

## TNO-rapport

TNO 2016 R00000

# Homogener klimaat in kassen

### Technical Sciences

Van Mourik Broekmanweg 6  
2628 XE Delft  
Postbus 49  
2600 AA Delft

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 30 00  
F +31 88 866 30 10

Datum	18 januari 2016
Auteur(s)	ing. B. Knoll en ing. J.C. Phaff m.m.v. ir. D. Parkhi
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	55 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	4
Opdrachtgever	programma 'Kas als Energiebron' LTO Glaskracht NL / min. ELI TNO SMO-financiering
Projectnaam	Overdruk
Projectnummer	060.03942



Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten 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.

© 2016 TNO

## Samenvatting

Het klimaat in moderne kassen blijkt aanzienlijke ongelijkmatigheden te vertonen. De temperatuurverschillen in lengte- of breedterichting van de kas blijken te kunnen oplopen tot meer dan 5 K en de verschillen in relatieve vochtigheid tot meer dan 15%. Naarmate meer energiezuinige voorzieningen zijn getroffen, lijken de afwijkingen alleen maar groter te zijn.

Dergelijke klimaatongelijkheden hebben niet alleen een duidelijk nadelig effect op de gewasproductie en –kwaliteit, maar ook op de nagestreefde energiezuinigheid. Daarom is het belangrijk de oorzaken van klimaatongelijkheid beter te leren begrijpen en remedies te ontwikkelen.

Het onderzoek, dat in dit rapport is beschreven, was gericht op het identificeren en kwantificeren van belangrijke invloedsfactoren op klimaatongelijkheid. Behalve dat analyses van klimaatmonitoring zijn uitgevoerd om belangrijke relaties te vinden, is als hulpmiddel een simulatiemodel opgezet dat deze relaties beschrijft in hun onderlinge samenhang. De bevindingen die hieruit volgen, hebben geleid tot verbetervoorstellen.

Klimaatongelijkheid kent vele oorzaken. De belangrijkste geconstateerde trends zijn:

- Klimaatongelijkheid neemt toe naarmate warmtestromen groter zijn (lage buitentemperaturen, veel zon).  
Een verklaring is dat door energiebesparende maatregelen de warmtestromen van het verwarmingssysteem minder dominant worden t.o.v. de fluctuaties door het buitenklimaat en dat die fluctuaties daardoor minder worden gecorrigeerd;
- Klimaatongelijkheid neemt ook toe naarmate de wind sterker is.  
Dit blijkt samen te hangen met een ongelijkmatige verdeling van de natuurlijke ventilatie via de raamluchting en kaslekken. Dat wordt nog versterkt doordat de raamregeling is gebaseerd op onnauwkeurige windwaarneming met de lokale meteomasten.  
Daarnaast kan van de gradiënt in wind over het kasdek ook een verloop in warmteafgifte van het dek worden verwacht;
- Gesloten schermen beperken klimaatongelijkheid, omdat ze zorgen dat fluctuaties in het buitenklimaat gedempt door komen.  
Anderzijds kunnen dichte schermen juist extra temperatuurongelijkheid veroorzaken. Dat ontstaat dan doordat de temperatuurverschillen er over toenemen. De verklaring is dat koudere lucht van boven het scherm via ondichtheden lokaal kan uitzakken. De plek waar dit gebeurt, is vaak de gevelzone (het laagste punt van het scherm), maar wordt mede bepaald door de voornoemde scheve ventilatieverdeling. De uitzakkende lucht werkt als aanjager voor een zichzelf versterkende interne luchtstroom, die resulteert in klimaatongelijkheid.  
Kritiek is ook het moment van openen van schermen. Dit veroorzaakt plaatselijk en tijdelijk ongewenste koudeval (nat slaan van het gewas);
- Latere aanpassingen aan de kas en installaties, vaak bedoeld om de energiezuinigheid te vergroten, zijn ook aan te merken als een oorzaak van klimaatongelijkheden. De warmtedistributie is dan ongemerkt verstoord.  
Voorbeelden zijn:
  - o Een verstoorde balans tussen de schermisolatie in dek en gevels, c.q. het onvoldoende daarop aanpassen van de gevelverwarming (bij de verschillende instellingen van de dekschermen).
  - o Toegenomen temperatuurverschillen tussen voor en achteraan het verwarmingsnet, die voortkomen uit het verwarmen op zo laag

mogelijke temperatuur (samenhangend met een relatief groter VO en lagere pompsnelheid).

Er zou een herontwerp zijn gewenst om te bepalen met welke installatieaanpassingen weer een zo evenwichtig mogelijke situatie kan worden bereikt. De ontwerpmodule die hiervoor nodig is, zou als rekenkern het ontwikkelde klimaatmodel kunnen hebben;

- Tenslotte kan klimaatongelijkheid ook het gevolg zijn van een niet-uniform (emitterend) gewas of van basale onvolkomenheden, zoals:
  - o kapotte ruiten en ongelijke lekken in afschermingen (schermen, tussenwanden, regelmatig openende toegangsdeuren),
  - o slecht afgeregelde instelkleppen,
  - o regeling op basis van onnauwkeurige sensoren,
  - o zwakke systeemontwerpen.

Tussen kassen onderling kunnen de effecten aanzienlijk verschillen. Dat hangt samen met de geometrie van de kas en teeltopstellingen en met verschillen in teelt en klimaatinstallaties.

Klimaatongelijkheid kan met verschillende maatregelen worden beheerst of teruggedrongen. Gezien de sterke onderlinge verschillen tussen kassen, variëren ook de maatregelen die daar het beste passen. Het opgestelde simulatiemodel kan helpen om een goede afweging tussen de mogelijke maatregelen te maken of om voor specifieke gevallen de juiste keuzen te maken.

De maatregelen waarmee belangrijke verbeteringen worden verwacht, zijn:

- Een goed systeemontwerp of herontwerp na aanpassingen en dito uitvoering. Dit betreft tenminste de balans tussen schermisolatie van het dek en de gevels;
- Maatregelen om versturende luchtstromen door uitzakken van koude van boven het scherm te voorkomen:
  - o Betere afdichting van de schermen, schermaansluitingen en schermkieren,
  - o Remmende voorzieningen zoals nokschotten of tegengesteld blazende stuwventilatoren,
  - o Overdruk tussen de kas en de ruimte boven het scherm d.m.v. overstroom van ventilatielucht of door aanzuig van circulatielucht van boven het scherm;
- Gelijkmatiger distributie van ventilatielucht door de kasramen. Dit kan door verfijning van de zonering van het luchtmechaniek, aansturing door een intelligente regeling met betrouwbaarder windsensoren en zo mogelijk toepassing van tweezijdig scharnierende luchtramen waarover loef- en lij-effecten in alle windrichtingen worden gegenereerd;
- Mechanische ventilatie en circulatie met gerichter toevoer rond en door het gewas, zodat een gelijkmatiger droging en uniformere klimaatopbouw ontstaat;
- Toepassing van (aanvullende) decentrale klimaatsystemen, omdat daarmee lokale verschillen kunnen worden weggeregeld;
- Reduceren van versturende warmtestromen bij de bron, bijvoorbeeld het direct koelen van assimilatielampen.

# Inhoudsopgave

	<b>Samenvatting .....</b>	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Opzet van het onderzoek .....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Criteria voor klimaatongelijkheid .....</b>	<b>7</b>
3.1	Inleiding .....	7
3.2	Enquête onder telers .....	7
3.3	Beoordeling in de meetpraktijk .....	7
3.4	Verbeterd criterium voor klimaatongelijkheid .....	8
<b>4</b>	<b>Analyse van monitoringsgegevens .....</b>	<b>11</b>
4.1	Inzicht door monitoring .....	11
4.2	Correlaties .....	11
4.3	Scherminvloeden .....	12
4.4	Invloeden van warmtestromen .....	14
4.5	Invloeden van vochtstromen.....	16
4.6	Invloed van luchtbeweging .....	17
4.7	Invloed van HNT .....	19
4.8	Relaties met wind en ventilatie .....	20
4.9	Betrouwbaarheid van meetsignalen .....	23
<b>5</b>	<b>Resumé invloedsfactoren .....</b>	<b>25</b>
5.1	Hoofdpunten .....	25
5.2	Factoren voor luchtverdeling .....	25
5.3	Factoren voor warmteverdeling .....	25
5.4	Ontwerp- en uitvoeringsdefecten.....	26
<b>6</b>	<b>Modellering.....</b>	<b>27</b>
6.1	Beschrijvend model .....	27
6.2	Ontwerpmodule .....	29
<b>7</b>	<b>Verbetermogelijkheden .....</b>	<b>31</b>
7.1	Beproefde remedies .....	31
7.2	Verdere verbetermogelijkheden .....	31
7.3	Terugkoppeling uit Technologieclusters .....	32
<b>8</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen .....</b>	<b>36</b>
<b>9</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>38</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
	A Verlopen van klimaatongelijkheid	
	B Verbanden met de windrichting	
	C Vergelijking lokale meteo met KNMI	
	D Toelichting op het klimaatmodel	

# 1 Inleiding

Er zijn en worden met succes stappen gezet om het energiegebruik in tuinbouwkassen terug te dringen. Tegelijk blijkt echter juist in energiezuinige kassen een toename van ongewenste klimaatverschillen op te treden [1]. Het blijkt dat vooral in energiezuinige kassen in lengte- of breedterichting van de kas temperatuurverschillen ontstaan, die kunnen oplopen tot meer dan 5 K naarmate het buiten kouder is. De overeenkomstige verschillen in relatieve vochtigheid lopen op tot meer dan 15%. In de traditionele kassen kwam dit veel minder voor. Dat er een samenhang is met de energiebesparende maatregelen is wel duidelijk.

Een inhomogeen klimaat is sterk nadelig voor de kwaliteit en ontwikkeling van het gewas en de te oogsten producten. Om gewasschade en –uitval zoveel mogelijk te beperken, wordt meer gestookt, zodat de condities ook op plaatsen met de laagste kasttemperatuur of hoogste vochtigheid acceptabel worden. Tevens wordt eerder geventileerd, om ook het vocht te beheersen op de koude plekken die relatief vochtiger zijn. Dit moet vooral gebeuren als de klimaatverschillen groot worden en dat is juist als de stookbehoefte aanzienlijk is. Daarom leert een voorzichtige schatting dat men door deze ingrepen wel 20% meer kan verstoken dan bij een homogeen klimaat. Niet alleen deze extra stookkosten, maar ook verminderde oogstopbrengsten en verhoogde arbeidskosten voor gewasverzorging resulteren in een belangrijke economische schade.

Het is duidelijk dat klimaatverschillen een (te) grote weerslag hebben op de gerealiseerde energiebesparing. Ze zorgen dat men grote veiligheidsmarges moet aanhouden ten opzichte van kritieke klimaatcondities, waar men dichterbij tracht te blijven als men teelt volgens de principes van 'Het Nieuwe Telen'. Door hun negatieve invloed op gerealiseerde besparingen vormen klimaatverschillen ook een barrière voor het economisch verantwoord doorvoeren van verdergaande besparingsmaatregelen. Daarom is het voor de sector van groot belang de oorzaken te achterhalen, te begrijpen en middelen te vinden om klimaatverschillen te verhelpen of dan tenminste te beperken, in samenhang met voortgaande besparingsmaatregelen.

Het in dit rapport beschreven project heeft als doel de belangrijke oorzaken van optredende klimaatverschillen te achterhalen en de systematiek er van zo goed mogelijk vast te leggen in een beschrijvend model.

Het model moet op termijn als hulpmiddel gaan dienen om beschikbare en potentiële voorzieningen systematisch te evalueren en verbeteringen te ontwikkelen die een uniformer kasklimaat mogelijk maken. Met dit hulpmiddel dient van bestaande en nieuwe energiebesparende maatregelen het effect op klimaatongelijkheid in uiteenlopende teelten te kunnen worden getoetst, zodat ze hierop kunnen worden geselecteerd en zo nodig aangepast.

## 2 Opzet van het onderzoek

Het onderzoek is opgebouwd uit de volgende hoofdtaken:

1. Identificatie en kwantificering van belangrijke invloedsfactoren;
2. Opbouw en validatie van een beschrijvend model;
3. Ontwikkelen van een ontwerpmodule voor verbetermogelijkheden;
4. Kennisverspreiding.

### Ad 1 Identificatie

Hierbij is nagegaan welke grootheden een belangrijke rol spelen bij het ontstaan van klimaatongelijkheid. Via (nadere) statistische analyses is getracht inzicht te krijgen in hun onderlinge relaties. Deze analyses zijn uitgevoerd op een veelheid aan gegevens uit monitoringsprojecten, aangevuld met gegevens van de klimaatcomputers. Het gaat zowel om klimaatmonitoring die eerder is uitgevoerd als om aanvullende monitoring in het kader van het project. De eerder uitgevoerde projecten betreffen Bio Verbeek, Brakelsbos, Butterfly Orchids, Fresh Valley, Grenspaal, Lankhaar, Red Star, Ruijter, Theeuwen en Themato. De aanvullende monitoring is in overleg met de opdrachtgever later toegevoegd en vond plaats bij Holstein en Zuiderwijk.

### Ad 2 Beschrijvend model

Met behulp van fysische wetmatigheden zijn de gevonden relaties uit de voorgaande fase zo goed mogelijk beschreven in een simulatiemodel. Het model zorgt dat ook de onderlinge interacties van de afzonderlijke invloedsfactoren op het kasklimaat goed worden beschreven.

De validatie van dit model heeft plaatsgevonden door zijn voorspellingen te toetsen aan diverse relevante meetsituaties, in plaats van via de oorspronkelijk geplande evaluatiemetingen. Enerzijds was dit pragmatisch vanwege de meetgegevens die reeds voorhanden waren, anderzijds moest er ruimte worden gewonnen vanwege het toevoegen van de aanvullende monitoringsprojecten.

### Ad 3 Ontwerpmodule

Omdat het voornoemde beschrijvende model vooral voor de studie is opgezet, is het niet direct bruikbaar voor ontwerpers. Daarom is een aanzet gegeven tot een ontwerpmodule waarmee derden mogelijke maatregelen kunnen gaan evalueren en specificaties kunnen genereren waarbij kassystemen zo doelmatig mogelijk zijn. De werkzaamheden betreffen vooral de gebruiksvriendelijke in- en uitvoer van het model en de vertaling van eigenschappen van maatregelen in fysische (model)grootheden.

### Ad 4 Kennisverspreiding

Naast onderhavige rapportage zijn presentaties gegeven en is meegewerkt aan artikelen in de vakpers om de opgebouwde kennis en inzichten omtrent het homogener maken van het kasklimaat te delen met belanghebbenden.

## 3 Criteria voor klimaatongelijkheid

### 3.1 Inleiding

Alvorens nader in te gaan op de oorzaken van optredende klimaatongelijkheid wordt eerst ingegaan op de vraag welke afwijkingen als al dan niet toelaatbaar dienen te worden gezien.

Ongelijkmatigheid in het kasklimaat zorgt er voor dat planten zich niet in optimale groeiomstandigheden bevinden. In principe leidt dit tot productie- en/of kwaliteitsverlies. Bij ernstige afwijkingen kan zelfs plantschade en uitval van gewas ontstaan. Het criterium voor klimaatongelijkheid moet zijn dat de risico's hierop voldoende worden beperkt. Het is gewenst een eenduidige definitie te hebben van klimaatongelijkheid en de globale grenswaarden die hiervoor worden gehanteerd.

### 3.2 Enquête onder telers

Door middel van een beperkte enquête is aan telers gevraagd wat zij belangrijk achten voor het beoordelen van klimaatongelijkheid.

De belangrijkste aspecten die worden genoemd, zijn:

- Temperatuur binnen een beperkte bandbreedte houden. Men noemt als criterium 1 tot 2 K temperatuurverschil als gemiddelde over enkele aansluitende uren;
- Voor vocht is het meest kritisch dat geen condensatie op het gewas optreedt en geen  $RV > 95\%$  gedurende langere tijd (enkele uren). Vooral het nat slaan van het gewas moet worden voorkomen. Dit vormt een absolute bovengrens vanwege schade aan het uiterlijk van de vrucht, plant of bloem;
- De homogeniteit is in horizontale kasrichting kritischer dan verticaal;
- De bandbreedte is overdag minder kritisch dan in de nacht;
- Een goed criterium is afhankelijk van de situatie (teelt, kasgrootte, teeltperiode, etmaalritme, vochtgevoeligheid van de planten, type kas);
- Variaties in de tijd dienen ook in de waardering te worden meegenomen.

Bepaalde variaties in de tijd zijn geoorloofd of worden zelfs nagestreefd. Dat laatste betreft verticale verschillen. Horizontale verschillen worden nooit nagestreefd. Afwijkingen zijn tot op zekere hoogte geoorloofd als ze in de tijd afdoende worden uitgemiddeld.

Gewenste variaties hangen samen met het etmaalritme of met de groei- en bloeistadia van de planten.

Geoorloofde variaties komen voort uit een kostenafweging. Het betreft compromissen tussen verminderde teeltopbrengsten door niet-optimale plantomstandigheden en beperking van de kosten van klimatisering (investering in klimaatsystemen en energiekosten). Voorbeelden zijn:

- Verlaagde temperatuurinstelling in de winter en verhoogde temperatuurinstelling in de zomer;
- Anticiperen op het vermogen van planten om zelf bepaalde fluctuaties te ondervangen (temperatuurintegratie).

### 3.3 Beoordeling in de meetpraktijk

Er is een aantal meetbureaus die klimaatongelijkheid in de praktijk meten met behulp van een netwerk van temperatuur- en vochtsensoren in de kas. Deze richten de beoordeling op de verschillen in meetuitkomsten tussen de verschillende locaties in de kas(afdeling) op eenzelfde tijdstip. Eerst bepaalt men het gemiddelde

van alle meetlocaties op eenzelfde tijdstip. Vervolgens gaat men na op welk percentage van de meetlocaties de afwijking t.o.v. dit gemiddelde groter is dan een grenscriterium. Dit percentage noemt men de inhomogeniteit. Als grenscriterium wordt hierbij vaak de maximaal toegestane afwijking van  $\pm 0,75$  K van de groen-label kas gehanteerd. Overigens kon bij navraag geen concrete onderbouwing worden gegeven voor dit criterium.

Het is opvallend dat de verlopen in de tijd (per meetlocatie) niet worden meegenomen. Men kent dus alleen een plaats- en geen tijd-afhankelijke inhomogeniteit. Het argument daarvoor is dat zekere variaties in de tijd zijn toegestaan c.q. ontspruiten aan de wensen en inzichten van de telers. Bij een goede klimaatregeling zouden deze vanzelf tot uiting moeten komen in de ingestelde waarden. Anders gezegd, de gemiddelde kasttemperatuur wordt dus op elk moment als 'ideaal' beschouwd, een aanname die discutabel is. In dat geval zou het inderdaad moeten volstaan om klimaatongelijkheid te beoordelen op optredende afwijkingen t.o.v. de ingestelde (momentane) waarden. Om de ingestelde waarde niet via de klimaatcomputer te hoeven opvragen, gaat men er vanuit dat deze gelijk is aan het gemiddelde van alle meetsensoren. Dit is betwistbaar, vanwege onderlinge meetafwijkingen en regeltraagheden. Om (o.a.) hieraan tegemoet te komen, bieden de meetbureaus veelal de mogelijkheid om de inhomogeniteit te wegen t.o.v. een langduriger (bijvoorbeeld 1 of 6 uur) gemiddelde in plaats van het momentane.

In discussie met de meetbureaus zijn mogelijke aanpassingen besproken. De voorstellen hiervoor zijn:

- Nuancering van de bandbreedte voor beoordeling van de toegelaten temperatuurafwijking. Onderscheiden wordt een horizontale afwijking van  $\pm 1$  tot  $2$  K en een verticale van  $\pm 2$  tot  $3$  K;
- Hantering van een bandbreedte voor de relatieve vochtigheid, zowel horizontaal als verticaal, van  $\pm 5\%$ ;
- Rekening houden met temperatuurintegratie, onderscheiden naar dag en nacht en per seizoen (nader uit te werken).

### 3.4 Verbeterd criterium voor klimaatongelijkheid

In de natuur ondervinden planten bepaalde klimaatverschillen waar tegen ze kennelijk bestand zijn. Een voorbeeld zijn de verticale temperatuurverschillen die ontstaan door bezonning overdag (plantkop warmer dan de plantvoet) en uitstraling in de nacht (plantkop kouder dan de plantvoet). Afhankelijk van het gewas trachten telers extremen hierin te beperken, maar zekere afwijkingen zijn acceptabel. Planten hebben ook het vermogen om zelf tijdelijk bepaalde fluctuaties te ondervangen, zonder al te nadelige gevolgen. Dit vermogen wordt benut en is bekend als 'temperatuurintegratie'. Een goed criterium voor klimaatongelijkheid zou met deze effecten rekening moeten houden. Dat is nu niet het geval.

Telers hanteren onderscheiden klimaatcondities gedurende de dag en de nacht. In de (al dan niet kunstmatige) dagperiode wordt het aangeboden licht door de plant benut voor de fotosynthesereactie. Om deze reactie optimaal te laten verlopen en zoveel mogelijk aan de plantgroei en bloem- of vruchtontwikkeling ten goede te laten komen, worden de temperaturen overdag hierop afgestemd. In de nacht vindt er geen assimilatie plaats. Om energie te besparen wordt dan gekozen voor lagere temperaturen.

Ook de ingestelde luchtvochtigheid is belangrijk. Planten moeten niet teveel vocht aan de omringende lucht overdragen, omdat dit ten koste gaat van een optimale groei. Om gewasschade te voorkomen, dienen planten hun vocht wel afdoende aan de lucht kwijt te kunnen. Enerzijds is daarvoor de mate van vochtproductie van (c.q.



verdamping door) de plant van belang. Die is in hoge mate afhankelijk van het lichtaanbod. Anderzijds vergt het voldoende mogelijkheden voor vochtopname door de lucht. Fysisch gezien vergt dit een afdoende dampdrukverschil tussen blad en lucht, dat in hoge mate afhangt met de luchtbeweging rond de plant. Voor telers betekent dit praktisch dat ze hoge relatieve vochtigheden willen voorkomen. Om zijn water te kunnen verdampen, onttrekt de plant verdampingswarmte aan de kaslucht. Zo zijn de vochtigheid en het lichtaanbod dus indirect van invloed op de temperatuur, c.q. op de stook- of ventilatiebehoefte die nodig is om de temperatuur op een gewenst niveau te kunnen handhaven.

Voor optimale plantcondities proberen telers de (combinaties van) kastemperatuur en –vochtigheid alsmede de luchtbeweging rond bepaalde ideale waarden per gewas te krijgen. Zekere bandbreedten zijn toegestaan, zonder dat dit de plantcondities al teveel ongunstig beïnvloedt. De afwijkingen die men hanteert hangen samen met (de verwachte dagsom van) het lichtaanbod en met de buitencondities (energievraag), maar worden ook ingegeven door het gewasstadium en productiedoelen (bijv. naar piekdagen toewerken). Te grote afwijkingen moeten worden vermeden, omdat dit tot allerlei schadelijke effecten kan leiden.

In het algemeen kan men stellen dat naarmate de klimaatafwijkingen t.o.v. het optimum groter worden de risico's exponentieel toenemen. Figuur 1 illustreert dit. De getalswaarden zijn indicatief. Op basis van plantkundige gegevens dienen ze per gewas te worden geconcretiseerd.

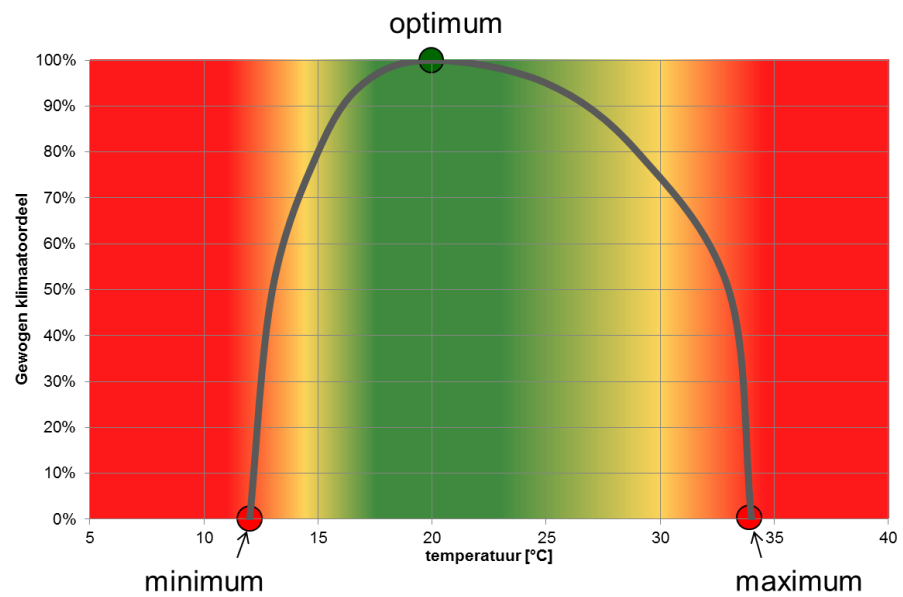
In bijeenkomsten met telers en bureaus die klimaatmonitoring uitvoeren, is voorgesteld een plantgevoeligheidscurve als in Figuur 1 als basis te gaan laten dienen voor een verbeterd beoordelingscriterium voor klimaatongelijkheid. Nieuw daarbij is dat niet de momentane toestand, maar een soort integraal van achtereenvolgende klimaattoestanden bepalend wordt. Momentane uitschieters zijn alleen nog van belang om acute effecten te signaleren.

Een andere afwijking t.o.v. het huidige beoordelingscriterium is dat het klimaat op elke meetpositie autonoom wordt beoordeeld. Het wordt dus niet meer als afwijking t.o.v. het gemiddelde van alle kasposities beoordeeld, omdat ook dit gemiddelde nadelig voor de planten kan zijn.

Als grootheid is in plaats van de temperatuur een mix van temperatuur, vochtigheid en luchtbeweging aan te bevelen, die meer karakteristiek is voor de warmte- en vochtoverdracht tussen de plant en zijn directe omgeving.

Opeenvolgende positieve of negatieve afwijkingen (fysiologisch gezien het onophoudelijk oplopen van de waterdruk in de bladcellen of juist het voortdurend uitdrogen van de plant) dienen elkaar te versterken. Cumulatief dienen ze sneller tot het bereiken van de grens aan een toelaatbare afwijking te leiden. Afwisselende positieve en negatieve afwijkingen dienen elkaar deels te compenseren, ofwel cumulatief langzamer tot het bereiken van de grens te leiden.

In de uitvoering kan het verbeterde beoordelingscriterium voor elke meetpositie wiskundig worden bepaald als een voortschrijdend, gewogen gemiddelde afwijking t.o.v. een klimaatoptimum. De weging is volgens een soortgelijke curve als in Figuur 1. Bij de bepaling van het voortschrijdend gemiddelde van de klimaatafwijkingen wordt een momentane (meet)waarde met hetzelfde teken als het actuele gemiddelde geheel in rekening gebracht, terwijl bij een tegengesteld teken een fractie in rekening wordt gebracht. Het te hanteren klimaatoptimum kan een gewenste etmaal- en groeicurve van de plant volgen.



Figuur 1 Een gewogen klimaatoordeel dient grotere klimaatafwijkingen t.o.v. het optimum exponentieel sterker mee te wegen bij de risicobeoordeling

De verwachting is dat een verbeterd toetscriterium zoals voornoemd tot een correcter beoordeling van klimaateffecten op het gewas zal leiden. Daarbij zijn niet meer arbitraire onderlinge niveauverschillen, die momentaan optreden tussen planten, maatgevend. In het nieuwe criterium zijn dan de voortschrijdende absolute niveaus van temperatuur, vochtigheid en luchtsnelheid per plant(locatie) van belang.

Het zal duidelijk zijn dat de uitwerking van zo'n verbeterd toetscriterium nog de nodige ontwikkeling vergt, waarbij plantkundige inbreng onontbeerlijk is. Toch lijkt het de inspanning waard. Niet alleen kan een betere beoordeling van klimaatongelijkheid worden verkregen, maar het criterium kan ook de grondslag gaan vormen voor een dynamischer, meer opportune regeling. Daarmee kan het aanspreken van de klimaatinstallaties worden beperkt, dus op een goedkope manier energie worden bespaard, zonder nadelige effecten voor de planten.

## 4 Analyse van monitoringsgegevens

### 4.1 Inzicht door monitoring

De afgelopen 20 jaar zijn tuinbouwkassen door schaalvergroting gegroeid van 1 tot circa 10 hectare. De kaplengten zijn navenant gegroeid.

Als energiebesparende voorzieningen zijn (extra) schermen aangebracht. Dit is vaak tussentijds gebeurd. Tevens wordt in sommige kassen ook mechanische ventilatie met voorverwarming toegepast. Deze maatregelen leiden er toe dat op lagere temperaturen wordt gestookt.

Door de aanpassingen aan de kas en het stookregime wijzigt de interne warmtehuishouding t.o.v. het oorspronkelijke ontwerp. Dit wordt echter niet gesignaleerd, omdat het klimaat in de huidige tuinbouwkassen wordt geregeld met gemiddeld 1 temperatuursensor per hectare. Met deze geringe sensordichtheid zijn ongelijkmatigheden in het kasklimaat niet of nauwelijks te onderkennen.

Om het inzicht in de optredende klimaatverschillen te vergroten, zijn op verschillende tuinbouwbedrijven inmiddels klimaatregistraties verricht, met behulp van draadloze sensornetwerken. Toch leidt dit niet of zelden tot een herontwerp van en aanpassingen aan het warmteverdeelsysteem. Het inzicht leidt vooral tot rudimentaire aanpassingen, zoals:

- herstel van fouten in installaties,
- reparaties van kasdek of schermen,
- aanpassing van regel- en voorinstellingen.

De uitdaging is om uit de registraties voldoende inzicht op te bouwen voor structurele verbeteringen die de klimaatverschillen significant terugdringen. Hiertoe is op monitoringsgegevens een nadere analyse verricht naar de onderlinge samenhang van ongelijkmatige klimaatopbouw en al zijn mogelijke invloedsfactoren. Die samenhang zal tussen de gemonitorde bedrijven ook nog verschillen vertonen. In de hierna beschreven analyses is getracht zoveel mogelijk de meest representatieve verbanden er uit te lichten.

### 4.2 Correlaties

Als eerste stap zijn correlatiekaarten gemaakt, die aangeven welke grootheden relatief gezien de sterkste verbanden vertonen met klimaatongelijkheid en met elkaar onderling. Figuur 2 toont een voorbeeld.

Naarmate de absolute waarde van het correlatiegetal dichterbij 1 ligt (feller rood of groen), is het verband tussen de grootheden sterker. Een getal 0 (blank) duidt op geen verband. Een positief getal (groen) wil zeggen dat de afhankelijke grootheid toeneemt met de invloedsfactor, terwijl een negatief getal (rood) op een afname duidt.

In het voorbeeld wordt de klimaatongelijkheid gekarakteriseerd met dT-plant (eerste kolom met een afhankelijke grootheid). De ongelijkheid blijkt volgens Figuur 2 het sterkst te worden beïnvloed door het schermgebruik en daarna successievelijk door bezonning, stoken (lage buitentemperatuur), wind en vocht.

	dTplant	gem kastemp	gem buitentemp	bin-bui	gem straling	gem windsnelheid	windrichting gr	regen	gem doek	Ontvochtigers aan	gem RV	gem VD	gem wind	gem luw	gem buis 1	gem buis 2
dTplant																
gem kastemp	0.09															
gem buitentemp	0.66	0.56														
bin-bui	-0.65	0.37	-0.56													
gem straling	0.73	0.41	0.85	-0.55												
gem windsnelheid	0.45	0.41	0.65	-0.32	0.52											
windrichting gr	-0.11	-0.17	-0.18	0.04	-0.14	-0.26										
regen	-0.09	-0.14	-0.13	0.01	-0.06	0.03	-0.04									
gem doek	-0.83	-0.05	-0.70	0.74	-0.77	-0.44	0.12	0.01								
Ontvochtigers aan	-0.22	-0.40	-0.43	0.08	-0.44	-0.33	0.11	-0.13	0.34							
gem RV	-0.58	-0.59	-0.82	0.34	-0.80	-0.61	0.22	0.04	0.68	0.70						
gem VD	0.51	0.74	0.84	-0.20	0.78	0.61	-0.21	-0.08	-0.60	-0.66	-0.98					
gem wind	0.31	0.18	0.19	-0.03	0.19	0.17	-0.02	0.03	-0.21	-0.11	-0.22	0.24				
gem luw	0.55	0.47	0.71	-0.33	0.67	0.50	-0.14	-0.01	-0.52	-0.42	-0.77	0.77	0.36			
gem buis 1	-0.65	-0.28	-0.89	0.72	-0.77	-0.57	0.09	0.07	0.72	0.30	0.65	-0.63	-0.16	-0.60		
gem buis 2	-0.70	-0.30	-0.86	0.66	-0.80	-0.56	0.13	0.10	0.73	0.18	0.65	-0.64	-0.16	-0.63	0.90	
gew warmte verm	-0.71	-0.27	-0.85	0.69	-0.81	-0.55	0.08	0.07	0.77	0.31	0.69	-0.66	-0.17	-0.63	0.89	0.96

Figuur 2 Voorbeeld van een correlatiekaart

Hoewel de correlatiekaarten voor verschillende tuinbouwbedrijven aanzienlijk kunnen verschillen, blijkt een aantal correlaties toch steeds dominant te zijn, al wisselt hun onderlinge volgorde en is het gebruik van onderscheiden klimaatsystemen van invloed. Zo komt bijvoorbeeld bij het gebruik van Ventilation Jets (verticale ventilatie) dit systeem als relevante invloedsfactor terug in de correlatiekaart, terwijl op een ander bedrijf bij gebruik van luchtslurven de LBK als relevante invloedsfactor wordt aangemerkt.

In het algemeen kan men stellen dat klimaatongelijkheid belangrijk wordt beïnvloed door het schermgebruik en vooral blijkt toe te nemen met de warmte- en vochtstromen. Ventilatie en wind als dominante factor voor natuurlijke ventilatie (raamluchting) blijkt eveneens van invloed.

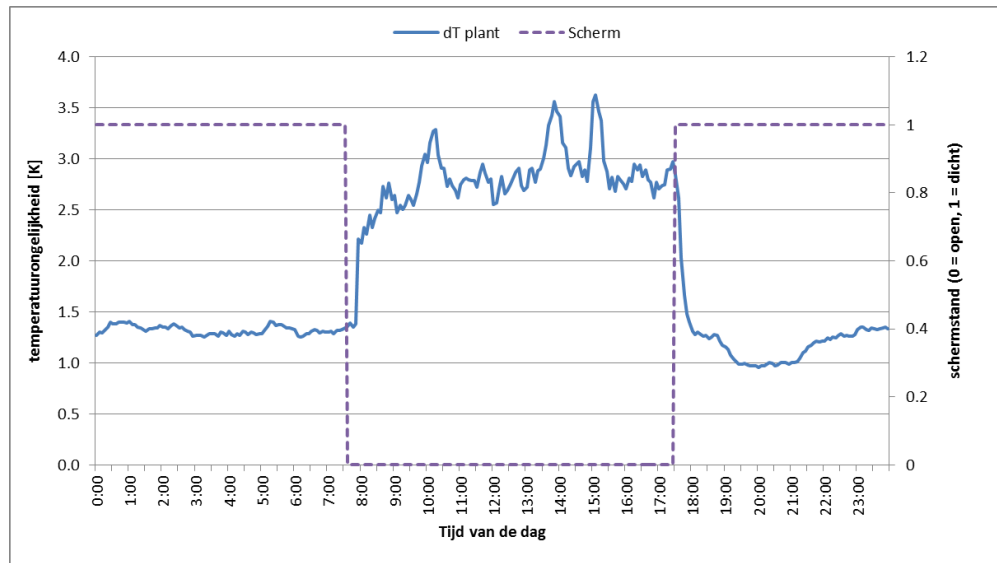
Op elk van de genoemde dominante invloedsfactoren wordt hierna verder ingegaan.

### 4.3 Scherminvloeden

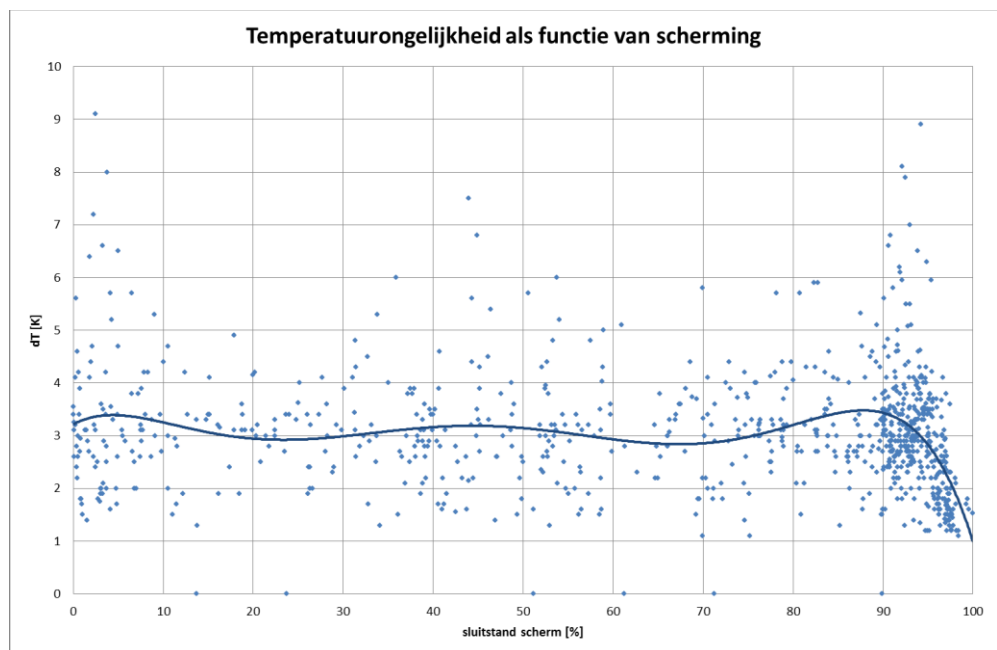
#### 4.3.1 Functie als demper

Een gesloten scherm blijkt een duidelijk dempende werking te hebben op de klimaatongelijkheid. Figuur 3 toont een representatief etmaalverloop van de klimaatongelijkheid (horizontaal temperatuurverschil dT op plantniveau) in relatie tot het schermgebruik. Het effect wordt mede beïnvloed door andere invloedsfactoren (zie hiervoor de bovenste figuren in Tabel 1, 2 en 3 van bijlage A). Een groter temperatuurverschil met buiten, meer wind en meer zoninstraling versterken de klimaatongelijkheid. Desondanks blijft de scherminvloed duidelijk herkenbaar.

Figuur 4 laat zien dat de dempende werking van het scherm op de temperatuurongelijkheid pas ontstaat als het scherm (zo goed als) gesloten is. Dat is overigens (begrijpelijkerwijs) een veel voorkomende schermstand. Het betekent niet dat standen tussen geheel open of dicht ook niet regelmatig voor komen. Dat is met name het geval in planten- en bloemeteelten waar felle zon minder is gewenst en toch de warmteafvoer via het dek in hoge mate in stand moet blijven.



Figuur 3 Representatief etmaalverloop temperatuurongelijkheid afhankelijk van schermstand



Figuur 4 De temperatuurongelijkheid neemt pas af als het scherm (vrijwel) geheel sluit

#### 4.3.2 Koudeval bij openen

Tijdens het openen van een gesloten scherm treedt tijdelijk een sterke lokale klimaatongelijkheid op. Met de monitoringsprojecten is dit niet in kaart gebracht, omdat de metingen niet fijnmazig genoeg zijn uitgevoerd.

Via de scherm spleet treedt lokale koudeval op die zorgt voor een schokeffect op de planten die zich onder de schermopening bevinden. De plotselinge lokale afkoeling kan leiden tot nat slaan van het gewas. Zoals in H3.2 is aangegeven, achten telers deze situatie kritiek.

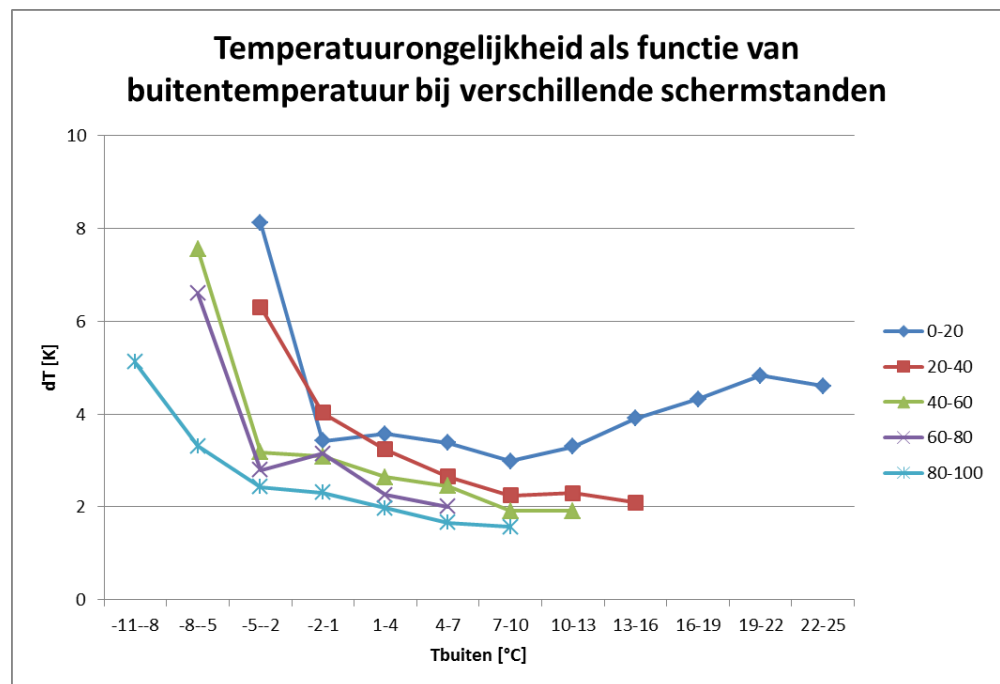
Om het probleem te verzachten wordt vaak de verwarming opgestookt, waarna het scherm stapsgewijs in een klein half uur een aantal centimeters opent, alvorens in

één keer geheel open te gaan. Toch treedt ook dan nog een aanzienlijke tijdelijke daling van de kasttemperatuur op. Het trage openen van het scherm heeft voorts als nadeel dat de daglichtsom wordt gereduceerd. Verdere verbeteringen worden dus wenselijk geacht.

#### 4.4 Invloeden van warmtestromen

##### 4.4.1 Effect van buitentemperatuur

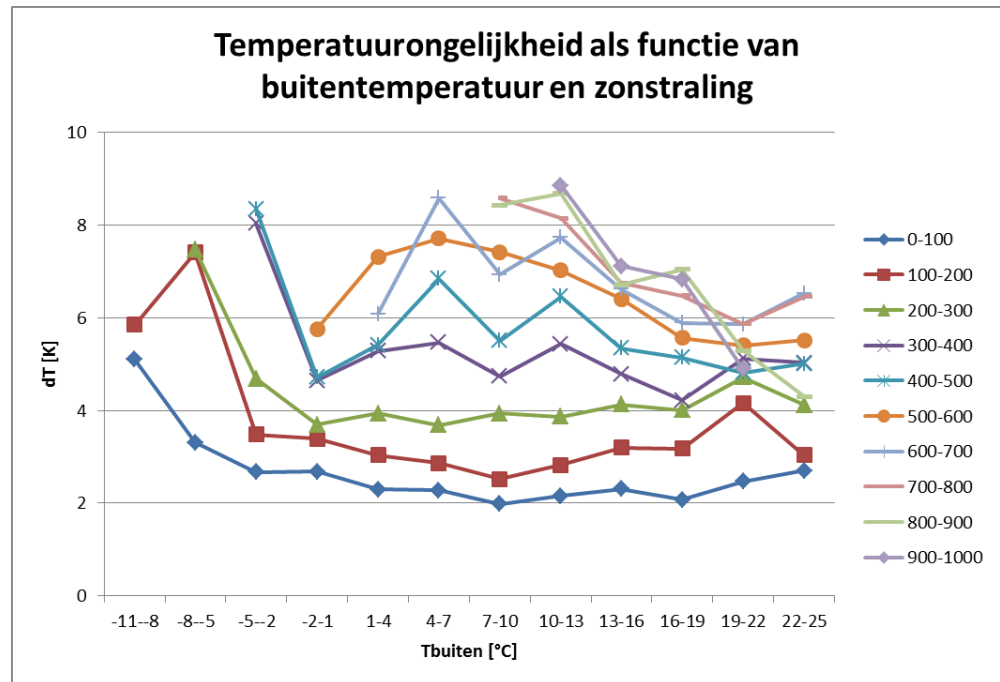
Een dalende buitentemperatuur zorgt voor toenemende warmtestromen in en uit de kas. Daarmee blijkt ook de klimaatongelijkheid toe te nemen. Figuur 5 toont dit. Een en ander wordt duidelijk beïnvloed door het schermgebruik. Dat is de eerder genoemde dempende werking; naarmate de schermen meer zijn gesloten, blijkt de klimaatongelijkheid sterker te worden beperkt.



Figuur 5 Temperatuurongelijkheid als functie van buitentemperatuur en schermstand (0 = open, 100 = dicht)

##### 4.4.2 Effect van zinstraling

In Figuur 5 is opvallend dat bij open scherm de temperatuurongelijkheid weer toeneemt als de buitentemperatuur hoog wordt (> 13°C). Dat blijkt samen te hangen met de zonlast. Dat wordt getoond aan de hand van Figuur 6. Deze figuur laat zien dat de temperatuurongelijkheid duidelijk ook toeneemt met toenemende zinstraling. Het afzwakken van het effect bij hogere buitentemperaturen wordt toegeschreven aan het openen van de luchtramen, waardoor de resulterende warmtelast wordt beperkt.



Figuur 6 Temperatuurongelijkheid als functie van buitentemperatuur en zonstraling

#### 4.4.3 Thermische wervels

Koude lucht lekt van tussen het scherm en het dek op de laagste punten de kas in. Dit wordt gezien als een motor voor natuurlijke luchtstromen die in klimaatongelijkheid resulteren. Vooral als het buiten koud is en het scherm dicht is, kan die koude luchtlaag zich opbouwen. Ook de uitstraling helpt daaraan mee, want de zonstraling blijkt dan tevens nihil te zijn.

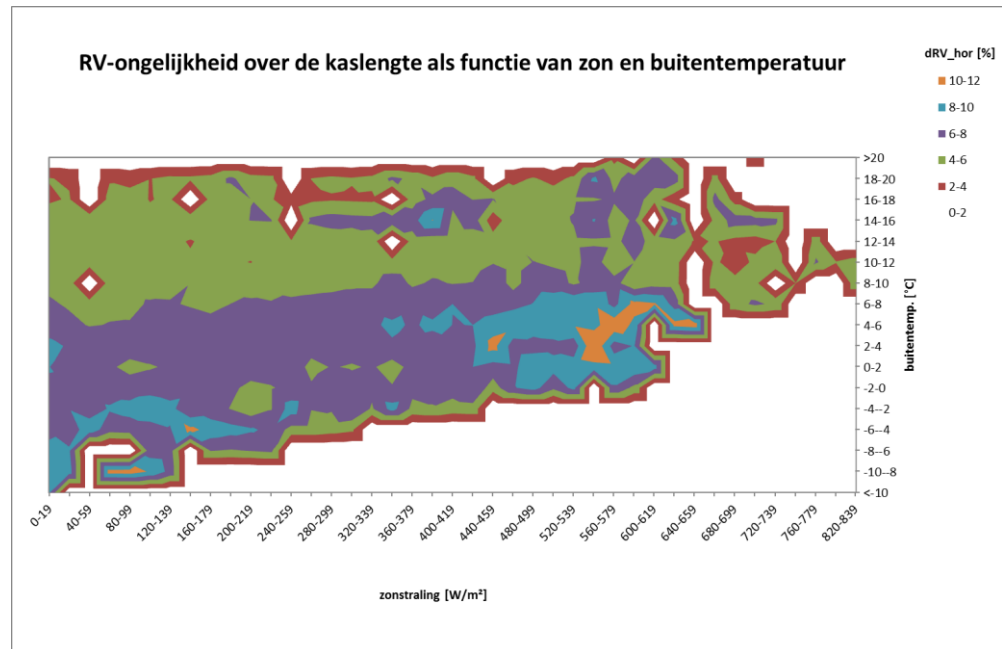
Figuur 5 laat echter zien dat een toenemende klimaatongelijkheid met dalende buitentemperatuur ook bij meer geopend scherm optreedt. Een verklaring is dat er boven het scherm weliswaar minder lage temperaturen ontstaan naarmate het scherm verder open is, maar dat de aan het dek afkoelende lucht ook steeds makkelijker door de grote schermopeningen kan. De totale koude impuls wordt blijkbaar minder geremd naarmate het scherm verder opent, zodat nog steeds een sterke natuurlijke thermische luchtstroming met temperatuurverschillen in de kas ontstaat.

De conclusie moet dus zijn dat het weliswaar zinvol is om het scherm dicht te maken, maar dat bij open scherm de natuurlijke convectiestroom ook nog dient te worden beperkt. Behalve aan obstakels die de stroming beperken, kan dan worden gedacht aan een aangepaste warmtedistributie of voorzieningen die een compenserende warmte- of luchtstroom genereren.

#### 4.5 Invloeden van vochtstromen

De verdamping vanaf het gewas en de afvoer van vocht (in het algemeen met ventilatie) gaan gepaard met aanzienlijke warmtestromen en vergen een ruime luchtuitwisseling in de kas. Wat dat betreft zijn er duidelijke verbanden met het voorgaande en het navolgende hoofdstuk.

Een aparte analyse van de monitoringsgegevens op vochtverdelingen over het kasoppervlak bleek nauwelijks mogelijk, omdat de vochtgegevens in de meeste bestanden ontbreken. Slechts een enkel bestand beschikte hier wel over. Figuur 7 is hieraan ontleend. Parallel aan de temperatuurongelijkheid (verschil tussen hoogste en laagste temperatuur in lengte- of breedterichting van de kas) is in dit geval de RV-ongelijkheid uitgezet (verschil tussen hoogste en laagste relatieve luchtvochtigheid). De figuur laat zien dat vooral bij lagere buitentemperaturen grotere horizontale verschillen in absolute vochtigheid ontstaan. Het effect van de zonstraling hierop is minder duidelijk. Bij veel zoninstraling lijkt de RV-ongelijkheid toe te nemen.

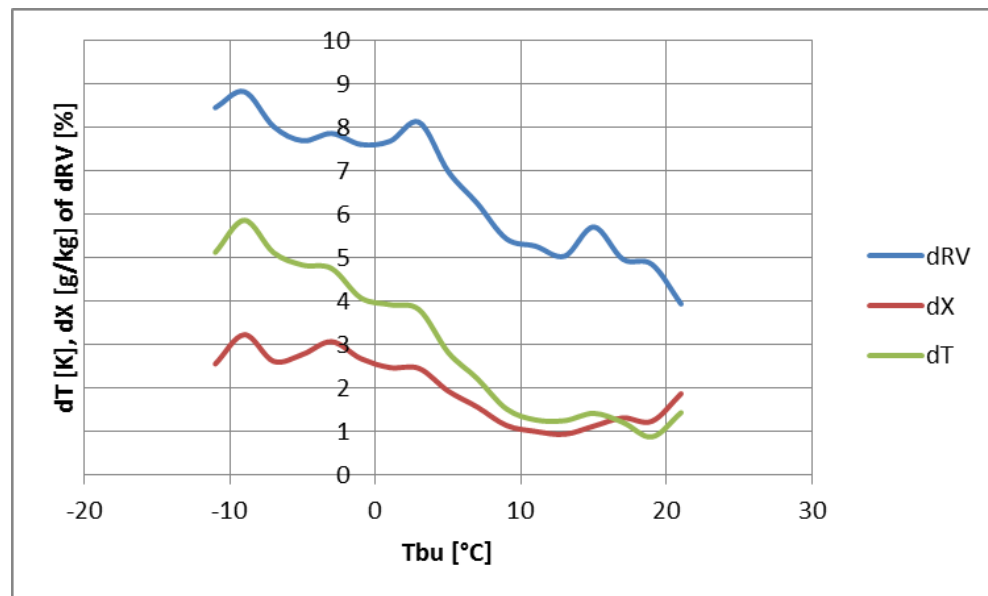


Figuur 7 Horizontale verschillen in relatief vocht onder invloed van zon en buitentemperatuur

De relatieve vochtigheid (RV) vertoont in het algemeen tegengestelde verbanden t.o.v. de temperatuur. Dit komt omdat een verhoogde temperatuur tot een daling in RV leidt, uitgaande van een gelijk absoluut vochtgehalte. Wat dit betreft geeft de analyse op temperatuurverlopen al de nodige indicaties voor de te verwachten RV-verlopen. Het is dan wel belangrijk na te gaan in hoeverre ook het absoluut vochtgehalte verloopt over het kasoppervlak. Figuur 8 gaat hierop in. De figuur toont de horizontale verlopen van zowel RV (dRV), temperatuur (dT) als absoluut vocht (dX) onder invloed van de dominante grootte buitentemperatuur. De figuur bevestigt dat de temperatuur- en RV-ongelijkheid toeneemt met aflopende buitentemperatuur (toenemende warmtebehoefte). Tevens laat de figuur zien dat ook de absoluut vochtverschillen in horizontale kasrichting toenemen met aflopende buitentemperatuur, hoewel deze trend wat minder steil is. Als men deze ongelijkheid in absoluut vocht uit zou drukken als fractie van het absolute vochtverschil tussen binnen- en buitenlucht, dan blijkt het verloop maar gering te



zijn. Dit duidt op een mogelijke relatie met (een ongelijkmatige verdeling van) de ventilatie.



Figuur 8 Verloop temperatuur, relatief en absoluut vocht als functie van buitentemperatuur

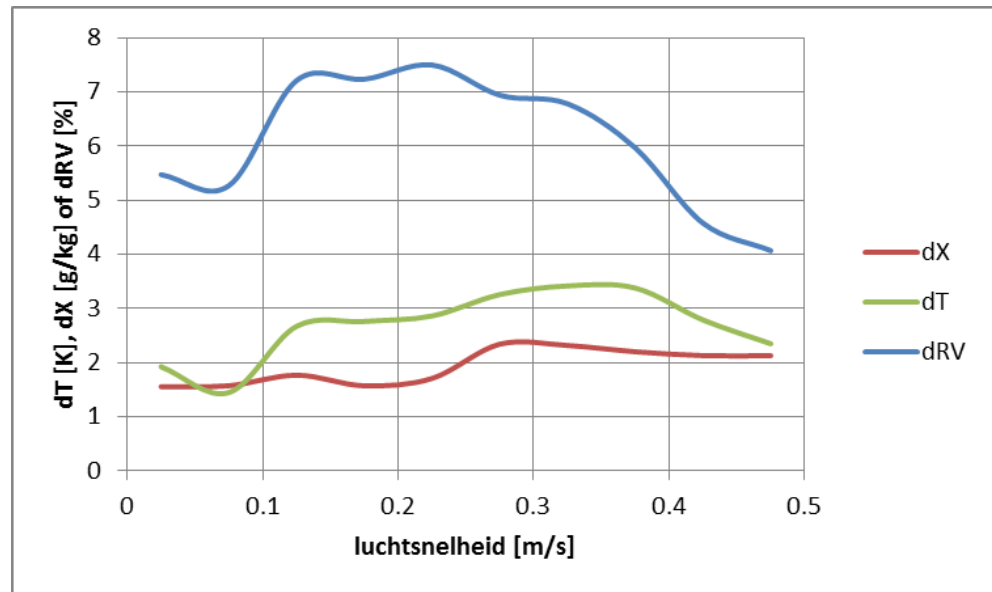
#### 4.6 Invloed van luchtbeweging

Bij hogere buitentemperaturen neemt het gebruik van de raamluchting excessief toe. Zo kan men overtollige warmte en hoge vochtproducties afvoeren. Open ramen geven meer luchtbeweging in de kas. Die kan voor een verkleining van (horizontale) temperatuur- en vochtverschillen zorgen. Meer luchtbeweging geeft immers meer menging, zodat een nivellerend effect te verwachten is. Dit kan een (gedeeltelijke) verklaring zijn voor de kleinere temperatuur- en vochtverschillen die Figuur 8 bij hogere buitentemperaturen laat zien.

Behalve door openen van de luchtramen kan luchtbeweging worden gecreëerd met (horizontale of verticale) mengventilatoren in de kas of met de mechanische ventilatie (luchtslurven). De hoeveelheid bewegingsenergie die daarmee in de kas wordt gebracht, is in het algemeen beperkt t.o.v. wat met intensieve raamluchting kan worden bewerkstelligd.

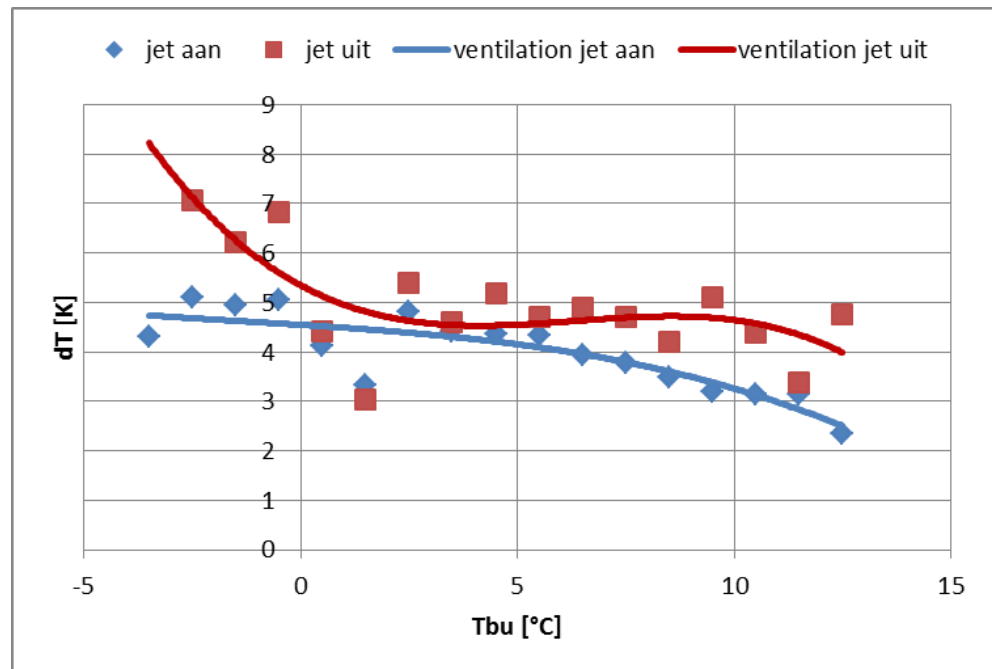
Overigens dient men zich te realiseren dat intensief luchten zich beperkt tot zomerse omstandigheden, wanneer grote warmtelasten door bezonning (en navenante hoge vochtproductie) moeten worden afgevoerd. In die situaties is ook vaak sprake van een sterke verticale gelaagdheid, hetgeen indringing van ventilatielucht dieper in de kas weer afremt.

In één van de monitoringsprojecten zijn naast temperaturen en relatieve vochtigheden ook luchtsnelheden tussen het gewas gemeten. In dit project werd mechanische ventilatie via luchtslurven toegepast. Figuur 9 laat zien welk verband de temperatuur- en vochtverschillen over de kaslengte daar vertonen met de gemeten luchtbeweging. Het blijkt dat alleen de RV-verschillen herkenbaar worden verkleind bij een verhoogde luchtbeweging. De horizontale afwijkingen in temperatuur en absolute vochtigheid vertonen geen duidelijke afhankelijkheid.



Figuur 9 Verloop temperatuur, relatief en absoluut vocht als functie van luchtbeweging

In een ander monitoringsproject zijn verticale ventilatoren toegepast. Bij ingeschakelde ventilatoren bleek merkbaar meer luchtbeweging in de kas op te treden dan als ze waren uitgeschakeld. De gemeten temperatuurongelijkheid in beide situaties is vergeleken (Figuur 10). Daaruit bleek dat de extra menging door de verhoogde luchtbeweging voor een zekere temperatuurvereffening zorgt. Dit blijkt niet significant te worden beïnvloed door de grootte van de schermkier.



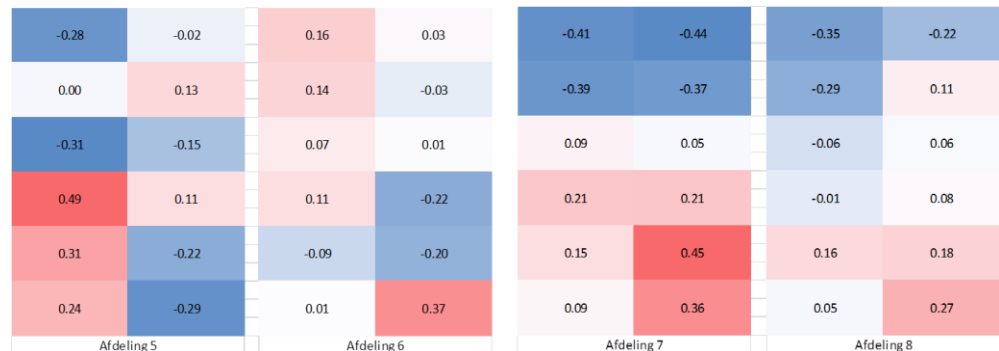
Figuur 10 Temperatuurongelijkheid als functie van buitentemperatuur met verticale ventilatoren aan en uit

## 4.7 Invloed van HNT

In de toegevoegde monitoringsprojecten bij de gerberatelers Holstein en Zuiderwijk konden afdelingen die waren aangepast voor 'Het Nieuwe Telen' (HNT) worden vergeleken met meer traditioneel ingerichte afdelingen met vergelijkbare teelten op dezelfde bedrijven. De monitoring in de verschillende afdelingen vond gelijktijdig plaats (met vergelijkbare weersomstandigheden en klimaatinstellingen).

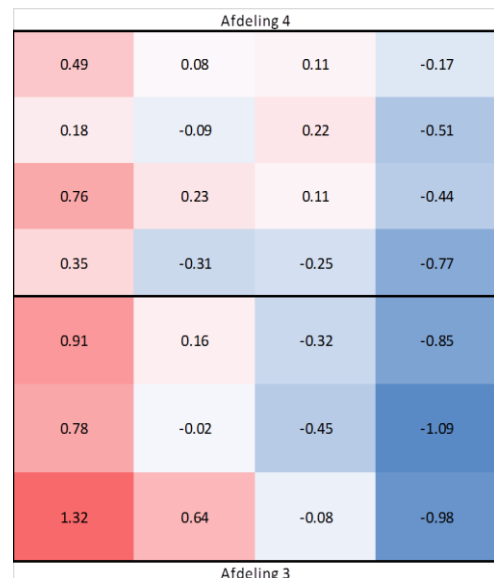
Bij Holstein waren voor het drogen met buitenlucht luchtslurven onder het gewas toegepast. Bij Zuiderwijk werd het gewas van bovenaf belucht met de hiervoor genoemde verticale ventilatoren. Zo nodig werd droge lucht aangevoerd via speciale regelbare openingen in het scherm. Naar behoefte werd boven het scherm gelucht om in voldoende droge lucht te kunnen voorzien.

Tussen de traditionele en de HNT-afdelingen bleken bij Holstein geen duidelijke verschillen in klimaatongelijkheid te bestaan. Bij Zuiderwijk was dit wel het geval: met name bij inschakelen van de Ventilation Jets bleek de klimaatongelijkheid te verminderen (zoals in H4.6 reeds is genoemd).



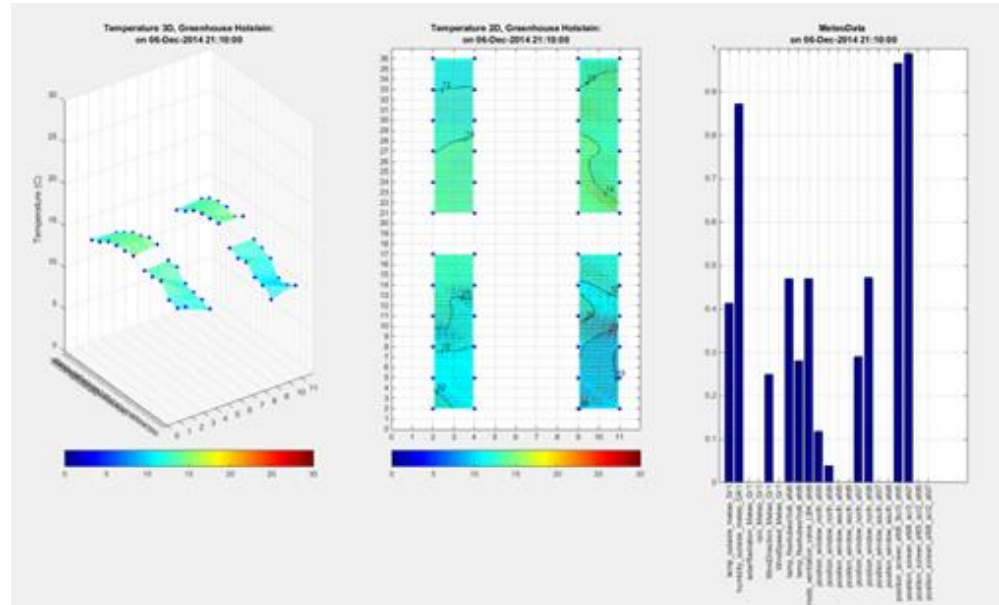
Figuur 11 Gemiddelde klimaatongelijkheid bij Holstein (afd. 7 & 8 is HNT)

In alle monitoringsprojecten vertoont de klimaatongelijkheid zowel qua niveau als verdeling flinke schommelingen in de tijd. Toch is er vaak sprake van systematische afwijkingen. Dit wordt o.a. zichtbaar in de gemiddelde temperatuurafwijkingen over langere tijd, die Figuur 11 toont voor Holstein en Figuur 12 voor Zuiderwijk. Blauw geeft de zones aan waar het systematisch kouder is en rood waar het warmer is. Bij Holstein valt op dat in de HNT-afdelingen 7 en 8 de gevelzone (bovenin Figuur 11) systematisch kouder is en dat bij het middenpad (onderin de figuur) systematisch hogere temperaturen optreden. Bij de referentieafdelingen 5 en 6 is dit meer diffuus. Bij Zuiderwijk zien we dat ditzelfde patroon juist bij de referentieafdeling 3 sterker optreedt (de gevelzone bevindt zich rechts in Figuur 12 en het middenpad links) en in de HNT-afdeling 4 in verminderde mate.



Figuur 12 Gemiddelde klimaatongelijkheid bij Zuiderwijk (afd. 4 is HNT)

Om naast het gemiddelde verdelingspatroon ook inzicht te krijgen in het verloop gedurende de tijd en de invloedsfactoren die daarbij een rol spelen, is een instrument ontwikkeld dat de achtereenvolgende momentane verdelingspatronen als een film kan weergeven. Figuur 13 toont hiervan een schermafdruk.



Figuur 13 Afdruk van de grafische weergave van achtereenvolgende temperatuurverdelingen

De figuur laat links een 3D-weergave van de monitoring op een tijdstip zien, midden 2D en rechts een staafgrafiek met waarden van belangrijke invloedsfactoren. De achterliggende gedachte was dat de visuele informatie tot een snelle patroonherkenning kan leiden die anders veel statistische analyses vergt. Er is met name gezocht of zo snel de veroorzakers van de scheefheid van de verdelingen en de grootte van de afwijkingen konden worden achterhaald. Uit deze grafische informatie blijkt bijvoorbeeld dat bij Holstein de scheefheid van de verdeling relaties vertoont met de windrichting, terwijl dit bij Zuidderwijk niet zo herkenbaar was.

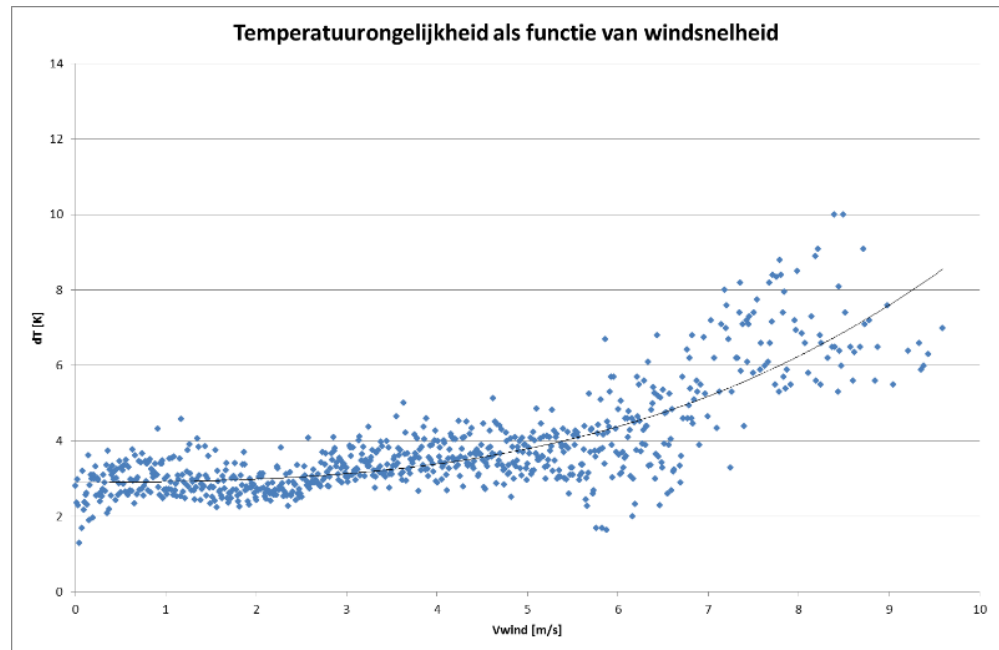
## 4.8 Relaties met wind en ventilatie

### 4.8.1 Windeffecten

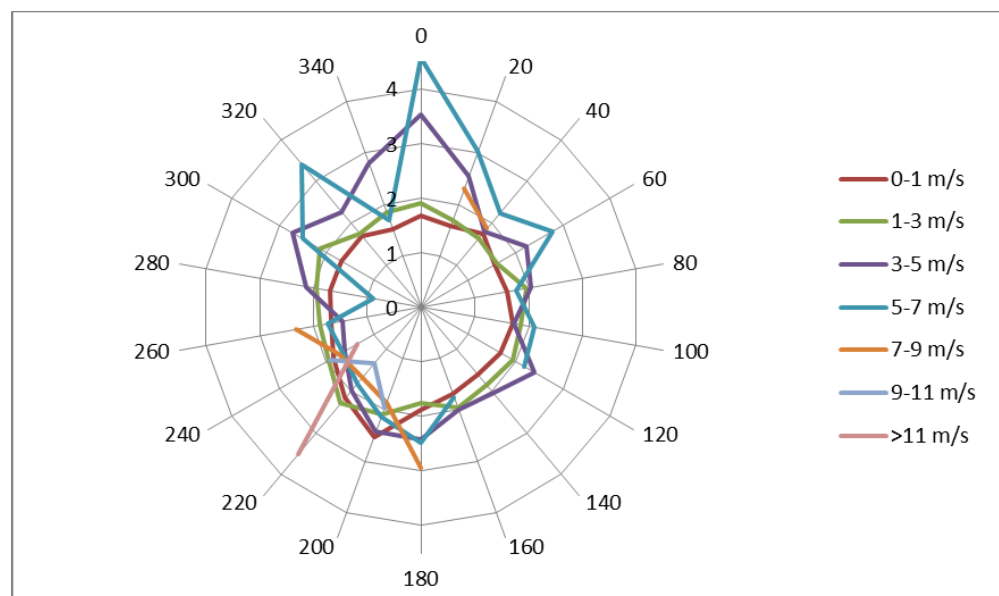
Figuur 14 laat zien dat de klimaatongelijkheid toeneemt met de wind, met name als de windsnelheid boven gemiddeld (ca. 5 m/s) is.

Figuur 15 toont dat de klimaatongelijkheid vooral bij bepaalde windrichtingen kan optreden. Dit varieert wel per kas, afhankelijk van de ligging met omringende bebouwing en obstakels (beschutting).

De verklaring voor deze windinvloeden is dat de natuurlijke drijvende kracht van de wind, die met de windsnelheid en –richting varieert, een ongelijkmatige verdeling van de natuurlijke ventilatie van de kas genereert.



Figuur 14 De klimaatongelijkheid neemt toe met de wind



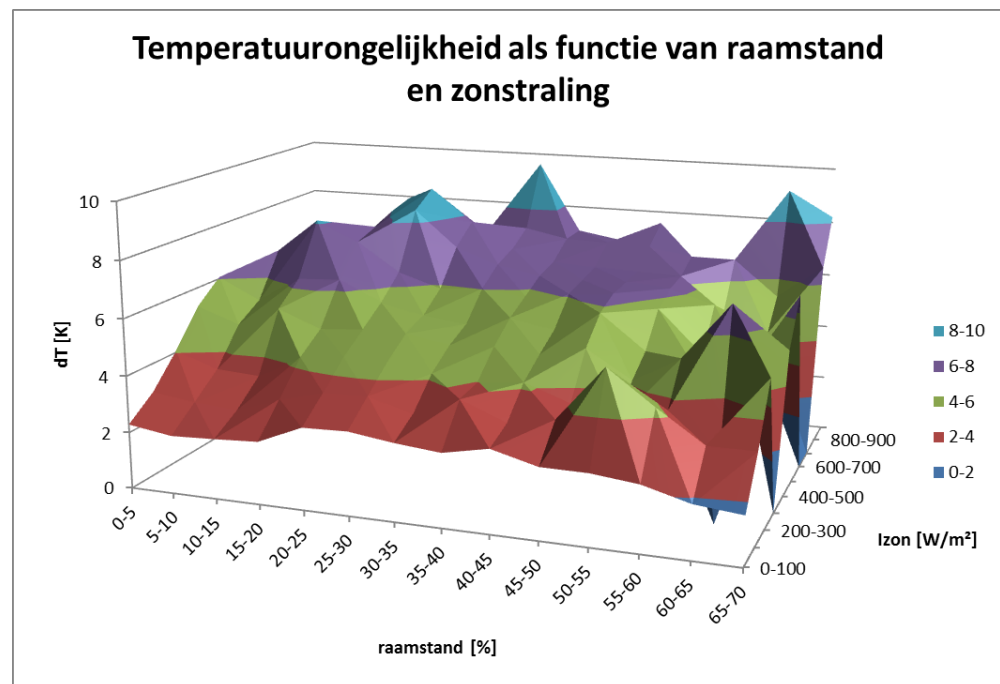
Figuur 15 Bij bepaalde windrichtingen en hogere windsnelheden treedt vooral klimaatongelijkheid op

Zoals in H4.7 is aangestipt, blijkt bij Holstein de scheefheid van de klimaatverdeling een relatie te vertonen met de windrichting, terwijl dit bij Zuiderwijk niet kon worden aangetoond. Het verband is daarom voor nog een aantal kwekerijen onderzocht. Bijlage B geeft hiervan resultaten. Daaruit kan worden geconcludeerd dat de relatie in een aantal gevallen wordt bevestigd, maar in andere gevallen zwak of niet aantoonbaar is. Een verklaring is dat kennelijk andere invloedsfactoren dan vooral of meer verantwoordelijk zijn voor de (verdeling van de) klimaatongelijkheid.

#### 4.8.2 Raamstanden

De natuurlijke ventilatie van de kas wordt behalve door de variërende natuurlijke drijvende krachten (winddrukken) ook bepaald door de raamstanden.

De onderste figuren in de drie tabellen van bijlage A laten resultaten zien bij uiteenlopende raamstanden aan loef- en lijzijde. Daaruit blijkt geen duidelijke trend. Ook Figuur 16 laat zien dat er kennelijk weinig verband met groter wordende raamstanden is. Deels is dit verklaarbaar, omdat grotere raamopeningen niet altijd meer ventilatie hoeven te betekenen. Een grotere raamopening wordt immers o.a. toegepast om geringere drijvende krachten te compenseren. Anderzijds geldt dat als bij grotere raamstanden wel meer wordt geventileerd en dus grotere warmte- of vochtstromen worden afgevoerd, dat die grotere luchtstromen ook een snellere nivellering van klimaatverschillen in de kas geven (meer menging).



Figuur 16 Temperatuurongelijkheid als functie van raamstand en zonstraling

#### 4.8.3 Verdeling loef- en lijzijde

Afhankelijk van de windrichting, de kasoriëntatie en de raamposities op het kasdek is er sprake van meer of minder windaanval op de kasramen. De raamregeling bestempelt (schuin) naar de wind gekeerde ramen als loeframen en van de wind afgekeerde ramen als lijzijderamen.

Om de windinvloed te beperken is het traditioneel gebruikelijk de lijramen eerder en (veel) verder te openen dan de loeframen. Recente nieuwe inzichten hebben er toe geleid dat sommige telers juist de loeframen eerder en meer gebruiken. Men claimt hiermee minder lokale klimaatverstoring van de luchting.

Er zijn vooralsnog geen monitoringsresultaten om dit te onderbouwen.

Toch is het geclaimde effect wel te verklaren. De binnendruk in de kas schuift namelijk dichter naar de buitendruk ter plaatse van de grootste kasopeningen. Door loeframen verhoudingsgewijs verder te openen, zorgt men dus dat hierover een kleiner drukverschil optreedt, hetgeen resulteert in een lagere instroomsnelheid. Eenzelfde ventilatiestroom kan zo uiteindelijk met minder bewegingsenergie (impuls) worden binnengelaten, zodat daarvan minder klimaatverstoring optreedt.

#### 4.9 Betrouwbaarheid van meetsignalen

Bij het analyseren van monitoringsgegevens bleek dat al dan niet incidenteel soms vreemde uitschieters of afwijkingen in de meetsignalen optreden. Deze zijn zo goed mogelijk bij de analyse uitgesloten. Voor deze afwijkingen zijn verschillende verklaringen gevonden:

- Tijdens gieten of regenen kunnen sensoren nat worden, waardoor ze tijdelijk sterk afwijkende signalen afgeven. Met het opdrogen van de sensor herstelt dit geleidelijk weer. Kennelijk zijn niet alle sensoren voldoende tegen spatwater afgeschermd;
- Soms waren sensoren direct in een luchtstroom met afwijkende condities geplaatst, bijvoorbeeld onder een luchtraam of schermopening, of in de uitblaasstroom van een klimaatvoorziening. Het gebruik van die voorzieningen was dan bepalend voor de optredende afwijking;
- Temperatuursensoren blijken veelal gevoelig voor directe zonstraling. Dit leidt tot overschatting van de zoninvloed op de temperatuur. De stralingsafscherming behoeft derhalve verbetering;
- Bij hoge relatieve luchtvochtigheden (> 90%) blijken de vochtsensoren, die voor klimaatmonitoring worden gebruikt, onbetrouwbaar te worden. Juist de kritieke vochniveaus kunnen dus niet goed worden gemeten.

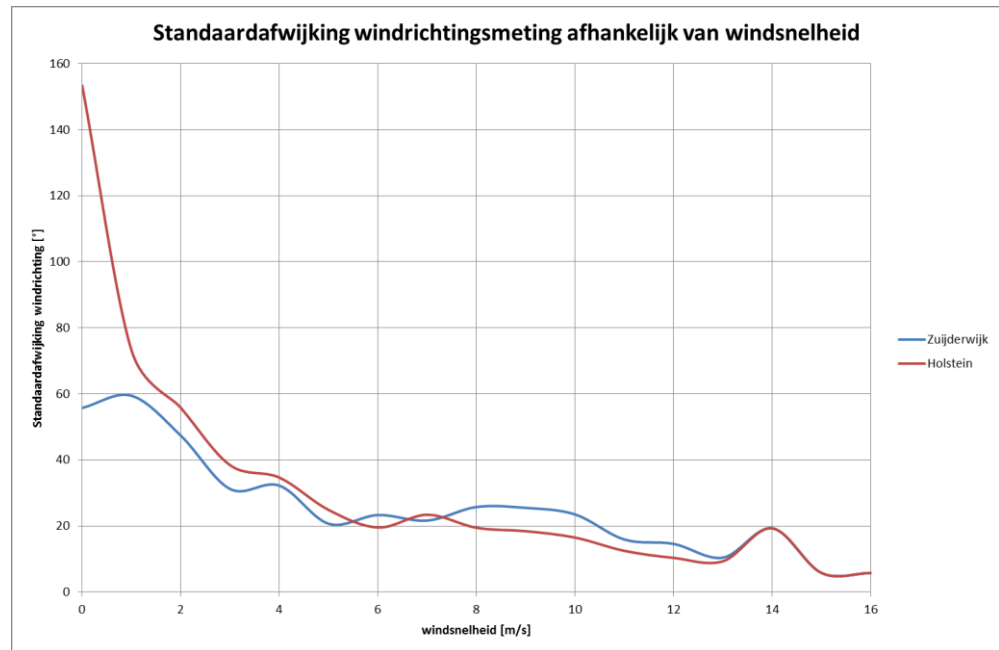
Tijdens de analyses van de windeffecten bleek dat de regelacties van de klimaatcomputers niet eenduidig en soms onlogisch waren. Dit was aanleiding om sensorsignalen voor de regeling te verifiëren.

De sensorsignalen van de meetboxen voor de klimaatcomputers in de kas hebben geen reden tot bemerkingen gegeven. Dat is wel het geval met de signalen van de lokale meteostations, met name die betrekking hebben op de windcondities.

Bijlage C toont vergelijkingen van de lokale meteo op tuinbouwbedrijven met de weergegevens van de dichtstbij gelegen officiële stations. Uit deze vergelijkingen blijkt dat er zowel van systematische als toevallige afwijkingen sprake is. Een opmerking daarbij is dat zekere toevallige afwijkingen te verwachten zijn vanwege de afstanden tussen de lokale en officiële meteostations. Met name tijdens het overtrekken van buien kunnen snelle veranderingen optreden en kortstondig flinke onderlinge verschillen ontstaan. Ook bij de onderlinge vergelijking van twee lokale meteostations van naast elkaar gelegen tuinbouwbedrijven blijkt er echter sprake van aanzienlijke verschillen (zie beide laatste figuren van bijlage C). De lokale windrichting blijkt de grootste afwijkingen (miswijzingen) te vertonen. Het betreft hier vooral toevallige fouten (de ene keer een grotere en dan weer een kleinere windhoek).

Figuur 17 laat voor twee lokale meteostations zien dat er sprake is van een grote standaardafwijking, die duidelijk afhankelijk is van de windsnelheid. Naarmate het harder waait, wordt de aanwijzing van het meteostation eenduidiger en neemt de meetfout af.

De meetfout zal verder samenhangen met een gebrekkige middelingsprocedure voor de continu draaiende wind. De grove resolutie zal hierbij een rol spelen; de lokale meteostations delen de windrichting op in slechts 8 sectoren.



Figuur 17 De meting van de windrichting vertoont een grote onnauwkeurigheid, die kleiner wordt naarmate het harder waait

De figuren in bijlage C laten zien dat de lokale windsnelheid vaak een systematische afwijking vertoont. Doorgaans is de lokaal gemeten windsnelheid ruim lagere dan de meteorologische windsnelheid. Dit zal samenhangen met de beschutting van de lokale meteomast (positie met onvoldoende vrije aanstroming van de wind door een te beperkte hoogte of ongunstige plaats van de mast).

Een betrouwbare meting van windsnelheid en –richting is belangrijk voor een correcte instelling van de luchtramen aan loef- en lijzijde. De te grove of onjuiste informatie zal resulteren in een ongewenste ventilatiestroom en –verdeling die de klimaatongelijkheid zal versterken.



## 5 Resumé invloedsfactoren

### 5.1 Hoofdpunten

Uit de nadere analyses van monitoringsgegevens blijkt dat vooral bij grote warmtestromen (lage buitentemperaturen, veel zon) en sterke wind (ongelijkmatige ventilatieverdeling) in belangrijke mate klimaatongelijkheid in kassen optreedt, terwijl het sluiten van schermen hierop een belangrijk dempend effect heeft.

De klimaatongelijkheid blijkt mede te worden beïnvloed door:

- De geometrie van de kas en teeltopstellingen;
- Het type teelt/gewas met zijn onderscheiden klimaatniveau (koud/warm, droog/vochtig) en systemen (bijv. belichting die warmte afgeeft);
- De configuratie en instellingen van de (distributie)systemen voor klimaat- en ventilatie en de schermen;
- Onvolkomenheden in (ontwerp en uitvoering van) de kasomhulling en de installaties met hun meet- en regelsystemen.

De verschillende aspecten die van invloed zijn op de klimaatongelijkheid worden hierna meer in detail gerubriceerd. Ze zijn uitgesplitst naar aspecten die betrekking hebben op de luchtverdeling, aspecten t.a.v. de warmteverdeling en uitvoeringsaspecten. In hun samenspel hebben ze een verstoring effect op de homogeniteit van het kasklimaat. Anders gezegd, de resulterende lucht- en warmteverdeling kent een dynamisch evenwicht bij een ongelijkmatige temperatuur- en vochtverdeling in de kas.

### 5.2 Factoren voor luchtverdeling

Klimaatongelijkheid kan ontstaan door een ongelijkmatige luchtverdeling of –verzameling, die het gevolg is van:

- Wisselend natuurlijk drukverloop over luchtramen en dek-kieren (natuurlijke ventilatie):
  - o over het hele oppervlak van het kasdek, wisselend met windrichting en –snelheid,
  - o over afzonderlijke kasramen, afhankelijk van hun standen en geometrie;
- Aanzwellen van de luchtstroom naar luchtbehandelingskasten (LBK'en) met een centraal afvoerpunt. Het kan zowel gaan om ventilatiesystemen (met WTW) als circulatiesystemen;
- Ongelijkmatige toevoerverdeling van mechanische ventilatie en/of circulatie:
  - o Een slecht ontwerp van het inblaaspatroon (verdeling van toevoeropeningen),
  - o Te sterke drukverlopen in verdeelplenums (verdeling van uitblaassnelheden).

### 5.3 Factoren voor warmteverdeling

Door ongelijkmatigheden in de warmteverdeling of –onttrekking, mede voor verdamping (niet voelbaar), ontstaan thermisch gedreven interne luchtbewegingen in de kas.

De thermische stromingen kunnen worden aangedreven door:

- koudeval van boven het (lekke) scherm;
- ongelijkmatige warmteafgifte:
  - o warmteafgifte die de lokale stroming niet domineert (wegdrijven warmte),

- onbalans gevelverwarming t.o.v. kasverwarming,
- verschil in aanstromlengte verwarming voorin/achterin (nauwlijzen),
- niet-isotherme luchtslurven;
- lokale verschillen in bezonning (schaduwbanen) en in afkoeling van het dek (bijv. door verschillen in langsstromende wind);
- ongelijkmatige warmteverliezen, bijv. schermverschillen dek-gevel.

De thermische stromingen worden beïnvloed door:

- grootte van schermlekken;
- afschot van de kas (thermisch hoogteverschil);
- vrije stromingsruimte onder en boven het gewas en boven het scherm;
- stromingsweerstand van het gewas (hoog of laag gewas en gewasdichtheid);
- overdruk over het scherm t.g.v. een ventilatie- of circulatiesysteem;
- lokaal geconcentreerde schermkieren (beginopening);
- onbalans (in lucht en/of warmte) met aangrenzende, autonoom geregelde kascompartimenten;
- plaatselijke verschillen in vochtgifte (warmte-onttrekking), bijvoorbeeld door niet-uniform gewas (uiteenlopende teeltfasen).

#### 5.4 Ontwerp- en uitvoeringsdefecten

Het instellen van een homogeen kasklimaat kan worden verstoord door:

- Onvolkomenheden aan de kasschil:
  - kapotte ruiten,
  - lekke rubbers,
  - ongelijke raamstanden luchtmechaniek;
- Onvolkomenheden in de kasinstallaties:
  - geen nieuwe inregeling/herontwerp na na-isolatie kas,
  - verwarmde slurven (geen 'Tichelman'-distributie),
  - geen lokale naregeling op verdeelsystemen,
  - geen (apart regelbare) gevelverwarming,
  - onbetrouwbare sensoren, bijvoorbeeld windrichting lokale meteo.

## 6 Modelling

### 6.1 Beschrijvend model

Via de analyses is duidelijk geworden welke factoren een belangrijke rol spelen bij het ontstaan van klimaatongelijkheid. Het blijkt vooral verband te houden met de warmte- en vochtstromen van de kas. Door bewegingen van de kaslucht worden deze warmte- en vochtstromen getransporteerd of vereffend. Daarbij speelt weer de ventilatie(verdeling) een rol.

Een model dat de klimaatopbouw in een kas kan voorspellen, dient dus als sleutelfactor de interne stroming van kaslucht te kunnen beschrijven.

De meest gangbare hypothese is dat klimaatongelijkheid ontstaat onder invloed van natuurlijke voorkeursstromen in samenhang met een bepaalde thermische opbouw in de kas. Dit is een complex, steeds wisselend samenspel van veel factoren. De uitdaging was die alle in een beschrijvend fysisch model op te nemen. Het gaat om:

- de thermische condities:
  - o buitentemperatuur,
  - o variatie van zoninstraling,
  - o nachtelijke uitstraling;
- de reacties hierop van het gewas:
  - o warmteonttrekking door verdamping;
- de reacties (regelacties) van het klimaatsysteem:
  - o afhankelijk van wisselende gebruiksinstellingen;
- de toegepaste kas- en systeemconfiguratie:
  - o isolatiewaarde (temperatuursprong), lucht- en vochttek van schermen,
  - o bedrijfstemperaturen van de verwarming (hoge of lage temperatuur),
  - o thermiek door het afschot van lange kassen,
  - o de luchtweerstand van het gewas,
  - o de vrije ruimte voor onbelemmerde luchtstroming boven en onder het gewas (bijvoorbeeld telen op goten of tafels i.p.v. in de volle grond) of juist de beperking daarvan (bijvoorbeeld het gebruik van nokschotten);
- de ongelijkmatige en wisselende verdeling van natuurlijke ventilatie via luchtramen over het kasoppervlak, afhankelijk van:
  - o zonerings van de luchting,
  - o raamstanden,
  - o raamtypen,
  - o kasvorm
  - o windcondities;
- de inblaascondities, debieten en verdeling van mechanische ventilatie alsmede de posities en debieten van de afgevoerde retourlucht;
- de verplaatste luchtstromen door circulatie;
- de doormenging van ventilatielucht door het gewas (indringdiepte) ofwel de ventilatie-efficiëntie.

Idealiter zou de samenhang van al deze grootheden het beste met een CFD-model<sup>1</sup> kunnen worden beschreven. Voor gebruik bij het ontwerpen zijn er echter twee grote nadelen: het CFD-model is zeer traag en de invoer is complex. Daarom is voor een alternatief gekozen.

---

<sup>1</sup> CFD staat voor 'Computational Fluid Dynamics'. Hierbij lost men per cel in de ruimte elementaire balans van warmte, massa en impuls op met behulp van Navier Stokes vergelijkingen.

Als grondslag voor het beschrijvend model is een meer-zone knooppuntenmodel genomen, dat normaliter voor complexe ventilatieberekeningen wordt gebruikt. Het nadeel is dat deze modeltechniek veel grover is dan CFD en slechts indicaties van de hoofdstroming in de ruimte kan leveren. Ook vergde het een forse inspanning om het model speciaal voor de onderhavige problematiek uit te breiden met specifieke vergelijkingen voor warmte- en vochtoverdracht. Tegenover deze nadelen staat dat de rekentijd zeer kort is, zodat ontwerpers snel een groot aantal varianten kunnen toetsen en zo iteratief naar een optimaal ontwerp kunnen komen.

Er wordt per luchttechnisch afgescheiden kasvak een knooppuntenmodel opgesteld. In dit model is de ruimte in grove zones opgedeeld. De lengte, breedte en hoogte van het kasvak worden opgedeeld in circa 10x10x10 zones. Dit aantal zones is sterk beperkt in vergelijking met CFD-modellen, maar voldoende om een goede indruk van de hoofdstroming in de kas te krijgen. De relatief fijne hoogte-indeling van de zones is nodig vanwege de onderscheiden klimaatcondities in de bodem en in de luchtlagen onder, in en boven het gewas tot buiten. In het gewas zelf zijn t.b.v. de optredende verlopen meer lagen verondersteld, alsook over en tussen de schermen, het dek en buiten. Het beschouwde kasvak kan deels aan buiten grenzen, maar ook deels aan andere kasvakken. Zulke aangrenzende binnenruimten worden als een fictief 'buiten' met aangepaste klimaatcondities en lekstromen beschouwd.

In elke zone (knooppunt) van het model wordt van één uniforme conditie uitgegaan. Dit is een voorwaarde om een knooppuntenmodel te kunnen toepassen. Tussen de knooppunten vinden gekoppelde warmte-, vocht- en luchtstromen plaats. De oplosroutine van het model bepaalt voor het netwerk met behulp van slimme iteratieroutines de evenwichtssituatie waarbij het totaal van deze stromen in balans is. Het resultaat is de klimaatopbouw in (doorsneden van) de kas met de te verwachten (verbetering van de) klimaatongelijkheid.

Net als bij CFD wordt per toestand een berekening uitgevoerd. Omdat echter veel sneller achtereen opvolgende toestanden kunnen worden doorgerekend, is desgewenst eenvoudig een beeld van de verandering in de tijd te krijgen. In dat geval wordt de invoer gevormd door gegevens van de voorgaande toestand (zo nodig met inachtnaam van buffereffecten) en door de grootheden die per tijdstap veranderen (zoals meteo en regelacties). Het model is standaard uitgerust met een referentiejaar dat in tijdstappen van een uur kan worden doorgerekend. Voor specifieke studies is dit eenvoudig aanpasbaar. Denk bijvoorbeeld aan enkele typische referentiedagen die in tijdstappen van één of enkele minuten worden doorgerekend om regelacties te evalueren.

Ventilatie is volgens de voorgaande analyses een belangrijke invloedsfactor voor klimaatongelijkheid. Het is ook een belangrijke parameter voor de stromingsopbouw in het model. Een voordeel van het meer-zonemodel is dat het oorspronkelijk is ontworpen voor ventilatieberekeningen. De natuurlijke ventilatie door raamluchting, met zijn ongelijkmatige verdeling over de kas, kan dus betrekkelijk eenvoudig door dit model worden bepaald.

De natuurlijke ventilatie ontstaat onder invloed van winddrukken en thermiek over de openingen in de kas. De thermische drijvende krachten zijn eenvoudig te bepalen uit de hoogtes van de luchtramen en eventueel de hoogteverschillen tussen ramen onderling. Bepaling van de winddrukken is complexer. De winddrukken vertonen verlopen met de windrichting. Die zijn afhankelijk van de omstroming van de kas en kasramen. Verder hangt hun grootte af van de windsnelheid. De richtingsafhankelijkheid wordt uitgedrukt in dimensieloze winddrukfactoren  $C_p$  (= pressure coefficient). De  $C_p$ 's geven een fractie t.o.v. de stuwdruk van de meteorologische wind aan. Ze worden per project eenmalig als functie van de windrichting voor elk kasraam afzonderlijk bepaald. Daarvoor wordt

gebruik gemaakt van een eerder door TNO ontwikkeld hulpprogramma Cp-Generator [2]. Dit programma heeft een speciale module voor kasdekken. Ventilatoren zorgen voor mechanische ventilatie. Een zone met een (in- of uitblaascomponent van een) ventilator krijgt een opgedrukte luchtstroom. Zo nodig wordt daaraan een dynamische druk in de worprichting meegegeven om de stromingsvoortplanting naar nabije zones te representeren.

Zoals gememoreerd is het model speciaal uitgebreid met specifieke vergelijkingen voor warmte- en vochtoverdracht. Bijlage D gaat hierop nog nader in. Het gaat om elementaire fysische vergelijkingen voor warmteoverdracht of –uitwisseling door straling, geleiding en convectie en vochtoverdracht door luchttransport, diffusie en absorptie. Ook de warmte- en vochtoverdrachten bij verdamping en condensatie zijn hierin betrokken.

Voor de verdamping door het gewas is uitgegaan van relaties die door WUR zijn opgesteld.

## 6.2 Ontwerpmodule

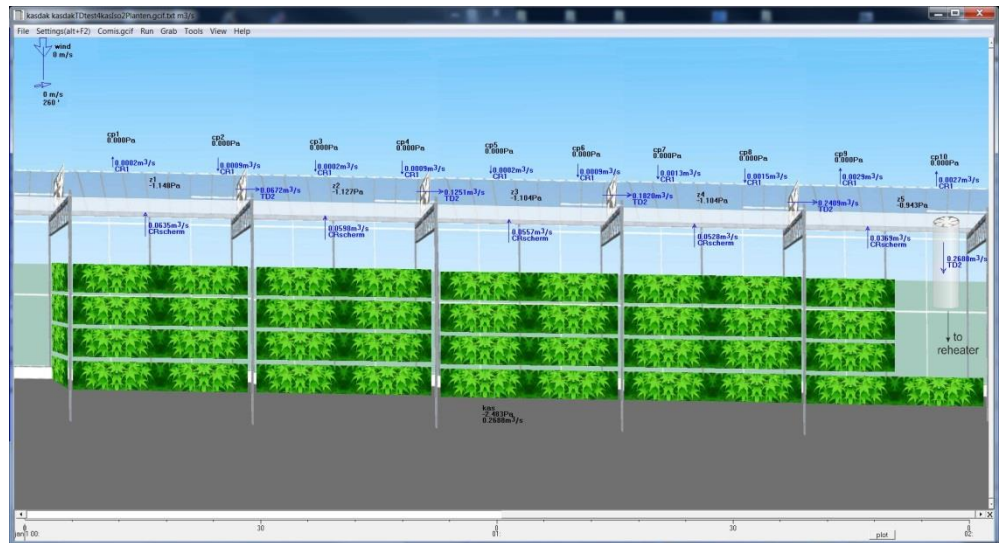
De ontwerpmodule is een specifieke toepassing van het beschrijvende model dat hiervoor is toegelicht. Waar het model is bedoeld als hulpmiddel bij het onderzoek, om het complexe samenspel van de relevante invloedsfactoren goed te beschrijven en te begrijpen, is het doel van de ontwerpmodule dat derden er systematisch verbeteringen mee kunnen genereren en onderling kunnen afwegen. Het beschrijvende model blijft hiervoor de rekenkern. Er zijn echter belangrijke uitbreidingen nodig om te zorgen dat willekeurige gebruikers ermee kunnen werken.

Om het model als ontwerpmodule geschikt te maken voor specifieke gebruikers, is in de eerste plaats een gebruiksvriendelijke invoerschil en uitvoerpresentatie belangrijk. Daarnaast is voor de ontwerpmodule zoveel mogelijk het gebruik van gestandaardiseerde kascomponenten gewenst.

Het ontwikkelen van de software voor een volledig uitgekristalliseerde ontwerpmodule was niet in de huidige opdracht voorzien. Dat vergt als aanvullende werkzaamheden bijvoorbeeld:

- Het kiezen van een geschikte en algemeen bruikbare computeromgeving en vervolgens geschikt maken van het huidige model voor gebruik in die softwareomgeving;
- Het ontwikkelen van een gebruikersschil. Het is zinvol een testgroep van potentiële gebruikers te organiseren, die meestuurt in de opzet van zo'n gebruikersschil;
- Het opzetten van een database met standaard kas- en installatiecomponenten, die in het model kunnen worden gebruikt. Deze zou in samenspraak met toeleveranciers moeten worden opgebouwd;
- Het toevoegen van een kostenmodule, zodat de ontwerpers uiteindelijk hun afwegingen behalve op functionaliteit ook op geraamde kosten kunnen baseren:
  - o Voor de investeringskosten kunnen de toeleveranciers en installateurs kostenramingen verzorgen.
  - o Als onderdeel van de bedrijfskosten dient het model met een rekenmodule voor het energiegebruik te worden uitgebreid;
- Het uitgebreid documenteren van de rekenmogelijkheden van de ontwerpmodule.

Om dit in gang te kunnen zetten, wordt nog gewerkt aan een eerste demo van een ontwerpmodule, die een impressie geeft wat wordt beoogd. Figuur 18 geeft hiervan een schermafbeelding.



Figuur 18 Schermafbeelding van de demo-ontwerpmodule

## 7 Verbetermogelijkheden

### 7.1 Beproefde remedies

In de praktijk zijn al verschillende remedies met wisselend succes geprobeerd:

- *Nokschotten*  
barrières van plastic folie in de puntdaken van de kas die de natuurlijke stroming tegenhouden;
- *Overdruk<sup>2</sup> van een mechanisch ventilatiesysteem*  
reductie van de retourluchtstroom c.q. onderdrukking van de stroming door het scherm.

Ze blijken soms voor een belangrijke reductie van klimaatverschillen te kunnen zorgen. Het effect treedt echter niet consequent (even sterk) op.

Aanvullende ventilatie via luchtslangen onder het gewas kan in combinatie met de raamluchting vooral de verticale verdeling van ventilatielucht verbeteren.

Het kan de inhomogeniteit echter ook nadelig beïnvloeden door het rondpompen (de retourluchtstroom) en opwarmen van lucht (ongelijkmatige afkoeling over de luchtslang).

In een nieuwe, verbeterde uitvoeringsvorm met naverwarming in de luchtslangen kan niet alleen een ongelijkmatige afkoeling worden voorkomen maar ook een compenserende warmteverdeling over de kas worden ingesteld.

Van oudsher zijn klimatiseringssystemen van kassen centraal van opzet. Ze zijn ontworpen om te zorgen voor een uniforme distributie van warmte, koude, droogte (ventilatielucht) of vocht over het gehele kascompartiment. De buisverwarming die in Tichelman-systeem is gelegd, is hiervan een goed voorbeeld.

Opkomende nieuwe klimaatsystemen zijn echter meer en meer decentraal opgezet en autonoom aan te sturen. Denk bijvoorbeeld aan:

- verticale ventilatoren, al dan niet met luchtaanzuig van boven het scherm,
- lokale luchtkoelers of –verwarmers,
- droogtoestellen met zout als absorber.

Dergelijke systemen hebben de potentie door onderscheiden instellingen, mits onderling goed afgestemd, lokale klimaatverschillen te kunnen compenseren. Van deze mogelijkheid wordt echter nog hoegenaamd geen gebruik gemaakt. De bestaande klimaatcomputers zijn nog niet uitgerust met mogelijkheden om dit aan te sturen.

### 7.2 Verdere verbetermogelijkheden

Dit hoofdstuk geeft een opsomming van verdere, potentiële verbetermogelijkheden.

Gelijkmatiger natuurlijke ventilatie kan worden bereikt met:

- gezoneerde raamluchting (in ontwikkeling);
- tweezijdig wind-vangende luchtramen (in ontwikkeling);
- regelsysteem voor optimale instelling van onderlinge raamstanden afhankelijk van de momentane windcondities (variant in ontwikkeling).

De efficiëntie van mechanische ventilatie (vervullen van de droging met minimum lucht) is aanzienlijk te verbeteren door optimalisatie van de toe- en afvoerposities:

- inbrengen van de droogste lucht t.p.v. de hoogste RV;
- afvoer van lucht waar de absolute vochtgehalten het hoogst zijn;
- een fijnere verdeling over meer posities.

<sup>2</sup> Aan deze remedie was de aanvankelijke werktitel 'Overdruk-project' ontleend

Klimaatverschillen nivelleren kan door mengventilatoren optimaal te combineren:

- horizontale ventilatoren;
- verticale ventilatoren;
- pulsventilatie (in ontwikkeling).

Vereffenen van lokale verschillen in warmtebelasting kan door:

- langer gesloten schermen;
- meervoudige schermen;
- diffuus glas;
- regelbare zonwerende beglazing (bijv. Fresnel in ID-kas/DaglichtKas);
- anticiperend regelen o.b.v. lokaal weerbericht (minder schokkerig);
- optimale warmteverdeling tussen deelnetten bij elke conditie;
- direct gekoelde lampen (belichte teelt).

Van zeer lage temperatuur verwarming, bijv. vloerverwarming is minder thermische inductie van de luchtstroming te verwachten.

Decentrale naregeling van klimaatinstallaties kan lokale verschillen compenseren:

- autonoom regelbare slurven met naverwarmingsslangen er in;
- autonoom regelbare verticale ventilatoren;
- autonoom regelbare luchtverwarmers/-koelers (bijv. OPEC);
- autonome absorptiedrogers per zone (bijv. ArcaZen zoutdroger);
- autonome condensdrogers per zone (bijv. Novarbo of combi met WTW in ontwikkeling).

De uitrede van een luchtstroom over het scherm is te voorkomen/beperken door:

- stromingsbarrières zoals nokschotten;
- verbeterde luchtdichting scherm;
- drukbeheersing door:
  - o overdruk m.b.v. voldoende overmaat toevoer van buitenlucht,
  - o circulatie met aanzuig via kokers van boven het scherm,
  - o een onderdrukspouw tussen de schermlagen (druksluit).

Koudeval over een schermkier is te voorkomen of beperken door:

- gelijkmatiger verdeelde schermkieren (bijv. diafragma openingssysteem);
- injectie van warmte boven het scherm voordat dit opent.

### 7.3 Terugkoppeling uit Technologieclusters

In het kader van Technologieclusters voor het MKB heeft TNO met een 25-tal bedrijven een serie studiebijeenkomsten gehouden, waarbij kennisvergaring en – uitdieping en terugkoppeling rond het thema ‘homogeen kasklimaat’ voorop stonden.

De relevante ontwikkelingen en verbetermogelijkheden die hierbij uiteindelijk zijn uitgekristalliseerd, worden hier per hoofdthema genoemd.

#### 7.3.1 Meten

- Temperatuursensors afschermen voor (zon)straling;
- Betaalbare nauwkeurige vochtsensoren voor RV rond of boven 90%;
- Sensoren afschermen voor spatwater;
- Verbeterd toetscriterium ontwikkelen, dat rekening houdt met mate en duur van de afwijking (temperatuurintegratie) en via groei- en gewasschadmodellen meer zegt over het werkelijke gewaseffect;
- Uniforme analysewijze (onderling vergelijkbaar) → meerwaarde creëren uit kruiscorrelaties (big database);
- Koppeling aan waarnemingen klimaatcomputer of internet → meerwaarde creëren;
- Periodieke check betrouwbaarheid meetsignalen:



- Vergelijk lokale meteo met nabij meteostation (windsnelheid en – richting, zonstraling, buitentemperatuur),
- Gegevens klimaatmeet-box versus monitoring,
- Controle open/dicht standen schermen en ramen;
- Klimaatverlopen in de kas meten en inzetten bij verbeterde regeling. Dit vergt klimaatsystemen met aanpasbare distributie over de kas, zodat lokaal kan worden nageregeld;
- Klimaatmonitoring uitbreiden naar klimaatverschillen op microniveau (focus van kas- naar plantschaal) en koppelen aan plantmetingen.

### 7.3.2 Ventilatie

- Betere ontwerp gereedschappen → keuze beste systeemcombinatie en bepalen optimale ventilatie- en circulatiecapaciteiten alsmede beste toe- en afvoerposities [*Vanwege de grote verschillen in benodigde capaciteit blijft raamluchting de primaire optie in en rond de zomer en ligt het nut van actieve mechanische ventilatie in de stookperiode. Voor de meest gelijkmatige gewasdroging zijn combinaties van onder- en bovenbeluchting te prefereren*];
- Mechanische ventilatiesystemen (verticale ventilatie en luchtslurven, vooral indien naverwarming in de slurf) kunnen door gelijkmatiger distributie dan bij raamluchting en door lokaal naregelen klimaatverschillen verkleinen;
- Luchtslurven en verticale ventilatie kunnen beide klimaatongelijkheid verkleinen [*de vergelijking tussen deze beide systeemvarianten i.h.k.v. dit onderzoek laat zien dat de resulterende vochtgradiënt over de planthoogte en de horizontale verschillen voor deze systemen wel onderscheidend zijn*]:
  - Verticale ventilatie heeft voorkeur i.v.m. lagere kosten en eenvoudige droging i.c.m. aanzuig boven het scherm [*Men kan luchtslurven ook voorzien van een aanzuig van boven het scherm, die via een mengklep het aandeel t.o.v. de buitenluchtaanzuig doseert*],
  - Luchtslurven bieden betere mogelijkheden om tot een verdergaande energiezuinigheid te komen. Ze kunnen al met warmterugwinning worden uitgerust, maar bieden tevens goede kansen om ook verdampingswarmte terug te winnen;
- Beide additionele ventilatietypen blijven thans nog beperkt tot relatief lage capaciteiten, vnl. afgestemd op droogcapaciteit voor de nacht → schermen langer dicht = positief voor klimaatgelijkheid. Voor terugwinning van de droogenergie in de stookperiode zou een ca. 5x hogere capaciteit verantwoord zijn (ontwikkelfocus);
- Door raamluchting in meer zones op te delen, onderling onafhankelijk instelbaar, kan een gelijkmatiger luchtverdeling en grotere capaciteiten worden bereikt. Dit is belangrijk om de bijdrage van (natuurlijke ventilatie via) raamluchting aan klimaatongelijkheid te verkleinen → Dit vergt een geavanceerde regeling (raamopeningen anticiperen op ongelijkmatige drukverdeling) o.b.v. betrouwbaarder lokale meteo-informatie omtrent wind. Een verdere verbetering kan de toepassing van tweezijdig scharnierende luchtramen zijn, waarmee loef- en lij-effecten niet alleen bij dwarswind, maar bij alle windrichtingen worden benut (ontwikkelpunten);
- De matig verhoogde, continue luchtbeweging door het gewas, die mechanische ventilatiesystemen nu maken, is gelimiteerd om gewasschade te voorkomen. Het is minder effectief om moeilijk bereikbare gewasplaatsen te bereiken dan een periodiek kortstondige piekbeweging die vanwege zijn beperkte duur niet schadelijk is voor het gewas (gesimuleerde windvlagen). Dit kan worden ondervangen door de ontwikkeling van pulsbeluchting.

### 7.3.3 Drogen

- Er moet een essentiële keuze worden gemaakt hoe men droogt:
  - o traditioneel en pragmatisch 'door de schermen heen' drogen (condensatie aan het dek en afluchten boven het scherm),
  - o geavanceerd 'onder de schermen' met nieuwe technieken van condens- of absorptiedroging.

De tweede optie biedt mogelijkheden voor terugwinning van de verdampingswarmte. Dit bepaalt in hoge mate welke energiebesparing wordt bereikt.

Optimale inzet van beide opties stelt overigens onderscheiden eisen aan de schermen;

- Moderne decentrale droogsystemen (bijv. ArcaZen, OPAC) kunnen klimaatverschillen verkleinen door gelijkmatige distributie, lokaal naregelen en optimale combi met scherming;
- Innovatieve varianten (condens- en absorptiedroging [*met recompressie bij de regeneratie*]) mikken op ruim hogere capaciteiten (naast terugwinning verdampingswarmte), zodat combi met scherming nog verder wordt geoptimaliseerd → d.w.z. in ruim meer situaties de klimaatongelijkheid verkleinen.

### 7.3.4 Schermen

- Beperk klimaatongelijkheid door:
  - o Intensiever schermen, vooral in nacht (meer vereffenen),
  - o Rustiger schermgedrag,
  - o Scherm met NIR-filter bij overmatige zonlast (warmtereductie),
  - o Gedifferentieerd schermen per kascompartiment;
- Verbeter de schermkier, zodat minder koudeval optreedt bij het openen (ontwikkelpunt);
- Verbeter de luchtdichting van schermen (verminderen van de uitrede van koude lucht die verantwoordelijk is voor het instellen van een ruimtestroming met klimaatongelijkheid). Het gaat dan niet alleen om de permeabiliteit van de schermen zelf, maar vooral ook om de afdichtingen rondom (de aansluitnaden met de kasconstructie en de kieren in het sluitmechanisme);
- Snelle wisselingen in warmtelast (weersinvloeden) kan men, in plaats van met de schermopening, wegregelen met een snel aanpasbare schermisolatie (bijv. samendrukken van de lagen van een meervoudig scherm). Dit levert veel minder verstoring en dus een stabiel kasklimaat op;
- De isolatie van de dek- en gevelschermen is vaak niet in balans. Dit is een belangrijke reden waarom juist de gevelzone vaak klimaatafwijkingen vertoont. Bij de keuze voor een schermstelsel moet derhalve meer aandacht worden besteed aan het creëren van een vergelijkbare gevelisolatie, die simultaan instelbaar is. De (door het aanbrengen van schermen impliciet gewijzigde) rol van de gevelverwarming moet hier eveneens in worden betrokken.

### 7.3.5 Lage-temperatuur verwarmen

Verwarmen met verlaagde temperaturen is energetisch van belang (efficiënte benutting rookgascondensator, hoge COP van een warmtepomp, maximale uitnutting aardwarmte, betere inzet van rest- en omgevingswarmte van bijv. WKK of duurzame bronnen). Het wordt mogelijk gemaakt door maatregelen zoals:

- Verbetering en intensiever gebruik van de isolatie (schermen, dubbel glas);
- Terugwinning van voelbare en latente ventilatiewarmte (droogenergie),
- Vergroting van het verwarmend oppervlak (VO) door extra buizen, gebruik van meer subnetten (bovennet, gewasbuis, vloerverwarming, luchtslurven

met interne naverwarming) en LT warmtewisselaars (geforceerde doorstroming met kaslucht);

- Cascadeschakeling van de diverse verwarmingsnetten, waarbij de subnetten met retourwater van het hoofdnet of een ander subnet worden gevoed en de warmtewisselaar van de aangezogen buitenlucht als laagste temperatuurtrap geldt (vanwege warmte-uitwisseling met de lage buitentemperatuur);
- Verlaging van de pompsnelheid bij deellast (langzamer doorstroming van het systeem om de temperatuursprong te vergroten).

Parallel wordt ook koelen met verhoogde temperaturen mogelijk en nog verder verbeterd door:

- Beschaduwning, met name het gebruik van buitenschermen;
- Assimilatiebelichting met directe koeling.

In de scope van dit rapport gaat het om de consequenties van LT-systemen voor de uniformiteit van het kasklimaat en de benodigde verbeteringen.

Een hoofdconclusie in dit rapport is dat klimaatongelijkheid sterker optreedt bij toename van de warmtestromen in de kas. Dit kan uit het gebruik van lage(re) temperatuur verwarming (deels) worden verklaard:

- Variaties in warmtestromen, die gepaard gaan met fluctuaties in het buitenklimaat, veranderen weinig in de energiezuinige kas, zeker overdag bij beperkt of geen schermgebruik. Aan de andere kant is de klimaatinstallatie met kleinere warmtestromen gaan werken. Door de veranderende verhouding tussen beide warmtestromen gaat het opvangen van de buitenfluctuaties vervolgens moeilijker en trager en resulteert in grotere fluctuaties in het binnenklimaat;
- Bij de transport- en verdeel-/verzamelleidingen is geen sprake van een Tichelman-opzet. Daardoor worden de voorste verwarmingsbuizen die er op zijn aangesloten sowieso met een lagere temperatuur gevoed dan de achterste aangesloten buizen. Fysisch kan worden aangetoond dat deze temperatuurval verder wordt vergroot als:
  - o Met grotere buisdoorlaten wordt gewerkt (bijv. doordat parallelle buizen t.b.v. de gevelverwarming worden bijgeplaatst), omdat een warmtestroom op lager temperatuurniveau plaatsvindt;
  - o De pompsnelheid wordt verlaagd om (zeker bij deellast) een grotere sprong in watertemperatuur (lagere retourtemperatuur) te bereiken.

Om dit soort verschijnselen te onderkennen en er voor te compenseren, is aan te bevelen ontwerpcriteria voor (homogeniteit van het) klimaat als integraal onderdeel in het ontwerpproces van energiezuinige kassen en LT-verwarmingssystemen op te nemen.

Daarnaast is aan te bevelen een ontwerpmodule op te nemen voor het bepalen van een uniforme lucht- en warmteverdeling over luchtslurven met verwarmingsslangen in de slurf (benutting slurf als VO).

Een goede ontwerpprocedure voor LT-systemen zal ook aspecten bevatten die op andere wijze het klimaat beïnvloeden. Voorbeelden zijn:

- Efficiënte luchtzijdige warmtewisselaars:
  - o Aandeel luchtverwarming/-koeling limiteren i.v.m. induceren teveel luchtbeweging (gewasverdamping ongewenst stimuleren) vooral in de nacht,
  - o Optimale aantallen en posities in de kas / tussen gewas;
- Beperk piekbehoeften (aantasting LT) door toestaan klimaatverlopen (= HNT) en door gebruik van korte-termijn buffers van optimale grootte.

## 8 Conclusies en aanbevelingen

Er zijn gegevens van klimaatmonitoring op een tiental tuinbouwbedrijven geanalyseerd. Daaruit kan het volgende worden geconcludeerd:

- Horizontale temperatuurverschillen in de kassen lopen regelmatig op tot in de orde van grootte van 5 K en verschillen in relatieve vochtigheid tot 15%. Incidenteel komen nog zelfs ruim grotere afwijkingen voor;
- De klimaatongelijkheid blijkt vooral toe te nemen als de warmtestromen door de kas groter worden, ofwel bij lagere buitentemperaturen en meer zon en als er sprake is van bovengemiddelde windsnelheden;
- Gesloten schermen blijken een dempende werking op klimaatongelijkheid te hebben.

De klimaatongelijkheid blijkt tussen bedrijven onderling flinke verschillen te vertonen. Dit hangt samen met verschillen in kas, teelt en klimaatsystemen.

Door de monitoringsgegevens te correleren aan mogelijke invloedsfactoren en door simulatie met een speciaal hiervoor opgesteld klimaatmodel is bepaald welke verschijnselen vooral een negatieve rol spelen. De volgende aspecten zijn gedefinieerd:

- Lokale koudeval vanuit de schermen in de gevelzone of tijdelijk onder schermkieren;
- Toenemende verlopen in de distributie over het verwarmingsnet, naarmate met lagere temperaturen wordt gestookt;
- Verlopen in de warmteafgifte naar buiten door gradiënten in de wind over het dek en door wisselende bezonning;
- Onbalans in de (scherm)isolatie en verwarmingssystemen van gevels en dek;
- Ongelijkmatige natuurlijke ventilatieverdeling door raamluchting;
- Verlopen in de luchtdistributie van mechanische ventilatie en door gebruik van centrale luchtafvoer;
- Overstroom van lucht van of naar naastliggende kascompartimenten;
- Emissieverschillen door niet-uniform gewas;
- Defecten in de kasomhulling of kassystemen;
- Tekortkomingen van de regeling of regelsensoren.

Om klimaatongelijkheid te beperken of voorkomen, wordt het van belang geacht dat er betere ontwerp hulpmiddelen komen voor moderne kassen en systemen.

Het ontwikkelde klimaatmodel kan hiervoor als basis dienen. Het dient vooral ook inzetbaar te zijn voor herontwerpen, omdat veel kassen worden aangepast om energiezuiniger te worden en volgens de principes van 'Het Nieuwe Telen' te kunnen worden gebruikt.

De ontwerpomgeving dient inzicht te verschaffen in de klimaateffecten van voorgestelde aanpassingen, zodat men ze kan beoordelen en zo nodig verbeteren.

Uit het onderzoek is naar voren gekomen dat met de volgende maatregelen klimaatongelijkheid kan worden beperkt of verholpen:

- Aanpassen en opnieuw inregelen van bestaande klimaatsystemen na een herontwerp als voornoemd;
- Gevelschermen die qua isolatie niet alleen zijn afgestemd op de schermen in het dek, maar waarvan de isolatie overeenkomstig regelbaar is;
- Voorzieningen zoals nokschotten of tegengesteld blazende stuwventilatoren plaatsen, die luchtstromen kunnen afremmen die van invloed zijn op het ontstaan van klimaatongelijkheid;
- Creëren van overdruk over schermen, hetzij door het laten overstromen van ventilatielucht, hetzij door een circulatiestroom die lucht aanzuigt van boven het scherm;

- Betere afdichting van schermen, schermaansluitingen en schermkieren;
- Verdeling van de raamluchting in meer, apart zones, in te stellen door een intelligente regeling. Bij voorkeur worden hiervoor tweezijdig scharnierende c.q. wind-vangende ramen ontwikkeld om loef- en lij-effecten optimaal te benutten;
- Betrouwbaarder regelsignalen, met name voor wind;
- Mechanische ventilatie die het gewas zowel van bovenaf als onderaf kan beluchten;
- Verbeterde menging door verticale of pulserende ventilatie;
- Diffuus verdeelde doorstroomopeningen in beperkt geopende schermen;
- Gebruik van decentrale klimaatsystemen met mogelijkheden tot naregeling. In dat geval zijn extra regelsensoren gewenst, die de klimaatverdeling in de kas vaststellen;
- Directe koeling van lampen voor assimilatiebelichting.

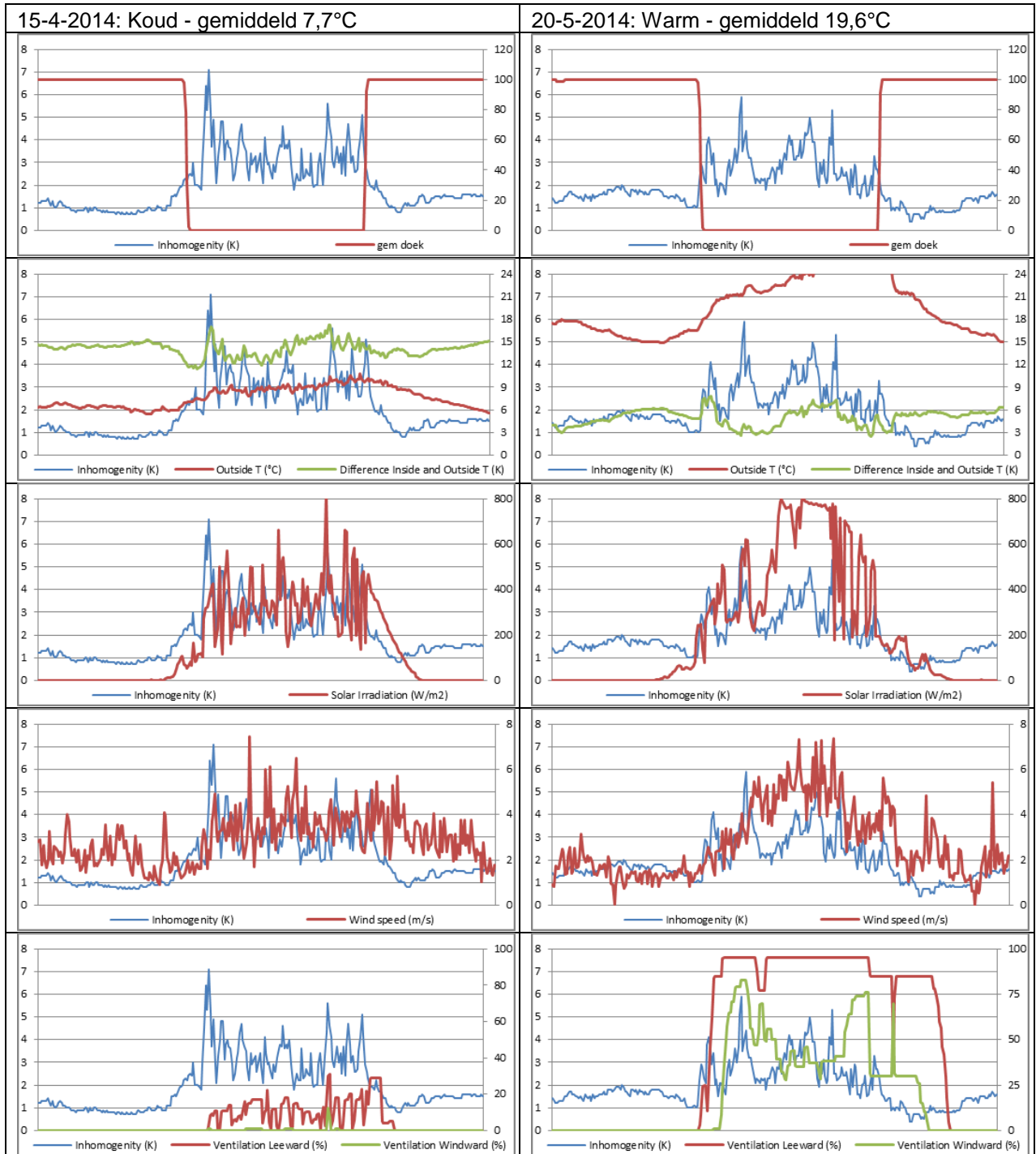
## 9 Referenties

- [1] Wientjes, R.  
Temperatuurgelijkheid verbeteren door klimaatmonitoring.  
Beuningen, Climeco, PT Projectnummer 13505-03, 2014.
- [2] Knoll, B. en J.C. Phaff.  
De Cp-Generator. Een eenvoudige methode voor bepaling van winddrukken.  
Delft, TNO Bouw, publicatie in Bouwfysica vol. 7 no. 4, 1996.
- [3] Feustel, H.E., J.C. Phaff et al  
Fundamentals of the multizone air flow model COMIS.  
Coventry (GB), AIVC TechNote 29, mei 1990.

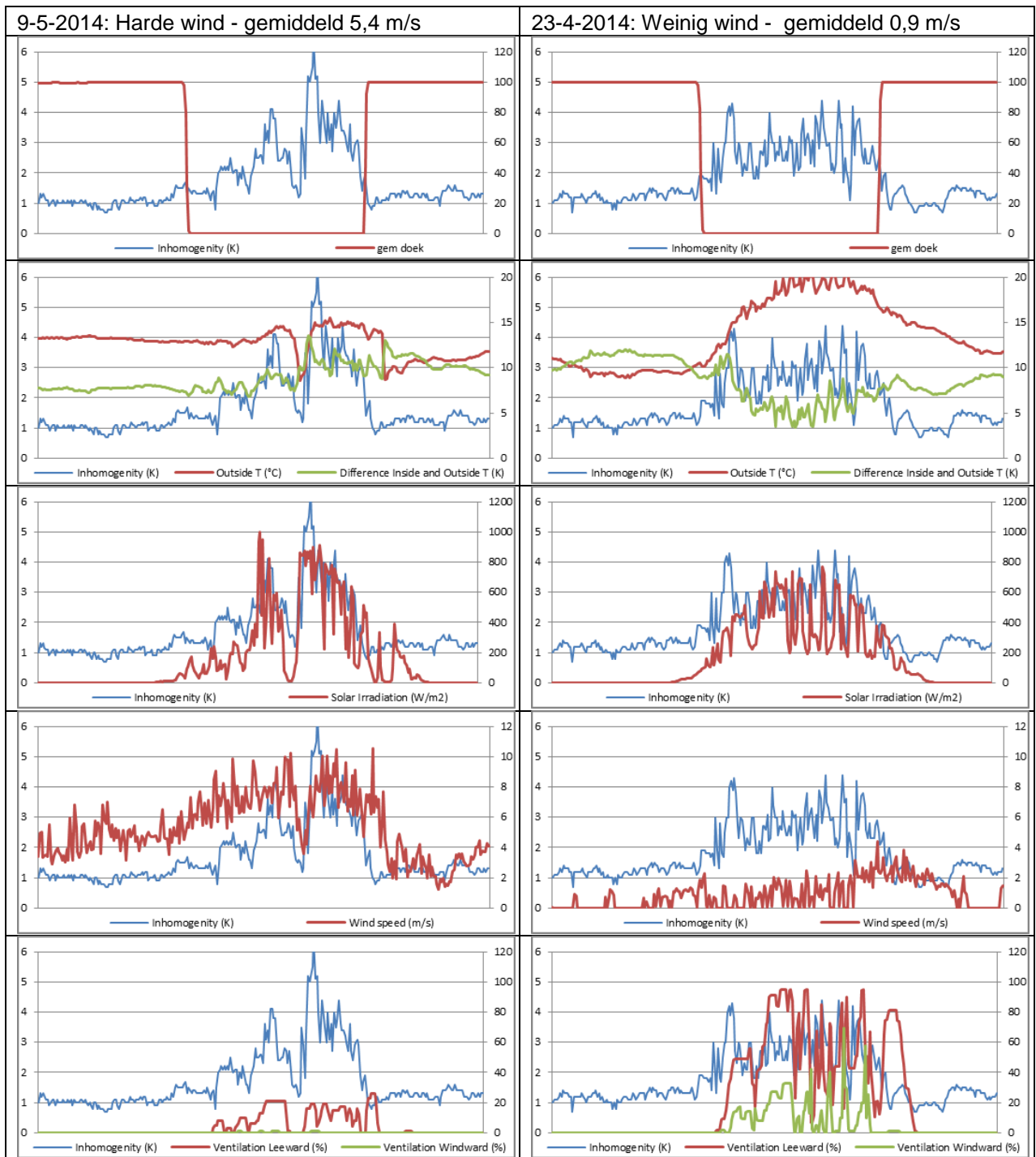
# A Verlopen van klimaatongelijkheid

Om inzicht te krijgen in de verbanden tussen verschillende invloedsfactoren en klimaatongelijkheid zijn hun gezamenlijke verlopen bepaald. De grafieken hierna tonen hiervan voorbeelden.

Tabel 1 Typische verlopen klimaatongelijkheid en invloedsfactoren bij twee niveaus van buitentemperatuur

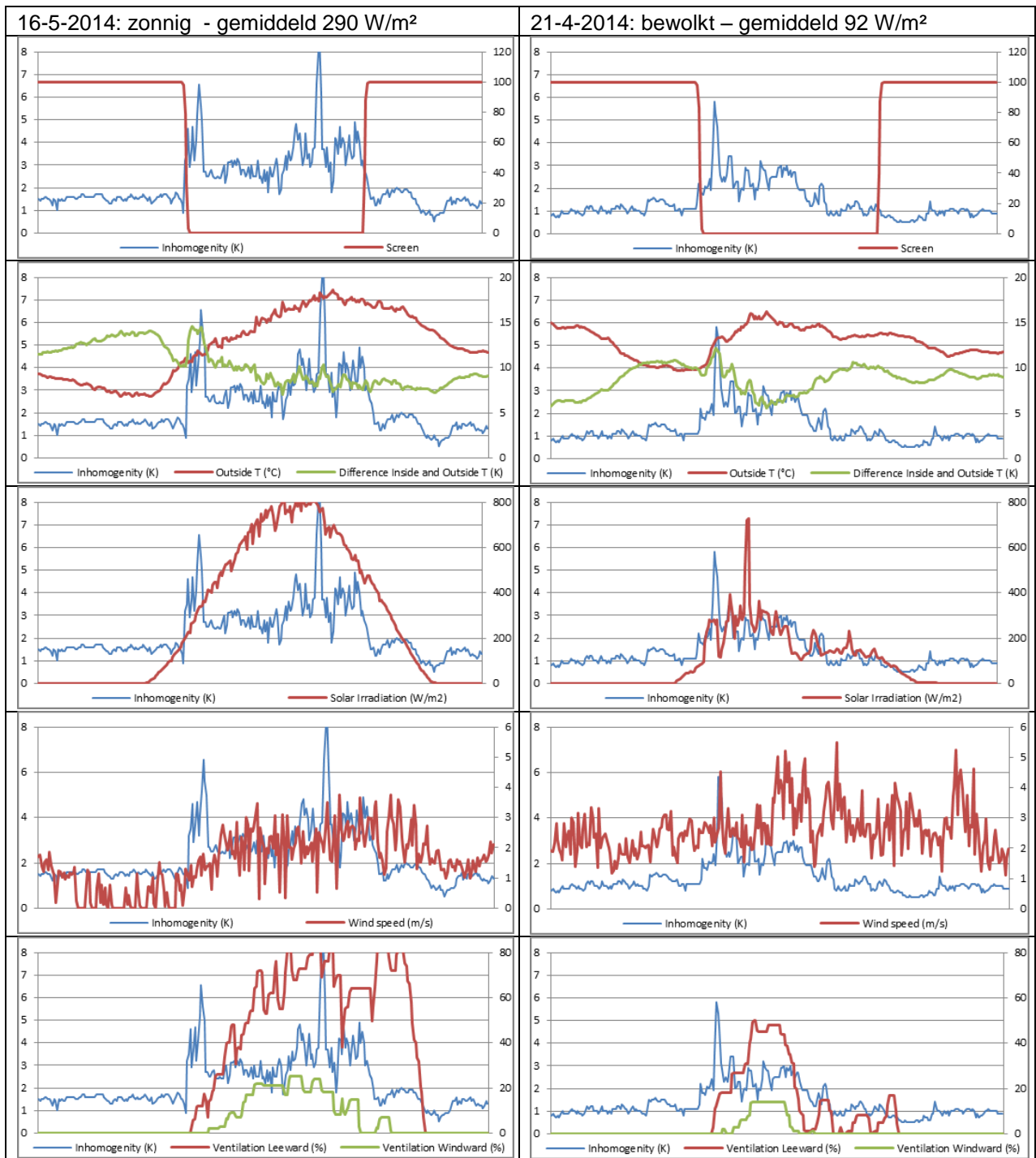


Tabel 2 Typische verlopen klimaatongelijkheid en invloedsfactoren bij twee niveaus van windsnelheid



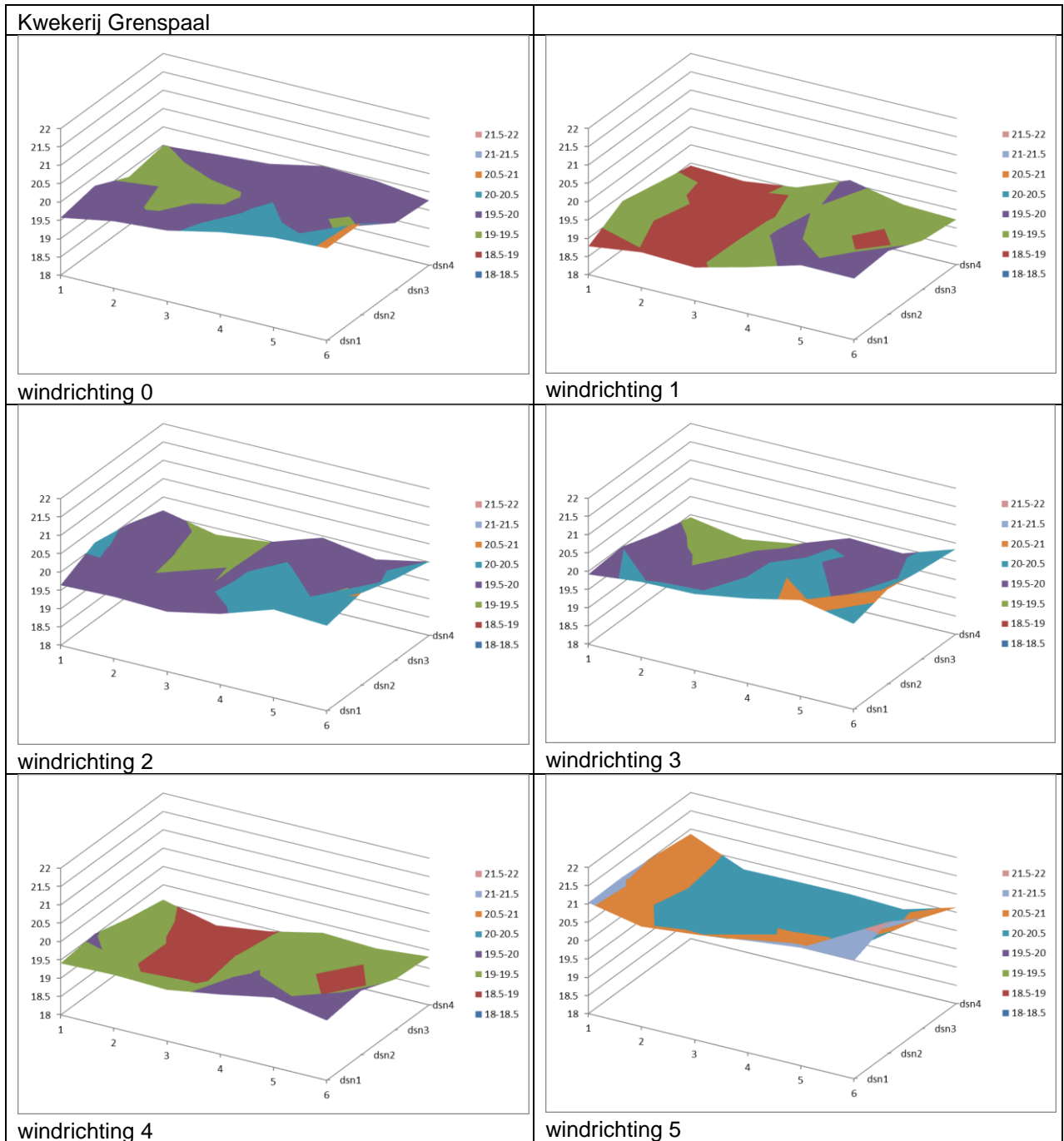


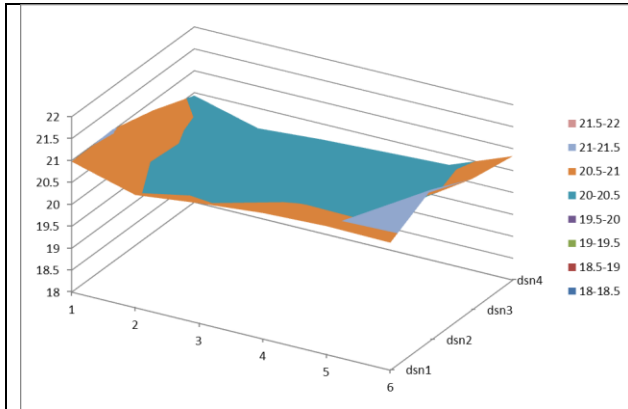
Tabel 3 Typische verlopen klimaatongelijkheid en invloedsfactoren bij twee niveaus van zoninstraling



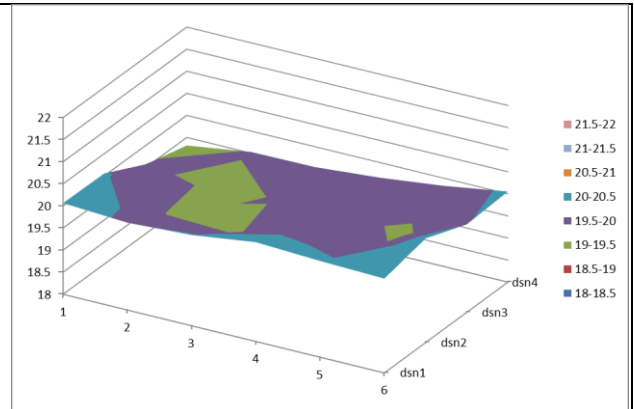
## B Verbanden met de windrichting

In de tabellen is voor een aantal kwekerijen het gemiddelde temperatuurverloop over het kasoppervlak uitgezet als functie van de relatieve windrichting volgens het lokale meteostation (verdeeld in 8 windrichtingssegmenten van elk 45°).



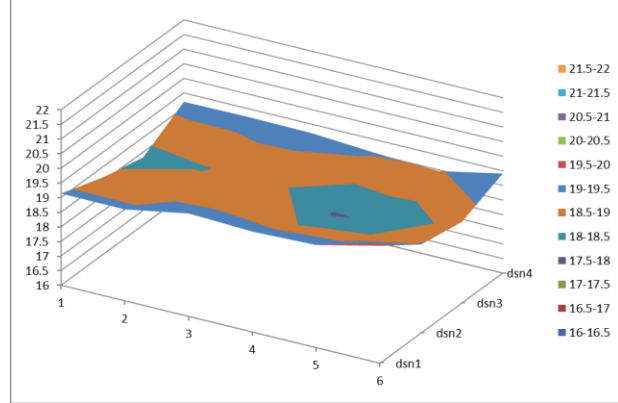


windrichting 6

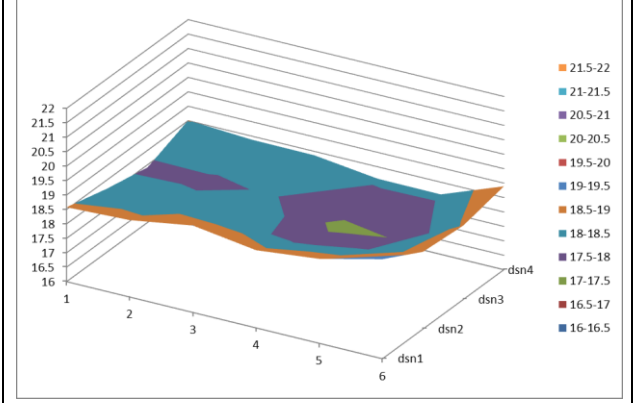


windrichting 7

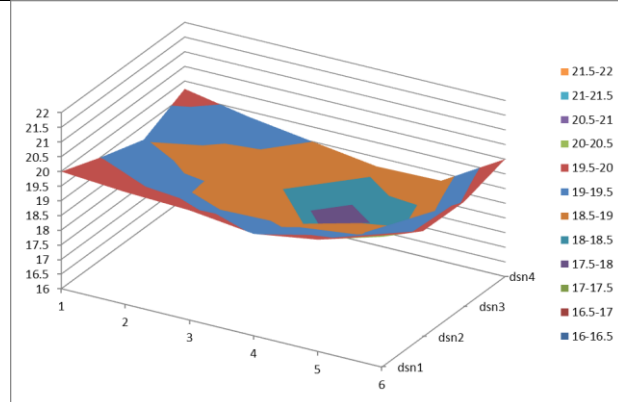
Kwekerij Theeuwen



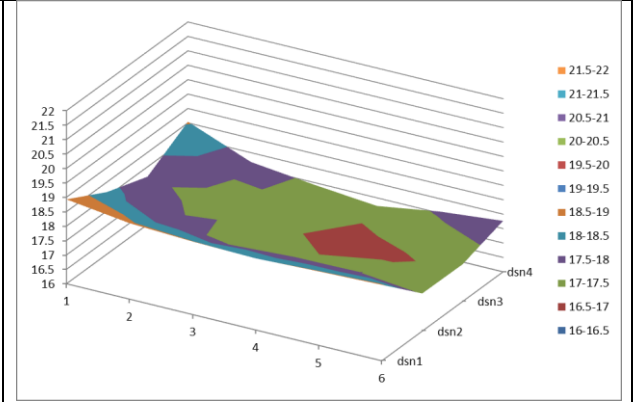
windrichting 0



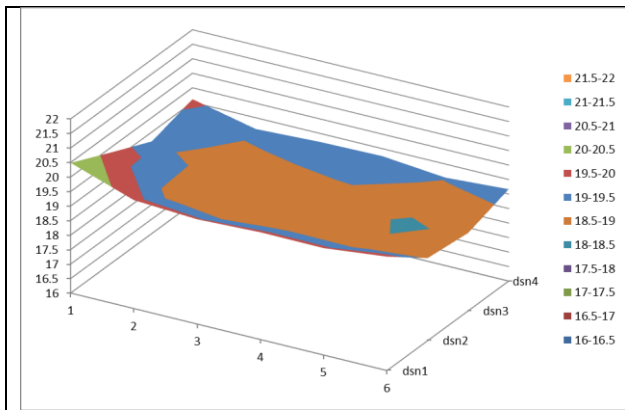
windrichting 1



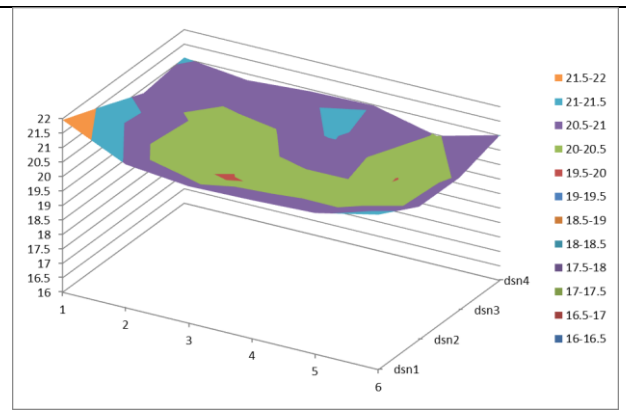
windrichting 2



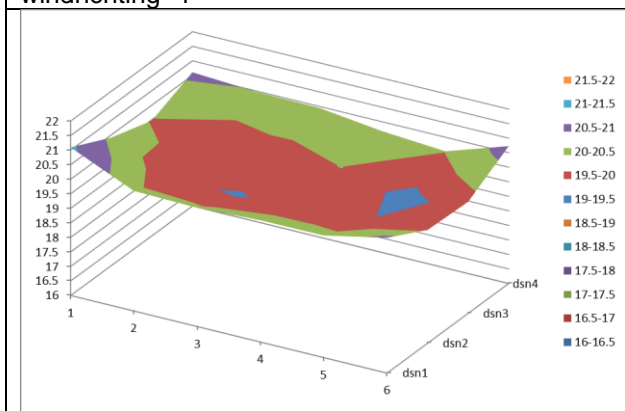
windrichting 3



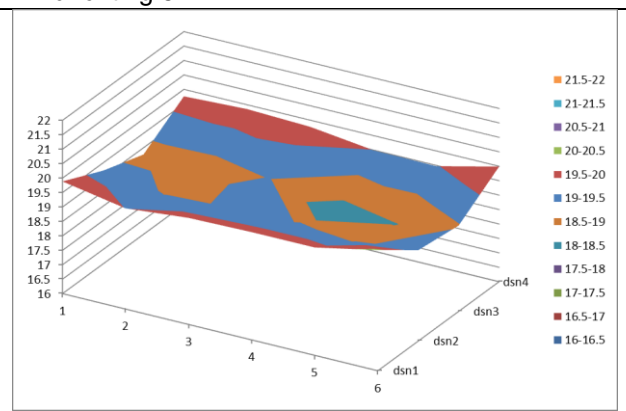
windrichting 4



windrichting 5

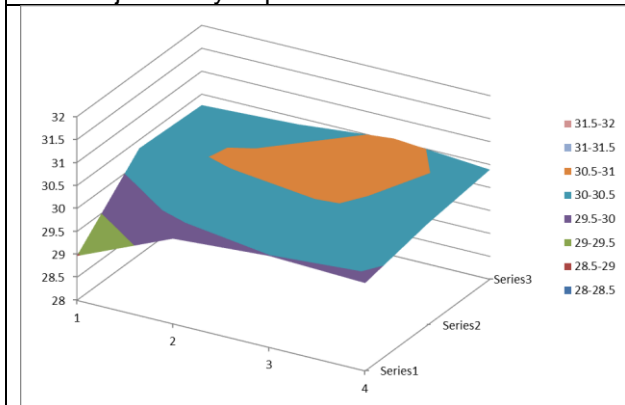


windrichting 6

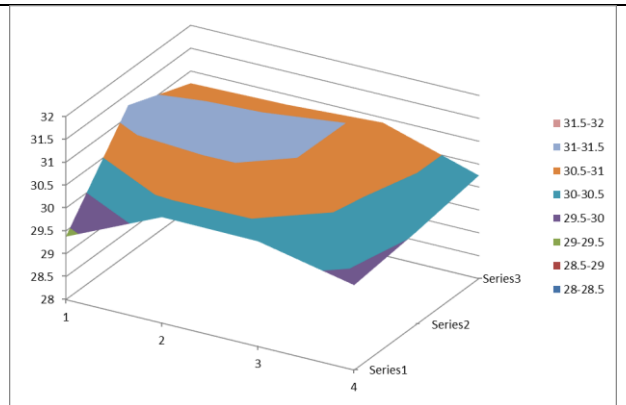


windrichting 7

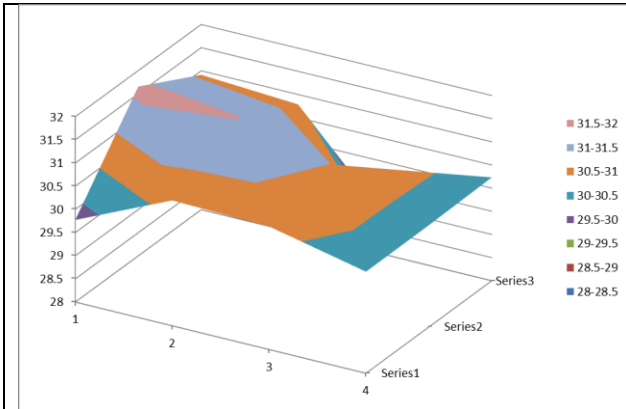
Kwekerij Butterfly - opkweek



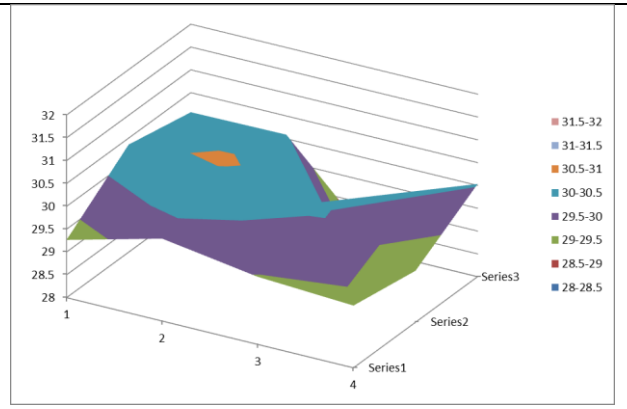
windrichting 0



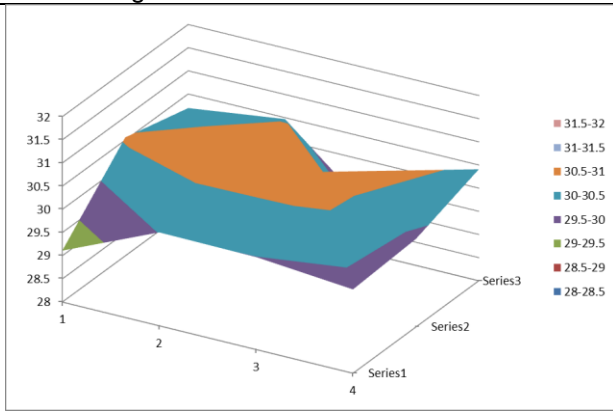
windrichting 1



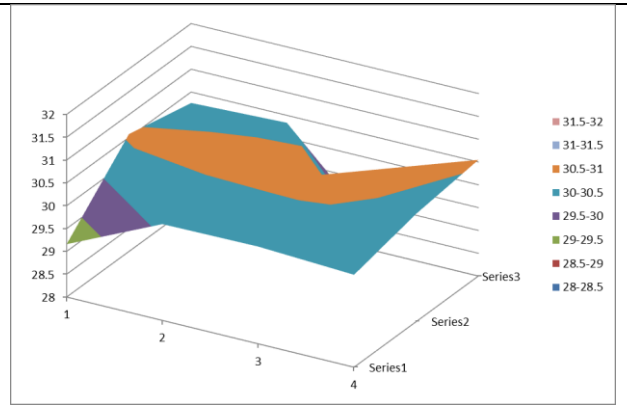
windrichting 2



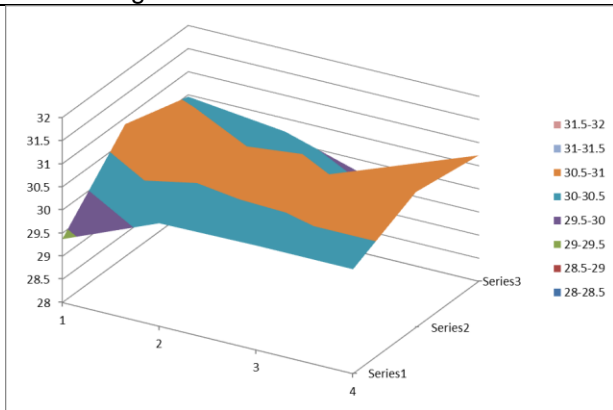
windrichting 3



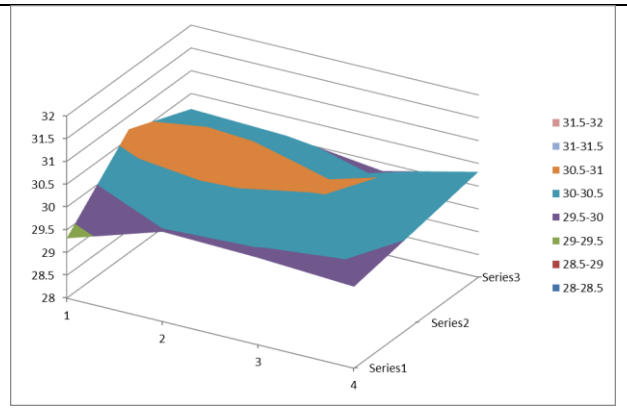
windrichting 4



windrichting 5

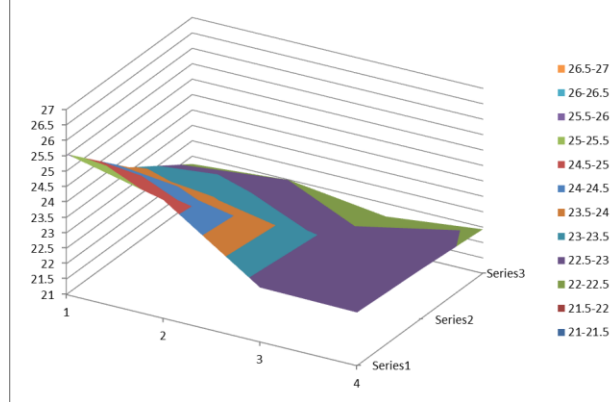


windrichting 6

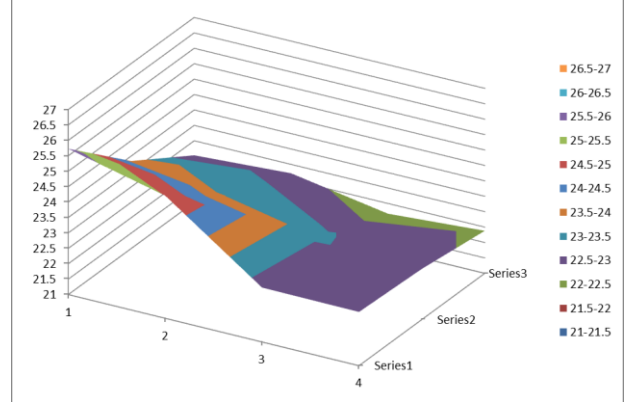


windrichting 7

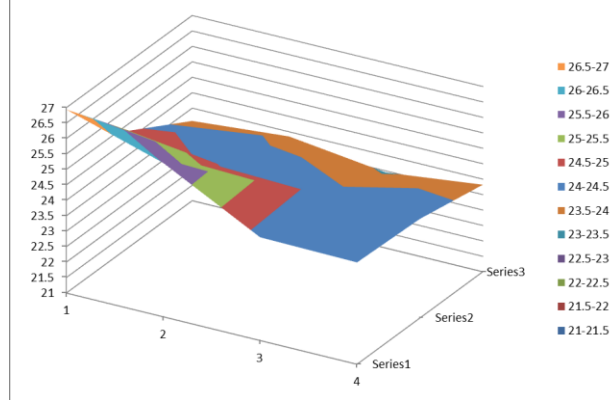
Kwekerij Butterfly - afkweek



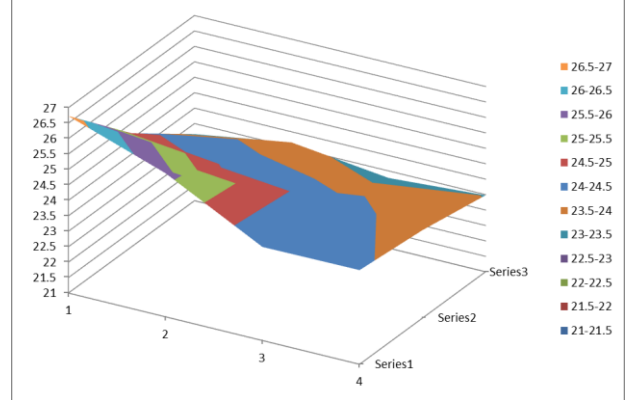
windrichting 0



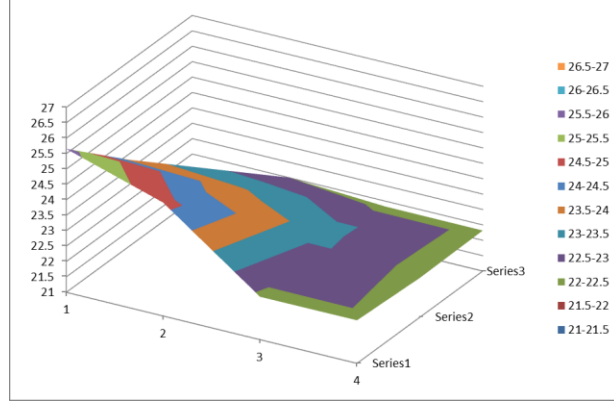
windrichting 1



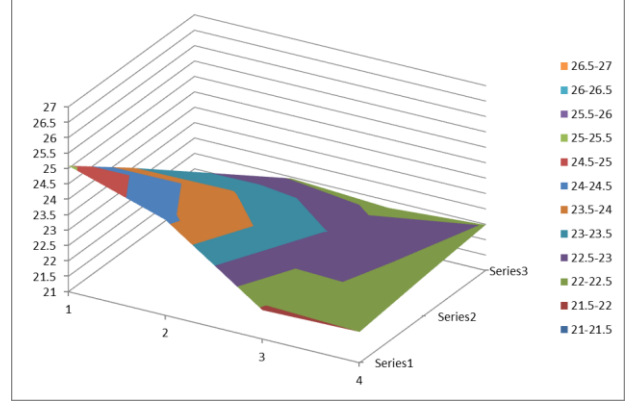
windrichting 2



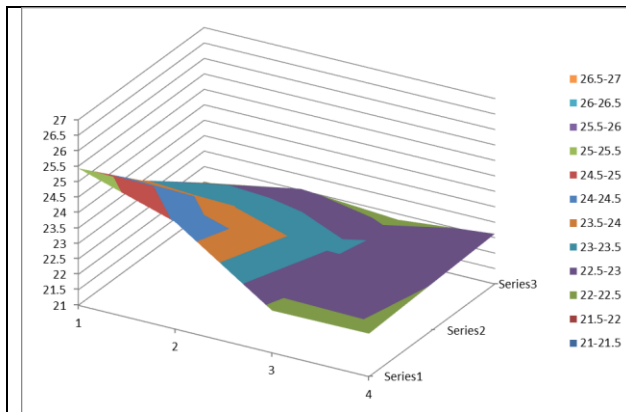
windrichting 3



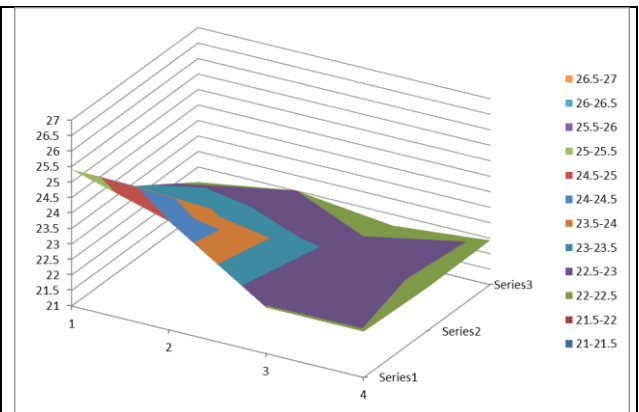
windrichting 4



windrichting 5

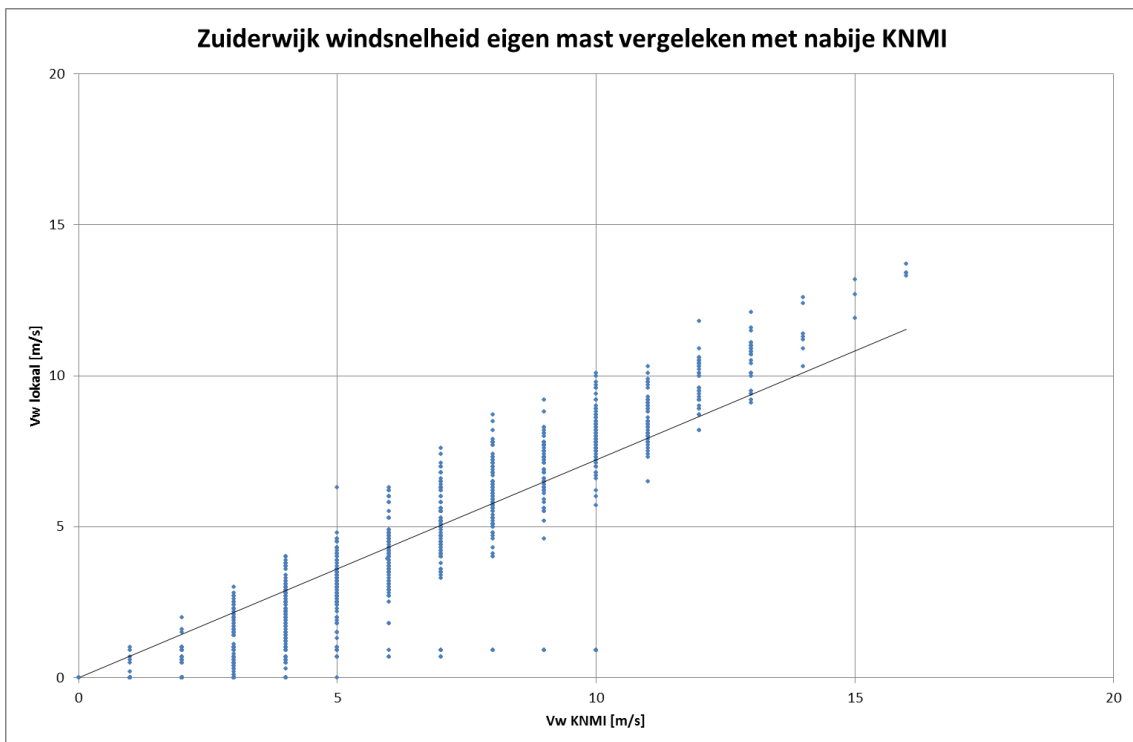
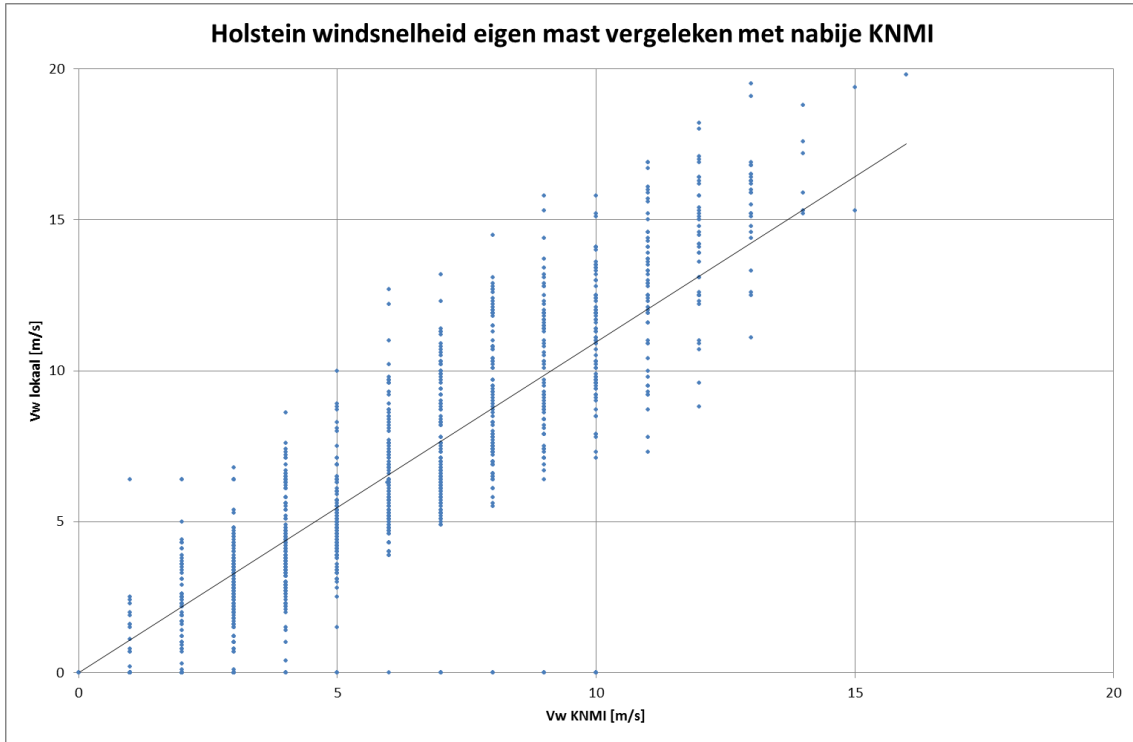


windrichting 6

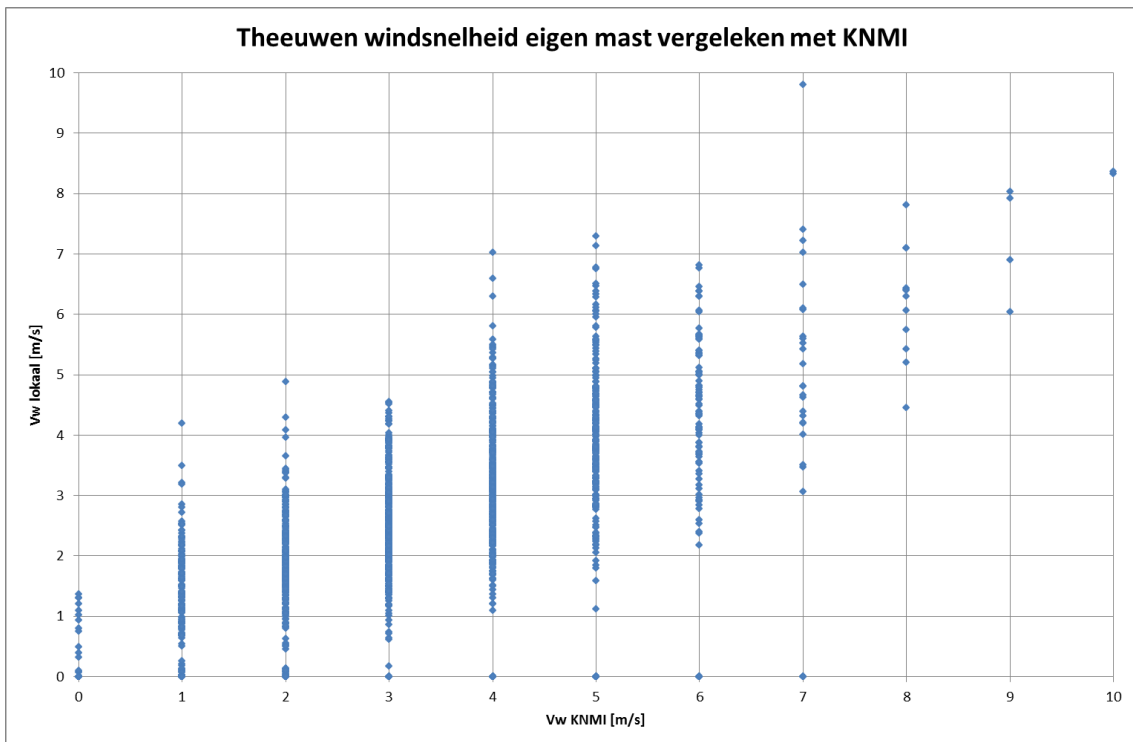
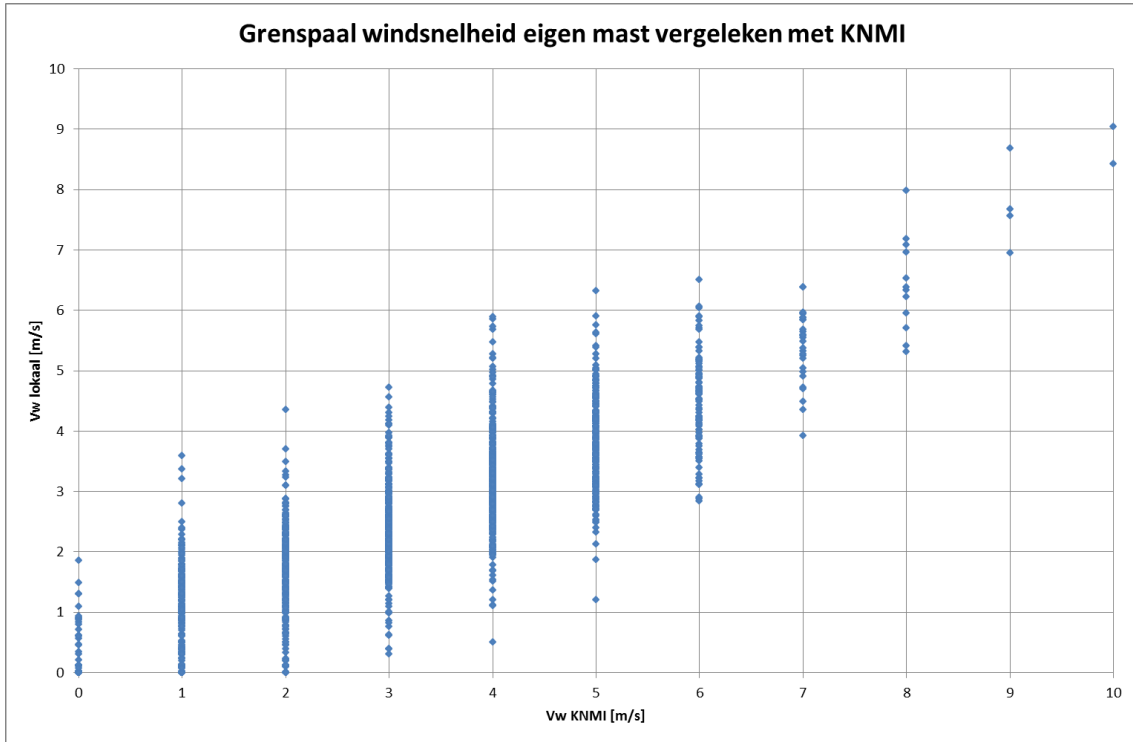


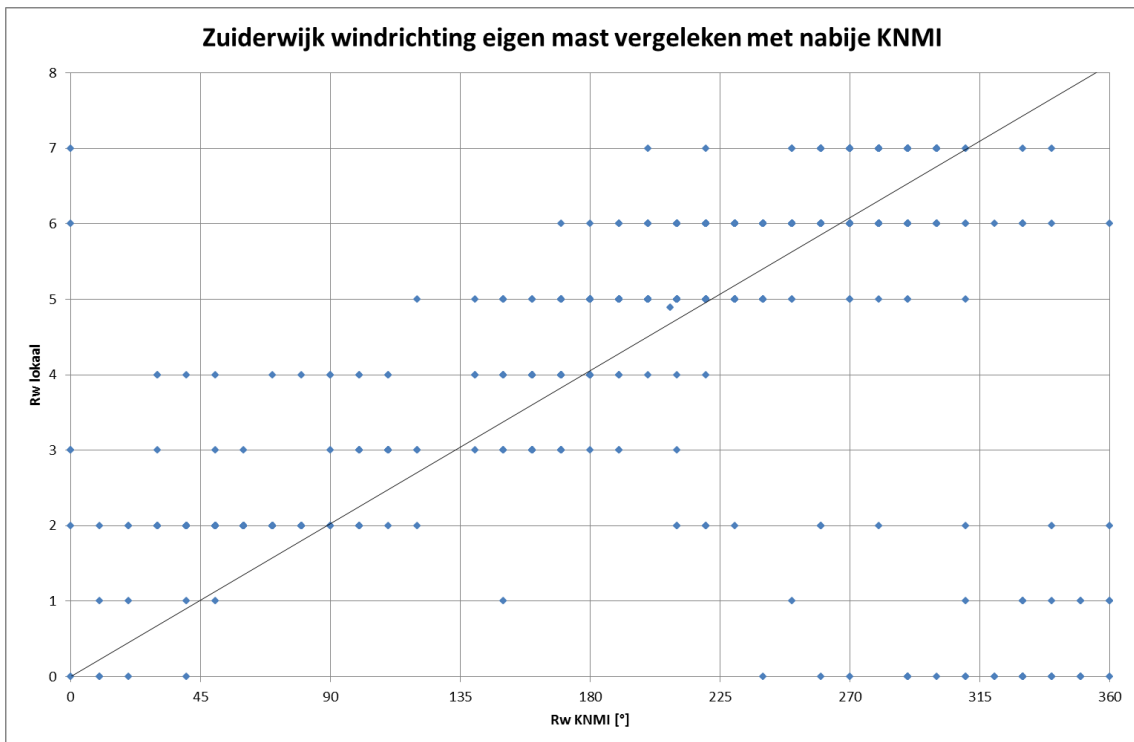
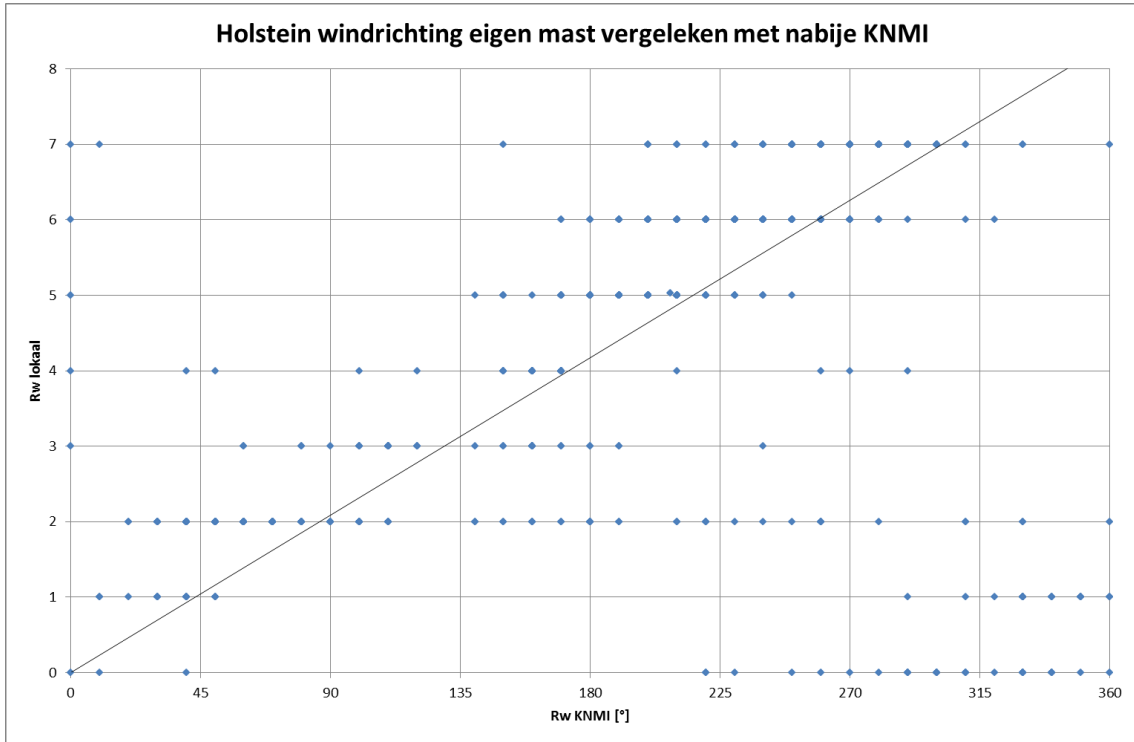
windrichting 7

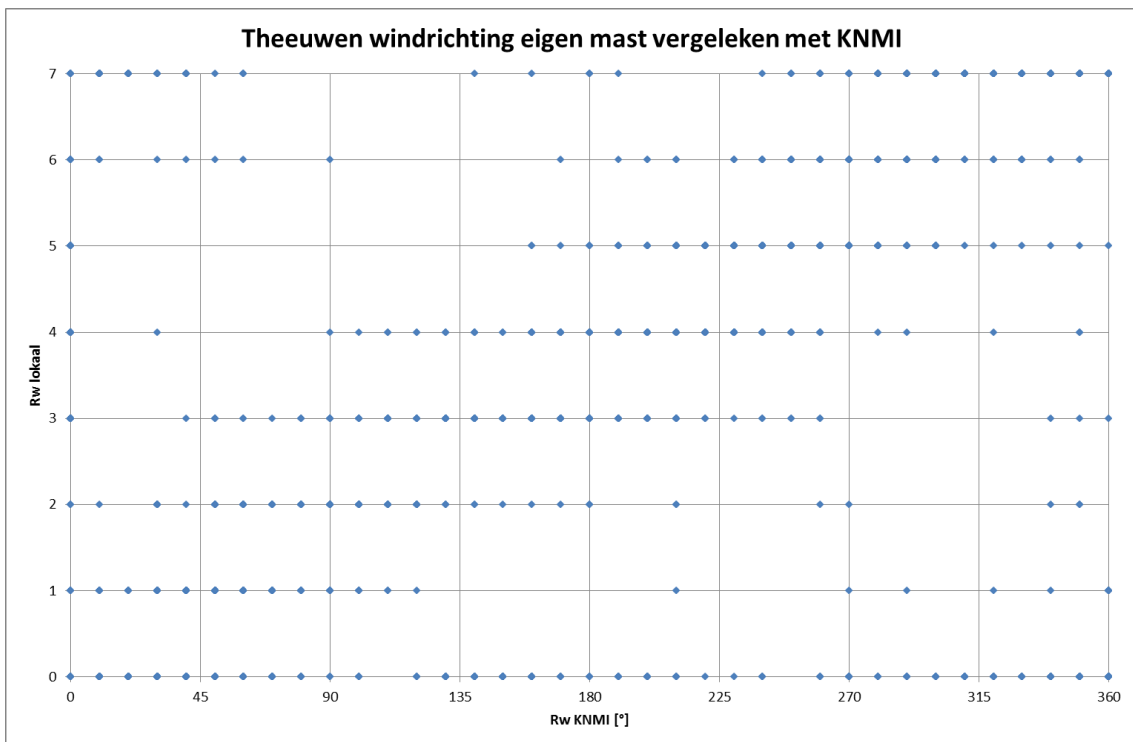
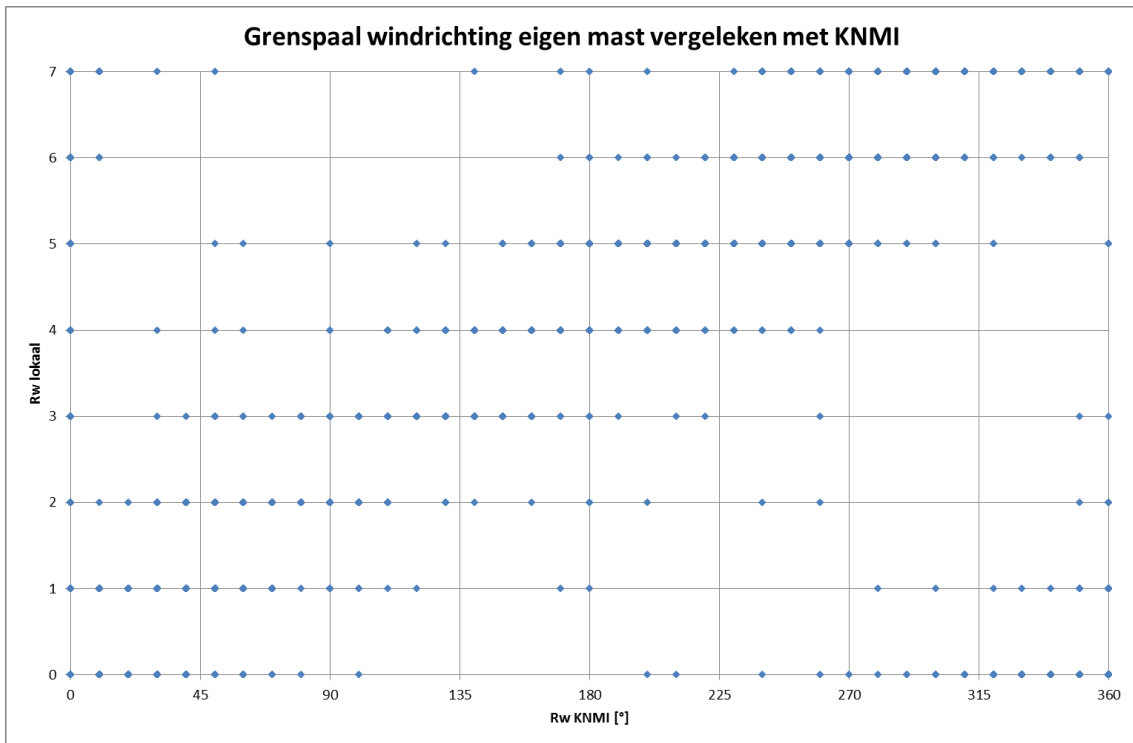
## C Vergelijking lokale meteo met KNMI

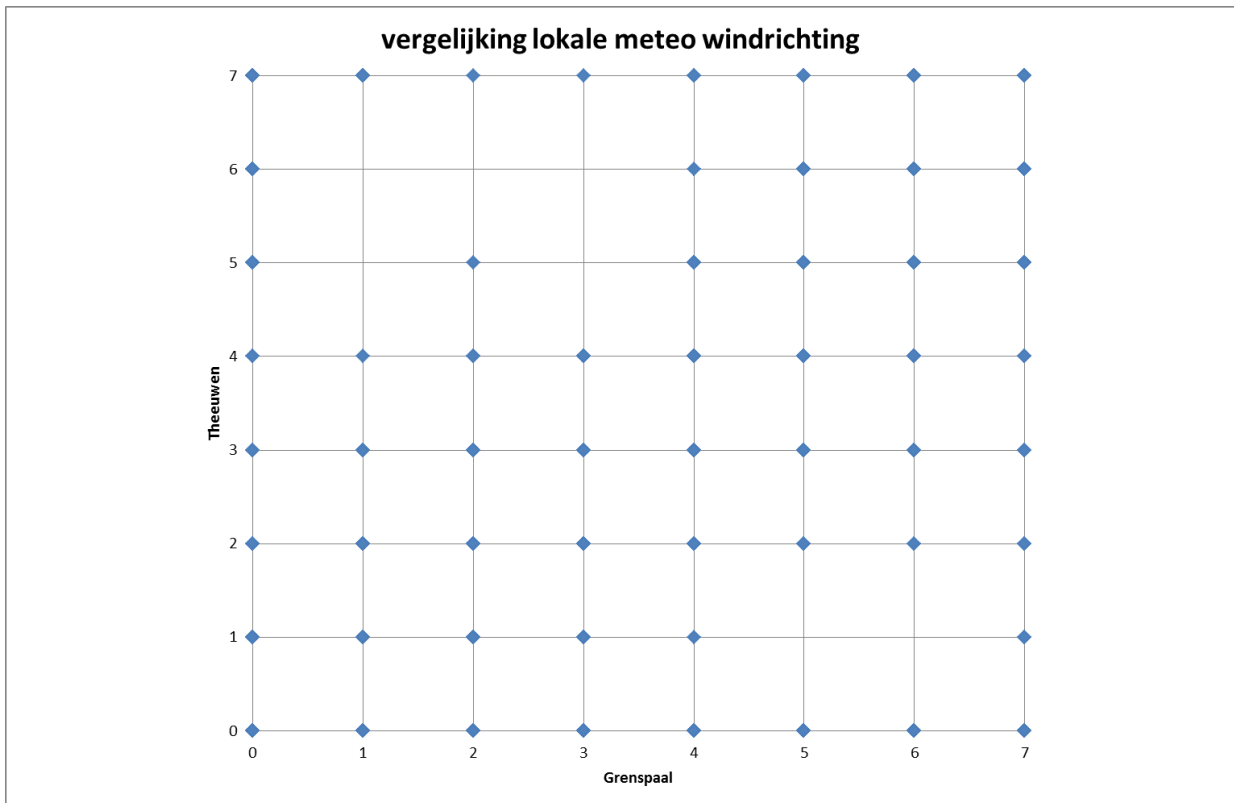
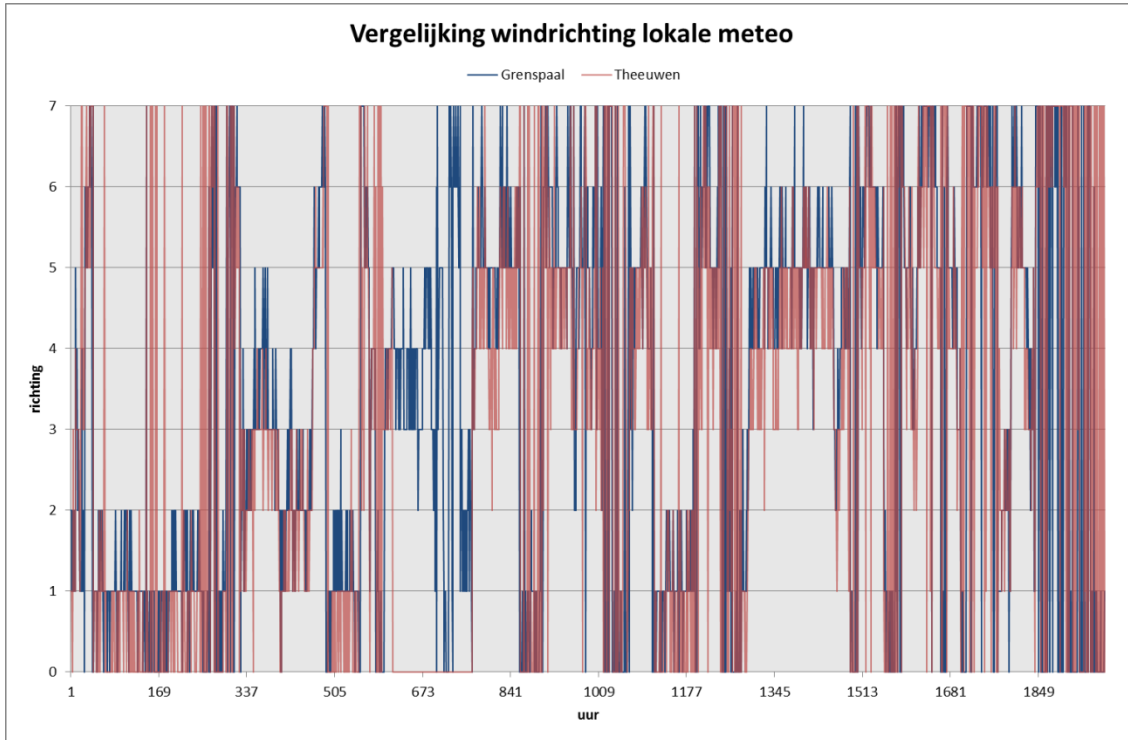












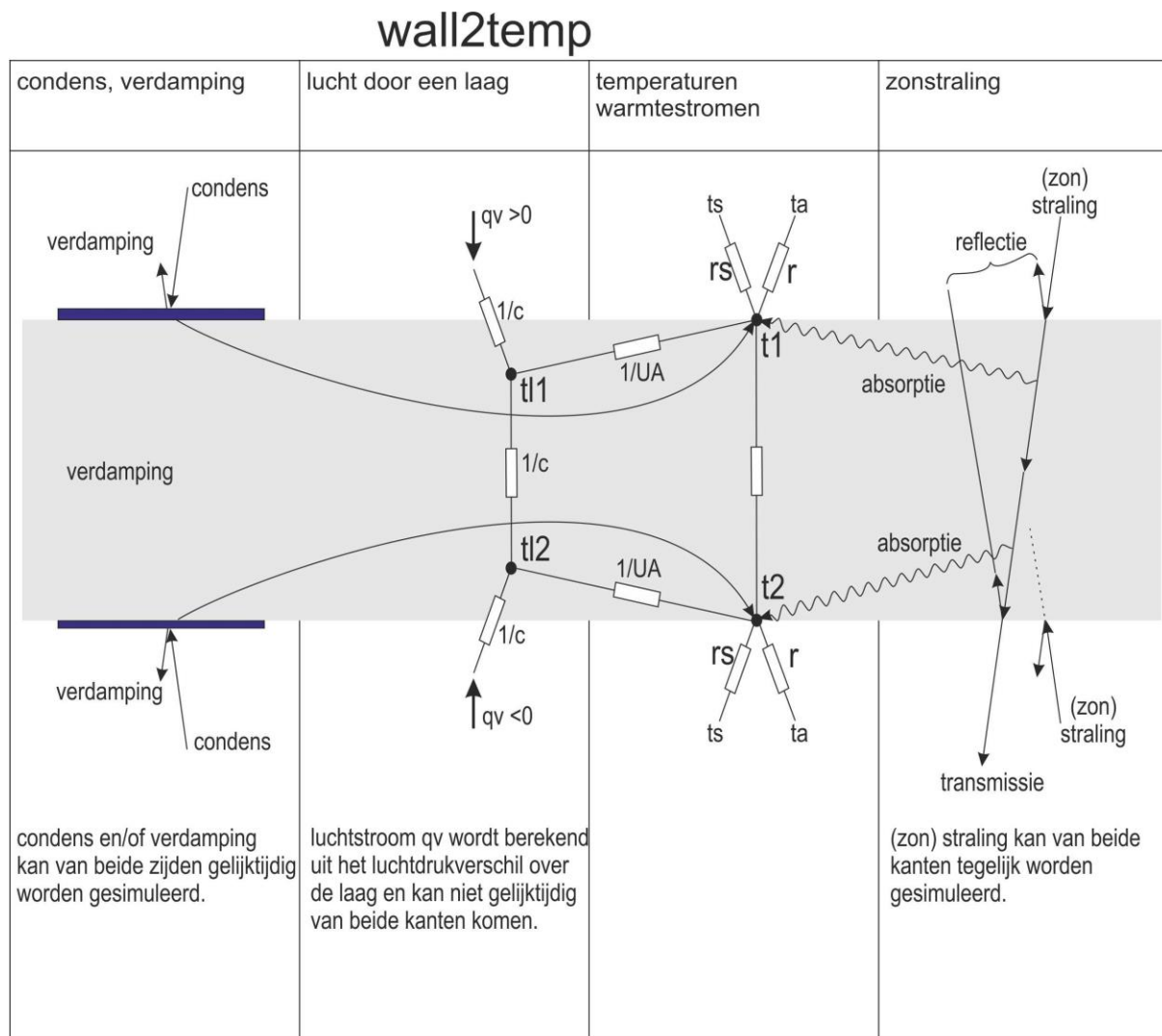
## D Toelichting op het klimaatmodel

### Simulatiemodel voor lucht, warmte en vocht (verdamping, condensatie)

De grondslag van het klimaatmodel van de kas is het luchtstromingsmodel 'gComis'. Dat model is een uitgebreide TNO-variant op het publieke ventilatiemodel 'Comis' [3]. Hieraan moesten warmte- en vochtfuncties worden toegevoegd. Dit is gedaan via een universeel deelmodel 'Wall2temp'.

Het model 'Wall2temp' (Figuur 19) lost de warmte- en vochtbalans op voor alle relevante componenten, zoals een materiaallaag (glas, scherm, e.d.) en een grondpakket, maar ook voor de luchtzones die zich te midden van en om deze componenten bevinden. De uitkomsten zijn de gezochte momentane (verlopen in) klimaatcondities in de kas (en ook van zijn omhulling).

Het model rekent dynamisch. Dat wil zeggen dat verlopen in de tijd worden bepaald, rekening houdend met voorgaande toestanden en buffereigenschappen. Overigens wordt het dynamisch simuleren van het grondpakket vooral belangrijk geacht als er snel relatief grote veranderingen in temperatuur (warmtestromen) in de kas zouden optreden.



Figuur 19 Schematische weergave van het model 'Wall2temp'

Korte verklaring bij de grootheden in Figuur 19:

- t1 en t2 zijn temperaturen van de oppervlakken van de laag (grijs in de figuur).
- ta is de luchttemperatuur en ts de stralingstemperatuur.
- r is de convectieve warmteweerstand (= t.g.v. luchtstroming aan het oppervlak).
- rs is de stralingsweerstand.
- tl1 en tl2 zijn luchttemperaturen van de luchtstroom qv.

### *De wall2temp component*

Wall2temp is een uitbreiding op een eerdere variant 'Wall1temp'. Dit model was bedoeld voor bijvoorbeeld een enkel glas ruit. Daarbij volstond het rekenen met één knooppunt, waarbij het glas één uniforme temperatuur heeft. In werkelijkheid is er een verloop van temperatuur tussen de binnen en de buitenkant van het glas. 'Wall2temp' splitst de wandlaag op in twee knooppunten. Bij simulatie van de genoemde enkel glas ruit komen hier oppervlaktetemperaturen uit die vrij dicht bij elkaar liggen. Bij simulatie van meervoudige schermen of gewaslagen zullen echter grotere gradiënten binnen één zone (verschillen tussen beide zijden) ontstaan. Daarom is het model 'Wall2temp' ontwikkeld. Het wandmodel is qua rekentijd heel snel. Dit vormt dus geen beletsel om met meerdere lagen te rekenen. Het voordeel is dat een nauwkeuriger benadering van het werkelijke verloop kan worden gesimuleerd.

'Wall2temp' kan worden toegepast voor een glasruit, het schermdeek of meervoudige schermen en voor gewaslagen. Het model beschrijft ze als een (al dan niet fictieve) homogene laag materiaal. De laag heeft aan beide zijden temperaturen, warmtestromen, luchtstromen langs beide oppervlakken en een luchtstroom door openingen en poriën in de laag, vochtstromen, (zon)straling als totaal spectrum en PAR of zichtbaar licht.

Stap 1. 'Wall2temp' berekent simultaan warmtestromen en temperaturen t.g.v.:

- Convectieve overdracht met de aangrenzende zones dus met de luchttemperatuur;
- Overdracht naar de stralingstemperaturen;
- Zon- en hemelstraling (opdeling in reflectie, absorptie en transmissie). Naast de warmtestraling (kort- en langgolvig) wordt tevens PAR en zichtbaar licht berekent t.b.v. de gewasverdamming;
- Warmteoverdracht via luchtstromen door het materiaal. De uitwisseling is hier afhankelijk van de permeabiliteit, netto doorlaat, karakteristieke diameter van de openingen en het contactoppervlak van de wanden;
- Condensatie- en/of verdampings-warmtestromen aan beide oppervlakken en ook verdamping vanuit de laag.

Stap 2. 'Wall2temp' berekent iteratief de condensatie/verdamping.

Eerst wordt berekend of er kans op condensatie en of verdamping is. Voor verdamping moet er een waterlaag op een of beide oppervlakken zijn of vochtproductie door het gewas. Het programma houdt de dikte van waterlagen op beide oppervlakken bij, inclusief afstromend vocht.

Vanuit twee geschatte oppervlaktetemperaturen wordt een nieuwe toestand van 'Wall2temp' geschat waarbij de condensatie- en verdampings-warmtestromen opnieuw worden bepaald. Dit wordt herhaald waarbij iteratief naar een oplossing wordt geconvergeerd. Hierbij worden telkens de stappen 1 en 2 doorlopen.

Verdamping en condensatie kunnen ook gelijktijdig worden berekend, bijvoorbeeld aan het buitenoppervlak verdamping en daardoor een afkoeling die tot condensatie op het binnenoppervlak leidt. Per oppervlak is er één van de volgende drie mogelijkheden:

1. Condensatie;
2. verdamping met als voorwaarde dat er vocht, een waterlaag moet zijn;
3. geen condensatie en geen verdamping.

Condensatie en capillair vochttransport door de laag wordt vooralsnog niet beschouwd. Vochttransport meegevoerd via de luchtstroom wordt wel gesimuleerd.

Optische eigenschappen lopen via reflectie en absorptie en opgegeven extinctiediepte. Dat mag voor een laag met een gedefinieerde dikte ook worden opgegeven.

Voor bepaling van de luchtstroom door de laag is verschillende invoer bruikbaar. Men kan de permeabiliteit opgeven, AD (leaf area per  $m^3$ ), maar ook een direct gemeten netto doorlaat. Dat kan zowel voor standaard materiaaleigenschappen generiek als specifiek voor een opgegeven laagdikte. Voor de warmte-uitwisseling is een karakteristieke afmeting van de doorlaatopeningen nodig en een uitwisselend oppervlak, voor zover dat niet al uit de invoer volgt, zoals bij AD (leaf area per  $m^3$ ). Bij het berekenen van de luchtstroom wordt zowel het drukverschil over de laag berekend, als de variërende temperatuur van de luchtstroom zelf, die ook tot condensatie en verdamping kan leiden of deze beïnvloedt.