezelfde status als de oude norm NEN 2675. Op dit moment wordt erover gedacht om deze norm te herzien om ook de meetprocedure voor lichtverstrooiende materialen op te nemen.

Dit rapport is wel opgenomen in de GLK systematiek. Hierin is het omhullingsmateriaal ook meegenomen in de bepaling van de lichttransmissie van een kas. Wanneer wordt aangetoond dat de hemisferische lichttransmissie van het omhullingsmateriaal hoger is dan de referentiewaarde dan mag deze worden gebruikt. Voor de meting moet dan wel de in dit rapport beschreven methode gebruikt worden.

2 Meetapparatuur

Voor het meten van de transmissie van kasdekmaterialen kan gebruik worden gemaakt van commerciële en/of zelfbouw apparatuur. Met deze apparatuur moet gemeten worden volgens de procedures beschreven vanaf hoofdstuk 3.

2.1 Integrerende bol

Voor alle metingen moet gebruik worden gemaakt van een integrerende bol, ook wel een bol van Ulbricht genoemd. Dit is een holle bol binnenin bekleed met een diffuus reflecterende laag waardoor een homogene lichtverdeling ontstaat. Hierdoor kan op een enkele plek met een enkele sensor de lichtintensiteit in de bol gemeten worden. Hierbij is het belangrijk dat de sensor afgeschermd wordt van direct licht uit de lichtbron of strooilicht vanaf het monster. In theorie mag een integrerende bol geen openingen en verstoringen in de bol hebben. Voor de monsterpoort geldt dat het oppervlak hiervan niet groter mag zijn dan 1% van het inwendige boloppervlak. Wanneer de transmissie gecorrigeerd wordt voor de diffuse reflectie van het monster mag het poortoppervlak tot 5% van het inwendig boloppervlak zijn.



Figuur 3 Voorbeeld van een integrerende bol (bron: <http://www.labsphere.com/>).

De grootte van de integrerende bol bepaalt in belangrijke mate de nauwkeurigheid waarmee gemeten kan worden. De lichtsterkte in de bol neemt kwadratisch af met de diameter. Hoe lager de lichtsterkte, hoe onnauwkeuriger de meting, zeker bij een relatief onstabiele lichtbron. Hierdoor neemt de nauwkeurigheid van de meting sterk af bij toenemende bolgrootte. Dit heeft als consequentie dat materialen met een grove structuur, relatief grote en/of dikke monsters en sterk lichtverstrooiende of lichtbrekende materialen op een relatief grote bol gemeten moeten waardoor voor deze materialen een lagere nauwkeurigheid gehaald kan worden.

2.2 Spectrometer

De meetnauwkeurigheid die bereikt kan worden is naast de afmetingen van de bol sterk afhankelijk van het type spectrometer dat gebruikt wordt. Hierin worden twee categorieën onderscheiden: de monochromator en de Photo Diode Array detector.

2.2.1 *Monochromator*

Een monochromator is een instrument dat van licht dat uit een mengsel van golflengten bestaat (wit licht) slechts één bepaalde golflengte doorlaat. Per scan wordt door de detector dan per golflengte gemeten.

Apparatuur met een monochromator maakt meestal gebruik van het “double beam” principe. Een double beam spectrometer heeft 2 lichtbundels en 2 poorten waarbij voor 1 poort het monster geplaatst is. Door met een optische “chopper” zeer snel afwisselend de bundels te blokkeren kan de lichtintensiteit zonder en met monster gemeten worden. Door vooraf een referentiescan uit te voeren hoeft achteraf niet gecorrigeerd te worden voor verhoogde interne reflectie ten gevolge van plaatsen van het monster.

Bij deze apparatuur moet de grootste zorgvuldigheid worden betracht bij het meten van relatief dikke niet-speculaire en/of anisotrope materialen omdat voor deze typen materialen de afmetingen van lichtbundel en monsterpoort niet geschikt zijn.

Apparaten met een monochromator zijn meestal commercieel verkrijgbare apparaten met hoge nauwkeurigheid die vaak alleen geschikt zijn voor kleine monsters van speculaire materialen zoals helder glas. De meettijd voor spectrale meting is vaak relatief lang.

2.2.2 *Photo Diode Array*

Bij apparatuur gebruik makend van een photo diode array (bijvoorbeeld CCD) wordt het monster integraal belicht met licht bestaande uit alle beschikbare golflengten. Bij deze apparatuur wordt vaak gebruik gemaakt van enkele lichtbundel (single beam). Dit betekent dat na het plaatsen van het monster de bolkarakteristiek veranderd waardoor de transmissie gecorrigeerd dient te worden voor de reflectiewaarde van het monster voor diffuus licht. Bij dergelijke meetopstellingen hangt de nauwkeurigheid nauw samen met de stabiliteit van de lichtbron.

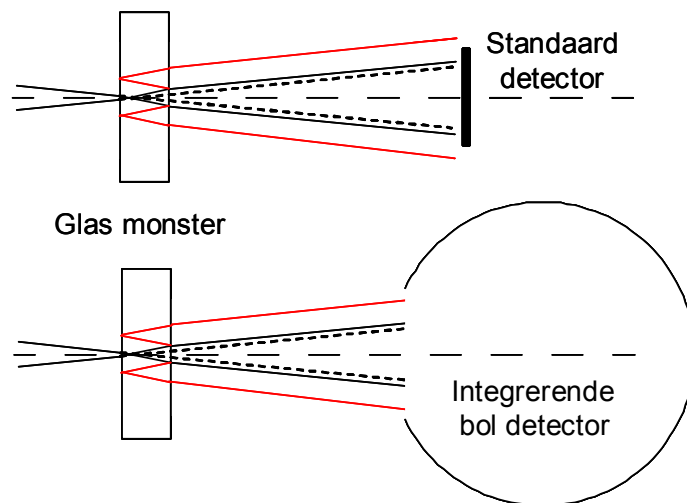
Doordat het hele spectrum tegelijkertijd gescand wordt is de meettijd relatief kort.

3 Transmissie voor loodrecht licht

3.1 Meetprincipe

Voor het meten van de lichttransmissie van materialen wordt in beginsel gebruik gemaakt van een parallelle lichtbundel en een integrerende bol. De integrerende bol bevat tenminste één poort waarop het monster geplaatst wordt. De parallelle lichtbundel valt loodrecht op het monster waarbij het doorgelaten licht door de poort in de bol terecht komt.

Wanneer een standaard detector rechtstreeks op de bundel gericht wordt zal na interactie van de bundel met het monster het belichte oppervlak van de detector doorgaans iets worden vergroot, niet alleen vanwege de vergrootte primaire bundel (direct doorgelaten) maar ook vanwege de secundaire bundel(s) die ontstaan door interne reflectie in het monster. Hierdoor wordt de transmissie onderschat en ontstaan meetfouten. Door gebruik te maken van de integrerende bol als detector worden zowel primaire als secundaire doorgelaten bundels volledig gemeten (figuur 4). Hoewel niet strikt noodzakelijk wordt in de praktijk het monster vaak tegen de ingangspoort van de integrerende bol gemeten.



Figuur 4 *Effect van secundaire bundelvorming (in rood) door interne reflectie in het monster.*

De lichttransmissie wordt bepaald door de lichtintensiteiten in de bol zonder en met monster te vergelijken.

3.2 Afmetingen monster

In de praktijk moeten de verhoudingen tussen bundelbreedte, monstergrootte en diameter van de verschillende poorten van de integrerende bol aan bepaalde eisen voldoen om de meetfouten acceptabel te houden.

Voor de verhouding tussen de afmeting van het monster en de monsterpoort geldt dat het monster altijd groter moet zijn dan de monsterpoort en veel dunner dan de diameter/breedte van de monsterpoort. Deze verhoudingen worden bepaald door de mate van lichtverstrooiing en -breking door het materiaal en hiervoor kan geen eenduidige regel opgesteld worden. Uitgangspunt is dat het door het monster verstrooide licht in de bol terecht komt.

Voor de verhouding tussen de afmetingen van de lichtbundel en monsterpoort geldt dat de bundel óf groter óf kleiner moet zijn dan de monsterpoort. In beide gevallen wordt voorkomen dat randeffecten in de meting worden meegenomen. Deze randeffecten ontstaan bij lichtverstrooiende en lichtbrekende materialen door verstrooiing en breking van het invallende licht en bij speculaire materialen alleen door inter-reflectie in het monster bij niet-loodrecht invallend licht (meting onder hoeken). In alle gevallen valt een deel van het licht aan de rand van de poort net naast de poort waardoor bij een bundel met dezelfde diameter als de monsterpoort de transmissie (sterk) onderschat wordt.

Naast randeffecten is het voor materialen die uit structuren bestaan of waarop een structuur is aangebracht (niet-isotrope materialen) belangrijk dat het belichte oppervlak groot genoeg is zodat het resultaat van de meting onafhankelijk is van welk deel van het materiaal belicht wordt. Als vuistregel geldt dat minstens 10 herhalende patronen moeten worden belicht. Ter controle van het elimineren van randeffecten moet de meting minimaal 1 keer worden herhaald met het monster in een andere positie. Als het herhalende patroon groot is zodat de bolafmeting theoretisch te groot wordt kan de lichttransmissie voor loodrecht licht ook worden bepaald door herhalende metingen met verschillende posities van het monster op de bol.

3.3 Meetnauwkeurigheid

Voor niet- of slechts in beperkte mate lichtverstrooiende enkelvoudige of meervoudige vlakglasproducten, gemeten met apparatuur die gebruik maakt van een monochromator in combinatie met double beam, wordt de meetnauwkeurigheid aangehouden zoals beschreven in de Nederlandse norm NEN 2675 (Tuinbouwglas: Bepaling van de lichtdoorlatendheid). Volgens deze norm mag de totale meetonzekerheid in de spectrale transmissiefactoren voor enkelvoudige monsters niet groter zijn dan $\pm 0,002$. Voor dubbele glasplaten, berekend uit de meetwaarden (transmissie en reflectie) van de afzonderlijke platen, mag de totale meetonzekerheid niet meer bedragen dan $\pm 0,004$.

Bij alle overige materialen moet een meetopstelling gebruikt worden waarbij voldaan wordt aan de in 3.2 beschreven voorwaarden met betrekking tot afmetingen van lichtbundel, monster en monsterpoort. Hiermee moet een totale meetnauwkeurigheid van $\pm 0,005$ gehaald worden. Dit geldt voor zowel de spectrale waarden als de gemiddelde (genormeerde) waarde.

Voor extreme materialen (weefstructuren, elastisch, multilaags) dient de meetafwijking kleiner te zijn dan de door het ijk/onderzoekinstituut opgegeven meetnauwkeurigheid.

4 Transmissie voor hemisferisch invallend licht (diffuse transmissie)

Loodrecht invallend licht komt in de Nederlandse praktijk nagenoeg niet voor. Daarnaast bestaat de globale straling in Nederland gemiddeld gezien voor tweederde uit diffuus licht. Ook valt het directe licht gedurende een dag (een jaar) onder veel verschillende invalshoeken op het kasdek zodat gemiddeld genomen een nauwe correlatie bestaat tussen de lichthoeveelheid in de kas en de hemisferische lichttransmissie van het kasomhullingsmateriaal. Daarom geeft de hemisferische transmissiewaarde van materialen, ook wel diffuse transmissie genoemd, een veel beter beeld van de prestaties als kasdek materiaal.

Het certificatieschema Groen Label Kas (GLK) neemt de transmissie van het kasdek materiaal mee in de beoordeling van de duurzaamheid van een kas. Tot GLK7 werd de transmissie van een kas berekend met een standaard omhullingmateriaal: float glas met 83% diffuse transmissie. Vanaf GLK8 is het mogelijk om af te wijken van deze standaard transmissie. De transmissie van specifieke kasdek materialen kan voor de GLK worden gebruikt wanneer deze is bepaald volgens de in dit hoofdstuk beschreven protocollen.

4.1 Meetprincipes

4.1.1 *Hemisferische transmissie op basis van de loodrechte transmissie*

Voor ongecoate speculaire materialen is het mogelijk de hemisferische transmissie te berekenen aan de hand van de loodrechte transmissie zoals gemeten volgens hoofdstuk 2. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de correlatie tussen de transmissie voor loodrechte inval T_N en die voor hemisferisch invallende straling T_{Hem} . In het geval van tuinbouwglas met een brekingsindex $n_D = 1.515$ bij 589.3 nm (de D Fraunhofer lijn) is de verhouding $T_{Hem}/T_N = 0.9197$. Een ruit met een loodrechte lichttransmissie van 90.0% heeft een hemisferische lichttransmissie van 82.8%.

Aangezien de brekingsindex van tuinbouwglas van fabrikant tot fabrikant nauwelijks verschilt, biedt de loodrechte transmissie een representatieve waarde op grond waarvan glas van verschillende leveranciers eerlijk kan worden vergeleken.

Omhullingmaterialen van een andere materiaalsoort of met een coating hebben een andere verhouding tussen de loodrecht- en de hemisferische transmissie. Om een goede vergelijking van verschillende materialen mogelijk te maken moet voor deze producten de hemisferische transmissie op een andere manier worden bepaald.

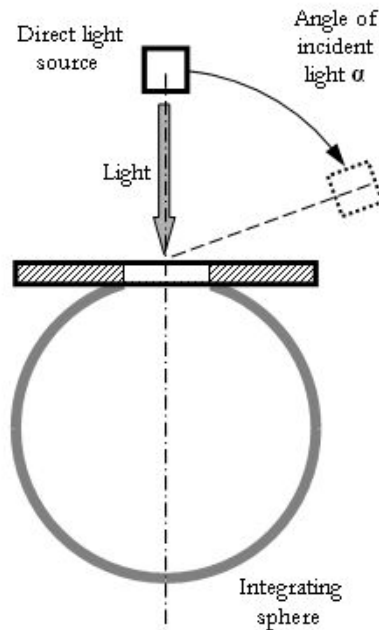
Meetnauwkeurigheid

Voor de totale meetnauwkeurigheid wordt de totale meetnauwkeurigheid van de loodrechte transmissie aangehouden plus 0.001 ter compensatie van verschillen in brekingsindex.

4.1.2 *Hemisferische transmissie op basis van de hoekafhankelijke transmissie*

Hemisferisch invallend licht bestaat uit lichtstralen uit alle richtingen waarbij de invalshoeken een bepaalde verdeling hebben. Als de transmissie voor een aantal invalshoeken bekend is kan hieruit de hemisferische waarde bepaald worden.

Voor het meten van de hoekafhankelijke transmissie wordt dezelfde methode gebruikt als voor het meten van de loodrechte transmissie met het verschil dat de lichtbundel onder de gewenste hoek gebracht wordt (figuur 5). Voor vrijwel alle materialen geldt echter dat de behaalde nauwkeurigheid sterk afneemt met de hoek van inval omdat bij toenemende hoek van inval de transmissie steeds sterker afneemt en een kleine afwijking in de hoeknauwkeurigheid een steeds grotere meetnauwkeurigheid tot gevolg heeft (zie Bijlage A).



Figuur 5 *Meting van de hoekafhankelijke transmissie.*

Voor het integreren van de hoekafhankelijke transmissies tot een hemisferische transmissie kunnen drie methoden gebruikt worden:

- Numerieke integratie.
- Template methode.
- Spline polynoomfit.

Voor de verhoudingen tussen de afmetingen van de monsterpoort, lichtbundel en monster gelden in principe de regels van de loodrechte transmissiemeting. Echter, bij hoge hoeken zal de lichtverstrooiing en -breking in de meeste gevallen toenemen. Daarnaast treedt bij speculaire materialen inter-reflectie op (figuur 6). Hierdoor moet de verhouding tussen de afmetingen van lichtbundel en monster kleiner zijn dan bij de loodrechte transmissiemeting. De afstand tussen de rand van de lichtbundel en de rand van het monster kan voor standaard float glas berekend worden met de volgende formule.

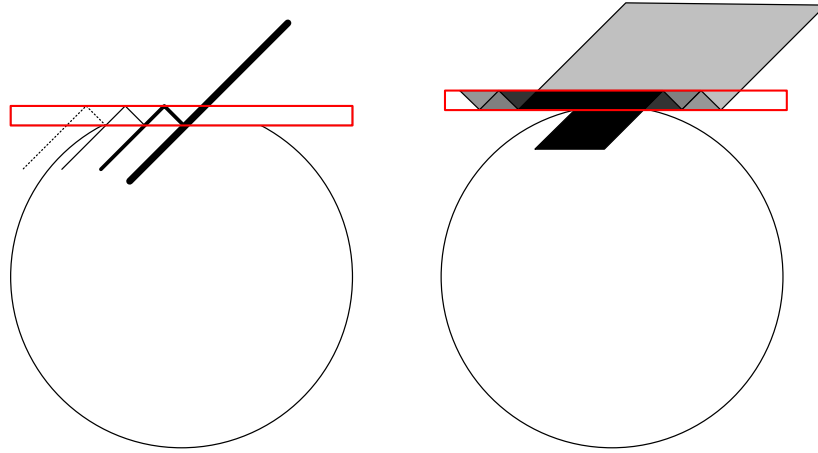
$$x = 0,75 \cdot t \quad (1)$$

Waarin:

x : De afstand tussen de rand van de lichtbundel en de rand van het monster.

t : De dikte van het monster.

Voor andere materialen dan standaard float glas moet de minimale afstand zodanig zijn dat minimaal de primaire en de eerste twee secundaire bundels worden opgevangen.



Figuur 6 Bij het meten van de hoekafhankelijke transmissie van speculaire materialen is de minimale afmeting van de monsterpoort afhankelijk van de inter-reflectie in het monster.

4.1.2.1 Numerieke integratie uit hoekafhankelijke transmissie

De hemisferische transmissie THEM is gerelateerd aan de hoekafhankelijke transmissie $T(\phi, \theta)$ voor ongepolariseerd licht middels de integraal:

$$T_{HEM} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} T(\phi, \theta) I(\phi, \theta) \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I(\phi, \theta) \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta d\phi} \quad (2)$$

Met

ϕ horizontale invalshoek (azimut)

θ verticale invalshoek

$I(\phi, \theta)$ distributiefunctie

Voor het berekenen van de hemisferische transmissie is de distributiefunctie hoekonafhankelijk en voor alle hoeken gelijk aan 1.

Voor isotrope materialen is de transmissie onafhankelijk van de horizontale invalshoek ϕ en kan bovenstaande formule vereenvoudigd worden tot:

$$\tau_d = \frac{\sum_{\Phi=-90}^{90} \tau(\Phi) \sin \Phi \Delta\Phi}{\sum_{\Phi=-90}^{90} \sin \Phi \Delta\Phi} \quad (3)$$

Voor metingen uitgevoerd met een vast hoekinterval θ_i wordt vergelijking 2 numeriek benaderd met:

$$T_{\text{HEM}} = \frac{1}{2} T(0) (1 - \cos(\theta_1)) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N T(\theta_i) (\cos(2\theta_i - \theta_1) - \cos(2\theta_i + \theta_1)) \quad (4)$$

waarin de $T(0)$ de transmissie onder loodrechte inval is en $T(\theta_i)$ de transmissie voor ongepolariseerd licht bij de invalshoek θ_i .

Deze benadering leidt tot een onderschatting van T_{HEM} met een afwijking die groter wordt naarmate het hoekinterval groter wordt en daardoor de functie $T(\theta)$ minder nauwkeurig wordt beschreven door de meetresultaten. Voor de bepaling van de hemisferische PAR transmissie is het meetinterval bij voorkeur 5° of kleiner. In totaal zijn dan 18 meetwaarden nodig (loodrecht plus 17 hoeken van 5° tot en met 85°). Bij dit interval is de extra meetnauwkeurigheid ten gevolge van de niet optimale fit tussen een beperkt aantal gemeten hoeken 0.0005.

Deze methode is bruikbaar zowel voor de spectrale transmissie als voor de geïntegreerde (en genormeerde) transmissie.

4.1.2.2 *Templatemodel voor berekening uit hoekafhankelijke transmissie*

Het aantal hoeken dat nodig is voor de berekening van de hemisferische transmissie uit de hoekafhankelijke transmissie kan nog aanzienlijk kan worden verminderd door gebruik te maken van het feit dat sterke veranderingen in transmissie vooral optreden bij grote hoeken. Het aantal hoeken waarvoor de transmissie nodig is voor een nauwkeurige bepaling is in dit geval slechts 10, namelijk $T(0^\circ)$, $T(15^\circ)$, $T(30^\circ)$, $T(40^\circ)$, $T(50^\circ)$, $T(60^\circ)$, $T(70^\circ)$, $T(75^\circ)$, $T(80^\circ)$ en $T(83^\circ)$.

De methode voor de berekening van de hemisferische PAR transmissie is dan als volgt. De transmissiewaarden worden genormeerd door te delen door de loodrechte transmissie: $T(\theta)/T(0^\circ)$.

De genormeerde transmissiewaarden worden vergeleken met genormeerde transmissiewaarden van hoekafhankelijke transmissiefuncties uit een databank, welke via Fresnelberekeningen zijn verkregen en zijn getabelleerd met een interval van 1° . Vervolgens wordt de transmissiefunctie die het best overeenkomt met de gemeten data gecorrigeerd met een polynoom die op de gemeten hoeken de afwijking met de meetdata verder reduceert.

Tot slot wordt via numerieke integratie van de gecorrigeerde transmissiefunctie (die een interval van 1° heeft) de hemisferische transmissie berekend.

Uit modelberekeningen blijkt dat de afwijking t.g.v. de berekening die met deze methode wordt bereikt kleiner is dan 0,01%.

4.1.2.3 *Spline polynoomfit van meetresultaten*

Op basis van de loodrechte metingen worden voor het bereik van 0 tot 90° met stappen van maximaal 1° de tussenliggende transmissies bepaald door middel van spline polynoominterpolatie. De hemisferische transmissie kan vervolgens bepaald worden door (3).

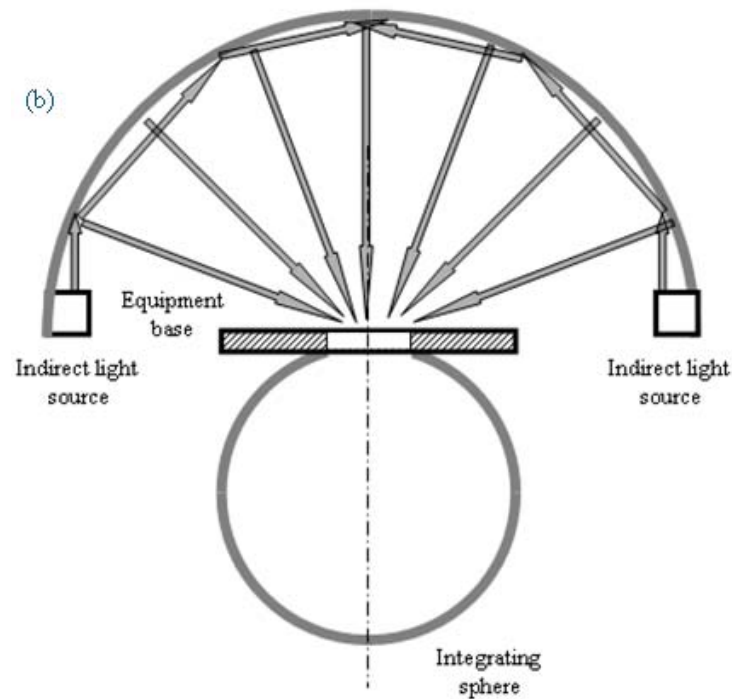
Bij deze methode is het van belang dat er voor voldoende hoeken metingen beschikbaar zijn. Voor speculaire isotrope materialen zoals standaard float glas volstaan de hoeken 0° , 15° , 30° , 45° , 60° en 75° . Voor lichtbrekende en lichtverstrooiende materialen zal de

hoekafhankelijke transmissiecurve een veel grilliger verloop vertonen en moeten veel meer hoeken gemeten worden. Het aantal hoeken moet dan worden bepaald door voor een bepaal type materiaal in eerste instantie een voldoende klein hoekinterval te kiezen zodat lokale pieken in het spectrum worden meegenomen.

4.1.3 Hemisferische transmissie op basis van diffuus licht

Hemisferisch invallend licht kan benaderd worden met een tweede integrerende bol welke dient als diffuse lichtbron. Dit kan een halve (figuur 7) of een hele bol zijn waarbij in het laatste geval de poort voldoende groot moet zijn om het monster te belichten. Met deze meetopstelling wordt de hemisferische transmissie bepaald op basis van hemisferisch invallend licht. Dit heeft als voordeel dat 1 meting per herhaling volstaat en geen afwijkende procedures gevolgd hoeven te worden voor niet-isotrope lichtverstrooiende en lichtbrekende materialen.

Omdat de bol die als lichtbron fungeert het vanuit het monster gereflecteerde licht weer opnieuw inbrengt moet de hemisferische transmissie hiervoor gecorrigeerd worden.



Figuur 7 Meting van de hemisferische transmissie door middel van een halve integrerende bol welke vanuit de basis volledig rondom wordt belicht.

4.2 Meetnauwkeurigheid

Voor de hemisferische transmissie moet een totale meetnauwkeurigheid van $\pm 0,005$ gehaald worden. Dit geldt voor zowel de spectrale waarden als de gemiddelde (genormeerde) waarde.

5 Lichtverstrooiing (haze)

5.1 Inleiding

Onder Haze (ofwel lichtverstrooiing) wordt verstaan het percentage van het doorgelaten directe licht dat door een transparant object wordt verstrooid, zodanig dat de afwijking ten opzichte van de invallende bundel meer dan een bepaalde hoek bedraagt.

Een typisch effect van Haze is een vertroebeling en een vermindering van contrast wanneer een object door een transparant materiaal wordt bekeken.

5.2 Meetprocedure

Voor het meten van de Haze wordt in principe de procedure gebruikt zoals beschreven in ASTM D1003 (Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics).

Volgens deze norm wordt een integrerende bol gebruikt die in theorie elke afmeting mag hebben zolang het totale poortoppervlak niet meer bedraagt dan 4% van het boloppervlak.

De integrerende bol moet voorzien zijn van een exitpoort die zich minimaal 170° tegenover de monsterpoort bevindt. De exitpoort moet groot genoeg zijn om in de referentiesituatie (zonder dat er een monster geplaatst is) de volledige lichtbundel door te laten. In de referentie mag dus geen licht, dat rechtstreeks uit de lichtbron komt, naast de exitpoort vallen en via de bolwand in de bol terechtkomen (figuur 8).

De exitpoort moet voorzien zijn van een constructie waardoor het uittredende licht volledig wordt geabsorbeerd. Dit kan door middel van een lichtval, eventueel in combinatie met spiegels.

Voor het meten van de Haze is de totale transmissie nodig. Om deze te kunnen meten moet de exitpoort vervangen kunnen worden door een monster met bekende reflectie (reflectiestandaard). Bij een variabele invalshoek van het licht kan als alternatief de aan de exitpoort grenzende bolwand als reflectiestandaard gebruikt worden. In dat geval mag de invalshoek niet meer dan $8 \pm 0.5^\circ$ afwijken ten opzicht van loodrecht.

Voor het meten van de lichtintensiteit in de bol wordt een lichtsensor aangebracht op de bolwand onder $90 \pm 10^\circ$ ten opzichte van de monsterpoort. De lichtsensor wordt via een zogenaamde "baffle" afgeschermd voor licht dat rechtstreeks uit de lichtbron afkomstig is. De baffle moet met hetzelfde reflecterende materiaal bekleed zijn als de bolwand.

De Haze wordt spectraal gemeten, voor de glastuinbouw is het golflengtegebied van 400 – 700 van belang (PAR). De lichtbron en bolcoating wordt gekozen op basis van het gewenste golflengtegebied. De Haze wordt bepaald voor loodrecht invallend licht. De Haze wordt bepaald door de hoeveelheid verstrooid licht te delen door de totale lichttransmissie bij direct licht. Hierna dient nog gecorrigeerd te worden voor de hoeveelheid strooilicht. Dit wordt zonder monster gemeten.

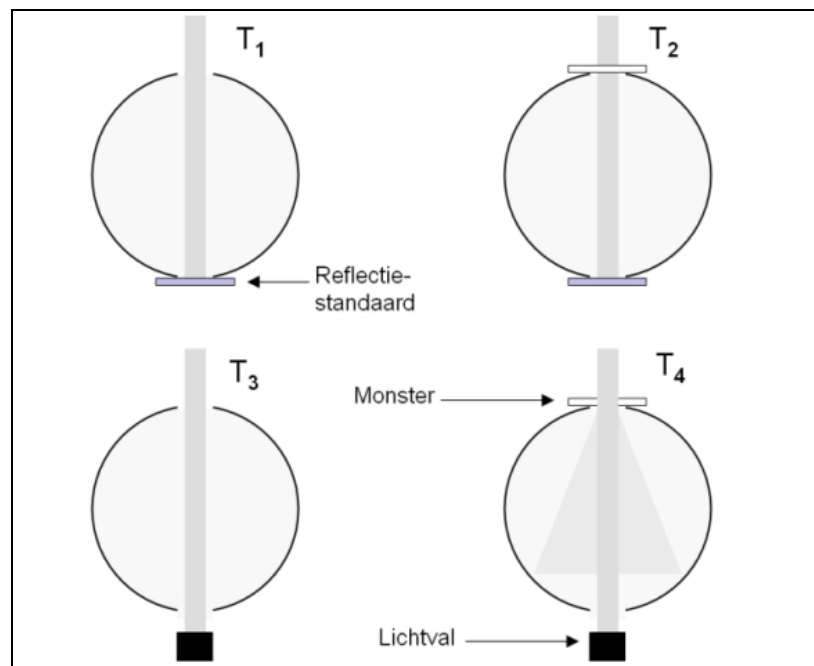
Tabel 1 Procedure voor het meten van Haze

Naam	Monster in positie	Lichtval in positie	Reflectie standaard in positie	Omschrijving
T ₁	Nee	Nee	Ja	Referentie transmissie
T ₂	Ja	Nee	Ja	Totale hoeveelheid door het monster doorgelaten licht
T ₃	Nee	Ja	Nee	Hoeveelheid door het instrument verstrooid licht (strooilicht)
T ₄	Ja	Ja	Nee	Hoeveelheid door het monster en instrument verstrooid licht

De Haze volgt dan uit:

$$Haze = \left(\frac{T_4}{T_2} - \frac{T_3}{T_1} \right) \times 100 \quad (5)$$

Voor bereiken van een bepaalde nauwkeurigheid wordt de procedure uit tabel 1 en vergelijking (1) een aantal keren herhaald totdat de gewenste nauwkeurigheid van +/- 0,007 is verkregen.



Figuur 8 Mogelijke opstelling voor het meten van Haze. De haze-poort (onderkant) moet zich minimaal 170° tegenover de monsterpoort bevinden (180° in de figuur) en de lichtbundel moet bij open haze-poort volledig door de poort vallen en door een lichtval geabsorbeerd worden.

5.3 Meetnauwkeurigheid

Wanneer gebruik wordt gemaakt van een apparaat met monochromator in combinatie met double beam wordt de nauwkeurigheid aangehouden van 0,005. Bij alle overige systemen dient de meetafwijking kleiner te zijn dan de door het ijk/onderzoekinstituut opgegeven meetnauwkeurigheid.

6 Condensatie

6.1 Inleiding

Condensatie op het kasdek kan de lichttransmissie van de kas in belangrijke mate beïnvloeden. Dit protocol beschrijft hoe de lichttransmissie voor hemisferisch invallend licht bepaald dient te worden van kasdekmaterialen met een condenslaag. Het protocol is zodanig van opzet dat de praktijksituatie in een tuinbouwkas zo goed mogelijk benaderd wordt. Belangrijk hierbij is de manier waarop de druppels of condenslaag gestandaardiseerd opgebracht wordt. Het protocol is gebaseerd op de resultaten van het project “Onderzoek naar de energie/vocht/licht effecten van condensatie aan het kasdek” (Stanghellini et.al, 2008).

In het protocol wordt de invloed van daglicht en assimilatiebelichting op de condensatie buiten beschouwing gelaten.

6.1.1 *Achtergrond*

Condensatie is het van gas- of dampvorm overgaan naar vloeibare vorm en treedt op als lucht langs een kouder oppervlak afkoelt en zodoende het dauwpunt bereikt. In tuinbouwkassen is condensatie tegen het kasdek een continu proces en afhankelijk van een aantal factoren waarbij de kasluchttemperatuur, de kasdektemperatuur en het vochtgehalte van de lucht de belangrijkste zijn. Periodes met een relatief hoge kasluchttemperatuur ten opzichte van de buitenluchttemperatuur, in combinatie met een hoge luchtvochtigheid komen in tuinbouwkassen vaak voor. De kasdektemperatuur zal dan ergens tussen de buitentemperatuur en de kasluchttemperatuur liggen, afhankelijk van factoren als de hemeltemperatuur en de vrijgekomen condensatiewarmte. Afvoer van condensatie gebeurt op 2 manieren: door verdamping en door druppelvorming waarbij de druppels uiteindelijk afvallen of afglijden richting de goot. Uit onderzoek is gebleken dat het condensatieproces, vanaf het ontstaan van condens naar druppelvorming tot en met waterafvoer, een grote invloed heeft op de lichttransmissie. Het gaat hierbij dan om de dikte van de condenslaag, de vorm en de grootte van de druppels.

In de glastuinbouw is “condensregen” op het gewas ongewenst. Door de hellingshoek van het kasdek wordt al veel condens afgevoerd naar de goot waardoor er niet of nauwelijks condenswater op het gewas terecht komt. Daarnaast wordt vaak een anticondenscoating of anticondensfolie gebruikt. Deze zorgt ervoor dat zich een egale condenslaag vormt in plaats van losse druppels. Anticondensmiddelen (en ook het ruwer worden van de oppervlakte, bv. door stof of veroudering) hebben invloed op de condensvorming (druppelgrootte en -vorm, laagdikte) maar niet op de hoeveelheid water die uiteindelijk condenseert.

6.2 Werkwijze

6.2.1 *Realiseren van condensatie*

Om de praktijk zo goed mogelijk te benaderen dient het monster onder een hellingshoek geplaatst te worden die overeenkomt met wat in de glastuinbouw gebruikelijk is. Voor dit protocol wordt een dakhelling van 22° aangehouden.

Om condensatie te laten optreden moet aan de bovenkant van het monster een lage luchttemperatuur en aan de onderzijde een hoge temperatuur gerealiseerd worden. Hierbij moet de warme lucht aan de onderzijde bevochtigd worden waardoor de waterdampspanning steeds dichterbij het niveau van verzadiging komt te liggen waardoor uiteindelijk condensatie optreedt.

De snelheid waarin het condensatieproces zich voltrekt hangt af van de snelheid waarmee de luchtcondities gevarieerd kunnen worden. De snelheid waarmee condensatie zich vormt moet grofweg overeenkomen met de praktijk en wordt begrensd door de snelheid waarmee de lichttransmissie gemeten kan worden.

Een praktische oplossing is een modelkas, voorzien is van verwarmingselement en verdamper, die in een klimaatkamer geplaatst wordt. Met de klimaatkamer worden de buitencondities gerealiseerd terwijl met het verwarmingselement en de verdamper de binnencondities gerealiseerd worden.

De modelkas en klimaatkamer worden beiden op een constante temperatuur gehouden. De klimaatkamer wordt op constante lage luchtvochtigheid gehouden waardoor condensatie aan de buitenzijde van het kasdek voorkomen wordt. Door de verdamper in te schakelen wordt de hoeveelheid waterdamp in de modelkas opgevoerd totdat condensatie optreedt. Om een goede standaardmeting te krijgen moet worden nagegaan bij welk verschil tussen binnen- en buitentemperatuur en verdampingsflux, een egaal reproduceerbare condenslaag wordt verkregen.

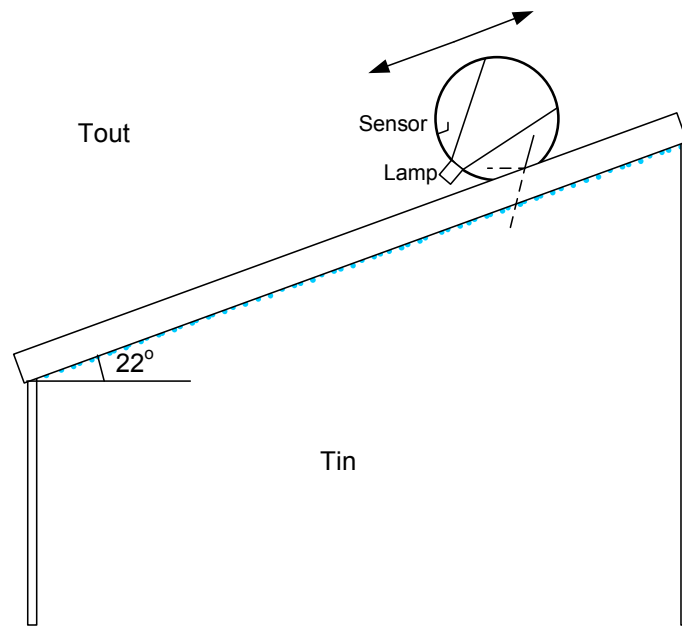
6.2.2 *Metten van de lichttransmissie*

Het protocol voor het meten van de lichttransmissie voor droge materialen is niet praktisch voor het meten van condensatie. Hiervoor zou een integrerende bol aan de onderzijde tegen het materiaal geplaatst moeten worden waardoor de luchtcondities en condensafvoer in de integrerende bol gerealiseerd zouden moeten worden. Hierdoor worden de diffuse reflectie en daarmee de integrerende eigenschappen van de bol ernstig verstoord.

Een alternatief is het meten van de reflectiewaarde van het kasdekmateriaal waarmee op basis van de vooraf bepaalde absorptie (van het droge materiaal) de transmissie kan worden uitgerekend. Hierbij wordt de absorptie van de condenslaag buiten beschouwing gelaten maar de bijdrage hiervan is bij normale omstandigheden verwaarloosbaar.

Het meten van de reflectie voor diffuus licht gebeurt door middel van een integrerende bol die aan de bovenzijde tegen het kasdekmateriaal geplaatst wordt. Een lichtbron in de bol zorgt voor diffuus licht. Hierbij is het belangrijk dat zowel de detector als het kasdekmateriaal geen direct licht ontvangen van de lichtbron.

In onderstaande figuur is de procedure voor het meten van de diffuse reflectie weergegeven. Deze bestaat uit een referentiemeting waarbij de bol losgekoppeld van het kasdekmateriaal is en een meting waarbij de bol op het kasdekmateriaal geplaatst is. De integrerende bol moet vooraf gekalibreerd worden met een materiaal met bekende reflectiewaarde.



Figuur 9 Meetopstelling voor het meten van de reflectiewaarde van een monster met een condensatielaag.

De verhouding van lichtsterktes kan uitgedrukt worden als:

$$\frac{\rho_d f_m}{C} = \left(\frac{T_2 - T_1}{T_2} \right) \quad (6)$$

Met:

ρ_d Diffuse reflectiewaarde van het monster

f_m Het fractionele poortoppervlak van de monsterpoort

C Bolconstante

T_1 Lichtsterkte in de bol bij een meting zonder monster

T_2 Lichtsterkte in de bol bij een meting met monster

Voor de diffuse reflectiewaarde is vergelijking 6 te schrijven als:

$$\rho_d = \frac{C}{f_m} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_2} \right) \quad (7)$$

IJking met een monster met bekende reflectiewaarde betekent dat de verhouding $\frac{C}{f_m}$ uit vergelijking 7 bekend is.

De hemisferische transmissie kan nu bepaald worden met behulp van vergelijking 8.

$$\tau_{dif} = 1 - \rho_d - a \quad (8)$$

Met:

τ_{dif} Transmissiewaarde van het monster met condensatie laag voor hemisferisch invallend licht

ρ_d Reflectiewaarde van het monster met een condensatielaag voor hemisferisch invallend licht

a Absorptiewaarde van het monster voor hemisferisch invallend licht

6.2.3 *Meetnauwkeurigheid*

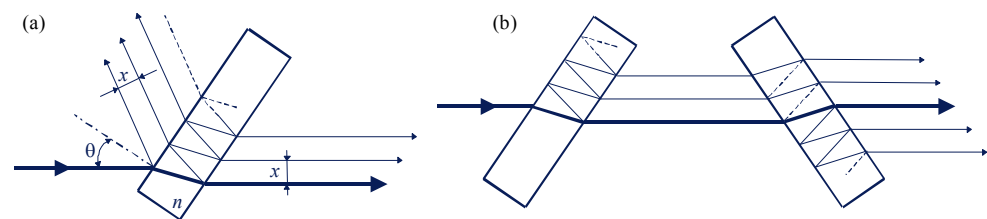
Voor het bepalen van de hemisferische reflectie moet eerst een ijkprocedure uitgevoerd worden met behulp van een monster met bekende hemisferische reflectie. Met een totale meetnauwkeurigheid van 0,005 voor het meten van de hemisferische reflectie afzonderlijk komt de totale meetnauwkeurigheid voor de hemisferische transmissie op 0.007.

A Meetonnauwkeurigheden

Meetonnauwkeurigheid door inter-reflectie

Meetfouten door inter-reflecties ontstaan indien zich in de optische weg van de meetbundel elementen bevinden zoals vensters, polarisiers en depolarisiers waarvan het oppervlak evenwijdig staat aan dat van het monster. Meetfouten die hierdoor ontstaan kunnen in de praktijk leiden tot een overschatting van de transmissie $> 0.5\%$. Voor het meten onder loodrechte inval zijn deze elementen niet noodzakelijk en dienen indien aanwezig uit de bundel te worden verwijderd.

Voor metingen onder schuine invalshoeken ontstaat een extra probleem doordat de doorgelaten primaire en secundaire bundels verschoven zijn t.o.v. de oorspronkelijke (zie figuur 10). De afstand x tussen de verschillende bundels hangt af van de invalshoek en is maximaal bij een hoek van ongeveer 50° waar deze in het geval van vensterglas circa 75% van de glasdikte bedraagt [2]. Bij een glasdikte van 4 mm komt dit neer op een maximale verschuiving van 3 mm.



Figuur 10 *Verschoven bundels bij schuine inval in reflectie en transmissie (a) en bij toepassen van een tweede glas (b) om de verschuiving van de primaire bundel te compenseren*

De detector (opening van de integrerende bol) moet in dit geval dus groot genoeg zijn om niet alleen de primaire bundel in te vangen maar ook voldoende van de secundaire bundels.

Bijvoorbeeld, voor een 4 mm dik glasmonster en een bundelbreedte van 8 mm moet in het geval dat de lichtvlek op het monster 1:1 wordt afgebeeld op de detector (bol) ingang deze een breedte hebben van tenminste $8 + 2 \cdot 0.75 \cdot 4 = 14$ mm om behalve de primaire bundel ook de eerste twee secundaire bundels te kunnen meten.

In sommige meetaccessoires voor spectrofotometrie wordt van een tweede glas gebruik gemaakt om de verschuiving van de primaire bundel te compenseren. Echter, zoals te zien in figuur 2.3 (b) wordt hierdoor het detectieprobleem verergerd!

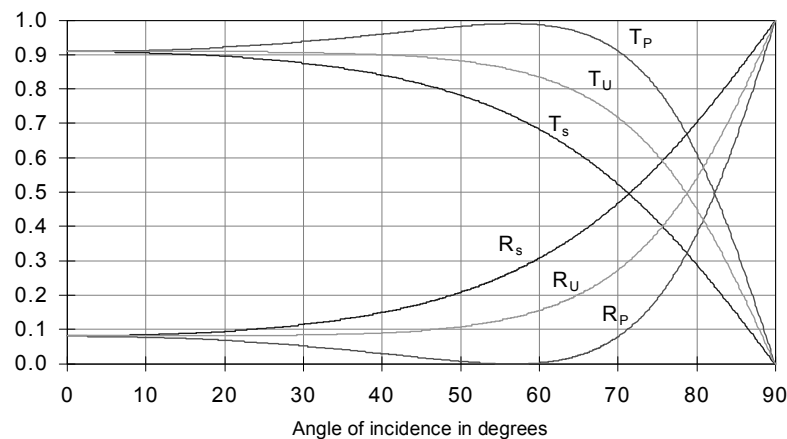
Meetonnauwkeurigheid door Polariseratie-effecten

In tegenstelling tot de transmissie bij loodrechte inval is deze bij schuine inval afhankelijk van de polarisatie van de invallende bundel (zie figuur 11). We onderscheiden hierbij twee extreme gevallen, namelijk polarisatie evenwijdig aan het invalsvlak (P = Parallel) en polarisatie loodrecht op het invalsvlak (S = Senkrecht, het Duitse woord voor loodrecht).

Natuurlijk daglicht bestaat uit elektromagnetische stralen waarvan de polarisatie (= richting van het elektrische veld) willekeurig is verdeeld. We willen dus de transmissie

weten voor willekeurig gepolariseerd licht, oftewel het gemiddelde voor P en S polarisatie.

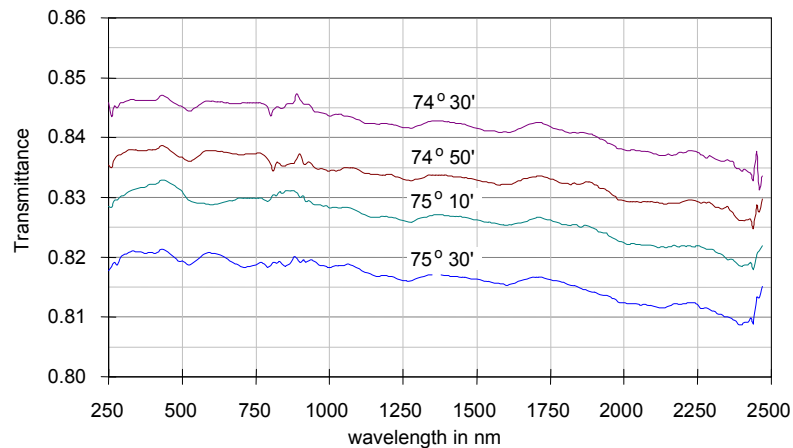
Bij gebruik van een spectrofotometer dient rekening te worden gehouden met het feit dat de meetbundel in dit geval sterk is gepolariseerd. Tevens hangt de mate van polarisatie ook nog sterk af van de golflengte. De beste oplossing in de praktijk blijkt het meten van de transmissie voor P en S polarisatie afzonderlijk door middel van een polarisator in de bundel, waarna vervolgens het gemiddelde van deze twee transmissiewaarden wordt genomen (zie T_U in figuur 11). Omdat het aandeel P-polarisatie in de bundel van een spectrofotometer doorgaans veel groter is dan het aandeel S-polarisatie is het beter om eerst de bundel voor interactie met de polariser te depolariseren zodat het evenveel S als P gepolariseerde straling bevat. Hiervoor wordt vaak een zogenaamde “Common Beam Depolariser” gebruikt die zich in het instrument bevindt op een positie net voordat de bundel in monsterbundel en referentiebundel wordt opgesplitst.



Figuur 11 *Hoekafhankelijke transmissie T en reflectie R van een 4 mm glasmonster bij een golflengte van 500 nm, voor verschillende typen polarisatie. De curven voor gemiddelde polarisatie zijn aangeduid met R_U en T_U (U = Unpolarised).*

Meetnauwkeurigheid door hoekafwijkingen

Het belang van een hoge hoeknauwkeurigheid wordt geïllustreerd in figuur 12. Het gaat hier weliswaar om een extreem geval maar de figuur maakt duidelijk dat een afwijking van 1° kan leiden tot een afwijking in de transmissie van wel 3%.

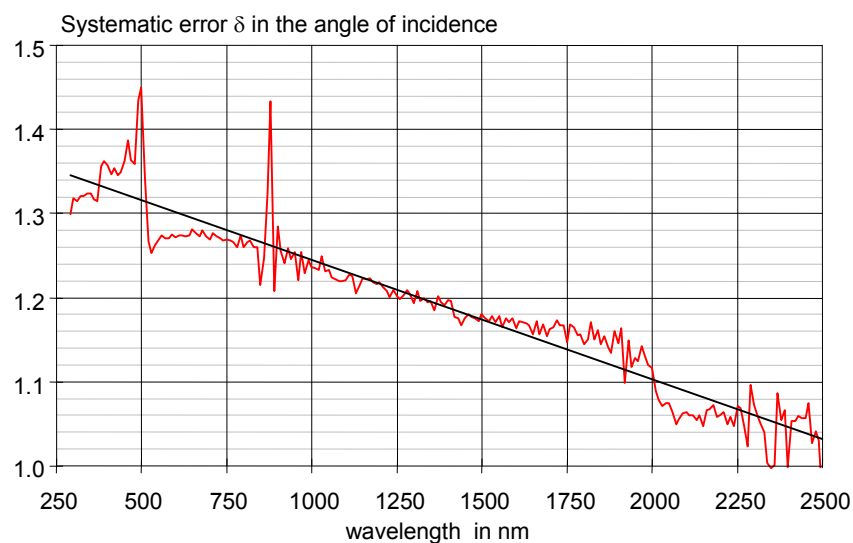


Figuur 12 *Spectrale transmissie van een kwarts glas monster bij verschillende invalshoeken rond 75° met P-gepolariseerd licht.*

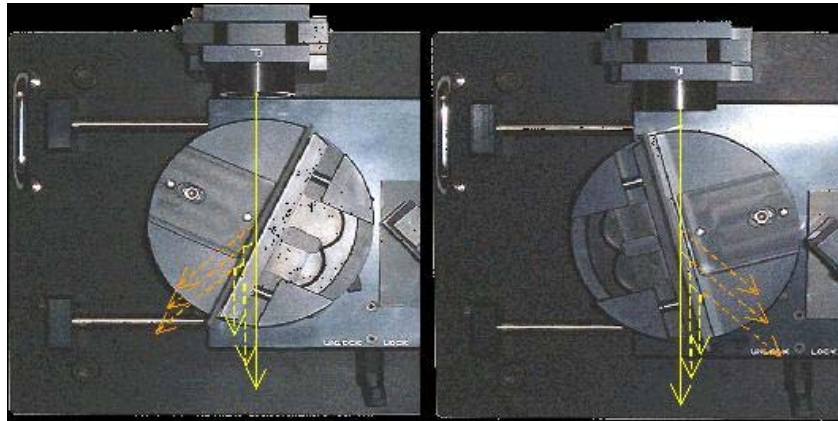
Onderzoek van spectrofotometers bij TNO heeft verder uitgewezen dat de richting van de energie in een bundel van een spectrofotometer in lichte mate afhangt van de golflengte. Dit blijkt uit het feit dat metingen onder dezelfde hoek maar andere richting niet dezelfde waarde oplevert. De oorzaak blijkt te liggen in het feit dat ondanks dat de geometrische richting van de as van een spectrofotometerbundel constant is, deze bundel niet geheel parallel is en de richtingen van de lichtstralen hierin niet-uniform zijn verdeeld.

In figuur 13 is de grootte van dit effect weergegeven voor een industriële spectrofotometer. Hierin is naast een “off-set” een richtingsverandering van 0.3° te zien bij een golflengte interval van 2250 nm.

Dit effect kan eenvoudig worden gecompenseerd door iedere meting per invalshoek in twee richtingen uit te voeren (zie figuur 14) en vervolgens het gemiddelde te nemen. Tevens wordt hiermee de afwijking in de nulpositie van de rotatie tafel gecompenseerd!



Figuur 13 *Afwijking in de invalshoek als functie van de golflengte.*



Figuur 14 Bovenaanzicht van de opstelling voor het meten van hoekafhankelijke transmissie onder "positieve" (links) en "negatieve" (rechts) richting bij dezelfde invalshoek.

Meetnauwkeurigheid bij integratie van hoeken

Voor metingen uitgevoerd met een vast hoekinterval θ_i wordt de hemisferische transmissie numeriek benaderd met:

$$T_{\text{HEM}} = \frac{1}{2} T(0) (1 - \cos(\theta_1)) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N T(\theta_i) (\cos(2\theta_i - \theta_1) - \cos(2\theta_i + \theta_1)) \quad (9)$$

waarin de $T(0)$ de transmissie onder loodrechte inval is en $T(\theta_i)$ de transmissie voor on gepolariseerd licht bij de invalshoek θ_i .

Deze benadering leidt tot een onderschatting van T_{HEM} met een afwijking die groter wordt naarmate het hoekinterval groter wordt en daardoor de functie $T(\theta)$ minder nauwkeurig wordt beschreven door de meetresultaten. De grootte van deze afwijking is in het geval van standaard (ongecoat) tuinbouwglas te zien in tabel 2.

Tabel 2 *Afwijking in T_{HEM} als gevolg van numerieke integratiefouten*

Meetinterval	Maximale meethoek	Aantal meethoeken	Relatieve afwijking in T_{HEM}
1°	89°	90	-0,001%
2°	88°	45	-0,007%
3°	87°	30	-0,019%
5°	85°	18	-0,058%
10°	80°	9	-0,204%
15°	75°	6	-0,526%