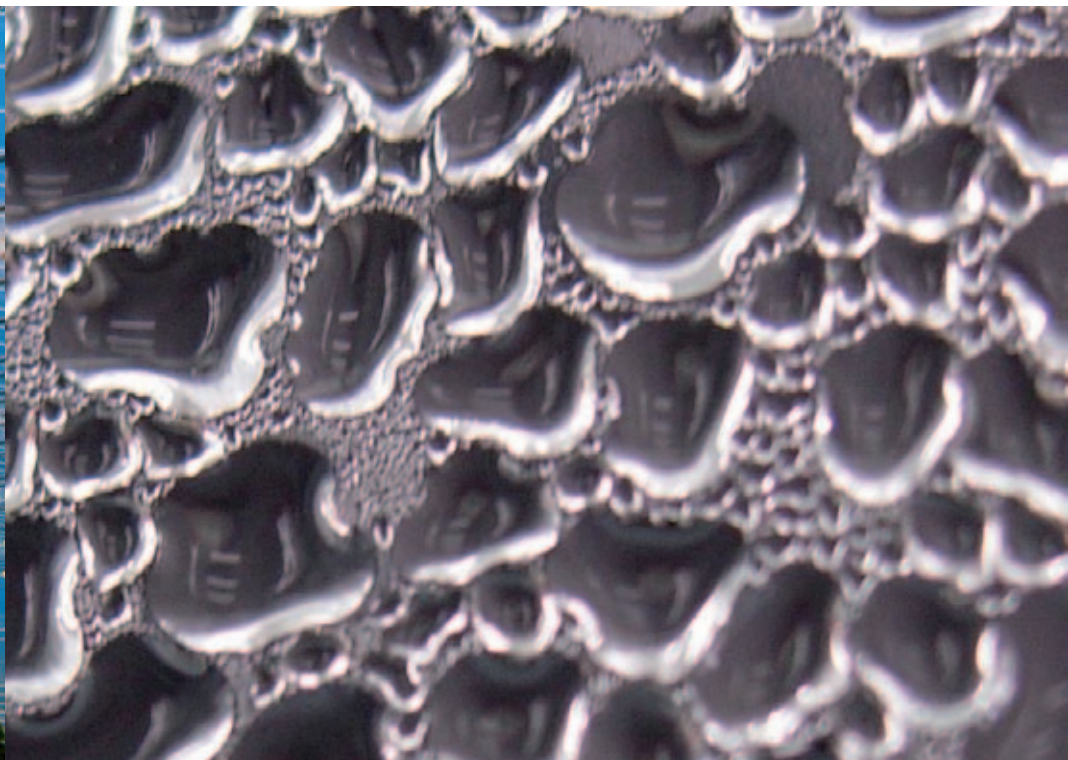




Condensatie tegen het kasdek

Licht- en energie-effecten van condensatie op acht kasdekmaterialen

C. Stanghellini, V. Mohammadkhani, M.A. Bruins, S. Hemming,
P. Sonneveld, G.J. Swinkels



© 2010 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Wageningen UR Glastuinbouw

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen
: Postbus 644, 6700 AP Wageningen
Tel. : +31 317 - 48 57 01
Fax : +31 317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

Samenvatting		4
1	Inleiding	5
2	Materialen en Methoden	6
	2.1 De meetopstelling	8
	2.1.1 Kasconstructie	8
	2.1.2 Klimaat in de kas	9
	2.1.3 Klimaatkamer	10
	2.1.4 Behandelingen	10
	2.2 Metingen	11
	2.2.1 Temperatuur en luchtvochtigheid	11
	2.2.2 Licht	12
	2.2.3 Reflectiemeting	12
	2.3 De uitgevoerde reeksen	12
	2.4 Dataverwerking	15
3	Resultaten	18
	3.1 Lichtmetingen	18
	3.2 Energiemetingen	24
	3.2.1 Energiebalans	24
	3.2.2 Effect van condenslaag op energieverlies	25
	3.2.3 Dektemperatuur en energieverlies	27
	3.3 Discussie	29
4	Analyse van de effecten en mogelijke maatregelen	30
	4.1 Lichttransmissie-effect door condensatie	30
	4.2 Energie-effect van condensatie	30
5	Conclusies	32
6	Literatuur	33
	Bijlage I Condensatie	34
	Bijlage II Reflectiemeting	39
	Referenties	46
	List of symbols	47
	Bijlage III tekening van het kasje	48

Samenvatting

Condensatie tegen het kasdek is een bekend verschijnsel in de glastuinbouw. Uit berekeningen met het simulatieprogramma KASPRO blijkt dat per jaar ongeveer 100 liter water per vierkante meter tegen het kasdek condenseert. Dit getal wordt bevestigd door het geringe aantal beschikbare metingen. Bij condensatie komt energie vrij die eerder voor verdamping van water werd gebruikt, de latente warmte. Condensatie van 100 liter water komt overeen met een energie-equivalent van ca. 7,5m³ gas wat 15-20% van het jaarverbruik is. Door condensatie wordt de kaslucht ontvochtigd. Condensatie heeft ook invloed op de lichttransmissie.

In een klimaatruimte was een kleine kas gebouwd om het effect van condensatie tegen het kasdek te bepalen. Met deze kas is de lichttransmissie en de energiehuishouding van acht gangbare dekmaterialen bepaald.

De kasdekmaterialen werden onderzocht bij een temperatuurverschil binnen-buiten van respectievelijk 10 en 20°C en bij twee verschillende luchtcirculatiesnelheden in de kas.

De lichttransmissie van een gecondenseerd kasdek was gemiddeld 91% van de lichttransmissie van een droog kasdek. De variatie tussen de materialen was groot. Materialen waar geen lichtverlies door condensatie optreedt, kunnen de productie met enkele (3 à 4) procenten verhogen. Zowel een 'antidrop coating' als een oppervlaktestructuur kan ervoor zorgen dat er [vrijwel] geen lichtverlies optreedt bij condensatie tegen het kasdek. De schatting is dat door verhoging van de zonnestraling in de kas, de verwarmingsbehoefte een paar procenten kan dalen. Glas met een lichtverstrooiende oppervlaktestructuur heeft potentieel voor verhoging van de energie-efficiëntie, bovenop het diffunderende effect waarvoor de structuur wordt aangebracht. Of de structuur aan de binnen- dan wel buitenkant van het dek is aangebracht, heeft geen invloed op lichttransmissie maar wel op het energieverbruik. Wanneer de structuur aan de binnenkant van het dek is aangebracht, wordt het dek warmer en is het energieverlies enkele procenten hoger.

Hoeveel verdampingsenergie door het condensatieproces kan worden teruggewonnen is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen binnen en buiten. Er kan ongeveer 85% worden teruggewonnen bij een ΔT van 10°C en kan dalen tot 60% bij een ΔT van 20°C. Bij isolatiematerialen is het energieverlies lager en het effect van ΔT kleiner. Het energieverlies zit in de verwarming van het dek, waardoor de U-waarde van de kas hoger wordt, gemiddeld 16% bij het enkellaags kasdek en 12% bij de isolatiematerialen.

Een [te] geringe luchtbeweging kan een onnodig hoog vochtgehalte in de kas tot gevolg hebben, omdat het vocht onvoldoende in contact komt met het relatief koude kasdek. Luchtcirculatie verlaagt de vochtigheid in de kas doordat de condensatie wordt bevorderd en waarmee een groot gedeelte van de verdampingsenergie teruggewonnen kan worden. Dit komt bij het gunstige effect van vereffening van temperatuur- en vochtgradiënten en verwarming van het gewas (in het donker).

1 Inleiding

Condensatie tegen het kasdek is een bekend verschijnsel in de glastuinbouw. Uit berekeningen met het simulatieprogramma KASPRO blijkt dat per jaar ongeveer 100 liter water per vierkante meter tegen het kasdek condenseert. Dit getal wordt bevestigd door de schaarse beschikbare metingen (b.v. Van der Staaij en Douwes, 1996). Bij condensatie komt de energie weer vrij die eerder voor de verdamping van het water werd gebruikt, de latente warmte. Condensatie van 100 liter water komt overeen met een energie-equivalent van ca. $7,5\text{m}^3$ gas, oftewel 15-20% van het jaarverbruik. Door condensatie wordt de kaslucht ontvochtigd. Naast het effect van condensatie op energie en vocht, heeft het ook invloed op de lichttransmissie. Een kwantificatie van de overall-effecten van condensatie op energie en vocht is dus wenselijk (Figuur 0.).

Energie

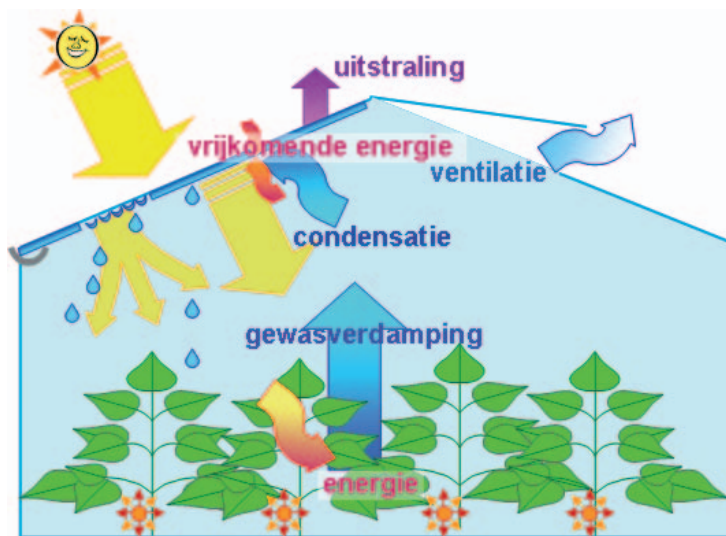
Een deel van de energie die bij condensatie vrijkomt, warmt het kasdek op. Een ander gedeelte van deze energie warmt het aangrenzende luchtlaagje op. Hoe deze verdeling is, is niet bekend. Daarnaast is niet bekend of en zo ja, hoe omgevingsfactoren van invloed zijn op de verdeling van de opwarming van het kasdek en het aangrenzende luchtlaagje. Voor de kasklimaatmodellen is het van belang om inzicht te krijgen in de condensatieprocessen. Het maakt uit of en hoeveel latente warmte terugkomt in de kaslucht. Condensatie tegen het kasdek wordt beïnvloed door de temperatuur van zowel de kaslucht als van het dek. Ook het luchtvochtgehalte speelt een rol dat weer wordt beïnvloed door de gewasverdamping en het buitenklimaat.

Lichttransmissie

Naast het energieverbruik beïnvloedt condens de lichttransmissie van het kasdek. Het effect van condensatie op de lichtopbrengst op gewasniveau is mogelijk afhankelijk van de vorm waarop condens zich tegen het kasdek afzet: als druppels of als uniform laagje. Ook de dikte van het waterlaagje en de druppelvorm/-grootte zijn van invloed.

Doelstellingen

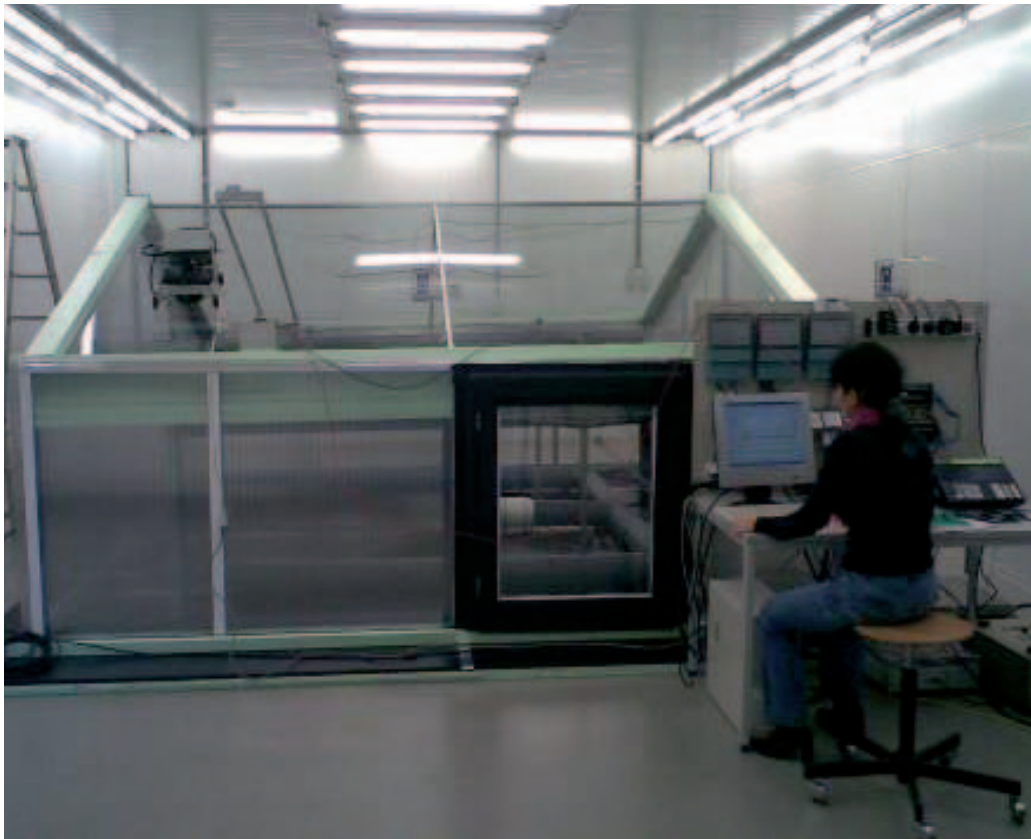
Is condensatie wenselijk of niet? Met dit onderzoek is meer inzicht op effecten van condensatie tegen de binnenkant van het kasdek verkregen evenals op vochthuishouding, energiegebruik en lichttransmissie. De resultaten kunnen leiden tot verbetering van klimaat- en lichtmodellen. Ook kunnen de resultaten mogelijk leiden tot scherpere eisen voor nieuwe kasdekmaterialen met betrekking tot het gewenste condensatiegedrag. Door onderzoek naar factoren die de condensatie beïnvloeden, wordt inzicht verkregen in de manier waarop het primaire energieverbruik kan worden verlaagd en de gewasproductie kan worden verhoogd.



Figuur 0. Vocht-, water- en energiestromen in een kas. De vorm van het condensatielaagje heeft invloed op de lichtdoorlatendheid van het kasdek

2 Materialen en Methoden

Een analyse van het condensatieproces is gegeven in bijlage I. Op basis van deze analyse werd gekozen voor een meetopstelling in een klimaatruimte waarin een modelkasje met een kap van een Venlokas was geplaatst (Figuur 1.). Met deze meetopstelling kon condensatie tegen het kasdek worden beïnvloed door sturing van de buitentemperatuur. Daarnaast kon in het kasje, door middel van een ventilator, ook het effect van luchtbeweging op de condensatielaag worden nagebootst. Door alle water- en energiestromen te meten kon het effect van condensvorming op energieverbruik worden geschat.



Figuur 1. Impressie van het kasje met de venlokap en de meetopstelling in de klimaatkamer

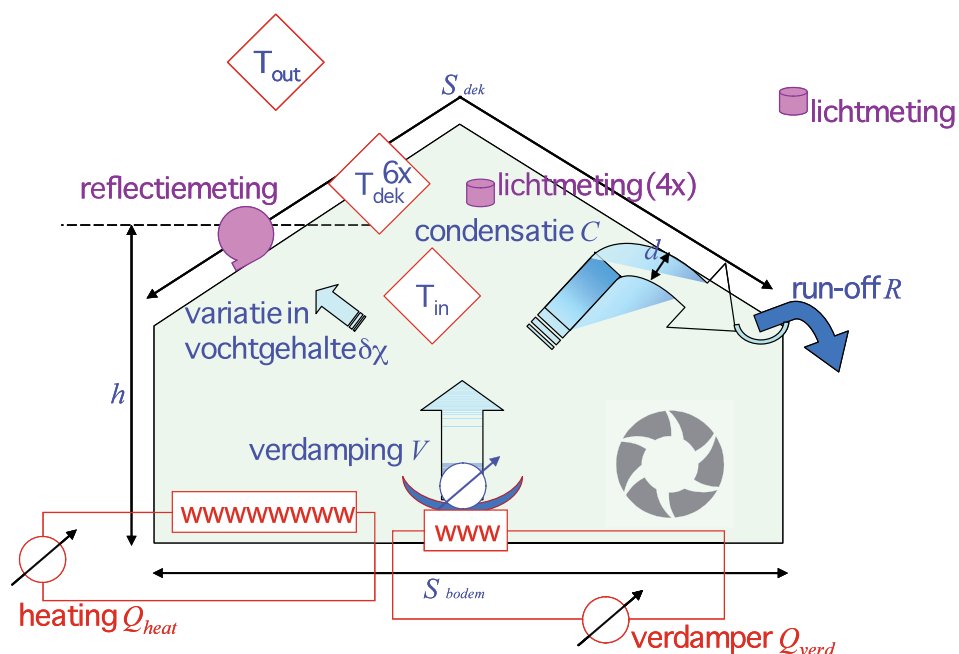
Het doel van het onderzoek is het bepalen van het effect van condensatie op de licht- en energiehuishouding van verschillende, gangbare dekmaterialen. De materialen werden geselecteerd op zowel hun lichteigenschappen (antireflectie(AR), diffuus, anti drop-behandeling) als op hun thermische isolatie (enkel- of dubbellaags uitvoering). De geteste materialen zijn weergegeven in Tabel 1.

Hierbij moet worden opgemerkt dat in de proefopzet twee verschillende behandelingen op AR-glas zijn opgenomen. Het betreft de behandeling waarbij de vorming van de dunne waterlaag (film-forming, hydrofiel) t.o.v. een standaard AR-coating zou worden onderzocht. De resultaten waren onverklaarbaar, ook na additionele metingen. Uiteindelijk bleek dat abusievelijk een kasdek met een hydrofobe behandeling is onderzocht in plaats van het door ons bestelde hydrofiel kasdek. Dit opgeloste probleem bevestigt dat ons meetsysteem goed functioneerde.

Bij het geteste diffuusglas treedt het verstrooiend effect op door een oppervlaktestructuur van kleine piramides die lichtverstrooiing veroorzaken. Omdat de structuur effect kan hebben op de vorming van de condenslaag, is dit materiaal met de structuur zowel naar binnen als naar buiten gericht gemeten.

Tabel 1. Specificatie van de geteste materialen. Het aantal tussenroeden geeft aan of het dek uit vier panelen bestond (één tussenroede, zie Figuur 1.) of uit zes panelen (twee tussenroeden). Het diffuusglas is gemeten met de structuur zowel naar buiten als naar binnen

Materiaal	Leverancier	Merksnaam	tussen roeden
Gehard Floatglas		LT 89,5%	1
AntiReflectieglas AR 4mm	Glascom	GroGlass	1
Diffuus glas 70% haze	Vetrad	Vetrasol 503	2
AntiReflectieglas Hydrofoob AR 4mm	CENTROSOLAR Glas GmbH & Co. KG	Centrosolar HiT-C Hydrophobic	3
Isolatieglas (dubbelglas) 4+8+4 mm gemaakt uit Floatglas			2
Isolatieglas (dubbelglas) 4+8+4 mm gemaakt uit Hydrofoob AR glas	CENTROSOLAR Glas GmbH & Co. KG		3
PolyCarbonaat 16mm 3-wandig	Kascoplex	PC Sunlite 16/3W UV helder	3
PolyCarbonaat 16mm 3-wandig met antidropcoating	Kascoplex	PC Sunlite 16/3W UV helder no drop	3



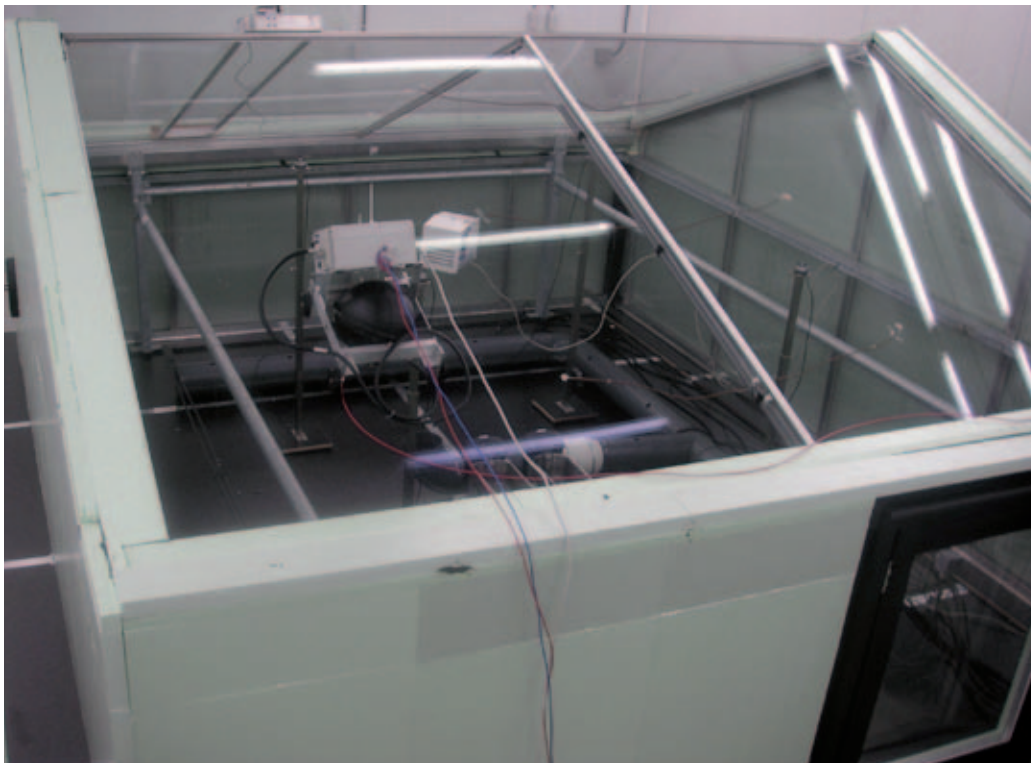
Figuur 2. Schematische weergave van het meetprincipe. De verdamping kon gestuurd en gemeten worden. De temperatuur en luchtvochtigheid binnen en buiten het kasje werden zowel geregeld als gemeten, de dektemperatuur werd op zes plekken gemeten. De lichtdoorlatendheid werd met vijf PAR-sensors gemeten: één buiten en vier binnen in het kasje. Ook de reflectie van het kasdek is van twee materialen gemeten. Een ventilator met variabel toerental zorgde voor voldoende luchtmenging in het kasje. Aanpassing van het toerental beïnvloedde de luchtcirculatie in het kasje. Daarnaast werd de benodigde energie voor de temperatuurhandhaving in het kasje en voor de verdampers gemeten. Ook werd de hoeveelheid condenswater geregistreerd

2.1 De meetopstelling

2.1.1 Kasconstructie

De P.L.J. Bomgroep plaatste het kasje voor de metingen van ongeveer 3,33m x 4,00m met nokhoogte 1,95m op een met styropur en betonplex geïsoleerde vloer in de klimaatcel. Het dek van het kasje bestond uit vier platen van het te meten materiaal, ieder met een afmeting van 1,67x2,12m. Enkele materialen waren niet te verkrijgen in deze afmetingen, zodat voor deze materialen zes platen nodig waren, zie Tabel 1. Die zijn als laatste gemeten, na een aanpassing van de constructie met twee middenbalken per kant.

Het meetprincipe was om gecontroleerd verdamping te verkrijgen, en de condities binnen en buiten het kasje nauwkeurig te volgen. In Figuur 2. is schematisch het meetprincipe weergegeven met de daarbij vereiste metingen. In Bijlage III zijn tekeningen met de exacte afmetingen van het kasje opgenomen. De wanden waren opgebouwd uit vijf-wandige 16mm PolyCarbonaat (PC)-plaat die aan de buitenkant eveneens met styropur waren bekleed, om te zorgen dat condensatie slechts aan het kasdek op zou treden (Figuur 3.). De deur bevatte een raam met dubbel glas. Mogelijke koudebruggen en lekken bij de kasconstructie waren met isolatiemateriaal ondervangen. Het metaal van het kasdeurtje was afgedekt met Armaflex.

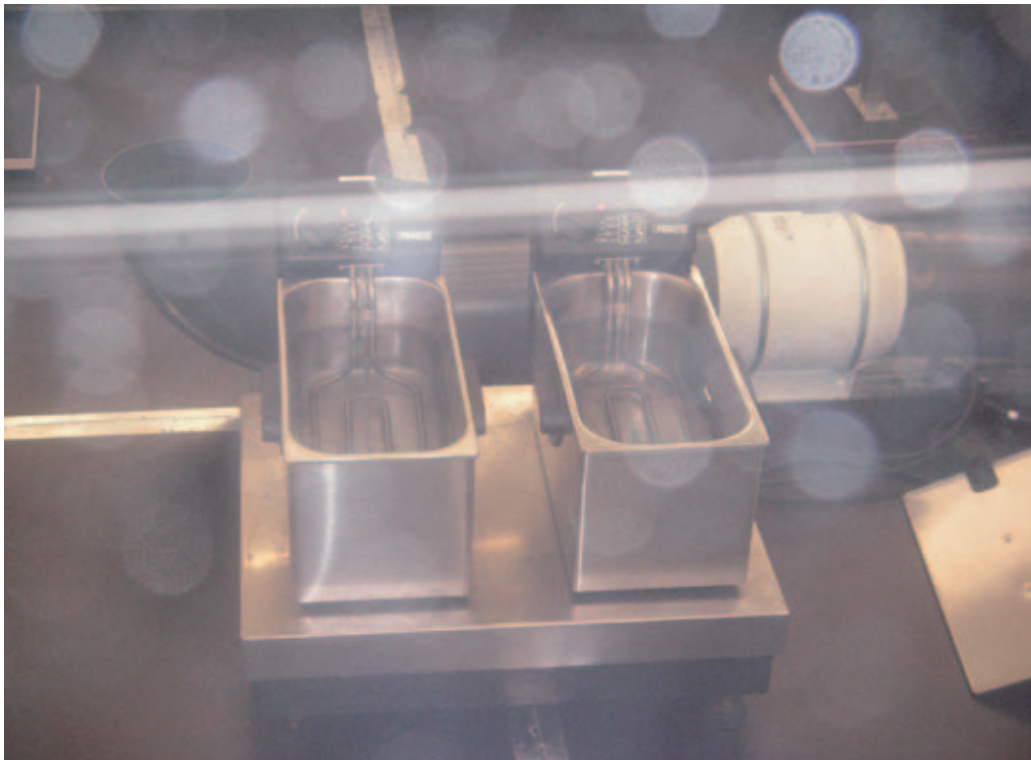


Figuur 3. De panelen van het dek (vier of zes) werden vervangen. De zijwanden waren uitgevoerd met vijf-wandige 16mm PolyCarbonaat (PC)-plaat om maximale thermische isolatie te waarborgen. Alles behalve het kasdek was bekleed aan de buitenkant met styropur om zeker te zijn dat condensatie alleen aan het dek plaats kon vinden. Symmetrisch om de middenbalk zijn de zes thermokoppels voor het meten van dektemperatuur zichtbaar. De vier PAR-meters waren ieder op een standaard gemonteerd. Twee ervan zijn links boven en midden rechts op de foto te zien. De "meetbol" voor de reflectiemeting staat op het linker glasdek

2.1.2 Klimaat in de kas

Met een bedieningspaneel buiten de kas werd het klimaat in de kas ingesteld. Een thermostaat (ELS TK IP66) regelde de ingestelde temperatuur door twee verwarmingselementen (ieder 2000W) aan te sturen. De verwarmingselementen hingen dwars op de nok ca. 60cm boven de grond. In het midden van het kasje stonden de verdamper. Dit waren twee in serie geschakelde frietpannen (Princess, 3L en ieder 2,2KW) die op een weegschaal stonden (Mettler MultiRange ID5), zie Figuur 4. De pannen werden met gedestilleerd water gevuld. Voor een goede verdeling van de luchtvochtigheid zoog een traploos regelbare ventilator (S&P TD-500, 50W, \varnothing 160mm, opbrengst zonder tegendruk $180\text{m}^3/\text{uur}$; bij een tegendruk van 50 Pa $110\text{m}^3/\text{uur}$) lucht uit het midden van het kasje aan. De lucht werd via een PVC-buis (ca. 1,5m lang, parallel met de nok) door de ventilator geleid. Na de ventilator splitste een T-stuk de lucht op ca. 0,5m voor de gevelwand. Beide buizen maakten ieder ca. 50cm voor de wand een bocht zodat ook bij de beide zijwanden, parallel aan de nok, de lucht werd gemengd. De ventilator en de buizen stonden op de grond. De PVC-buizen hadden na het T-stuk, regelmatig verdeeld over de bovenkant, gaten van \varnothing 0,04m. Door deze buizen met gaten trad een aanzienlijke tegendruk op. De opbrengst op volle toeren (stand 10) is ingeschat op ongeveer $100\text{m}^3/\text{uur}$, wat resulteert in een geschatte luchtsnelheid van ongeveer 15cm/s.

Om na afloop van een condensatieproef de kas sneller te ontvochtigen was in de zijwand van het kasje een ontluchtungsventilator (ITHO type VWS 250, 115W) gemonteerd. De ontluchtungsventilator heeft een capaciteit zonder tegendruk van $1700\text{m}^3/\text{uur}$ en $1400\text{m}^3/\text{uur}$ bij een tegendruk van 40Pa.



Figuur 4. De in twee serie geschakelde verdamper op de weegschaal

Op het bedieningspaneel waren drie kWh-meters (Landis & Gyr, DFS) gemonteerd, om het energieverbruik voor verwarming, verdamping en de ventilator afzonderlijk te kunnen meten. Ook de datataker (datataker 500 series 2) was op het bedieningspaneel gemonteerd. De datataker was aangesloten op de computer die op de tafel stond, zie Figuur 5.

2.1.3 Klimaatkamer

De klimaatkamer is van de Agrotechnology & Food Sciences Group, Wageningen UR. De temperatuur en luchtvochtigheid van deze kamer was in te stellen. De laagste in te stellen temperatuur was 13,5°C. Aan het plafond waren, in drie rijen, TL-lampen aangebracht. Langs iedere lange kant één rij en een rij in het midden. De lichtintensiteit van deze TL-buizen was traploos regelbaar.



Figuur 5. Links boven de energiemeters van de verwarming van het kasje, de verdamper en de ventilator, rechtsonder de uitleesunit van de weegschaal waarmee de verdamperen werden gewogen, achter de monitor rechts de data taker

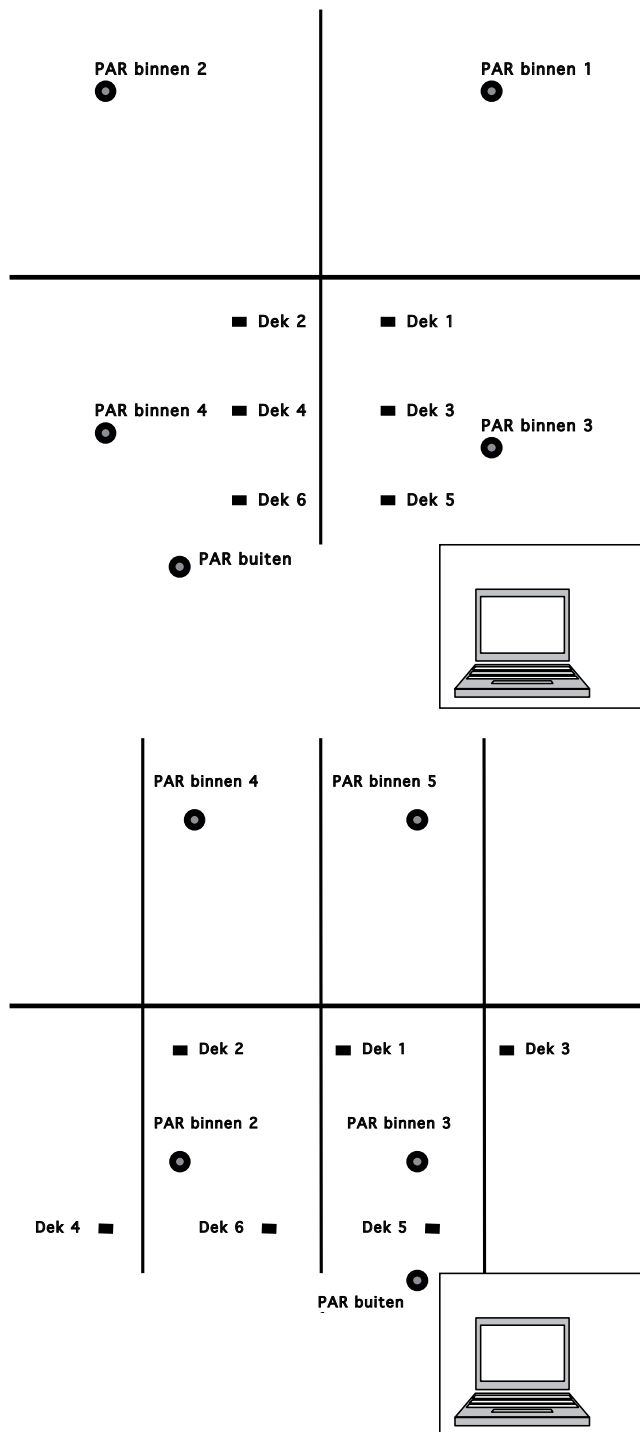
2.1.4 Behandelingen

Om het effect van een waterlaag op het energieverlies van de kas te kunnen beoordelen, is gevarieerd met de warmteoverdrachtcoëfficiënt (U-waarde). Dit gebeurde door te variëren met: het temperatuurverschil binnen- buiten en de luchtsnelheid in de kas. Om condensatie tegen het kasdek te realiseren, was het nodig om de ventilator minimaal op 50% (stand 5) in te stellen. De behandelingen waren stand 5 (geschatte luchtsnelheid van 7,5cm/s) en de maximale stand 10 (geschatte luchtsnelheid 15cm/s). De verwachting is dat dit een effect van ca. 10% op de U-waarde van het kasje heeft. De luchtsnelheid in de klimaatkamer kon niet variëren. Variatie ervan zou meer effect kunnen hebben op de U-waarde van het kasje. De klimaatkamer kon niet lager koelen dan 13°C, zodat 20°C het maximaal haalbare temperatuurverschil was. De temperatuurbehandelingen waren respectievelijk $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ en $\Delta T = 10^\circ\text{C}$. Dit temperatuurverschil kan de U-waarde veranderen met 15 á 20%. De verwachting was dat deze behandelingen de vorm van de condenslaag konden beïnvloeden met als gevolg een verandering in lichtdoorlatendheid. Ook is onderzocht of de lichtdoorlatendheid van het kasdek veranderde.

2.2 Metingen

2.2.1 Temperatuur en luchtvochtigheid

Om het condensatieproces goed te volgen werden temperatuur en luchtvochtigheid gemeten. De temperatuur van het kasdek werd geregistreerd met zes thermokoppels, op evenredig verdeelde afstanden op twee/drie glasplaten bevestigd (Figuur 6.). In het midden van het kasje hing een Priva-meetbox met een natte en een droge bol. Een tweede Priva-meetbox was buiten het kasje opgehangen.



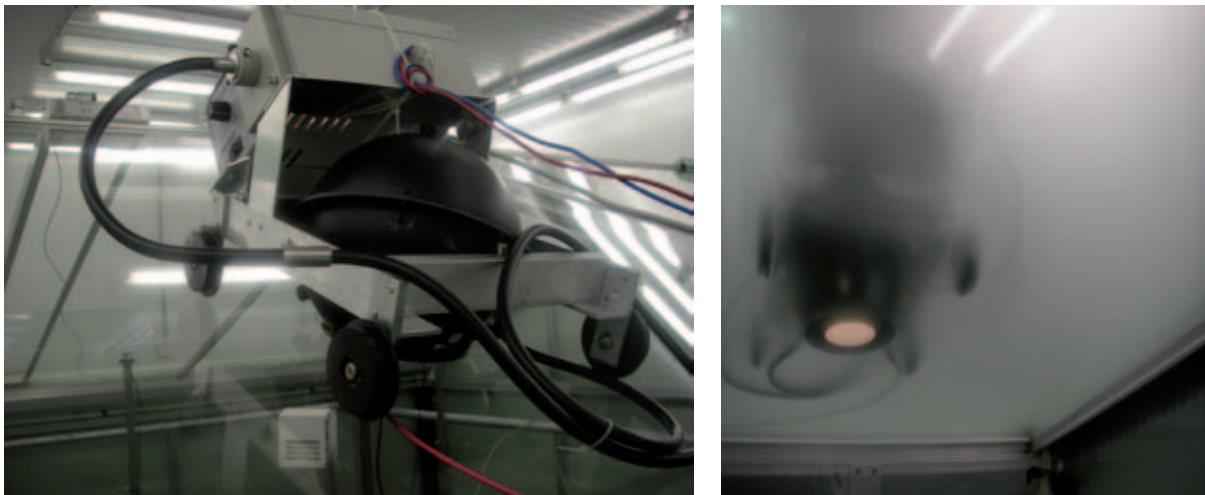
Figuur 6. Schematische weergave van de plaats van de temperatuur- en lichtmetingen op het kasdek. Boven: meetopstelling voor vier platen en onder voor zes platen

2.2.2 Licht

In het kasje was in het midden van iedere glasplaat op goothoogte een PAR-meter opgesteld (zie Figuur 3.). Buiten het kasje was ook een PAR-meter opgesteld. Door zowel de lichtintensiteit binnen als buiten te meten kon daar later de lichtdoorlatendheid uit worden berekend. Een schematische weergave van de metingen is gegeven in Figuur 6.

2.2.3 Reflectiemeting

Naast de lichtdoorlatendheid werd ook de lichtreflectie gemeten. Door condenserende waterdruppeltjes tegen het kasdek neemt de lichtreflectie toe met een lagere lichtdoorlatendheid als gevolg. De reflectiemeter was een "Ulbricht" bol, \varnothing 30cm, die met de opening over het glasdek heen schoof. De bol heeft een eigen lichtbron en lichtmeter. Het principe van de meting is verklaard in Bijlage II. De bol was gemonteerd op een frame met wieltjes waar ook de lichtbron op gemonteerd zat. Het frame bewoog met een oprolmechanisme op en neer over het glasdek (zie Figuur 7.). Handmatig kon het frame naar een andere glasplaat worden verplaatst. Per meting bleef de reflectiemeter op een vaste plaats staan. Tijdens de verschillende condensatieproeven werd de reflectiemeter op verschillende plaatsen opgesteld.



Figuur 7. De reflectiemeter. Links: boven op het dek; rechts: van binnenuit gezien bij het beslaan van het dek

2.3 De uitgevoerde reeksen

Een overzicht van de uitgevoerde metingen is in Tabel 2 gegeven. Om de warmte- en massaoverdracht-coëfficiënt van het kasdek te kunnen beïnvloeden, is gevarieerd met het temperatuurverschil binnen-buiten (ΔT) en met de stand van de ventilator in het kasje. Elke combinatie is, bij alle materialen, minimaal in duplo uitgevoerd. Omdat de reflectiemeting in het donker betrouwbaarder zou zijn dan in een lichte omgeving, zijn tijdens de eerste reeks (2008) relatief veel metingen in het donker uitgevoerd. Hierdoor was het niet mogelijk om achteraf de transmissie te berekenen met de opgestelde PAR-meters. In 2008 is de reflectiemeting te vaak uitgevallen, zeker aan het begin. Daarom zijn in de eerste serie metingen alle reeksen zowel in het donker als in het licht uitgevoerd. Herhaling van dezelfde procedure met de zes materialen van de tweede serie zou de meetperiode té kostbaar maken, omdat de klimaatcel werd gehuurd. Daarom zijn de reflectiemetingen alleen bij het standaard enkel glas en het gecoate AR-glas uitgevoerd. Daarnaast zijn door een fout in het programma de energiemetingen tot 10 juni 2008 niet correct uitgevoerd. Tussen twee reeksen in is een meting zonder dek uitgevoerd om de lichtsensoren te controleren.

Glas type	ΔT , °C	fan	TL lampen	Datum (jjjj mm dd)
Standaard gehard Floatglas	10	5	Aan, niveau 8	2008 05 15
	20	5	uit	2008 05 19
	10	5	Aan, niveau 3	2008 05 20
	10	5	uit	2008 05 28
	20	5	uit	2008 05 29
	10	1	uit	2008 05 30
	10	5	Aan, niveau 3	2008 06 03
	10	5	Aan, niveau 10	2008 06 10
	10	5	uit	2008 06 16
	20	5	uit	2008 06 17
	10	1	Aan, niveau 10	2008 06 19
	10	5	Aan, niveau 10	2008 07 03
	20	5	Aan, niveau 10	2008 07 04
	20	5	Aan, niveau 10	2008 07 08
	Zonder dek, PAR meting			Aan, niveau 10
AntiReflectie Glas (Glascom)	10	5	Aan, niveau 10	2008 07 14
	10	5	uit	2008 07 15
	10	5	uit	2008 07 16
	20	5	uit	2008 07 17
	20	5	uit	2008 07 18
	10	5	Aan, niveau 10	2008 11 11
	10	5	Aan, niveau 10	2008 11 14
	20	5	Aan, niveau 10	2008 11 18
	10	10	Aan, niveau 10	2008 11 20
	10	5	Aan, niveau 10	2008 11 21
	10	10	uit	2008 11 25
	20	10	Aan, niveau 10	2008 11 27
	20	10	Aan, niveau 10	2008 11 28
	10	10	Aan, niveau 10	2008 12 02
Diffuus Vetrasol 503 structuur naar binnen	10	5	10	2009 04 10 ochtend
	10	5	10	2009 04 10 middag
	10	10	10	2009 04 14
	10	10	10	2009 04 15
	20	5	10	2009 04 16
	20	5	10	2009 04 17
	20	10	10	2009 04 20
	20	10	10	2009 04 21
Diffuus Vetrasol 503 structuur naar buiten	10	5	10	2009 04 23
	10	5	10	2009 04 24
	10	10	10	2009 04 27
	10	10	10	2009 04 28
	20	5	10	2009 04 29
	20	5	10	2009 05 01
	20	10	10	2009 05 04
20	10	10	2009 05 05	

Glas type	ΔT , °C	fan	TL lampen	Datum (jjjj mm dd)
PolyCarbonaat 16mm No antidrop	10	5	10	2009 05 08 ^{1,2}
	20	10	10	2009 05 11
	20	10	10	2009 05 12
	20	5	10	2009 05 13
	20	5	10	2009 05 14
	20	10	10	2009 05 15
	20	10	10	2009 05 18
PolyCarbonaat 16mm Antidrop	20	10	10	2009 05 22
	20	10	10	2009 05 25
	20	5	10	2009 05 27
	20	5	10	2009 05 28
	20	5	10	2009 05 29
	20	10	10	2009 06 02
	20	5	10	2009 06 05
Standard double glass	20	10	10	2009 06 12
	20	10	10	2009 06 15
	20	10	10	2009 06 16
	20	5	10	2009 06 17
	20	5	10	2009 06 18
	20	5	10	2009 06 25
	20	5	10	2009 06 26
Hydrophobic AR coating single glass	20	10	10	2009 07 02
	20	10	10	2009 07 03
	20	5	10	2009 07 06
	20	5	10	2009 07 07
	10	10	10	2009 07 08
	10	10	10	2009 07 09
	10	5	10	2009 07 10
	10	5	10	2009 07 13
Hydrophobic AR coating single glass	20	5	10	2009 07 16 ³
	20	5	10	2009 07 17
	20	5	10	2009 07 21 ⁴
	20	10	10	2009 07 22
	20	10	10	2009 07 23
	20	5	10	2009 07 27

Tabel 2. Samenvatting van de uitgevoerde metingen. ΔT is het temperatuurverschil binnen- buiten in °C, de volgende twee kolommen geven het niveau van respectievelijk de ventilator in het kasje en de belichting in de cel. In beide gevallen was 10 de maximum stand.

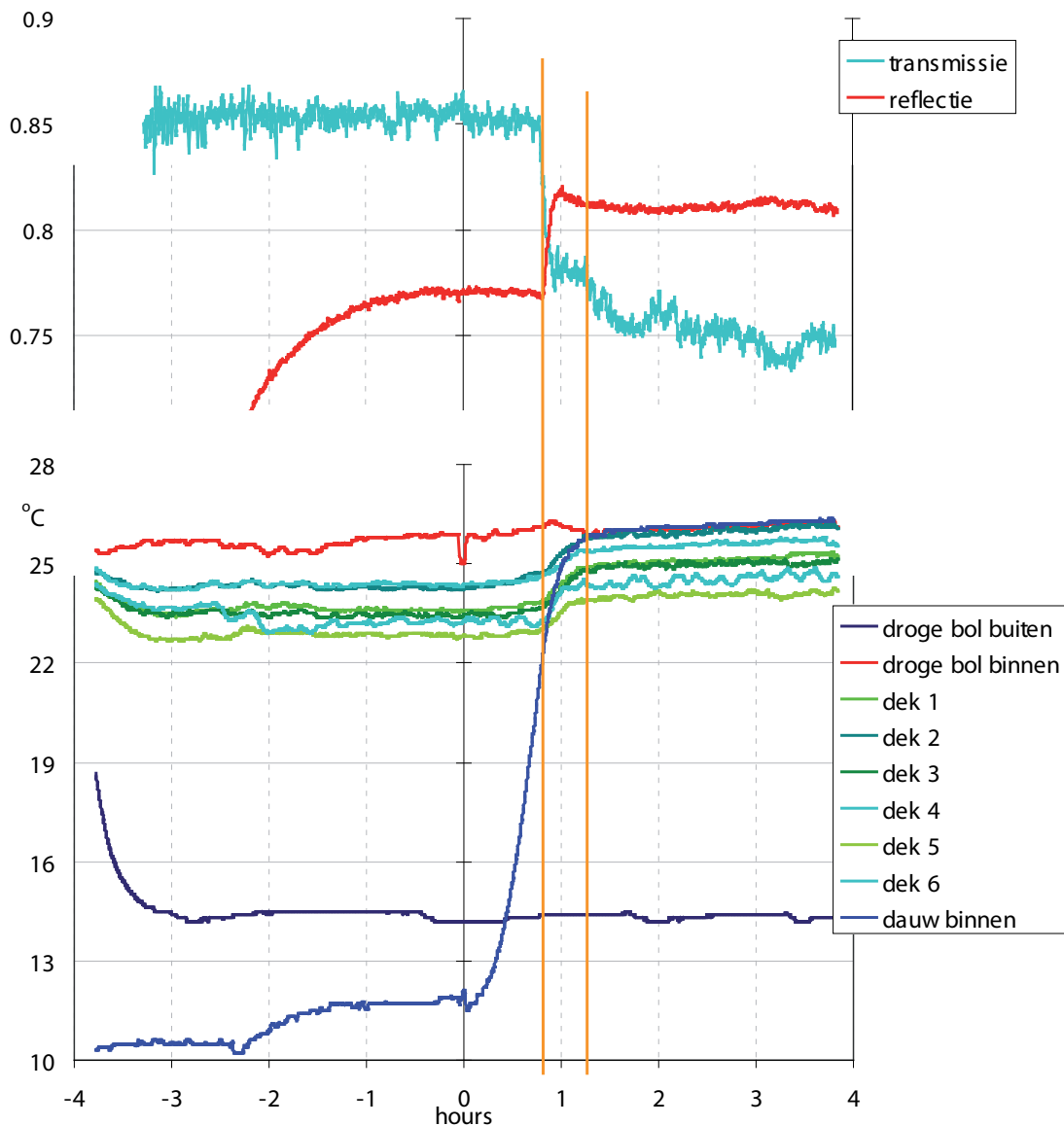
1 Vanaf deze datum is gewerkt met zes platen per dak, dus met twee middenbalken.

2 Na afloop van de meting bleek dat overal condens was gevormd en zeker meer op de vloer dan op het kasdek. Dat betekende dat de temperatuur aan de binnenkant van het kasdek warmer was dan de vloer temperatuur. Daarom zijn bij dubbele materialen alleen metingen uitgevoerd met een temperatuurverschil van 20°C.

3 Twee platen waren abusievelijk ondersteboven gemonteerd, wat geen invloed heeft gehad op de resultaten, zoals later bleek.

4 Alle platen weer goed gemonteerd.

2.4 Dataverwerking

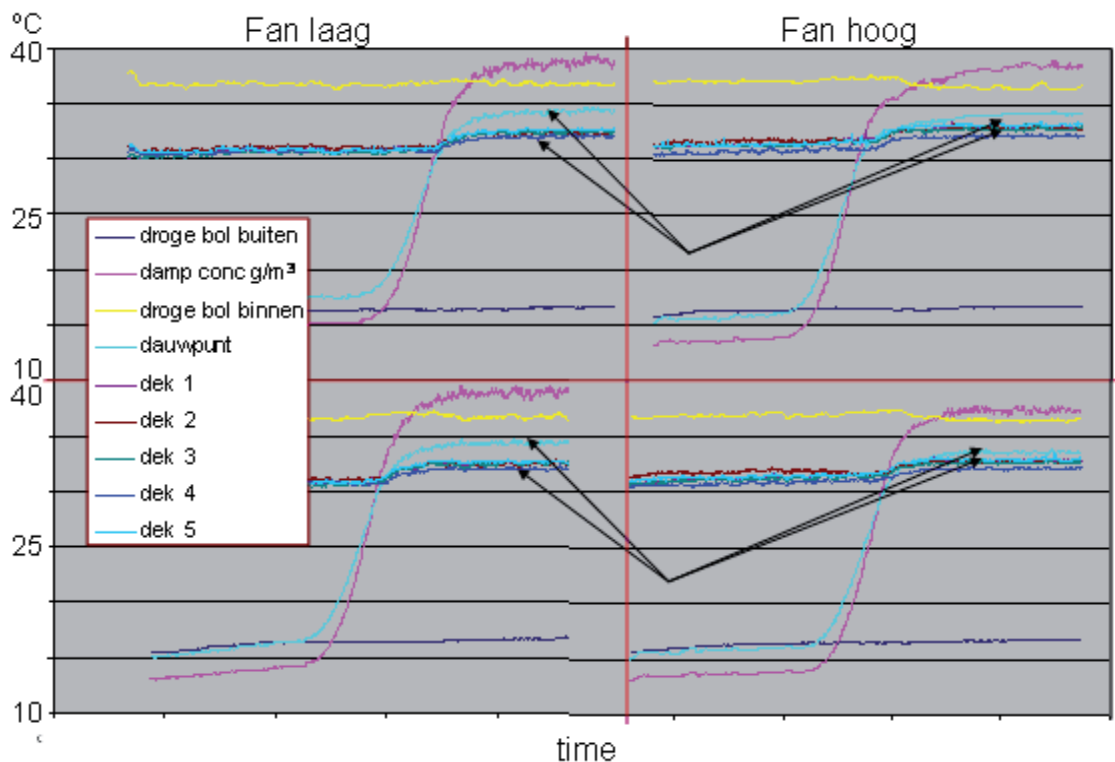


Figuur 8. Verloop van een meting. Op tijdstip 0 ($T=0$) worden de verdamper gestart. Ongeveer vier uur voor $T=0$ werd de apparatuur ingeschakeld om een stabiele situatie te krijgen bij het gewenste temperatuurverschil bij het kasdek. Vervolgens werd ongeveer vier uur na $T=0$ gemeten om voldoende metingen te hebben in de stabiele, vochtige situatie. Het dauwpunt is berekend uit droge en natte bol gemeten in het kasje, de lichtdoorlatendheid (bovenste grafiek is berekend uit het gemiddelde van de vier PAR-sensors binnen). De reflectie is op dezelfde tijdas kwalitatief weergegeven. De oranje lijnen geven de tijd aan dat condens zich vormde op het kasdek, en de lichtdoorlatendheid afnam

Figuur 8. laat het verloop van een meting zien. Bij $T=0$ worden de verdamper aangezet. Vier uur hierna ontstond een stabiele situatie voor metingen bij de gewenste temperaturen binnen en buiten het kasdek. Het dauwpunt is berekend uit droge en natte bolmetingen in het kasje, de lichtdoorlatendheid (zie bovenste grafiek) is berekend uit het gemiddelde van de vier PAR-sensors binnen. Het is interessant om te zien dat het effect op lichtdoorlatendheid en reflectie zichtbaar is zodra het dauwpunt de "eerste" dektemperatuur heeft "ingeaald".

Voldoende luchtmenging zorgt ervoor dat de aanwezige waterdamp snel in contact wordt gebracht met het relatief koude dek en daar condenseert. Er blijft een maximale hoeveelheid waterdamp in de lucht, wat betekent dat—als het evenwicht weer bereikt wordt— het dauwpunt van de lucht vrijwel gelijk is aan de temperatuur van het dek. Bij een geringere lucht-menging kan in de meetbox middenin het kasje een hogere waterdampconcentratie optreden dan in het luchtlaagje bij het dek, waar condensatie optreedt. Dat is te zien in Figuur 9., waarbij het verloop bij ventilatorstand 5 (links) en 10 (rechts) wordt getoond.

Vergelijking van de positie van het dauwpunt ten opzichte van luchttemperatuur in het kasje in Figuur 8. ($\Delta T = 10^\circ\text{C}$) en Figuur 9. ($\Delta T = 20^\circ\text{C}$), laat zien dat afvoer van waterdamp in het tweede geval, hoog genoeg was om te waarborgen dat het lucht in het kasje niet verzadigde, terwijl dit wel het geval is bij een $\Delta T=10^\circ\text{C}$ (Figuur 8.). Dit is niet nieuw: het is al lang bekend dat bij een koud kasdek het kasklimaat droger is.



Figuur 9. Van vier metingen is weergegeven: het temperatuurverloop binnen, buiten en van zes plekken op het kasdek, de waterdampconcentratie en het dauwpunt binnen. Het tijdsinterval tussen streepjes op de X-as is 2 uur. Eerst wordt gedurende een paar uur “droog” gemeten, waarbij de temperatuur zowel binnen als buiten het kasje stabiel wordt. Daarna worden de verdampers aangezet en neemt de vochtconcentratie (roze lijn) in het kasje toe, tot er een nieuw evenwicht ontstaat en er evenveel waterdamp condenseert als verdampt. De metingen links zijn uitgevoerd met een lage en rechts met een hoge ventilatorstand. De onderste twee figuren zijn een herhaling (met dezelfde omstandigheden) van de metingen boven, ΔT was overal 20°C . Bij geringe luchtmenging (links), kan het dauwpunt in de meetbox aanzienlijk hoger zijn dan de dektemperatuur

Onder stabiele omstandigheden vóór en ná het aanzetten van de verdampers, werd het volgende bepaald: de gemiddelde doorlatendheid van het dek; de gemiddelde reflectie van het dek en de gemiddelde U-waarde van het kasje.

De laatste wordt als volgt berekend:

$$U = \frac{Q_{heater} + Q_{verdampers}}{A_{kas} (T_{binnen} - T_{buiten})} \quad \text{W m}^{-2} \text{K}^{-1} \quad (1)$$

Waarbij:

Q_{heater} het energieverbruik (gemiddeld per seconde over het interval) van de verwarming van het kasje is,
 $Q_{verdampers}$ het energieverbruik (gemiddelde per seconde over het interval) van de verdampers is,
 A_{kas} het vloeroppervlak van het kasje, nl. 14 m² is en
 T_{binnen} en T_{buiten} respectievelijk de gemiddelde binnen- en buitentemperatuur over het interval zijn.

De verdampers geven warmte af, naast de energie die voor de verdamping, Q_{latent} wordt gebruikt. Q_{latent} wordt berekend uit de gewichtsafname van de verdamper. Als door condensatie alle verdampingsenergie aan de kas teruggegeven zou worden, dan zou er geen verschil zijn in de U-waarde. Echter een fractie, F, van de energie gaat via het verwarmen van het dek naar buiten. Een berekeningswijze hiervoor is in Bijlage I (vergelijking I.8) gegeven. Het bleek dat het temperatuurverschil tussen het dek en de lucht in het kasje heel klein was (zie figuur 9.), waardoor een relatief grote fout optrad bij de berekening van de interne warmteoverdrachtscoëfficiënt. Een alternatieve berekeningswijze voor de fractie verdampingsenergie die niet in de kas terugkomt is:

$$F = \frac{(Q_{heater} + Q_{verdampers})_{nat} - (Q_{heater})_{droog} \frac{\Delta T_{nat}}{\Delta T_{droog}}}{Q_{latente}} \quad - (2)$$

Waarbij:

De aanduidingen droog en nat betrekking hebben op de evenwichtsperiode in respectievelijk droge en natte omstandigheden. ΔT Staat voor het temperatuurverschil binnen – buiten. Omdat het verschil kan variëren, wordt de energiebehoefte hiervoor gecorrigeerd.

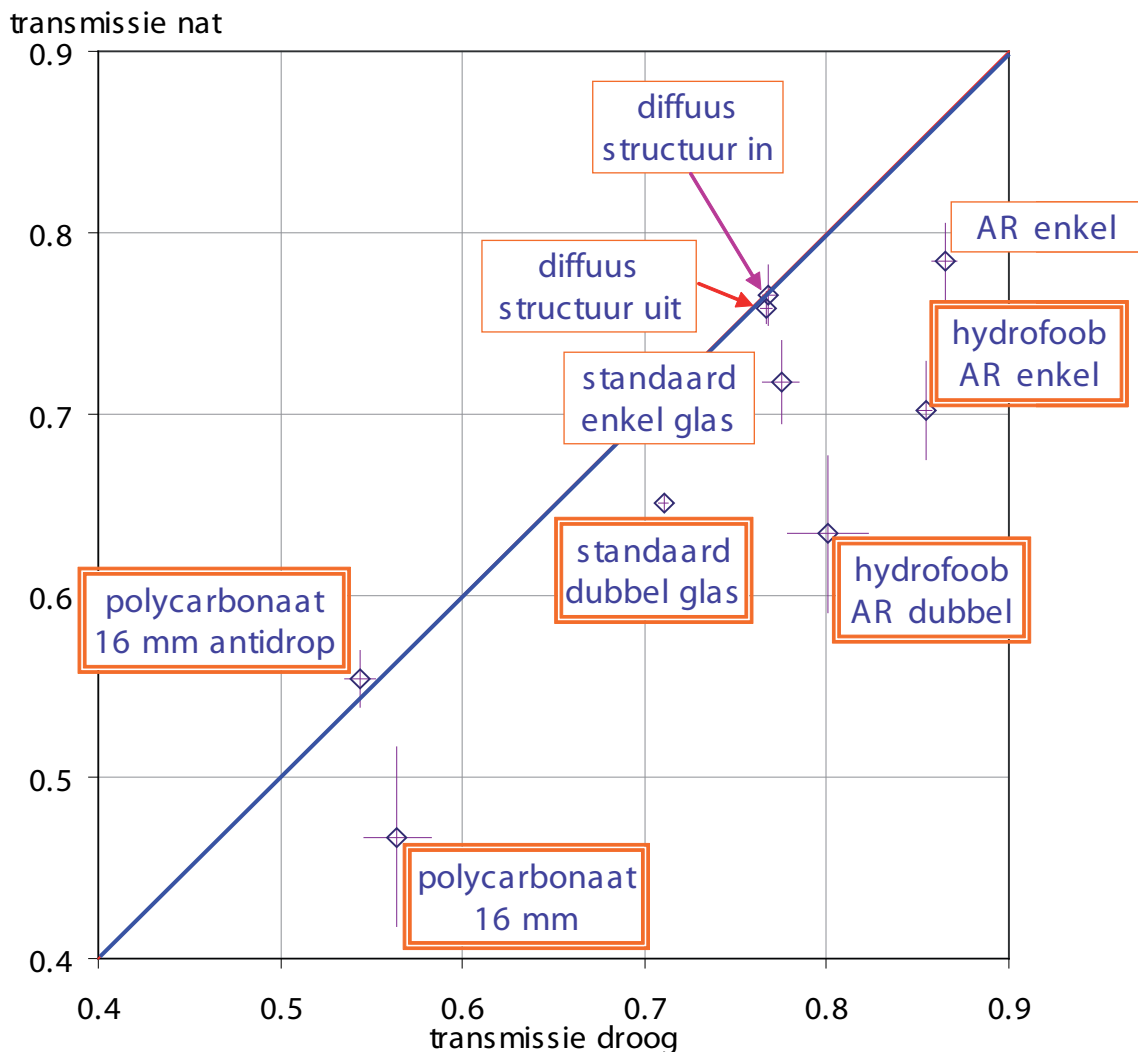
Door lucht- en waterdampverlies uit het kasje, zou de energiebalans die in vergelijkingen 1 en 2 wordt verondersteld, minder kunnen kloppen. Hiervoor is als volgt geredeneerd: Noch het nat zijn, noch de omstandigheden binnenin het kasje hebben invloed op de warmteoverdrachtcoëfficiënt van het dek naar buiten. Dus dezelfde hoeveelheid energie moet door het dek gaan in de volgende twee gevallen:

$$\frac{(Q_{heater} + Q_{verdampers})_{nat}}{(T_{dek} - T_{buiten})_{nat}} = \frac{(Q_{heater})_{droog}}{(T_{dek} - T_{buiten})_{droog}} \quad \text{W m}^{-2} \text{K}^{-1} \quad (3)$$

Wanneer vergelijking (3) niet klopt, is dit een indicatie dat er buiten het dek energieverlies optreedt.

3 Resultaten

3.1 Lichtmetingen

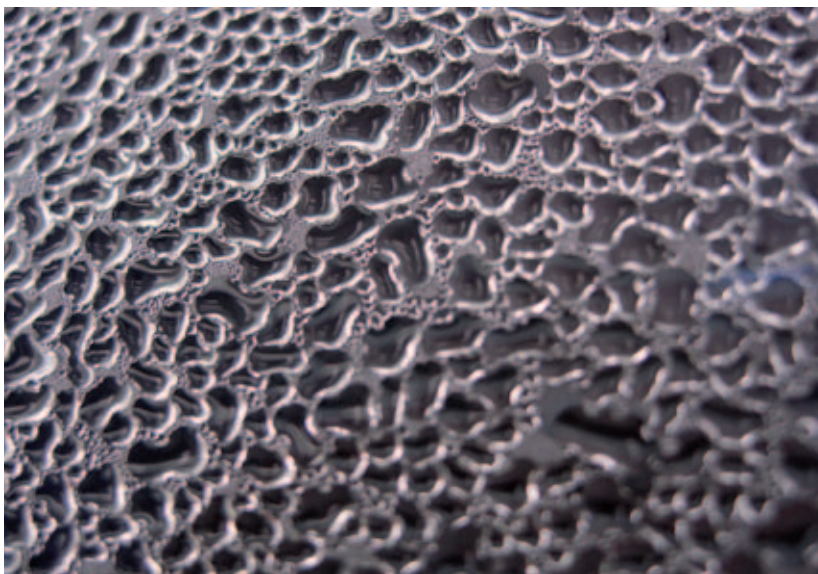
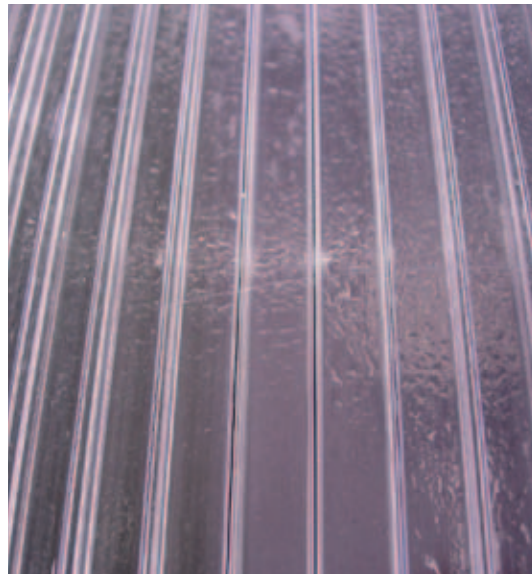
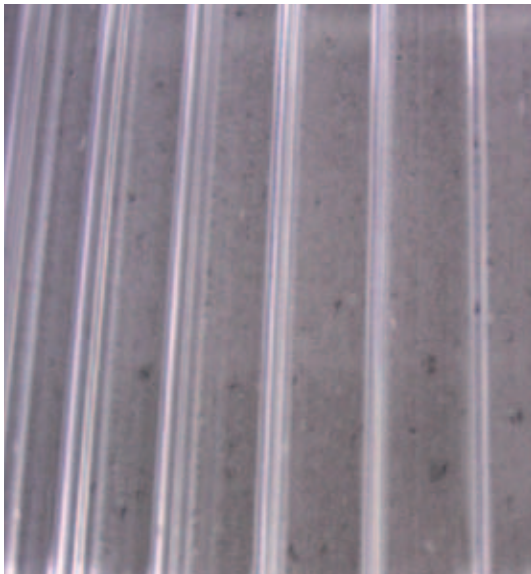


Figuur 10. Samenvatting van alle lichtmetingen. Per materiaal is het gemiddelde van alle transmissiemetingen gegeven nadat evenwicht in condensatie was opgetreden uitgezet tegen het gemiddelde van alle transmissiemetingen bij een droog dek. De horizontale en verticale lijnen per meetpunt geven de standaardafwijking van de betreffende meting aan, waarbij het belangrijk is om op te merken dat de variatie in natte toestand ook het gevolg is van onze behandelingen. Dit kan verklaren waarom de verticale lijnen langer zijn dan de bijbehorende horizontale lijn. De dubbele omkadering geeft aan dat het dek twee tussenbalken had i.p.v. één, wat de gemeten lichtdoorlatendheid mogelijk met een paar procent vermindert

Over alle metingen genomen, was de transmissie van het dek met condens gemiddeld 91% ten opzichte van transmissie van een droog dek.

Alle beschikbare metingen zijn samengevat in Figuur 10. Het moet duidelijk zijn dat de bepaling van de transmissie niet volgens de normen is gebeurd en zullen de absolute waarden met enige terughoudendheid bekeken moeten worden. Zeker wanneer materialen worden vergeleken die met één dan wel twee tussenbalken zijn gemeten.

Het valt op dat er voor twee materialen geen afname is in lichttransmissie bij een kasdek met condens. Dit is een bevestiging van de antidropeffect-behandeling op polycarbonaat (Figuur 11., boven). Meer onverwacht is het uitblijven van een condensatie-effect op de lichtdoorlatendheid van het gestructureerde diffuusglas. Ook valt op dat de positie van de condenslaag met betrekking tot de structuur geen effect heeft op de lichtdoorlatendheid (Figuur 11., midden). Het diffunderende effect van dit materiaal wordt bereikt door de meervoudige verstrooiing van de piramidale structuurtjes. Het lijkt erop dat het licht dat door de waterdruppeltjes wordt gereflecteerd, door de structuur wordt opgevangen en uiteindelijk toch in de kas komt.



*Figuur 11. Boven: condenslaag op kanaalplaat zonder (links) en met (rechts) antidropbehandeling
Midden: condenslaag op de diffuusglas met structuur naar binnen (links) en naar buiten (rechts)
Onder: close-up van de condensvorming op het hydrofobe AR-glas*

Met condens tegen het dek laat AR-glas 8% minder licht door in vergelijking tot een standaard glas wat 6% minder licht doorlaat, uiteraard is de lichtdoorlatendheid van ARglas gemiddeld hoger dan van standaardglas. Dit is te verklaren door de aanwezigheid van de laag hoog reflecterende druppeltjes die de werking van de AR-coating gedeeltelijk teniet doet (Figuur 11., onder).

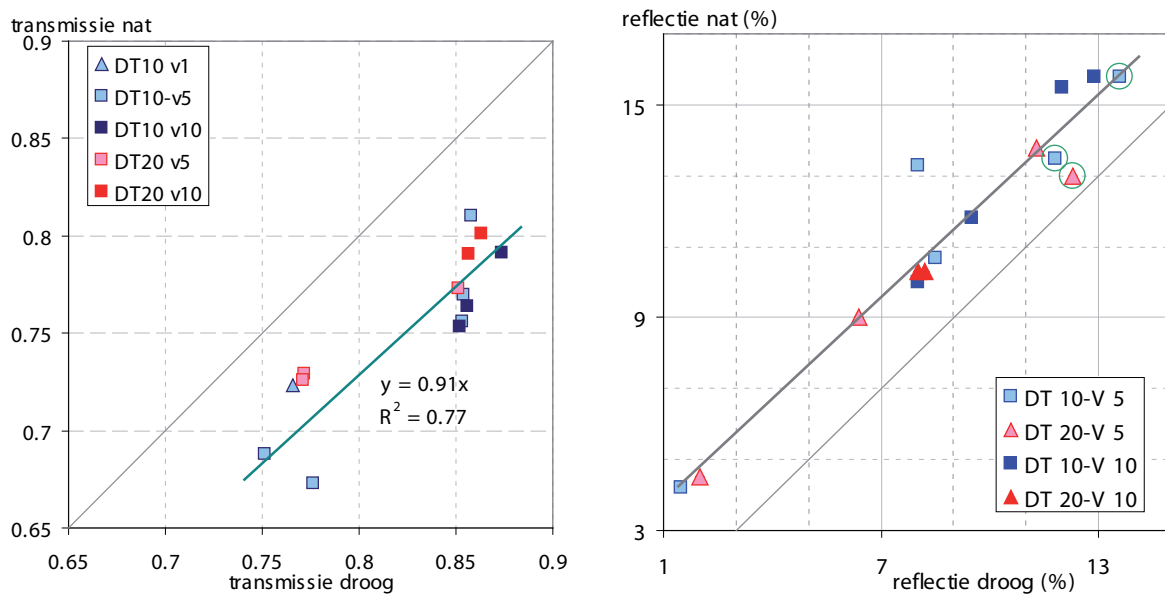
Met de gewichtmetingen kon slechts een grove schatting worden gemaakt van de dikte van de condenslaag op het glas, om te zien of de oppervlaktebehandeling een significant effect had. De schatting ging als volgt: Eerst werd de lekventilatie van het kasje geschat bij een geschikte meetreeks. Het water dat in de kas aanwezig was, was het verdampte water minus het waterdampverlies, minus het in de goot opgevangen water. Dat volume gedeeld door het dekkoppervlak geeft de dikte van de stabiele condenslaag. Bij sommige metingen (voornamelijk dubbeldek-materiaal) moest ook het opgevangen water op de vloer en/of de zijkanten van de balans afgetrokken worden. De verkregen getallen geven slechts een grove schatting van de dikte van de condenslaag. De resultaten zijn opgenomen in Tabel 3. Een antidropcoating heeft effect. Mogelijk is er ook enig antidropeffect van de coating van het AR-glas (Glascom). Diffuusglas heeft een, logisch, duidelijk verschil tussen 'structuur in' en 'structuur uit'. Onverwacht is dat de "waterretentie" bij 'structuur in' gelijk is aan die van onbehandeld glas. Gevoelsmatig zou het hoger moeten zijn. Niet verwacht was dat 'structuur uit' ten opzichte van de twee hiervoor genoemde materialen veel lager was, tenzij de gladde kant een coating heeft. Wanneer dit aspect belangrijk is, dan zal dit met specifieke metingen bepaald moeten worden. De gebruikte meetopstelling was niet ontworpen om de condensdikte nauwkeurig te meten.

Tabel 3. Geschatte waterlaagdikte (m) op het glas. De schatting is gemaakt door de massabalans (verdampt water – water uit de goot) op te stellen, met een correctie voor de geschatte waterdamplekkage uit het kasje en condensatie op andere oppervlakten dan het dek

Materiaal	enkel	dubbel
standaard Floatglas	99	97
Hydrofoob AR glas	96	102
AR glas	86	n.v.t.
	structuur in	structuur uit
Diffuus	96	68
	geen antidrop behandeling	wel antidrop behandeling
kanaalplaat 16mm	94	84

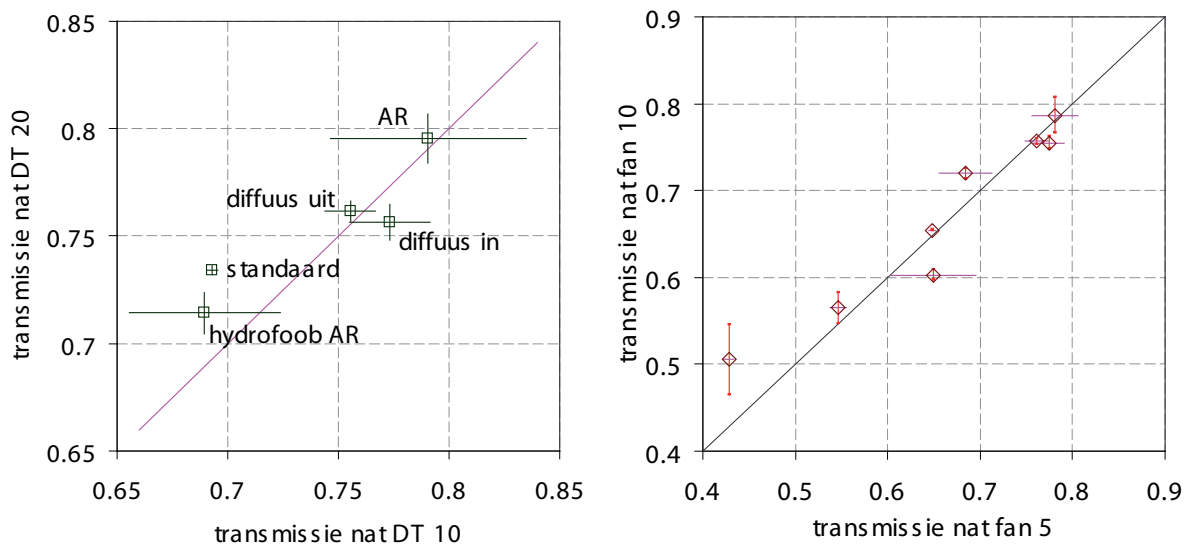
De toename in reflectie, gemeten met de integrerende bol (Figuur 12., rechts), was steeds lager dan de afname in transmissie en is gebaseerd op de metingen met het lichtplafond van de klimaatkamer. Dit komt omdat het effect van condens op licht is afhankelijk van de hoek waaronder het licht op het oppervlak komt (Pieters *et al.*, 1997; Pollet *et al.*, 2000). Het netto-effect van de reflectie op de binnenzijde van de druppeltjes is kleiner bij volledig diffuus licht dan bij een mengsel van diffuus en direct licht, zoals dat door TL-buizen wordt veroorzaakt. Het variërende aandeel van direct licht zou inderdaad de verschillen tussen metingen in de literatuur kunnen verklaren met de invloed die condens heeft op de lichttransmissie van enkelglas kasdek. Bijvoorbeeld, Morris *et al.* (1958) hebben in Engeland 10% minder transmissie gemeten, terwijl von Zabeltitz (1987) in Duitsland 8 % minder heeft gemeten en Jaffrin and Morisot (1994) in Zuid Frankrijk ongeveer 3% minder. Het lijkt erop, dat het door ons gemeten effect van condens op transmissie (een lichtverlies van 6-8%) dicht bij het verlies ligt wat je in Nederland kunt verwachten. Omdat in deze proef de transmissiemetingen betrouwbaarder en beter reproduceerbaar zijn, is besloten om deze metingen te gebruiken en het effect van condens alleen in relatieve termen te bepalen.

Het [geringe] effect van de behandelingen op de vorm van de condenslaag is te zien in Figuur 13. Met uitzondering van het diffuus glas met structuur aan de binnenkant, is de transmissie (van gecondenseerde dek) bij een hoger temperatuurverschil altijd groter dan bij een kleiner temperatuurverschil (zie Figuur 10., links). Pieters *et al.* (1997) en Pollet & Pieters (2002b), toonden aan dat het niet de afmeting van de condensdruppeltjes is die de lichttransmissie beïnvloed, maar de 'contact angle', de contacthoek. Dit is de hoek die de druppel met het oppervlak maakt. Hoe kleiner de contacthoek is, des te vlakker zijn de druppels en des te hoger is de lichtdoorlatendheid. De contacthoek is afhankelijk van de oppervlakte-eigenschappen en de oppervlaktetension van de vloeistof (Gbiortczyk, 2003), in ons geval water. De oppervlaktetension van water is sterk temperatuurafhankelijk: bij een hogere temperatuur zijn de druppels vlakker dan bij een lagere temperatuur. Dit is te zien in Figuur 13., links. De enige uitzondering, waarbij de transmissie nat is niet hoger bij hoge ΔT , kan mogelijk verklaard worden door aanwezigheid van een oppervlaktestructuur, wat bepalender voor de contacthoek kan zijn dan de druppeltemperatuur.



Figuur 12. overzicht van transmissie en reflectie, waarbij gemeten waarden van een nat en een droog kasdek tegen elkaar zijn uitgezet. Links: lichtdoorlatendheid van een gecondenseerd kasdek uitgezet tegen lichtdoorlatendheid van een droog kasdek, voor twee materialen, standaard glas en gecoat AR-glas waarvan zowel transmissie als reflectie is bepaald, met weergave van de verschillende klimaatbehandelingen. Twee groepen 'doorlatendheid droog' (rond 77% en 87%) zijn gegeven voor respectievelijk standaard glas en gecoat AR-glas. Rechts: reflectie van een gecondenseerd kasdek uitgezet tegen reflectie van een droog kasdek. De omcirkelde symbolen zijn de metingen aan standaard glas, de overigen zijn resultaten van AR-glas. Voor de verklaring van de symbolen: DT (°C) is het ingestelde temperatuurverschil binnen-buiten, en v is de ventilatorstand (10 is het maximum stand)

Het rechter gedeelte van Figuur 13. suggereert dat luchtcirculatie weinig effect heeft op de transmissie. Dit geldt voor vrijwel alle materialen, zoals Figuur 13. laat zien. Het werd niet verwacht, maar enige invloed op de vorm van het condenslaag (druppelgrootte, b.v.) kon niet bij voorbaat uitgesloten worden.



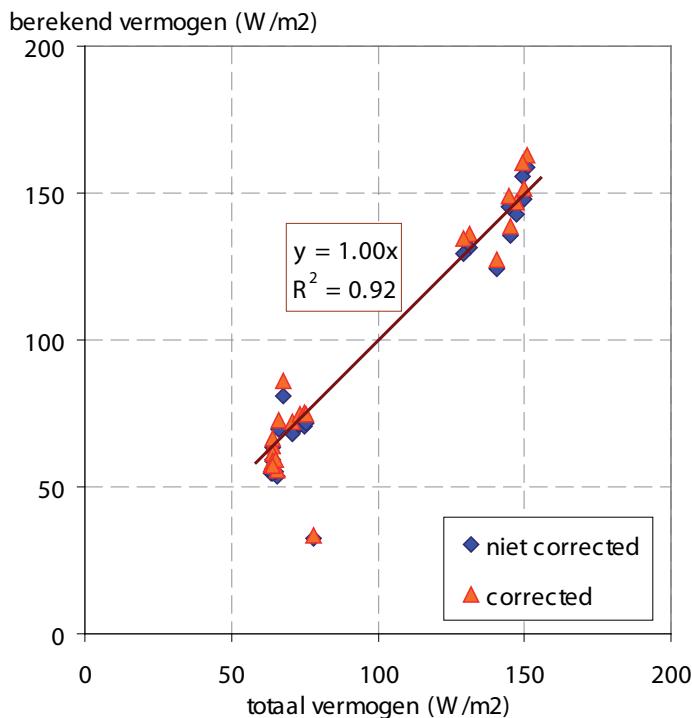
Figuur 13. Effect van de onderzochte behandelingen op de transmissie. Links: temperatuurverschil binnen–buiten van respectievelijk 10 en 20°C, en rechts de ventilatorsnelheden 50% en 100%. De weergegeven punten zijn gemiddelde transmissies van ieder materiaal in gecondenseerde toestand, uitgezet tegen de gemiddelde transmissie van hetzelfde materiaal (ook nat) bij de andere behandeling, met de standaard afwijking van de gemiddelde. Niet bij alle materialen zijn beide temperatuurverschillen gemeten, daardoor zijn er minder punten op de linker grafiek dan op de rechter grafiek

3.2 Energiemetingen

3.2.1 Energiebalans

Zoals bij vergelijking (3) is omschreven, kan worden geverifieerd dat er uitsluitend energieverlies optreedt via het dek. In Figuur 14. wordt het berekend vermogen door het dek (met condens) vergeleken met het totale vermogen dat gebruikt is voor de verwarming en de verdamper.

Het al goede verband kan verbeterd worden door rekening te houden met de variatie in temperatuurverschil tussen het dek en buiten. Het is namelijk bekend dat de warmte overdrachtscoëfficiënt groeit met de 1/3 macht van het temperatuurverschil. Geconcludeerd kan worden dat de aanname, waarop de berekeningen in de volgende hoofdstukken gebaseerd zijn (namelijk dat er uitsluitend door het dek significant energie- en vochtverlies optreedt), bewezen is.

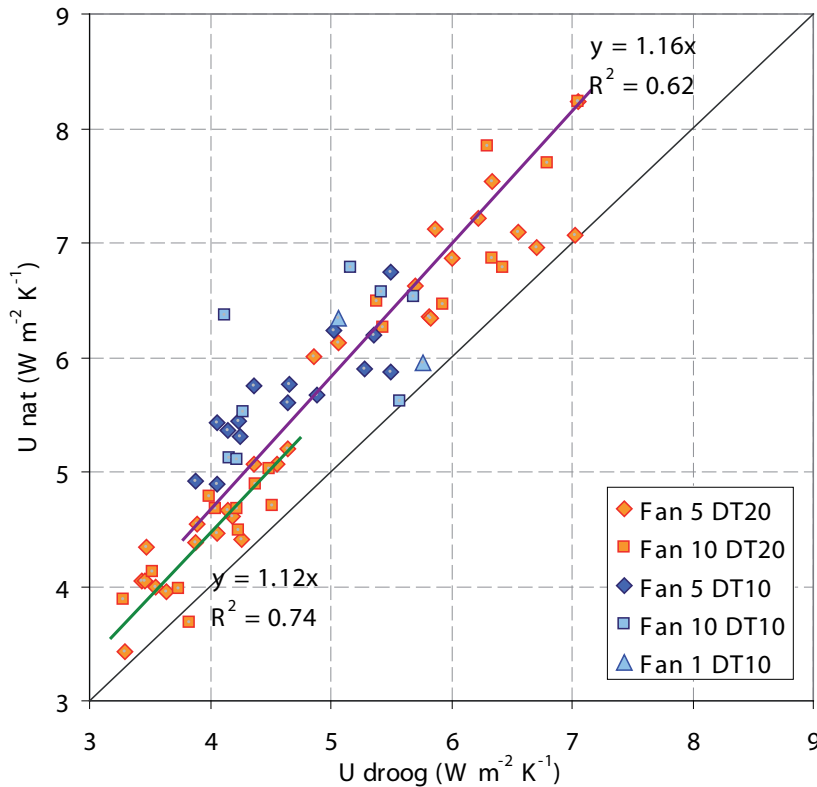


Figuur 14. Bewijs van de energiebalans. Op de x-as staat het gemiddelde vermogen dat nodig is voor de verwarming en de verdamper, tijdens de evenwichtperiode in gecondenseerde toestand. Op de y-as staat het een schatting van het energieverlies via het dek. Het is berekend met de warmteoverdrachtscoëfficiënt voor de droge evenwichtperiode, vergelijking (3), (blauwe punten). De overeenkomst wordt beter (oranje punten), als de warmteoverdrachts-coëfficiënt wordt gecorrigeerd voor de verandering in het temperatuurverschil dek-buiten. De hier aangegeven 'best-fit'-lijn heeft betrekking op de gecorrigeerde punten. De punten zijn afkomstig van metingen aan twee materialen. Omdat de meetopstelling gelijk bleef, is dit niet voor alle meetreeksen berekend

3.2.2 Effect van condenslaag op energieverlies

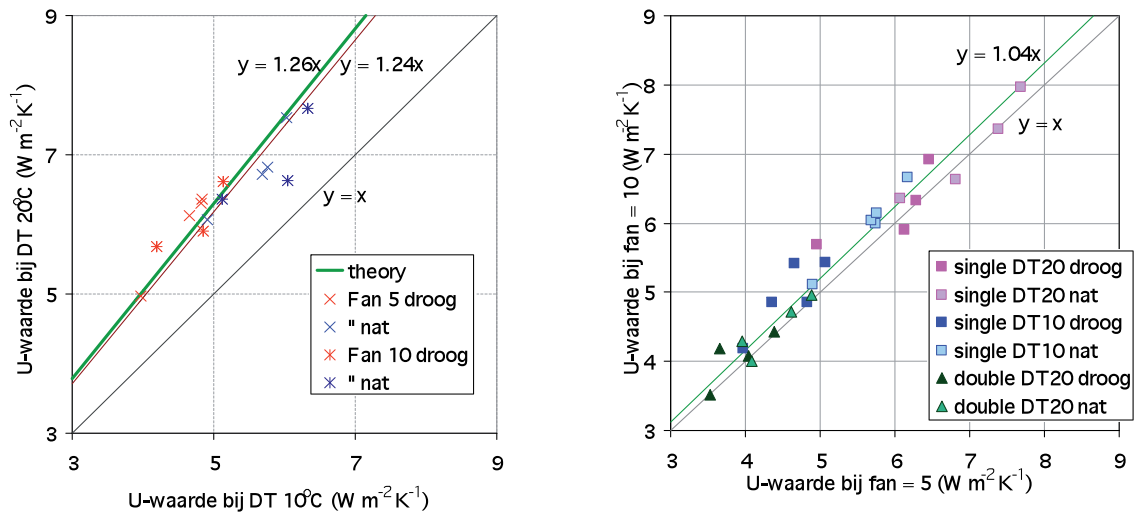
In Figuur 15. zijn de met vergelijking (1) berekende U-waarden van alle meetreeksen samengevat. Op de Y-as is de U-waarde van het natte dek en op de X-as de U-waarde van het droge dek uitgezet.

Condensatie aan het kasdek maakt de energieoverdracht aanzienlijk efficiënter, wat zichtbaar is in de toename van de U-waarde. Bij isolerende (dubbele) materialen is de toename van de U-waarde 12% i.p.v. de 16% die bij enkellaags materialen zijn berekend. Het verschil tussen de twee hellingen is significant ($P < 0.05$).



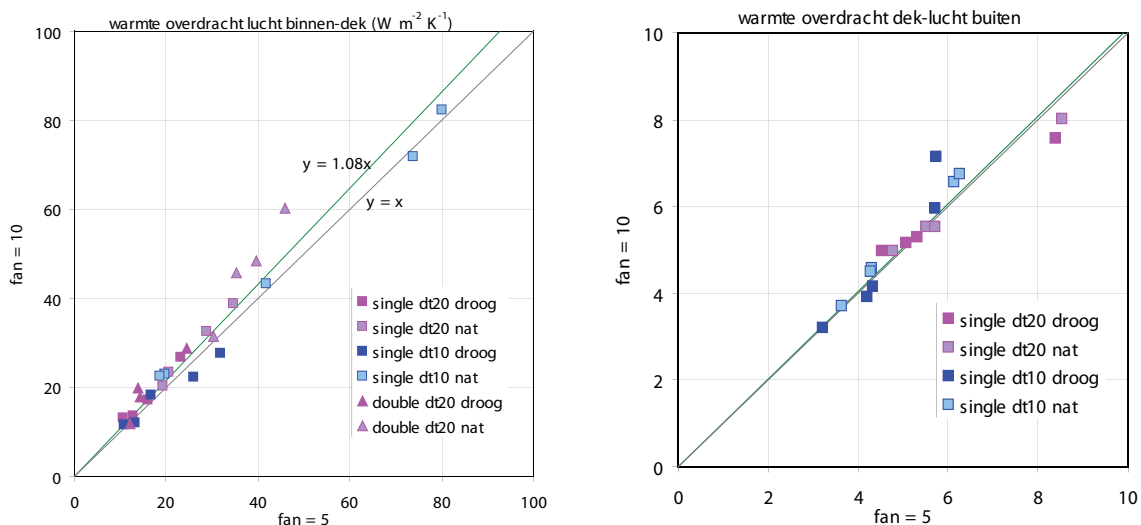
Figuur 15. Verhouding tussen de U-waarde (warmteoverdrachtscoëfficiënt van het kasje) van het gecondenseerde kasdek uitgezet tegen de U-waarde van het droge kasdek, in dezelfde omstandigheden. DT staat voor temperatuurverschil binnen-buiten ($^{\circ}\text{C}$) en V is de ventilatorstand binnen: hoe hoger de stand, des te hoger de luchtcirculatie. Dubbellaags materialen (oranje punten links onder) zijn uitsluitend gemeten bij een temperatuurverschil van 20°C . Anders was de binnenkant van het dek niet koud genoeg om te condenseren. De groene lijn heeft betrekking op deze punten, de paarse op alle andere punten

Met Vergelijking 2 kan worden geschat hoeveel verdampingsenergie verloren is (en dus hoeveel als voelbare warmte in de kas blijft). Het blijkt dat de verdeling sterk samenhangt met het temperatuurverschil binnen-buiten. Samenvattend kunnen we stellen dat enkellaags materialen bij $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ ongeveer 15% van de vrijkomende verdampingsenergie naar buiten toe verliezen. Bij $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ kan het energieverlies via het kasdek oplopen tot 40%.



Figuur 16. Effect van de behandelingen op de U-waarde van het kasdek. Elk punt is het gemiddelde per materiaal, per combinatie van behandelingen en per status van het kasdek (droog/condens). Links: effect van temperatuurverschil binnen-buiten. De dunne lijn is de 'best-fit' en de dikke lijn is berekend volgens de warmteoverdrachttheorie, het verschil is niet significant. Rechts: effect van de luchtcirculatie. De geschatte luchtsnelheid bij stand 5 is 7,5cm/s, en 15cm/s bij stand 10. De helling van de lijn is significant anders dan 1

Het effect van onze behandelingen op het energieverlies is aangetoond in Figuur 16. Het waargenomen effect van het temperatuurverschil binnen-buiten (Figuur 16., links) komt goed overeen met de theorie van warmteoverdracht, namelijk dat de warmteoverdrachtscoëfficiënt toeneemt met de 1/3 macht van het temperatuurverschil. Met een grotere luchtcirculatie ontstaat meer luchtbevinging in de kas en komt waterdamp sneller in aanraking met het kasdekoppervlak om daar te condenseren. De verwachting is dat bij verandering van luchtbevinging ook een effect van energieoverdracht te zien is. In Figuur 17., links, is te zien dat de energieoverdracht toeneemt met 8% bij verdubbeling van de [geschatte] luchtsnelheid van 7,5 naar 15m/s. Aan de buitenkant werd geen effect verwacht: er was niets veranderd. Dat is weergegeven in Figuur 17. rechts. In Figuur 16., rechts is te zien dat de U-waarde van de kas netto met 4% toeneemt, bij verdubbeling van luchtsnelheid (van 7,5 naar 15m/s) is. Het is interessant om op te merken dat de aanwezigheid van condens daar geen verandering in brengt, uiteraard bij een hoger niveau van warmteoverdracht.



Figuur 17. Effect van luchtsnelheid op de warmteoverdracht aan de binnenkant (links) en buitenkant (rechts) van het kasdek. De 8% toename aan de binnenkant kan verklaard worden door een gemengde warmteoverdracht, d.w.z. dat zowel het temperatuurverschil als de luchtbevinging van invloed zijn op de hoogte van de warmteoverdracht

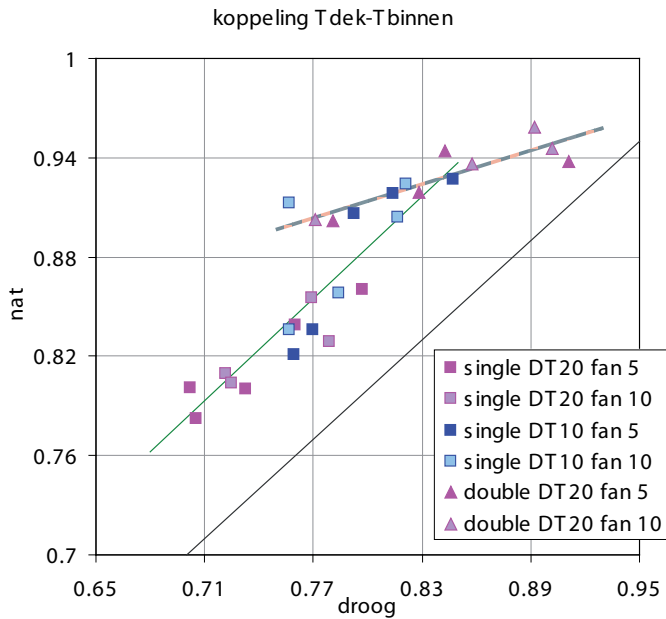
3.2.3 Dektemperatuur en energieverlies

Zoals in het vorige hoofdstuk al duidelijk was, warmt het condensatieproces het dek op, waardoor het temperatuurverschil dek-buiten iets toeneemt. Een veel gebruikte vuistregel is:

$$T_{dek} = T_{buiten} + K(T_{binnen} - T_{buiten}) \quad ^\circ\text{C} \quad (4)$$

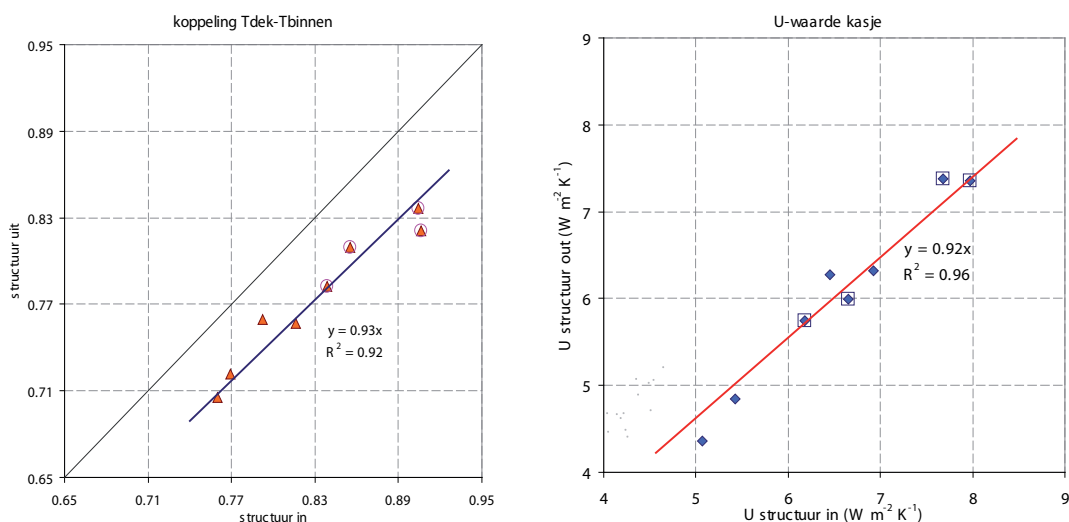
K is de parameter die de kasdektemperatuur 'koppelt' aan het binnenklimaat: bij $K = 1$ is de dektemperatuur gelijk aan de binnenluchttemperatuur, bij $K = 0$ is de dektemperatuur gelijk aan de buitentemperatuur.

Voor enkelglas kassen wordt vaak $K = 2/3$ aangenomen. In de metingen was K meestal groter (dichter bij de binnenluchttemperatuur). Dit is te verklaren doordat er in onze meetopstelling geen uitstraling als koelingmechanisme van het kasdek was. Wat interessant is, is dat condens de energieoverdracht tussen het kasdek en de binnenlucht van de kas efficiënter maakt. Daardoor komt de dektemperatuur nog dichterbij de kastemperatuur te liggen. Dit is te zien in Figuur 18., waar K met condens op het kasdek vergeleken is met K bij een droog kasdek. De punten groeperen zich duidelijk rond het temperatuurverschil binnen - buiten, terwijl alle andere factoren (inclusief de verdampingssnelheid kennelijk geen rol spelen. Omdat aannemelijk was dat een hogere condensatiesnelheid een rol zou kunnen spelen, is er (een factor 2) gevarieerd met het vermogen van de verdampers. Het effect van temperatuurverschil was te verwachten: zoals eerder aangegeven, wordt door dit verschil de warmteoverdrachts-coëfficiënt beïnvloed.



Figuur 18. Effect van condensatie op de K-waarde (zie vergelijking 4), een indicator van de koppeling tussen dek- en binnentemperatuur ($K = 1 \rightarrow T_{dek} = T_{binnenlucht}$). Ieder punt is, per materiaal, het gemiddelde van alle metingen bij de aangegeven combinatie van behandelingen, voor elk materiaal. De lijnen zijn de 'best-fit' op de dubbele materialen (driehoeken, dikke lijn) en de enkele materialen (vierkanten, dunne lijn). Bij een $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ (blauwe punten), maar niet 20°C (roze punten) hebben de volgende enkellaags materialen een zeer hoge koppeling in natte toestand (ze lijken te horen bij de dubbellaags materialen): de HD met structuur naar binnen; het standaardglas en het gecoate AR-glas

Een warmer dek heeft een hoger energieverlies, er is meer verwarmingsenergie nodig, wat leidt tot een hogere U-waarde. Bij een "ruw" dek zal een hogere "koppeling" met de binnenlucht zijn omdat: 1. er meer "koppeloppervlakte" per eenheid grondoppervlakte is en 2. de ruwheid van het oppervlak de laminaire luchtstroming langs het oppervlak breekt, waardoor de warmteoverdracht efficiënter wordt. Dit is in Figuur 19., links te zien. Figuur 19., rechts, laat zien dat het ook voor de energiehouding uitmaakt of de ruwe structuur van het AR-glas naar binnen dan wel naar buiten is gekeerd. In de praktijk zal het verschil in energieverbruik 8% zijn, omdat onze meetopstelling het energieverlies door straling minimaliseert. De energiestroom is onafhankelijk van de plaatsing van de structuur.

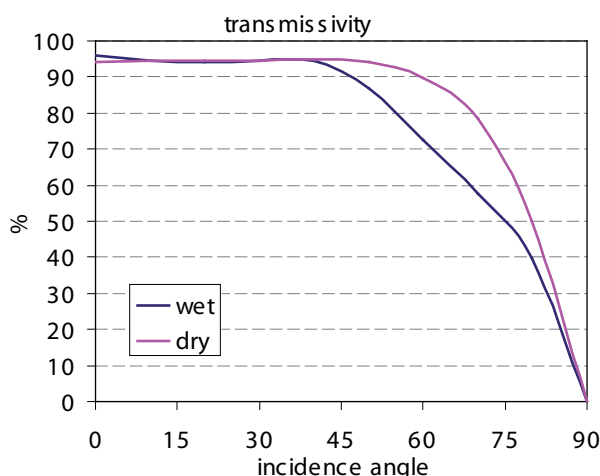


Figuur 19. Effect van de oppervlaktestructuur op het verband tussen de dektemperatuur en de binnenlucht (links) en de vergelijking met het effect op de U-waarde (rechts). De rond- en vierkant-omkaderde symbolen geven een gecondenseerd kasdek aan

3.3 Discussie

Dat het gestructureerde diffuusglas geen lichtverlies had door condensatie, was een onverwacht resultaat. De zeer geringe standaardafwijking van de bijbehorende punten in Figuur 10. geven aan het een reëel effect is.

Jammer genoeg werd het beoogde AR-materiaal met een 'film-forming' oppervlaktebehandeling niet geleverd. Dat de gemeten hydrofobe behandeling een heel lage doorlatendheid heeft in gecondenseerde toestand kan verklaard worden door de dikke druppels (Figuur 11.). Hoe kleiner de contacthoek is, hoe vlakker zijn de druppels zijn en hoe hoger de lichtdoorlatendheid is. In het bijzonder hebben Pieters *et al.* (1997), aangetoond dat de contacthoek de incidentiehoek (hoek van inval) van het licht bepaalt waar de doorlatendheid begint af te wijken van de waarde bij loodrecht inkomend licht. Dit is duidelijk te zien in Figuur 20.



Figuur 20. PAR-doorlatendheid van het hydrofobe AR-glas uitgezet tegen de incidentiehoek van het licht, gemeten met de integrerende bol van Wageningen UR Glastuinbouw. Om de condensmeting te simuleren, werd het glas met water bespoten. In tegenstelling tot de metingen, kwam het licht eerst de druppels tegen en daarna pas het glas. De verhouding met de doorlatendheid die in Figuur 10. is gegeven, is dus zeer kwalitatief. In de grafiek hiernaast is te zien dat bij een hoek boven de 45° het effect van de druppels snel zichtbaar wordt en dat de lichtdoorlatendheid met meer dan 20% af kan nemen

Met betrekking tot de energiehuishouding: de U-waarde neemt 16% toe door condensatie (warmteoverdracht). Dat bij dubbellaagsdekken een toename van 12% werd waargenomen, uiteraard bij veel lagere U-waardes, lag niet in de lijn der verwachting. Blijkbaar is de rol van straling tussen de twee lagen als belangrijk mechanisme voor energieoverdracht onderschat. Dit kan voorkomen worden door een 'lage emissie coating' aan de laag die grenst aan de binnenlucht van de kas (zoals b.v. de platen van Scheuten).

De eigenschappen van het diffuusglas met structuur (Vetrasol) zijn zeker opmerkelijk. Ten eerste omdat de transmissie niet beïnvloed wordt door de aanwezigheid van condens. En ten tweede omdat de positie van de structuur niets uitmaakt voor de lichtdoorlatendheid. Beide effecten kunnen mogelijk worden verklaard door het werkingsprincipe van het glas: de structuur (de hellingshoek van de "kleine piramides") is zo berekend en aangebracht om inkomend licht, heel homogeen verdeeld over alle hoeken, van de ene kant van het glas door te geven naar de andere kant. Het is denkbaar dat het "scattering"-effect van de druppels "opgevangen" wordt door de structuur. Dit is echter een veronderstelling. Bij belangstelling voor het werkingsmechanisme moet dit nader onderzocht worden. De structuur heeft wel invloed op de U-waarde en dus op het energieverbruik. In onze experimentele opstelling, was door afwezigheid van wind en uitstraling, natuurlijke convectie het belangrijkste warmteverliesmechanisme, wat niet reëel hoeft te zijn in de praktijk. Mogelijk zal met de plaatsing van de structuurlaag naar de binnenkant van de kas de U-waarde geen 8% maar eerder 4% toenemen t.o.v. de plaatsing van de laag aan de buitenkant. Daarbij komt het praktische probleem om te voorkomen dat de ruwe kant van het dek stoffig wordt. Hoe dan ook, stof tot nadenken.

4 Analyse van de effecten en mogelijke maatregelen

4.1 Lichttransmissie-effect door condensatie

Uit KASPRO-berekeningen (tomaat, enkel glasdek) blijkt dat op het kasdek, gedurende 85% van de daguren, [gedeeltelijk] condens aanwezig is. Onder de conservatieve aanname dat condens gemiddeld 50% van het oppervlak dekt, hebben we een schatting van het verlies aan lichtdoorlatendheid op jaar basis van 50% (van het oppervlak) \times 9% (lichtverlies door condenslaag) \times 85% (daguren waarbij dek nat is) = $3,85\%$. Daarbij komt dat in de meeste gevallen overdag gestookt wordt zodat het temperatuurverschil binnen-buiten aanzienlijk is. Het dek is relatief koud en de druppels die daaraan kleven zijn dus relatief dik. Dit verlaagt de lichtdoorlatendheid verder, ook is het temperatuureffect niet heel groot (Figuur 13., links). Bij de analyse van de rentabiliteit van het toepassen van een transparant scherm overdag (De Zwart *et al.*, 2010) moet in principe rekening worden gehouden met het extra lichtverlies door condens. Wellicht valt het mee, omdat transparante schermen meestal worden toegepast bij het begin van de teelt en de binnenlucht dan relatief droog is.

Materialen waarbij geen lichtverlies optreedt door condensatie kunnen de productie met enkele procenten verhogen. Hier biedt het gestructureerde diffuusglas zeker perspectief, omdat het in natte toestand een vergelijkbare lichtdoorlatendheid heeft als het droge standaardglas.

De vervorming van de condens van druppel naar film verhoogt mogelijk de doorlatendheid met 1 á 2%. Dat is gemeten bij de antidrop behandelde kanaalplaat, uiteraard bij een vrij lage doorlatendheid. Helaas hebben we dit type coating niet op AR-glas kunnen meten.

4.2 Energie-effect van condensatie

Verlaging van lichtinval gaat gepaard met een lagere energieopbrengst van de kas. Met de aannames hierboven, vermindert condensatie de totale energie input van de kas met ongeveer 90 MJ. Bij de voorzichtige aanname dat het slechts een derde van de energiebehoefte vermindert, dan komt het ongeveer één m³ gas, d.w.z. 2,5 á 3% van het energieverbruik. Materialen/coatings waarbij geen lichtverlies optreedt bij condensatie, kunnen de energie-efficiënte van de kas verhogen zowel door hogere productie als door verlaging van de stookbehoefte.

Het gewas verdampt water, maar waterdamp kan niet in de kaslucht blijven ophopen. Of condensatie optreedt wordt bepaald door de mate waarin het dauwpunt van de lucht hoger is dan de dektemperatuur. Bij dubbellaags-materialen, waarbij de interne oppervlakte relatief warm is, treedt minder condensatie op. Het gevolg is dat de kaslucht vochtiger wordt en er eerder moeten worden geventileerd. Onder omstandigheden waarbij in de kas tegelijkertijd zowel behoefte aan ontvochtiging als een warmtevraag is, hoeft condensatie is niet ongunstig te zijn. In dat geval zal een groot deel van de verdampingsenergie terugkomen als warmte in de kas. Wanneer waterdamp wordt afgevoerd, is dat niet het geval. Ook niet bij een heel efficiënte afvoer zonder verlies van voelbare warmte (zoals buitenluchtaanzuiging door een goede warmtewisselaar).

Figuur 9. laat zien dat een [te] geringe luchtbeweging in de kas een onnodig hoog vochtgehalte in de kas tot gevolg kan hebben, omdat het vocht onvoldoende in aanraking komt met de koude oppervlak. Luchtcirculatie kan de vochtigheid in de kas verlagen, bovenop het verwachte effect van verminderen de plaatselijke temperatuur en luchtvochtigheidsverschillen. Luchtcirculatie is het eerste middel dat ingezet kan worden tegen een te hoge luchtvochtigheid. De werking is driedelig: 1. bevordering van condensatie leidt tot een lagere hoeveelheid waterdamp in de lucht; 2. het gewas wordt verwarmd waardoor de kans op condensatie op het gewas afneemt en 3. door vereffening van horizontale/verticale temperatuur- en vochtigheidsgradiënten wordt de kans van lokale condensatie op gewasdelen kleiner. Dit is mogelijk met beperkte kosten. Figuur 17. en Figuur 16. tonen aan dat door 8% meer warme luchtcirculatie (en massa=condensatie) de warmteoverdracht aan de binnenkant van het dek toeneemt. Dit verhoogt de U-waarde van de kas met 4%. In de praktijkkas zullen de getallen niet precies hetzelfde zijn, omdat in deze meetopstelling uitstraling vrijwel geen rol speelde in het energieverbruik. Dit betekent dat het relatieve effect van luchtbeweging op de U-waarde van een kas met uitstraling kleiner kan zijn.

5 Conclusies

Condensatie vermindert de lichtdoorlatendheid met, gemiddeld over alle onderzochte materialen, 9%. In deze proef is bewezen dat er materialen bestaan waarvoor dit niet geldt. Dit betreft niet alleen de 'antidrop oppervlakte-behandeling' (volgens verwachting), maar ook lichtverstrooiende materialen met een oppervlaktestructuur. Hoe het mechanisme werkt is in dit onderzoek niet volledig verklaard.

De lichtdoorlatendheid (zowel droog als nat) van materialen met een structuur blijkt onafhankelijk van de plaatsing van de structuur naar binnen dan wel naar buiten. Echter, een kasdek met de structuur naar buiten heeft een 8% lagere U-waarde ten opzichte van een kasdek met de structuur naar binnen. Uit dit onderzoek blijkt dat de naar buitengerichte structuur het meest energiezuinig is. Maar dit moet worden afgezet tegen een verhoogde kans op vervuiling. Ook is het mogelijk dat in een praktijkkas het energetische verschil tussen de naar binnen gerichte structuur en de naar buitengerichte, kleiner is dan de waargenomen 8% in onze metingen. Dit komt omdat zowel het energieverlies door uitstraling als het effect van windsnelheid op de U-waarde in onze meetopstelling verwaarloosbaar waren. Zou het verschil in werkelijkheid maar 4% zijn, dan is dit ook de orde van grootte van het verwachte effect op het energieverbruik.

Luchtcirculatie kan de vochtigheid in de kas verlagen door het bevorderen van de condensatie. Dit boven op de bekende gunstige effecten van vermindering van ruimtelijke temperatuur en luchtvochtigheidsverschillen en verwarming van het gewas. Dit is ook niet zonder kosten maar de kosten blijven beperkt.

6 Literatuur

Gbiorczyk, K., 2003.

New test methods for evaluating the antifog effect of greenhouse films. Gartenbautechnische Informationen, Institut für technik in gartenbau und landwirtschaft, Universität Hannover, Heft 58: 195 pp.

Jaffrin A.; Morisot A (1994).

Role of structure, dirt and condensation on the light transmission of greenhouse covers. *Plasticulture*, 101: 33-44

Morris L.G.; Trickett E.S; Vanstone F.H; Wells D.A, 1958.

The limitation of maximum temperature in a glasshouse by the use of a water film on the roof. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 3(2), 121-130

Pieters J. G; Deltour J.; Debruyckere M.,1997.

Light transmission through condensation on glass and polyethylene. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85, 51-62

Pieters, J.G. & J.M. Deltour, 1998.

Effect of latent heat phenomena on thermal insulation and inside climate of greenhouses, *J. Therm. Environ. Build. Sci.* 22: 9–31.

Pollet, I.V. & J.G. Pieters, 2000.

Condensation and radiation transmittance of greenhouse transparent materials. Part 3: results for glass plates and plastic films, *J. Agric. Eng. Res.* 77 (4) : 419–428.

Pollet, I.V. & J.G. Pieters, 2002a.

Visible radiation transmittances of dry and condensate covered glass and plastic greenhouse cladding, *Agric. For. Meteorol.* 110 (4): 285–298.

Pollet, I.V. & J.G. Pieters, 2002b.

Forward scattering induced by water drops on a transmissive substrate, *Appl. Optics* 41: 5122–5129.

Van der Staaij M., & S. Douwes, 1996.

Optimalisering van de toepassing van gewasbeschermingsmiddelen in de glastuinbouw. Emissie via condenswater. Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, Naaldwijk, Rapport 53, ISSN 1385-3015

Von Zabeltitz C., 1987.

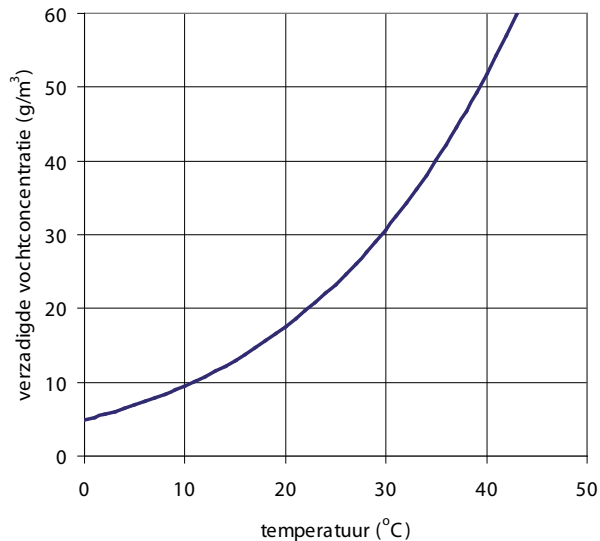
Folien als Gewachshausbedachung [Plastic films as greenhouse cladding]. *Landtechnik*, 42, 326-327.

Zwart, H.F. de, C. Stanghellini, L.P.M. van der Knaap, 2010.

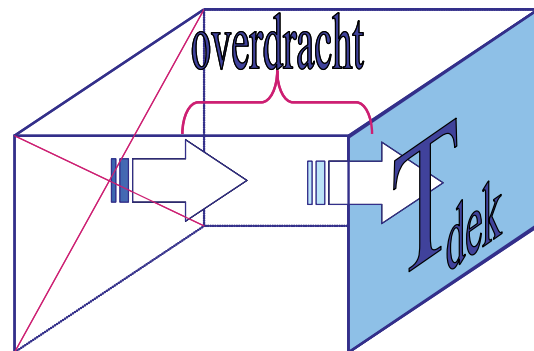
Hoogisolierende en lichtdoorlatende schermconfiguraties. Wageningen UR Glastuinbouw, nota in druk: 34pp.

Bijlage I Condensatie

Het condensatieproces



Figuur I.1. Schematische weergave van de massaoverdracht coefficient. Condensatie kan plaatsvinden alleen als het damphoudende luchtlaagje in aanraking komt met het koude dek



Figuur I.2. Maximale hoeveelheid waterdamp (verzadigde dampconcentratie) dat lucht kan bevatten bij de aangegeven temperatuur

Met het water dat een kasgewas verdampt kunnen slechts twee dingen gebeuren: ergens condenseren of afvoer door ventilatie. Ook kan er niets mee gebeuren en blijft het in de lucht als waterdamp..., of niet? Echter, lucht kan maar een beperkte hoeveelheid waterdamp bevatten, afhankelijk van temperatuur, zoals weergegeven in Figuur I.1.

Een rekenvoorbeeld: buitenlucht van 10°C met 50% relatieve vochtigheid bevat ongeveer 5g waterdamp/m³_{lucht}. Wordt die lucht verwarmd tot 20°C, dan kan er maximaal 13g/m³ bij. Een kasgewas verdampt ongeveer 10g/h per m² teeltopervlakte, 's nachts, tot meer dan 100g/m² per uur op een zonnige dag. Wanneer rekening wordt gehouden met een kasvolume (hoogte) van bijv. 6m³ per m² teeltopervlakte zien we dat zonder ventilatie (vochtafvoer) de gewasverdamping de lucht snel kan verzadigen. Wanneer meer waterdamp in de lucht komt dan de lucht kan bevatten, dan gaat het overschot aan waterdamp ergens condenseren. Dit gebeurt het eerst bij een oppervlak (b.v. kasdek) met een lagere temperatuur dan het dauwpunt van de lucht (de temperatuur waarbij lucht met het huidige vochtinhoud verzadigd zou zijn). Het luchtlaagje grenzende aan het kasdek zal koeler zijn dan de vrije lucht en kan minder waterdamp bevatten. De extra waterdamp gaat condenseren (dauw gaat vormen) aan het koude oppervlak. Of de waterdampconcentratie in een ruimte nooit groter is dan de verzadigde concentratie bij de laagste temperatuur in die omgeving, hangt af van hoe snel de ingebrachte waterdamp in aanraking komt met het koude oppervlak (Figuur I.2.). Met andere woorden: het hangt af van de massaoverdrachtscoëfficiënt. Dit wordt omschreven in de volgende vergelijking:

Condensatiestroom = overdrachtscoëfficiënt χ (waterdampconc._{lucht} – verzadigde conc._{Tdek})

In symbolen:

$$C \left[g m^{-2} s^{-1} \right] = g \left[m s^{-1} \right] \times \left(\chi_{lucht} - \chi_{T_{dek}}^{verzadigd} \right) \left[g m^{-3} \right] \quad (1.1)$$

Bij condensatie komt de verdampingsenergie (latente warmte) weer vrij in het luchtlaagje aangrenzend aan het dek. Daarnaast, het waterlaagje (dan wel druppels) aan het kasdek kan de lichtdoorlatendheid ervan doen veranderen.

Hieronder wordt beschreven hoe de metingen worden gebruikt om het volgende te bepalen:

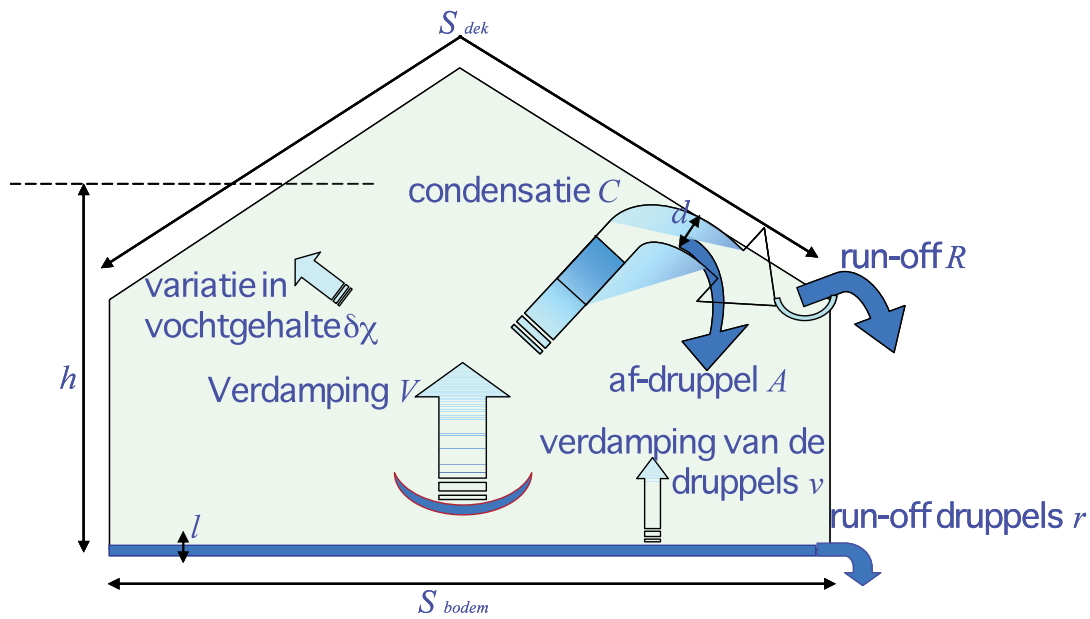
1. de snelheid (massaoverdrachtscoëfficiënt) waarmee de waterdamp condenseert aan het kasdek, afhankelijk van de (temperaturen, luchtbeweging en oppervlakte) omstandigheden
2. de dikte van het condensatielaagje afhankelijk van de oppervlakte (en andere?) omstandigheden
3. waar komt de vrijkomende latente warmte terecht
4. lichtdoorlatendheid afhankelijk van het vorm en of dikte van het condenslaagje (verschillende type laagjes veroorzaken door oppervlaktebehandeling dan wel dekmateriaal aanpassen)

Massaoverdrachtscoëfficiënt

De massaoverdrachtscoëfficiënt wordt bepaald d.m.v. vergelijking (1). De vochtconcentratie van de lucht, de kasdektemperatuur en de condensatiestroom moeten dan bekend zijn. Temperatuur en vochtigheid worden gemeten; wat kunnen we gebruiken om de condensatiestroom te bepalen? Massabalans van de kaslucht:

$$V + v = C + \delta\chi \quad (1.2)$$

Wat moeten we kunnen meten



Ook aannemende dat we een bekende vochtbron (V) hebben, kan vergelijking (1) niet worden gebruikt om de condensatiestroom te bepalen, tenzij de verdamping vanuit de natte bodem is gemeten of verwaarloosbaar is. Massabalans van het kasdek:

$$C = \delta d + R + A \quad (1.3)$$

Het rechtstreeks wegen van het dek geeft d weer. Om de condensatiesnelheid m.b.v. vergelijking (2) te kunnen bepalen moet de 'run-off', en ook het afdruppelen gemeten worden. M.b.t. het laatste zijn er twee mogelijkheden: a. zorgen dat het afdruppelen in de gemeten run-off vloeit voordat het water weer verdampt (zeer waterafstotend en stijle opvang pijp) of b. het afdruppelen van een representatief oppervlak wegen, wat klein genoeg is zodat het verdampen daarvan verwaarloosbaar is in de massabalans van de totale dek. Het bepalen van A d.m.v. de massabalans van de bodem helpt ook niet omdat dan het cirkeltje rond is en we de verdamping van de druppels (v) weer tegenkomen ...

$$A = \delta l + r + v \quad (1.4)$$

Dus: om de condensatiestroom te kunnen bepalen moet de her-verdamping van wat uit het dek druppelt verwaarloosbaar zijn. Als aan deze conditie voldaan wordt, dan kan C herleid worden zowel uit vergelijking (2) als uit de combinatie van (3) en (4).

De combinatie van vergelijkingen (1) en (2) om de massaoverdrachtscoëfficiënt te bepalen gaat als volgt:

$$h \frac{\partial \chi}{\partial t} = V - g (\chi_{lucht} - \chi_{T_{dek}}^{verzadigd}) \quad [g m^{-3} s^{-1}] \quad (1.5)$$

De evenwicht vochtconcentratie is: $\chi_{\infty} = \frac{V}{g} + \chi_{T_{dek}}^{verzadigd} \quad [g m^{-3}]$

en de tijdconstante (de benodigde tijd om evenwicht te bereiken) is: $\tau = \frac{h}{g} \quad [s]$

De theorie van massaoverdracht laat berekenen dat g , voor panelen van 1 à 2 meter en temperatuurverschillen van ca. 10°C een orde van grootte heeft van enkele (3 à 4) mm/s. Bij een goothoogte van 1m dit is ongeveer 300s of 5 min. Om het proces goed te kunnen volgen hebben we dus metingen om de 10s of vaker nodig.

Bij een waterdampbron van 100g/m² per uur is het evenwicht vochtconcentratie ongeveer 10g/m³ boven de verzadigde concentratie bij de dektemperatuur, dus:

- moeten we temperatuurverschillen tussen binnen en dek van minstens 10°C kunnen handhaven (zie eerste figuur)
- de waterdampbron moet ongeveer een liter per uur zijn (we hebben 12m²) en nauwkeurig gemeten kunnen worden (1g of beter).

Om de dikte van het condenslaagje te bepalen moet de gewichttoename van het dek nauwkeurig gemeten kunnen worden. Hoe nauwkeurig?

Een homogeen laagje water van een μ op de gehele oppervlakte (4 x 3,2 x 1,1) weegt ongeveer 14g. Dus moeten we het dek kunnen wegen met een nominale nauwkeurigheid van één gram. Het gaat hier niet om het absolute gewicht, maar wel om gewichtverschillen waar te kunnen nemen.

Echter, als de vloeromstandigheden zodanig zijn dat al wat afdruppelt wordt opvangen en nauwkeurig wordt gemeten voordat het weer kan verdampen; en als de run-off ook nauwkeurig en tijdig wordt gemeten, zou in principe de toename in dikte van het laagje ook bepaald kunnen worden uit de combinatie van vergelijkingen (1) en (2):

$$\frac{\partial d}{\partial t} = C - R - A = \frac{1}{\rho_{H_2O}} \left(V - h \frac{\partial \chi}{\partial t} - R - A \right) \cdot \frac{S_{bodem}}{S_{dek}} \quad [m s^{-1}] \quad (1.6)$$

De dikte van het laagje is dan de integraal van vergelijking (6) in de tijd voordat evenwicht is bereikt, d.w.z.:

$$V = A + R$$

Deze methode vereist een hoge snelheid en nauwkeurigheid voor de meting van R en A , dus de pro en contra van de twee methoden moeten we goed afwegen. Mogen we aannemen dat run-off en afdruppelen pas gebeuren als het condenslaagje zijn maximale dikte heeft bereikt? Als dat inderdaad het geval is, dan is de tijdigheid van de meting veel belangrijker dan de nauwkeurigheid en toepassing van vergelijking (6) zou zeker te proberen zijn.

Een afweging voor het wegen van het dek is dat voordat het evenwicht wordt bereikt dit is ook een onafhankelijke bepaling van de condensatiesnelheid, d.m.v. vergelijking (3).

Verdeling van de vrijkomende latente warmte: is dit te bepalen d.m.v. [dek]temperatuur metingen?

We hebben te maken met meetomstandigheden waarbij de luchttemperatuur binnen en buiten het kasje volledig geregeld is. In het eenvoudigste geval, dat er geen licht of andere energiebron is, kan de temperatuur van het dek berekend worden uit de energiebalans van het kasdek:

$$\alpha_{in}(T_{in} - T_{dek}) = \alpha_{out}(T_{dek} - T_{out}) \quad [W m^{-2}] \quad (1.7)$$

waar α is de warmteoverdrachtscoëfficiënt. Nu hebben we een extra energiebron (L): iedere gram water die condenseert maakt 2450J vrij. Met een verdampingsbron van 100g per m² per uur, de energiestroom die vrijkomt als het evenwicht is bereikt is ongeveer 67W/m², die wordt verdeeld tussen de binnenlucht en het kasdek, met een verdeel sleutel, f , die we hopen te bepalen.

In onze gecontroleerde meetomstandigheden, kunnen we de fractie die direct de kaslucht opwarmt “zien” als vermindering van de benodigde energie om het kasje op de gewenste instelling te houden. Het effect van de fractie die het dek opwarmt is te berekenen door de energiebalans opnieuw te schrijven:

$$\alpha_{in}(T_{in} - T_{dek}) + f L = \alpha_{out}(T_{dek} - T_{out}) \quad [W m^{-2}] \quad (1.8)$$

$$T_{dek,nieuw} = T_{dek,oud} + \frac{f L}{\alpha_{in} + \alpha_{out}} \quad [K]$$

Met een totale warmteoverdrachtscoëfficiënt van 7 á 10W/(m² K) en een L van 60W/m² moet de verhoging van de dektemperatuur groot genoeg zijn om te meten, tenzij f heel klein is. In dat geval moet wel de vermindering van de energiebehoefte meetbaar kunnen zijn, omdat met een temperatuurverschil binnen-buiten van b.v. 10°C de condensatie energie zeker niet verwaarloosbaar is. Natuurlijk moeten we L (d.w.z. de condensatiestroom) goed weten, maar dat wisten we al...

Bijlage II Reflectiemeting

De meetapparatuur voor lichttransmissie is ontwikkeld voor metingen aan dakbedekking materialen. Met deze apparatuur is de lichttransmissie voor loodrecht opvallend en diffuus licht van glas, folies, kanaalplaten, nanoschuim en schermmaterialen nauwkeurig te bepalen. Een nieuwe ontwikkeling is het inbrengen van lichtverstrooiende pigmenten in folies. Hierdoor ontstaat meer diffuus licht in de kas. Met deze meetapparatuur is de lichtverstrooiing (haze) van het materiaal te meten. Door de hoge meetsnelheid kunnen binnen korte tijd een groot aantal metingen gedaan worden waardoor de nauwkeurigheid van het meetresultaat toe kan nemen door middeling in de tijd.

Theorie integrerende bol

Het centrale onderdeel van het meetsysteem is de integrerende bol. De bol wordt gebruikt om de lichtstroom over het oppervlak te integreren. De discussie over de lichtdoorgang van de bol start met een discussie over diffuus reflecterende oppervlakken. Daarom is de radiantie en de koppeling met twee belangrijke parameters namelijk de bol vermenigvuldigingsfactor [M] en de gemiddelde reflectie [ρ]. De theorie van de integrerende bol heeft zijn oorsprong in de stralingsuitwisseling tussen twee diffuse oppervlakken [1,2].

De bol radiantie L_s is te bepalen uit de verlichtingssterkte L en de dimensie loze de bol vermenigvuldiging factor M volgens:

$$L_s = L * M \quad (II.1)$$

De verlichtingssterkte L is berekend uit de invallende flux Φ en het wandoppervlak A_w :

$$L = \frac{\Phi}{\pi A_w} \quad (II.2)$$

en de bol vermenigvuldigingsfactor M is uitgedrukt als:

$$M = \frac{\rho_o}{1 - \bar{\rho}} \quad (II.3)$$

Deze term bepaalt de toename in verlichtingssterkte door de meervoudige reflecties in termen van de begin- en gemiddelde reflectiewaardes waarbij:

ρ_o = de reflectie voor de invallende flux (diffuus of direct)

$\bar{\rho}$ = de gemiddelde reflectie voor de gehele integrerende bol

De gemiddelde reflectie waardes $\bar{\rho}$ voor de gehele integrerende bol kan berekend worden met:

$$\bar{\rho} = \rho_w \left(1 - \sum_{i=1}^n f_i \right) + \sum_{i=1}^n \rho_i f_i \quad (II.4)$$

waarbij:

ρ_w = reflectiewaarde van de bolwand

ρ_i = reflectiewaarde van poort i

$f_i = \frac{A_i}{A_w}$ is het fractionele poort oppervlak voor oppervlak A_i van poort opening i

De gemiddelde reflectiewaarde van de bol verandert wanneer referentiemateriaal vervangen wordt door een monster. In het geval van loodrecht invallend licht op de standaard en het monster is de verhouding met vergelijking (3) te berekenen:

$$\frac{L_m}{L_r} = \frac{\rho_m}{\rho_r} \cdot \left(\frac{1 - \overline{\rho_r}}{1 - \overline{\rho_m}} \right) \quad (II.5)$$

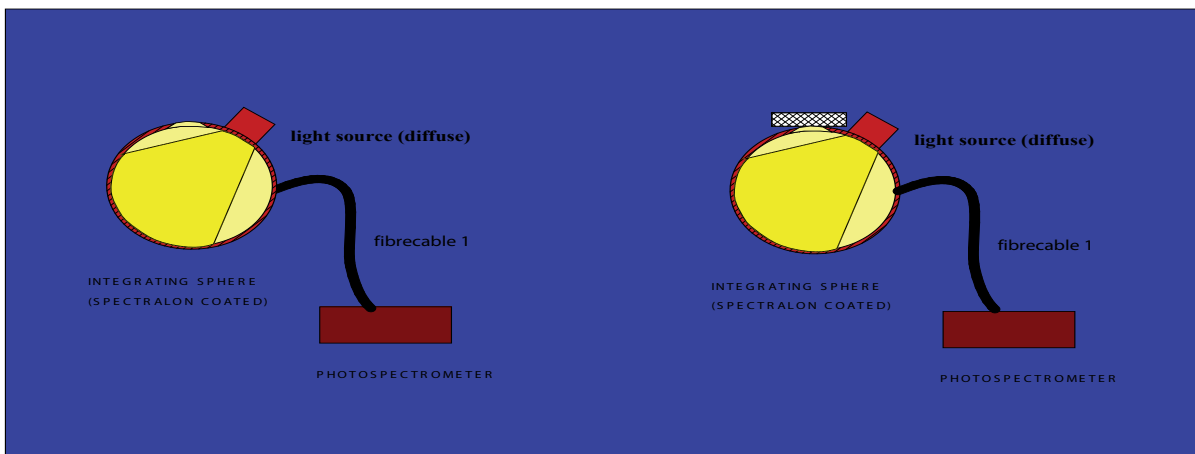
In de meeste gevallen is ρ_m gelijk aan ρ_r . In dat geval geldt:

$$\frac{L_m}{L_r} = \left(\frac{1 - \overline{\rho_r}}{1 - \overline{\rho_m}} \right) \quad (II.6)$$

Met:

$\overline{\rho_m}$ = gemiddelde wand reflectiewaarde met monster

$\overline{\rho_r}$ = gemiddelde wand reflectiewaarde met referentie



Figuur II.1.a. Meetopstelling diffuse reflectie metingen zonder monster

Figuur II.1.b. Meetopstelling diffuse reflectie metingen met monster

Reflectiemetingen en calibratie

Diffuus licht

In Figuur II.1. is de schematische meetopstelling voor diffuse lichtreflectiemetingen weergegeven. Voor reflectiemetingen wordt de lichtsterkte in de bol met en zonder monster vergeleken. Hiertoe wordt de bol belicht met een aparte lichtbron die geplaatst is in de poort naast de monsterpoort. Met vergelijking (3) kan dan de verhouding in lichtsterkte worden berekend. Voor de reële termen deze vergelijking kan een factor $1 - \rho = (C_1 - \rho_d f_m)$ genomen worden.

De lichtsterkte L_{dro} zonder monster is gelijk aan:

$$L_{dro} = L \frac{\rho_w}{C_1} \quad (II.7)$$

De lichtsterkte L_{drr} met referentie is gelijk aan:

$$L_{drr} = L \frac{\rho_w}{(C_1 - f_m \rho_{dr})} \quad (II.8)$$

Dan is de verhouding van de lichtsterktes bij referentie en zonder monster (formule (7) en (8); eerste lichtreflectie is in dit geval tegen de wand):

$$\frac{L_{drr}}{L_{dro}} = \frac{C_1}{(C_1 - f_m \rho_{dr})} \quad (II.9)$$

Na calibratie is de verhouding f_m / C_m bekend en daarmee kan de reflectie met vergelijking (11) berekend worden. Omschrijven van vergelijking (9) resulteert in de onderstaande uitdrukking voor onbekende calibratieterm. Deze is gelijk aan:

$$\frac{f_m}{C_1} = \frac{1}{\rho_{dr}} \left(\frac{L_{drr} - L_{dro}}{L_{drr}} \right) \quad (II.10)$$

De lichtsterkte L_{drm} met een monster is gelijk aan:

$$L_{drm} = L \frac{\rho_w}{(C_1 - f_m \rho_{dm})} \quad (II.11)$$

Met:

ρ_{dm} = diffuse reflectiewaarde van het monster

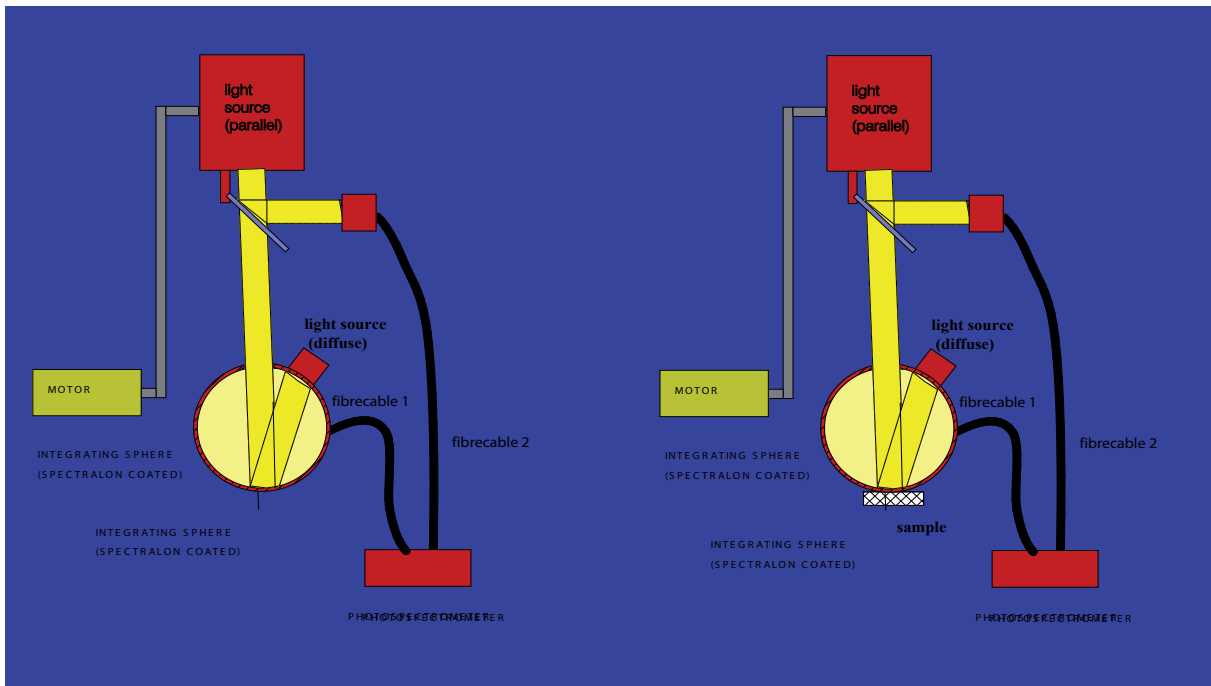
f_m = het fractionele poortoppervlak van de monsterpoort

Dan is de verhouding van de lichtsterktes bij referentie en monster (formule (8) en (11); eerste lichtreflectie is in dit geval tegen de wand):

$$\frac{L_{drm}}{L_{drr}} = \frac{(C_1 - f_m \rho_{dr})}{(C_1 - f_m \rho_{dm})} \quad (II.12)$$

Omschrijven van vergelijking (12) met vergelijking (10) geeft de diffuse reflectie ρ_{dm}]:

$$\rho_{dm} = \rho_{dr} \left(\frac{L_{drr}}{L_{drm}} \right) + \rho_{dr} \left(\frac{L_{drm} - L_{drr}}{L_{drr} - L_{dro}} \right) \left(\frac{L_{dro}}{L_{drm}} \right)$$



Figuur 11.2.a. Meetopstelling directe reflectie-metingen (invalshoek 4°) zonder monster

Figuur 11.2.b. Meetopstelling directe reflectie-metingen (invalshoek 4°) met monster

Reflectie direct invallend licht

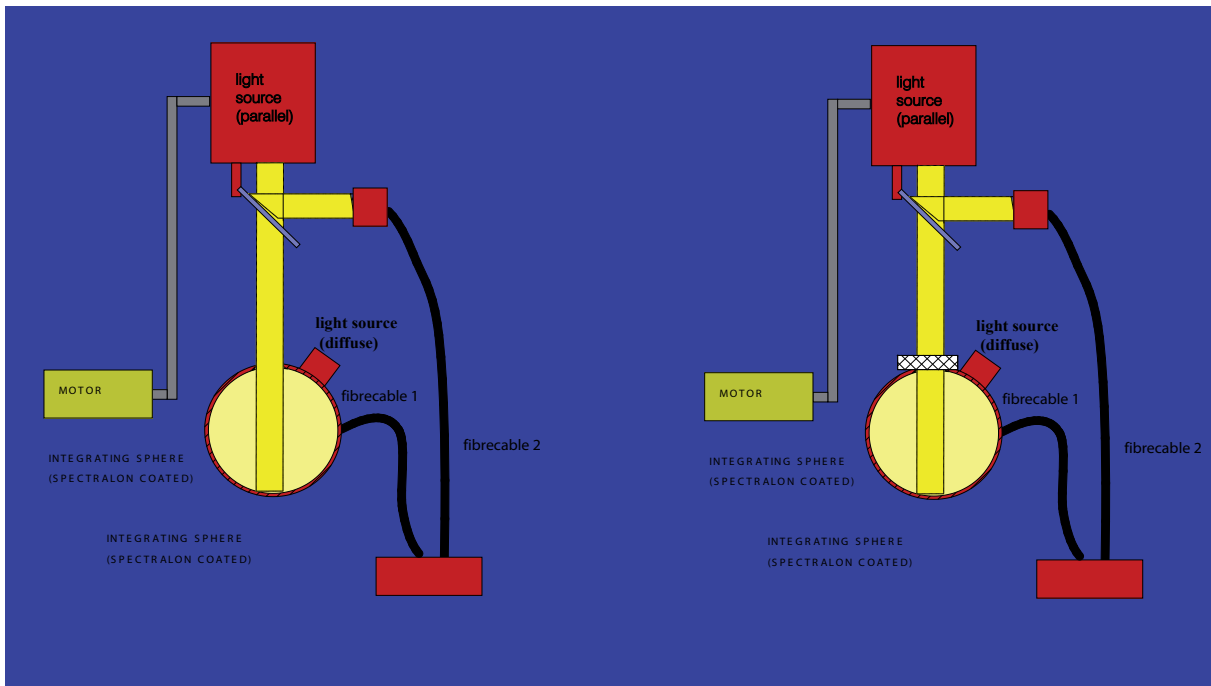
Meting van de reflectie van loodrecht opvallend licht is niet mogelijk omdat het gereflecteerde licht dan de integrerende bol weer verlaat. Daarom wordt het monster onder een kleine hoek van 4° belicht waarna gereflecteerd het licht juist in de bol blijft. De lichtsterkte in de bol met referentie L_{lrr} en met een monster L_{lrm} worden vergeleken. Voor de reële term van vergelijking (4) kan weer een factor $(C_1 - \rho_d f_m)$ genomen worden. De verhouding van de lichtsterktes met en zonder monster is:

$$\frac{L_{lrm}}{L_{lrr}} = \frac{\rho_{lm}}{\rho_{lr}} \cdot \frac{(C_1 - f_m \rho_{dr})}{(C_1 - f_m \rho_{dm})} \quad (11.13)$$

Hierbij is ρ_{lr} de loodrechte reflectie waarde van het referentie monster. De laatste term, de calibratiefactor, is reeds bekend van vergelijking (10) uit de reflectiemetingen voor diffuus licht. Zodat de reflectiewaarde te bepalen is met:

$$\rho_{lm} = \rho_{lr} \left(\frac{L_{lrm}}{L_{lrr}} \right) \left(\frac{L_{drr}}{L_{drm}} \right) \quad (11.14)$$

De reflectie waarde voor direct opvallend licht (ρ) is hiermee zonder verdere kallibratie te bepalen.



Figuur 11.3.a. Meetopstelling transmissiemetingen zonder monster

Figuur 11.3.b. Meetopstelling transmissiemetingen met monster

middeling en standaardisatie van lichttransmissie

De meetwaarden worden standaard berekend volgens de Nederlandse standaard: NEN 2675. Latere omrekening naar DIN 3055 en ASTM 1003 normering is mogelijk omdat de spectrale gegevens van de transmissie opgeslagen worden. De metingen zijn gecorrigeerd voor fluctuaties van de lichtbron door de gemeten lichtsterkte te delen door de lichtsterkte van de lichtbron.

De transmissie volgens de norm wordt berekend met:

$$\tau = \frac{\sum_{\lambda=400}^{700} D(\lambda)S(\lambda)\tau(\lambda)\Delta\lambda}{\sum_{\lambda=400}^{700} D(\lambda)S(\lambda)\Delta\lambda} \quad (11.15)$$

Met: $D(\lambda)$ de genormeerde spectrale energieverdeling van de stralingsbron D65 die overeenkomt met de spectrale energieverdeling van de zonnestraling bij heldere hemel.
 $S(\lambda)$ de relatieve plantgevoeligheid functie

Wanneer er een vast interval $\Delta\lambda$ van 10 nm genomen kan voor de volgens de norm de gewogen lichttransmissie vereenvoudigd berekend worden met:

$$\tau = 0,00045 \sum_{\lambda=400}^{700} A(\lambda)\tau(\lambda) \quad (11.16)$$

Waarbij: De gewichtsfunctie $A(\lambda)$ het product is van $D(\lambda)S(\lambda)$. De waarden hiervan zijn in Tabel 11.1 weergegeven.

Tabel II.1. De gewichtsfactoren $A(\lambda)$ volgens NEN 2675

Golflengte λ [nm]	Gewichtsfactor $A(\lambda)$	Golflengte λ [nm]	Gewichtsfactor $A(\lambda)$
400	23,64	560	80,00
410	53,59	570	78,44
420	56,06	580	79,37
430	53,25	590	74,75
440	65,91	600	77,15
450	75,22	610	78,08
460	77,42	620	77,68
470	77,12	630	74,96
480	79,49	640	76,54
490	76,17	650	74,31
500	78,11	660	75,63
510	78,54	670	78,75
520	77,84	680	76,04
530	81,54	690	68,72
540	80,54	700	35,80
550	81,75		

De aldus bepaalde lichttransmissie kan als functie van tijd in grafiekvorm worden weergegeven.

Ter verhoging van de nauwkeurigheid kunnen de spectrale gegevens $\tau(\lambda)$ over langere tijd gemiddeld worden.

$$\tau(\lambda) = \frac{\sum_{t_o=0}^t \tau(\lambda, t) \Delta t}{\sum_{t_o=0}^t \Delta t} \quad (\text{II.17})$$

Na een bepaalde meettijd t kan de genormeerde lichttransmissie met vergelijking (17) berekend worden. De spectrale gegevens van $\tau(\lambda)$ worden tevens opgeslagen zodat achteraf ook berekeningen volgens andere standaarden mogelijk zijn.

Eigenschappen van de integrerende bol

In Figuur II.3. is de integrerende bol weergegeven. De integrerende bol is gecoat met Spectraflex. Spectraflex heeft een reflectie van $\rho_w = 0,96$. De bol heeft een inwendige diameter van 378,46mm. Er zijn in totaal vier poorten aangebracht. De detector poort heeft een straal van $r_d = 6\text{mm}$ en de drie overige poorten, waarvan één monster poort, hebben alle een straal van: $r_m = 37,5\text{mm}$. Een overzicht van de oppervlaktefractie van alle poorten is gegeven in Tabel II.2. De totale fractiepoorten in de bol is laag namelijk 0,74%.

Tabel II.2. Overzicht van de oppervlakte fractie van de poorten

Onderdeel	Symbol	Oppervlak A [cm ²]	Oppervlaktefractie f
Bol	A_w	17999,06	-
Monster poort	A_m	44,18	2,45 *10 ⁻³
Reflectie poort	A_r	44,18	2,45 *10 ⁻³
Haze poort	A_h	44,18	2,45 *10 ⁻³
Detector poort	A_d	1,13	6,28 *10 ⁻⁵
Alle poorten	A_{eff}	133,7	7,42 *10 ⁻³

Referenties

- [1] A Guide to Integrating Sphere Theory and Applications, Techguide Labsphere P.O.Box 70 Shaker Street North Sutton 01/97-1.5K
- [2] Kortüm G.,(translated from the German by Lohr J.E.), Reflectance Spectroscopy, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1969
- [3] Wendlandt W.W., Hecht H.G., Reflectance Spectroscopy, Interscience Publishers, New York, London, Sydney 1966
- [4] Pickering J.W., Moes C.J.M., Sterenberg H.J.C.M., Prahl S.A, van Gemert M.J.C., Two integrating spheres with an intervening scattering sample, J.Opt.Soc.Am.A Vol9, No.4 April 1992 621-631

List of symbols

Φ	Invallende flux	[W]	\mathcal{M}	vermenigvuldigingsfactor	[-]
A	oppervlak	[m ²]	R	straal van de integrerende bol	[m]
C	bolconstante	[-]	t	tijd	[s]
L	verlichtingssterkte	[W ster ⁻¹ m ⁻²]	$\overline{\rho}$	gemiddelde reflectie	[-]
f	fractie van het bol oppervlak	[-]	ρ	reflectie	[-]

Subscripts:

0	incident	l	loodrecht
1,2,3	nummer, tijd	r	referentie
d	detector, diffuus	w	wand integrerende bol
i	poort nummer i		

Bijlage III tekening van het kasje

