

Energiebesparing door vochtintegrerende regeling

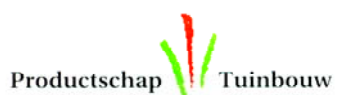
Cecilia Stanghellini
Frank L.K. Kempkes

oktober 2002

IMAG Rapport P2002-73

Onderzoek in het kader van het
Convenant Glastuinbouw en Milieu

Gefinancierd door:



Energiebesparing door vochtintegrerende regeling

Cecilia Stanghellini
Frank L.K. Kempkes

© 2002

Instituut voor Milieu- en Agritechniek (IMAG)
Mansholtlaan 10-12
Postbus 43, 6700 AA Wageningen
Telefoon 0317 - 476300
Telefax 0317 - 425670
www.imag.wageningen-ur.nl

Interne mededeling IMAG. Niets uit deze nota mag elders worden vermeld, of worden vermenigvuldigd op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van IMAG.

Bronvermelding zonder weergave van de feitelijke inhoud is evenwel toegestaan, op voorwaarde van de volledige vermelding van: auteursnaam, jaartal, titel, instituut en notanummer en de toevoeging: 'niet gepubliceerd'.

Voorwoord

In het kader van het convenant Glastuinbouw en Milieu (GLAMI) hebben de overheid (ministeries van LNV en EZ) en de glastuinbouwsector (LTO Nederland) afspraken gemaakt over de maatschappelijke randvoorwaarden, met als horizon 2010. Als doelstellingen zijn geformuleerd:

“Het terugbrengen van het fossiele energiegebruik per eenheid product tot 35 % ten opzichte van dit gebruik in 1980” en “Het aandeel duurzame energie moet toegenomen zijn tot 4 %.” De overheid heeft hier recent aan toegevoegd dat de glastuinbouw haar bijdrage moet leveren aan het terugdringen van de CO₂-uitstoot.

De vochtregeling (het binnen grenzen houden van luchtvochtigheid) draagt voor 10 tot 25 % bij aan het totale energieverbruik van kassen. Een efficiëntere inzet van vochtregelen zou een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan de realisatie van die doelstellingen.

Tegen deze achtergronden zijn in de periode van Januari 2002 tot en met november 2002 in opdracht van het ministerie voor LNV en het Productschap Tuinbouw (proj. nr. PT 10970) door het Instituut voor Milieu- en Agritechniek (IMAG bv), met medewerking van PPO-Naaldwijk de mogelijkheden onderzocht om de energiebesparing te bepalen die kan worden behaald als men de nu gangbare vochtregeling vervangt door een te realiseren minimale “verdampingssom”, over een bepaald tijdsinterval, waarbij de energie input wordt geminimaliseerd.

Samenvatting

De vochtregeling (bijvoorbeeld door inzet van de “minimumbuis”) draagt voor 10 tot 25 % bij aan het energieverbruik van kassen. Het vochniveau wordt “geregeld” met een tweeledige doelstelling:

- Het voorkomen van uitbreken van ziekten, zoals bijvoorbeeld schimmels.
- Zorgen dat er “voldoende” gewasverdamping optreedt.

Gewasgroei en -productie staan in nauw verband met de gewasverdamping; weinig is echter bekend over het verband. Het is aannemelijk dat de biomassa productie van het gewas (meer dan 90 % water) sterk is gerelateerd aan wateropname (waarvan meer dan 90 % verdamping is). Daarnaast is, aangezien opname en distributie van mineralen wordt bepaald door de water opname, het ook aannemelijk dat over een bepaalde periode een minimum hoeveelheid water door een plant moet stromen om een gebalanceerde groei te waarborgen.

Dit project heeft dan ook als doel gehad de mogelijke energiebesparing te bepalen die kan worden behaald als men de nu gangbare vochtregeling vervangt door een te realiseren minimale “verdampingssom”, over een bepaald tijdsinterval, waarbij de energie input wordt geminimaliseerd. Om acceptatie door de praktijk te waarborgen is gekozen om in beginsel de mogelijkheid te analyseren om de verdampingssom op jaarbasis gelijk te houden met in de praktijk gangbare waarden. Daarnaast is gekeken naar de verschillen en overeenkomsten tussen de twee doelstellingen van vochtregeling, d.w.z. wat zou de consequentie zijn (voor de verdamping en het energieverbruik) als de enige expliciete doelstelling het voorkomen van het “natslaan” van het gewas zou zijn.

Voor de uitvoering van het project is gekozen om kennis van in de praktijk gangbare verdampingsniveaus van drie gewassen (tomaat, paprika en roos) te combineren met een kassimulatieprogramma (KASPRO) waarbij de gewasverdamping, het klimaat en het daarbij behorende energieverbruik bij verschillende scenario's zijn doorgerekend. De berekende scenario's zijn gebaseerd op drie principes: het ventileren op RV; het ventileren op het temperatuurverschil tussen gewas en dauwpunt van de kaslucht; of het verhogen van de stook- en ventilatielijn op het temperatuurverschil tussen gewas en dauwpunt van de kaslucht. In al deze drie de gevallen zijn de mogelijke verdampingssommen met de daarbij behorende energieverbruiken verder geanalyseerd door met setpoints, het wel of niet toepassen van minimumbuis en/of het gebruik van temperatuurintegratie en de proportionele band van de regeling te variëren.

De belangrijkste resultaten zijn:

1. de mogelijkheid om energie te besparen door “verdampingsintegratie”, met behoud van de nu gangbare verdampingssom is beperkt (een paar procenten)
2. het toelaten van een kleine daling (bijvoorbeeld 5 %) in de totale verdampingssom, zou de mogelijkheid voor energie besparing door vochtintegratie enorm verruimen, waarbij naast de directe vermindering van het energieverbruik met 11 á 13 % door de verminderde verdamping, nog meer energie bespaard kan worden door de gecreëerde integratieruimte
3. de verdamping hangt veel meer af van de energie input dan van het regelprincipe, d.w.z. twee verschillende principes die resulteren in een gelijk energieverbruik geven ook vrijwel dezelfde verdamping.
4. andersom, de performance van een regeling ten aanzien van het voorkomen van nat slaan van het gewas is veel meer afhankelijk van de regelstrategie (target grootheid, set-point, P-band) dan van het energieverbruik.

Het lijkt dus dat er een goede mogelijkheid is dat er in de praktijk 10 % á 20 % energiebesparing gehaald kan worden door het aanpassen van de principes waarop de nu gangbare vochtregeling is gebaseerd. Voordat het zover is, moeten wij echter onze kennis verruimen langs twee wegen: één is het nagaan welke van de twee doelstellingen van vochtregeling (het waarborgen van “voldoende” verdamping dan wel het droog houden van het gewas) de meest stringente eisen stelt aan het klimaat. Daarna is aanpassing van de klimaatregeling de logische volgende stap. Dat vereist onderzoek naar het beste principe (target grootheid: verdamping en/of temperatuurverschil; regelgrootheid: RV; VPD; kas/buis temperatuur; schermen; kieren) en de beste uitvoering (bijvoorbeeld wel of geen integrerende set-points; P- en/of I-band).

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Samenvatting	5
1 Inleiding	9
2 Opzet van het onderzoek.....	11
2.1 Keuze van referentiegewassen.....	11
2.2 Model validatie.....	11
2.3 Scenario studie.....	11
2.4 Relatie verdamping vs “actuatoren” (ventilatie, temperatuur).....	13
2.5 Bepaling van de mogelijkheid om “met verdamping te schuiven”	14
3 Resultaten.....	15
3.1 Relatie verdamping en vochtafvoer vs energie input.....	15
3.1.1 Invloed kasdek materiaal en gewas op vochtstromen	17
3.2 Mogelijkheden om verdamping “te schuiven” naar perioden zonder energie toevoer	18
3.2.1 Integratie periode van één etmaal	18
3.2.2 Integratie periode van enkele dagen.....	18
3.2.3 Integratie periode over de gehele teelt	19
3.3 Schuiven van de verdamping naar perioden waarbij dat het efficiëntst gebeurt.....	21
3.4 Invloed van de regelingen op het dauwpuntverschil.....	22
3.5 Effect van de stuuralgoritme	23
3.5.1 Standaard vochtregeling	24
3.5.2 Vochtregeling op dauwpunt	24
4 Conclusies	27
4.1 Aanbevelingen	27
Bijlage 1 KASPRO	31
Bijlage 2 Belangrijkste setpoints en kasparameters	33
Bijlage 3 Model validatie.....	35
Bijlage 4 Verdamping als functie van actuatoren.....	43
Bijlage 5 Analyse van de regelingen	47

1 Inleiding

De vochtregeling (het binnen grenzen houden van luchtvochtigheid, bijvoorbeeld door inzet van de “minimumbuis”) draagt voor 10 tot 25 % bij aan het energieverbruik van kassen (Bakker, 1994; Esmeijer, 1998; Visser, 2002). Het is de ervaring van de begeleiders van tuinders, die energiebesparende maatregelen gebruiken (kasklimaatcomputer-fabrikanten en voorlichters), dat het potentieel daarvan wordt gehinderd door minimumbuis- en minimumraaminstellingen, zoals door onderzoek bij het IMAG werd gekwantificeerd (Bakker, 1998) en door LEI waarnemingen bevestigd (Ploeger et al., 1999). De belangrijkste motivatie hiervoor is dat tuinders steeds beducht zijn voor onacceptabele luchtvochtigheidsniveaus. Het vochniveau wordt “geregeld” met een tweeledige doelstelling:

- Het voorkomen van uitbreken van ziekten, zoals bijvoorbeeld schimmels.
- Zorgen dat er “voldoende” gewasverdamping optreedt.

Gewasgroei en -productie staan in nauw verband met de gewasverdamping; weinig is echter bekend over het verband. Er wordt bijvoorbeeld gemiddeld ongeveer 10 % van het door een tomatenplant opgenomen water vastgelegd in oogstgewicht (vruchten), maar dat is een lange termijn gemiddelde en geldt zeker niet voor **elke** liter opgenomen water.

Enige vorm van vochtregeling (minimumbuis- en/of minimumraaminstellingen) wordt toegepast bij vrijwel alle gewassen, voornamelijk in het voor- en najaar. Bovendien heeft een recente studie van het LEI (Bakker et al., 1999) aangetoond dat toepassing van dergelijke energievragende activiteiten toeneemt met een recenter gemiddeld bouwjaar van de bedrijven. Minimumbuis- en minimumraaminstellingen zijn echter weinig selectieve acties om via luchtvochtigheid de verdamping te beïnvloeden, zodat het “stimuleren” van de verdamping (in de praktijk vaak als: het voorkomen een “dood” klimaat dan wel het activeren van de plant genoemd) heel veel energieverbruik zonder duidelijk rendement met zich meebrengt (PBG, 1999, Esmeijer, 1998). In een semi-gesloten omgeving (zoals die van een kas) is de luchtvochtigheid net zo goed het gevolg als de oorzaak van de verdamping (men spreekt van een feed-back loop) (Stanghellini, 1995). Dit betekent dat de luchtvochtigheid in een kas redelijk stabiel is, en “sturing” daarvan heel inefficiënt kan zijn (De Jong en Stanghellini, 1994). Onderzoek bij het PBG (1994) heeft inderdaad aangetoond dat de stijging van het energieverbruik bij vochtregulerende maatregelen, vele malen hoger kan zijn dan de stijging van het waterverbruik (bijvoorbeeld een energieverbruik van 192 % resulteerde in een waterverbruik van 114% bij tomaat met een minimum buis van 70 °C ten opzichte van gangbare klimaatsetpoints), trouwens zonder enige productiestijging.

Daarom is het gewenst om te bepalen of het inderdaad nodig is om te allen tijde te zorgen dat de gewasverdamping boven een bepaald niveau blijft (Dodde & Sikken, 2002). Men zou bijvoorbeeld kunnen volstaan met de waarborg dat er over een nog te bepalen tijdsinterval (dag, dagen, week, weken) voldoende water door de plant opgenomen is (een zogenaamde vochtintegratie). Zou dat het geval blijken, dan is het wenselijk om een eenvoudig regelalgoritme te ontwikkelen die vochtintegratie mogelijk maakt in de nu gangbare klimaatregeling.

Dit project heeft dan ook als doel gehad de mogelijke energiebesparing te bepalen die kan worden behaald als men de nu gangbare vochtregeling vervangt door een te realiseren minimale “verdampingssom”, over een bepaald tijdsinterval, waarbij de energie input wordt geminimaliseerd. Om zeker te zijn dat het principe van vochtintegratie ook in de praktijk zou kunnen werken (afgezien van de acceptatie daarvan) zijn wij uitgegaan van een gangbare kas met een in alle andere opzichten gangbare klimaatregeling en actuatoren. Met het oog op acceptatie door tuinders is gekozen om in beginsel de mogelijkheid te analyseren om de verdampingssom op jaarbasis gelijk te houden met in de praktijk gangbare waarden. Daarnaast, is er een schatting gemaakt van de mogelijke energiebesparing bij het loslaten van deze randvoorwaarde.

2 Opzet van het onderzoek

Om een schatting te maken van de energiebesparing bij andere manieren om de verdamping te “regelen”, is kennis van in de praktijk gangbare verdampingsniveaus van verschillende gewassen gecombineerd met een kassimulatieprogramma (KASPRO) waarbij de gewasverdamping, het klimaat en het daarbij behorende energieverbruik bij verschillende scenario's kan worden doorgerekend.

2.1 Keuze van referentiegewassen

In dit project zijn drie gewassen voor de scenariostudie geselecteerd. De voornaamste criteria ten aanzien van de gewaskeuze in het projectplan waren de volgende:

- Het geschat belang van de energiekosten (energieaandeel in het totale energieverbruik) van de vochtregeling.
- Het economische belang van het gewas.
- Het bekend zijn van aan- dan niet afwezigheid van afwijkend fysiologisch gedrag van het gewas, met name ten aanzien van de vochthuishouding.
- De beschikbaarheid van gegevens.

Het is echter gebleken, dat slechts alleen voor tomaat voldoende complete praktijkgegevens beschikbaar zijn. Daarnaast waren data-sets beschikbaar voor paprika en roos uit eerdere onderzoek bij het proefstation in Naaldwijk. Uiteindelijk is het project uitgevoerd met de volgende drie gewassen: Tomaat, Roos en Paprika, die ook in belangrijke mate voldoen aan de eerste drie criteria.

2.2 Model validatie

Van de drie referentiegewassen zijn gegevens met daggemiddelde waarden verzameld. Naast de wateropname van deze gewassen is ook de kaslucht- en buistemperatuur en de RV bekend. Met deze gegevens is de verdamping, met het kassimulatie proces model KASPRO (Bijlage 1) voor deze gewassen, berekend en vergeleken met de praktijkgegevens. Hiervoor zijn de voor glastuinbouw gangbare regelingen als ventilatie, verwarming en vochtregulatie en klimaatsetpoints ingezet (Swinkels, 2000).

De beschikbare gegevens lieten alleen een uitgebreide toetsing van de model berekeningen toe voor tomaat. Dit komt in eerste instantie omdat de gegevens van de andere twee gewassen kwamen uit zeer kleine kas compartimenten, terwijl KASPRO uitgaat van een “gemiddelde” praktijkkas met een omvang van enkele ha. Aangezien deze voorstudie een beeld moet geven van de mogelijkheid om energie te besparen in de praktijk, is er voor gekozen om aan de omschrijving van de kas niet te tornen. Daarnaast, zijn voor de rozen geen bijbehorende buitenklimaatgegevens (op uurbasis) beschikbaar. In dit geval zijn gegevens uit De-Bilt van het zelfde jaar gebruikt. De resultaten van de model validatie zijn uitgebreid omschreven in Bijlage 3. Uit deze validatie mag geconcludeerd worden dat KASPRO in staat is om de verdamping van tomaat zeer nauwkeurig te voorspellen, en daardoor betrouwbaar is bij het berekenen van scenario's.

De beschikbare gegevens voor de twee andere gewassen maken het onmogelijk om de modelberekeningen zo uitgebreid te toetsen als bij tomaat. Daarom, zijn deze berekeningen (zeker de absolute waarden) met wat minder vertrouwen gebruikt. Voor deze twee gewassen is, bij het trekken van conclusies ten aanzien van de invloed van vochtregulerende klimaatregelingen op het energieverbruik, steeds getracht om globale indicaties te geven en, zoals aangegeven in Bijlage 3, lijkt het ons aannemelijk dat de modelresultaten robuust genoeg zijn voor deze doelstelling.

2.3 Scenario studie

Nadat aangetoond is dat KASPRO de gemeten verdamping goed kan reproduceren, als de bijbehorende klimaat instellingen worden toegepast, zijn een 18-tal scenario's doorgerekend, elke met een verschillende

principe van vochtregeling, hetzij via setpoint wijzigingen dan wel een principiële andere regelmethode. Alle scenario's zijn berekend voor een heel jaar, waarbij voor de [buiten]klimaatgegevens het SEL-jaar (Breuer, 1989) van het IMAG is gebruikt.

Bij alle gewassen is als referentie de in de praktijk meest gangbare regeling, d.w.z. een minimumbuis (temperatuurniveau afhankelijk van het gewas) en een "setpoint" RV, waarboven de ramen open gaan, gebruikt. Bij de scenario's is met de volgende variaties gerekend: wel of geen minimum buis; wel of geen temperatuurintegratie (op eetmaal basis); variaties van het RV setpoint en van de proportionele band (de mate van opening bij het overschrijden van het setpoint). Daarnaast zijn twee volledig andere principes toegepast: één is het vervangen van de setpoint RV (RV regeling) met een setpoint voor het verschil [hierna aangegeven als ΔT_d] in temperatuur tussen het gewas en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht (als indicator voor de kans van condensatie op het gewas), de DP regeling genoemd. De tweede is het verhogen van de stooklijn (en ventilatielijn) in plaats van het openen van de ramen bij het overschrijden van de ΔT_d vocht criterium, SP regeling genoemd. Bij beide principes is ook gevarieerd met minimumbuis (MB), temperatuurintegratie (TI) en de proportionele band (Pb). In een paar gevallen is ook gekeken naar het effect van een afwijkende setpoint in de tweede deel van de nacht. Een overzicht van de scenario's die zijn doorgerekend bij alle gewassen is weergegeven in Tabel 1.

In alle gevallen is (o.a.) berekend, de resulterende luchttemperatuur en -vochtigheid, het energieverbruik, de verdamping, en het aantal uren in het jaar dat het verschil tussen het berekend gewas temperatuur en de dauwpunt van de kaslucht kleiner is dan 1 °C.

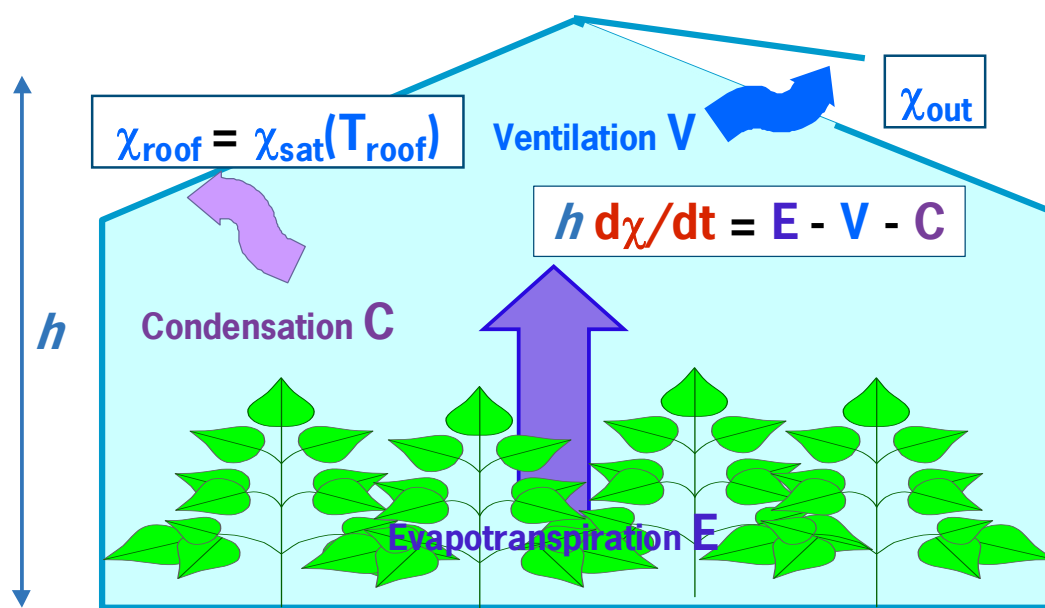
De voor de validatie gebruikte setpoints zijn in Bijlage 2 opgenomen.

Tabel 1 Berekende scenario's en de bijbehorende codering bij de 3 gewassen. De referentie regeling zal steeds in vet worden aangegeven.

Principe: raam openen bij setpoint RV overschrijding				
setpoint	% opening bij SP+5 (Pb)	Minimumbuis (MB)	Temp. integratie (TI)	Code
85	5	J	N	RV85_Pb5+MB
85	5	J	J	RV85_ Pb5+MB+TI
85	5	N	N	RV85_ Pb5
85→80	5	J	N	RV85/80_ Pb5+MB
85→80	5	N	N	RV85/80_ Pb5
95	5	J	N	RV95_ Pb5+MB
95	5	N	J	RV95_ Pb5+TI
95	5	N	N	RV95_ Pb5
90	50	N	N	RV90_ Pb50
Principe: raam openen bij setpoint ΔT_d overschrijding				
setpoint	% opening bij SP-1 (Pb)	Minimumbuis (MB)	Temp. Integratie (TI)	Code
2	1	N	N	DP2_ Pb1
2→1	1	J	N	DP2/1_ Pb1+MB
2→2.5	1	N	N	DP2/2.5_ Pb1
1	100	N	N	DP1_ Pb100
Principe: verhoging stook- en ventilatielijn bij ΔT_d overschrijding				
setpoint	Verh. bij T _{gew} =T _{dauw} (Pb)	Minimumbuis (MB)	Temp. Integratie (TI)	Code
2	3	J	N	SP2_ Pb3+MB
2	3	N	J	SP2_ Pb3+TI
2	3	J	J	SP2_ Pb3+MB+TI
2	3	N	N	SP2_ Pb3
1.5	4.5	N	N	SP1.5_ Pb4.5

2.4 Relatie verdamping vs “actuatoren” (ventilatie, temperatuur)

De verdamping van een specifiek gewas wordt bepaald door “het klimaat” waarin het gewas zich bevindt. De belangrijkste invloedsparameters zijn in eerste instantie zonnestraling en daarnaast luchttemperatuur en –vochtigheid. De vochtigheid in kassen wordt meestal gebruikt als stuurvariabele voor de gewasverdamping omdat aan de straling over het algemeen niet te tornen valt en het goede setpoint voor de luchttemperatuur vaak bepaald is door gewasfysiologische en teeltkundige processen. In een semi-gesloten omgeving, zoals een kas, is luchtvochtigheid echter geen onafhankelijke variabele, omdat deze weer afhangt van de verdamping, samen met de condensatie en de ventilatie. Dit mechanisme is in Figuur 1 weergegeven, waarbij de vochtconcentratie van de lucht ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) wordt weergegeven door het symbool χ .



Figuur 1 Schematische weergave van de vochthuishouding in een kas.

Zoals hiervoor aangegeven, zorgt het bestaan van dit “feed-back” effect ervoor dat het “regelen” van luchtvochtigheid in de kas vrijwel onmogelijk is. Daarbij komt het feit dat er in de meeste kassen geen rechtstreekse hulpmiddelen zijn om de vochtigheid te regelen. Dit kan dus alleen indirect door middel van het regelen van de raamstand en buistemperatuur. Dit betekent dat een regeling die beoogd om de verdamping “rechtstreeks” te sturen, gebruik moet maken van een algoritme waarbij de gewasverdamping wordt beschreven als functie van primaire variabelen, waarbij met “primaire” wordt bedoeld variabelen die rechtstreeks kunnen worden beïnvloed door de tuinder. Dit algoritme is in Bijlage 4 weergegeven.

Het is mogelijk om dan het effect van bijvoorbeeld raamopening op de verdamping te bepalen, dat wil zeggen, de variatie van de verdamping als gevolg van een variatie in het ventilatievoud. Dat wordt gedaan door de afgeleide te bepalen van de formule die voor de verdamping is ontwikkeld, zie Bijlage 4. Als voorbeeld geven wij hier het geval dat er geen condensatie tegen het kasdek optreedt weer:

$$\frac{dE}{dg_v} = \frac{g_t}{g_v(g_t + g_v)} E \quad (1)$$

Alle symbolen zijn in Bijlage 4 gedefinieerd. Ter wille van de leesbaarheid geven wij hier een korte toelichting:

E is de verdamping

g_v is de geleidingen voor de ventilatie, en is evenredig met het ventilatievoud

g_t kan gezien worden als een “samengestelde geleiding” op de verdampingsstroom. Deze is groot bij veel bladoppervlakte en/of bij een kleine huidmondjes weerstand, en bij kleine bladeren.

Vergelijking (1) kan herschreven worden in de vorm van “incrementele” afhankelijkheid:

$$\frac{dE}{E} = \frac{g_t}{g_t + g_v} \frac{dg_v}{g_v} \quad (2)$$

Uit vergelijking (2) is te lezen dat bijvoorbeeld een verdubbeling van het ventilatievoud nooit resulteert in een verdubbeling van de verdamping, omdat de coëfficiënt immers kleiner is dan 1. De coëfficiënt in een incrementele vergelijking, zoals (2) wordt vaak de “gain” van de feed-back loop genoemd. Een klein gain (veel kleiner dan 1) betekent dat de actuator (in dit geval de ventilatie) vrijwel geen effect heeft op de variabele (in dit geval de verdamping). Dit gebeurt bij voorbeeld in alle omstandigheden waarbij de verdamping wordt beperkt door de toevoer van energie en niet door de afvoer van het verdampende vocht. Andersom, een grote gain geeft de omstandigheden aan waarbij de vochtafvoer de limiterende factor is. Natuurlijk kan dezelfde procedure gebruikt worden om de invloed van kasluchttemperatuur (een andere “actuator”) op de verdamping in alle omstandigheden te bepalen.

2.5 Bepaling van de mogelijkheid om “met verdamping te schuiven”

Voor het verdampingsproces is energie nodig. Daarom moet eerst getracht worden om de “optimalisatie grenzen” voor de gewasverdamping te verkennen, door te zoeken naar mogelijkheden om een fractie van de gewasverdamping te schuiven naar periodes waarbij in de kas een energieoverschot optreedt.

Daarvoor zijn de resultaten vergeleken van de referentieteelt (met de in de praktijk gangbare klimaatsetpoints en klimaatregeling) met de resultaten van een teelt met een gelijke klimaatregeling, echter met de minste vochtsturing, d.w.z. er wordt geen gebruik gemaakt van de minimumbuis, temperatuurintegratie wordt wel toegepast en er is een verhoging van het vochtventilatiesetpoint tot 95 % RV. Niet onverwacht, resulteert deze teeltwijze in het minste energieverbruik, voor alle gewassen.

Verder is ook gekeken naar de mogelijkheid om “piek” verdamping te schuiven naar periodes waarbij het verdampen en afvoeren van dezelfde hoeveelheid minder energie zou vergen, ook al zou enige energie toevoer nodig blijven.

3 Resultaten

Hierna worden de resultaten voor tomaat grondig geanalyseerd. Globaal geldt deze analyse ook voor de andere twee gewassen, en de resultaten daarvan worden dan ook korter gepresenteerd.

3.1 Relatie verdamping en vochtafvoer vs energie input

De resultaten van de scenario berekeningen voor tomaat zijn weergegeven in Tabel 2, waar de gemiddelde waarden van luchttemperatuur en relatieve vochtigheid zijn aangegeven, samen met het jaartotaal van de verdamping en gasverbruik. Er is gesorteerd op oplopend energieverbruik.

Tabel 2 *Jaarverbruik van gas, de gerealiseerde gemiddelde klimaatomstandigheden en de jaarsom van de gewasverdamping onder verschillende "vocht"regelingen, zoals aangegeven, voor een tomatenteelt. De Stooklijn en ventilatietemperatuur zijn in alle gevallen dezelfde, met uitzondering van de scenario's waarbij verhoging van de set-point werd toegepast (code begint met SP) De in vet aangegeven lijn heeft betrekking op de referentie regeling.*

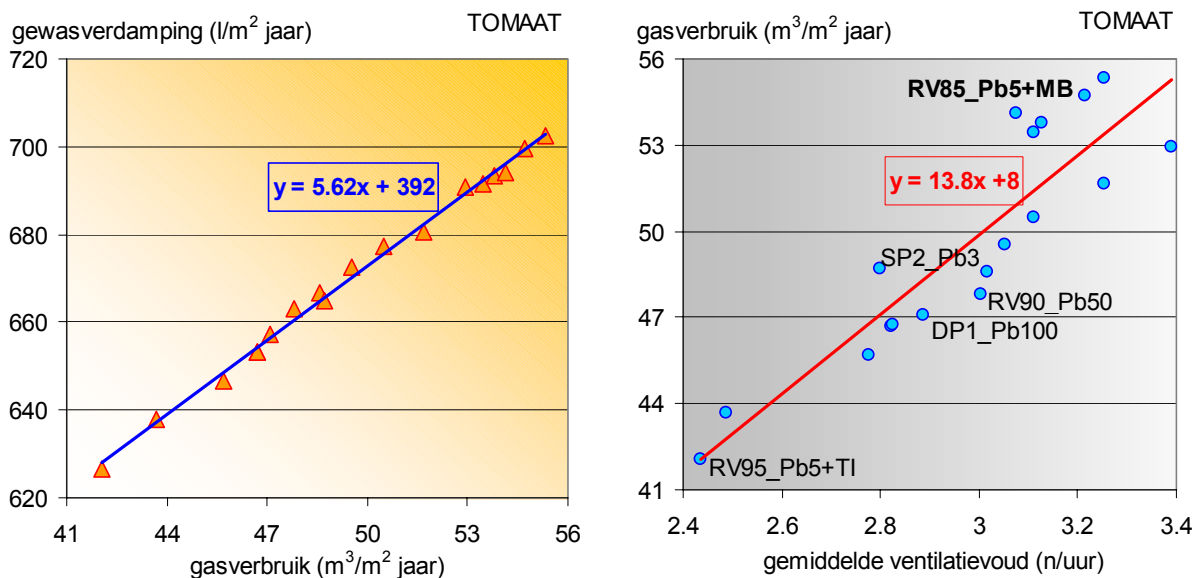
Scenario code	Gasverbruik m ³ .m ⁻² .a ⁻¹	Tkas °C	RV %	verdamping l.m ⁻² .a ⁻¹
RV95_Pb5+TI	42.0	18.6	76.3	627
SP2_Pb3+TI	43.7	18.7	76.0	638
RV95_ Pb5	45.7	18.7	75.3	647
DP2_ Pb1	46.7	18.7	75.1	653
DP2/2.5_ Pb1	46.7	18.7	75.0	653
DP1_ Pb100	47.1	18.7	75.0	657
RV90_ Pb50	47.8	18.7	74.8	663
SP1.5_ Pb4.5	48.6	18.8	74.8	667
SP2_ Pb3	48.7	19.0	74.9	665
RV85_ Pb5	49.5	18.7	74.5	673
RV85/80_ Pb5	50.5	18.7	74.3	677
SP2_ Pb3+MB+TI	51.7	18.9	74.1	680
RV85_ Pb5+MB+TI	52.9	18.8	73.8	691
RV95_ Pb5+MB	53.5	19.0	73.7	692
DP2/1_ Pb1+MB	53.8	19.0	73.6	694
SP2_ Pb3+MB	54.1	19.1	73.6	694
RV85_ Pb5+MB	54.7	18.9	73.4	699
RV85/80_Pb5+MB	55.3	18.9	73.3	702

In Figuur 2 is de relatie tussen het gasverbruik en de gewasverdamping en het (jaar)gemiddelde ventilatievoud en het gasverbruik voor de verschillende "vocht"regelingen weergegeven.

Zoals uit Figuur 2 blijkt, is er een nauwe relatie tussen het gasverbruik en de gewasverdamping (links).

Dit kan verklaard worden met behulp van de rechter deel van het figuur, waaruit valt te lezen dat de verschillende regelingen resulteren in een verschillende mate van ventilatie, en dat meer verdamping in feite gegenereerd wordt door extra vochtafvoer.

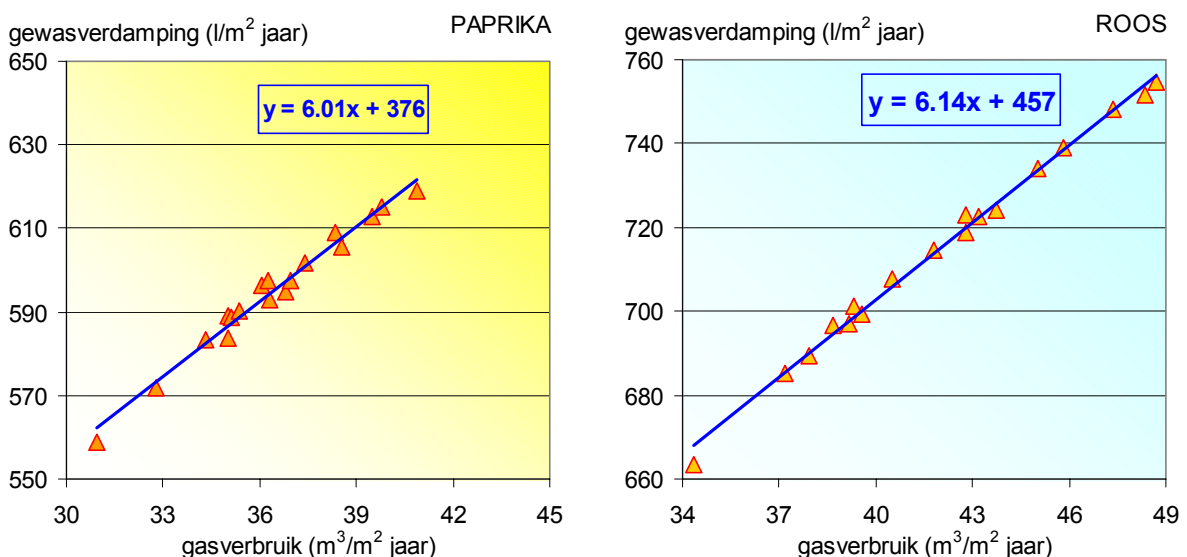
Wat in de praktijk gebeurt is dat dan lucht wordt afgevoerd met de eigenschappen (temperatuur en vochtinhoud) zoals aangegeven in Tabel 2, en die zijn vrijwel onafhankelijk van de toegepaste principe. Dit kan de rechtstreekse relatie tussen verdamping en het gasverbruik (linker deel van Figuur 2), zoals hierna beredeneerd, verklaren. Het verband impliceert dat elke kuub gas die men meer stookt, de verdamping met een kleine 6 liter verhoogt, zonder enig zichtbare invloed van het toegepaste "principe" van vochtregeling. Een kleine berekening laat zien waar het verband 1 kuub gas = ongeveer 6 liter verdamping vandaan komt.



Figuur 2 Links: Relatie tussen het gasverbruik en de gewasverdamping en Rechts: het gasverbruik tegen het (jaar)gemiddelde ventilatievoud voor de verschillende “vocht”regelingen (de referentie is in vet aangegeven).

De benodigde energie (latente warmte) voor de verdamping van 6 kg water is: $\approx 2.5 \text{ MJ.kg}^{-1} \times 6 \text{ kg} = 15 \text{ MJ}$. Laat het gemiddelde verschil in waterdamp concentratie tussen de kas- en buitenlucht $\approx 5 \text{ g.m}^{-3}$ zijn. Om dan 6 kg water af te voeren, moet $\approx 6000/5 = 1200$ kubieke meter lucht weg geventileerd worden. Laat het gemiddelde temperatuur verschil tussen binnen en buiten $\approx 10 \text{ }^\circ\text{C}$ zijn. De specifieke warmte van lucht is $\approx 1200 \text{ J.m}^{-3}.\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. De voelbare warmte inhoud van de afgevoerde lucht is dan: $10 \text{ }^\circ\text{C} \times 1200 \text{ J.m}^{-3}.\text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 1200 \text{ m}^3 \approx 15 \text{ MJ}$. De enthalpie (totale energie inhoud) van de lucht die wordt afgevoerd om 6 kg waterdamp kwijt te kunnen raken is dus ongeveer 30 MJ, wat heel goed overeenkomt met de energie inhoud van 1 m^3 aardgas (ongeveer 32 MJ), rekening houdend dat er maar een schatting is gemaakt van de verschillen tussen binnen en buiten.

Het verband tussen extra verdamping en extra energieverbruik voor paprika en roos is te vinden in Figuur 3.



Figuur 3 Relatie tussen het gasverbruik en de gewasverdamping voor Paprika (links) en Roos (rechts).

In beide gevallen geeft het stoken van één kuub gas iets meer verdamping dan het geval is met tomaat (resp. 6. en 6.1 liter in plaats van 5.6 voor tomaat). Dit betekent dat het vocht bij deze gewassen in een iets

efficiëntere wijze wordt afgevoerd dan bij tomaat. Dat heeft te maken met het toepassen van het energiescherm bij paprika en het feit dat de kaslucht bij roos meer waterdamp bevat dan bij tomaat (het is warmer onder andere door de belichting). Uit het bovenstaande moet geconcludeerd worden dat een innovatieve vochtregeling die energie kan besparen op twee principes moet berusten: één is het toelaten dat de verdampingssom lager kan worden, de andere is te zorgen dat de afvoer van vocht in een energie-efficiëntere wijze gebeurt. Het eerste geval vereist verder onderzoek om de mate waarbij verdamping bijdraagt aan de productie (en dus echt noodzakelijk is) te verkennen, samen met andere randvoorwaarden zoals het beperken van risico van het ontstaan van ziektes. In het tweede geval moet men denken aan een “slimme” regeling waarbij de mate van vochtafvoer wordt bepaald door de enthalpie-inhoud van de kaslucht.

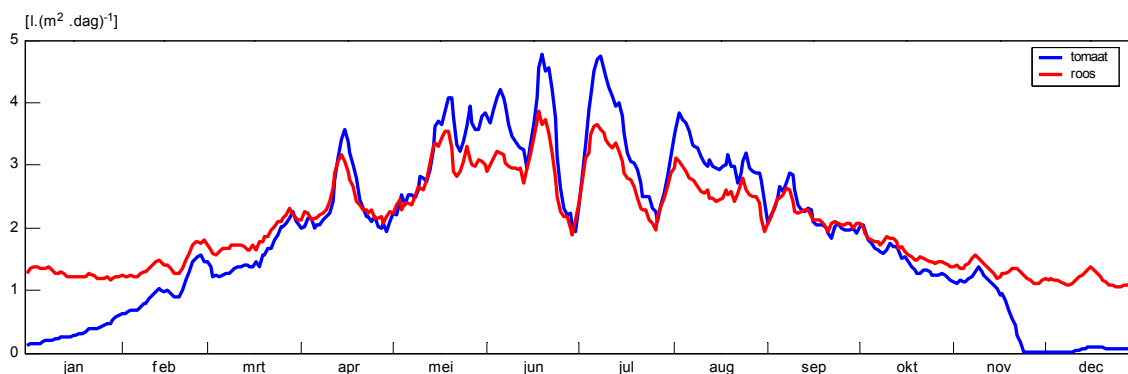
3.1.1 Invloed kasdek materiaal en gewas op vochtstromen

Kasbedekkingsmateriaal

Een belangrijke vochtafvoercomponent is condensatie tegen het kasdek. Hoe kouder het kasdek is, des te groter wordt de condensatieflux richting het kasdek. De verhouding tussen vochtafvoer middels condensatie, dan wel via ventilatie is sterk afhankelijk van het jaargetijde. Indien er kasdekmaterialen met een hogere isolatiegraad worden toegepast, zal het kasdek wat warmer worden met als gevolg een verminderde condensatieflux. Indien de vochtproductie van het gewas gelijk blijft, zal de vochtafvoer middels ventilatie dan vergroot moeten worden, waarbij de energiebesparing door de hogere isolatiewaarde gedeeltelijk teniet wordt gedaan. Echter, bij andere kasdekmaterialen dan de standaard (glas) horen vaak ook andere stralingstransmissie en emissie eigenschappen, met als gevolg een veranderend binnenklimaat en meestal een verhoogde gewastemperatuur. Om onnodig ventileren te voorkomen, is het daarom noodzakelijk dat de vochtregeling rekening houdt met deze veranderde omstandigheden, met name het feit dat bij een verhoogde gewastemperatuur de kans op condensatie op gewasdelen kleiner wordt.

Gewas

Het type gewas heeft grote invloed op de vochtproductie. Zo worden glasgroenten gewassen meestal niet jaarrond geteeld, terwijl dit bij de meeste bloemisterijgewassen wel gebeurt. Het gevolg hiervan is dat er in de late herfst en het begin van de winter op de meeste glasgroentenbedrijven een klein gewas met een kleine vochtproductie aanwezig is, terwijl op bedrijven met rozen de verdamping door assimilatiebelichting vaak nog eens extra gestimuleerd wordt. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 4 waar de daggemiddelde verdamping van tomaat en roos van het RV85_Pb5+MB scenario is weergegeven. Daarom treden veel meer “vochtige” uren op bij roos dan bij paprika en tomaat. Het veel lagere aantal uren bij paprika dan bij tomaat is het gevolg van het gebruik van een energiescherm, die de gewastemperatuur verhoogd door het verminderen van de uitstraling.



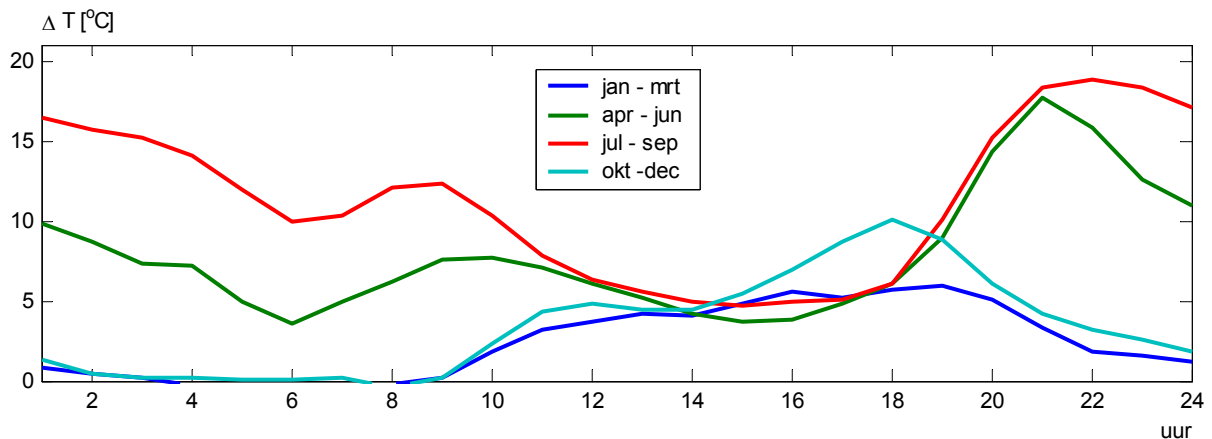
Figuur 4 Daggemiddelde verdamping van tomaat en roos (referentie teelt “RV85_Pb5+MB”) gedurende het jaar, weergegeven als een voortschrijdend gemiddelde over 5 dagen.

3.2 Mogelijkheden om verdamping “te schuiven” naar perioden zonder energie toevoer

Het concept van “vochtintegratie” houdt in dat een eventuele tekort aan verdamping in een periode wordt “goedgemaakt” in een andere periode. Het meest aantrekkelijk is zoeken naar perioden waarbij geen energie vraag optreedt voor het verwarmen van de kas (immers wij weten het prijskaartje al van de verdamping in zo’n geval). Om zulke perioden te identificeren, is gezocht naar gevallen waarbij de buistemperatuur van de referentieregeling (RV85_Pb5+MB) gelijk is aan de buistemperatuur van de meest zuinige regeling, tussen de door ons berekende scenario’s. Dat is voor alle 3 gewassen de RV95_Pb5+TI, dat is de regeling waarbij de minste eisen aan vocht worden gesteld en de temperatuurintegratie ervoor zorgt dat de minste “bijsturing t.a.v. de momentane kasluchttemperatuur” plaatsvindt. Het verschil in jaarverbruik van gas tussen de twee voorbeelden is 23 % maar er is ook een verschil in totale verdamping van 10 % (Tabel 2). De resultaten voor paprika en roos zijn ongeveer dezelfde, zie Tabel 3. Als maat voor het energieverbruik is de temperatuur van het ondernet gekozen in plaats van de branderstand van de ketel, omdat door de CO₂-dosering in combinatie met het gebruik van een warmtebuffer een fase verschuiving van het gasverbruik kan ontstaan.

3.2.1 Integratie periode van één etmaal

Het gemiddelde temperatuurverschil van het ondernet van deze 2 regelingen over de uren van respectievelijk de winter/voorjaar/zomer en herfst dagen is weergegeven in Figuur 5.



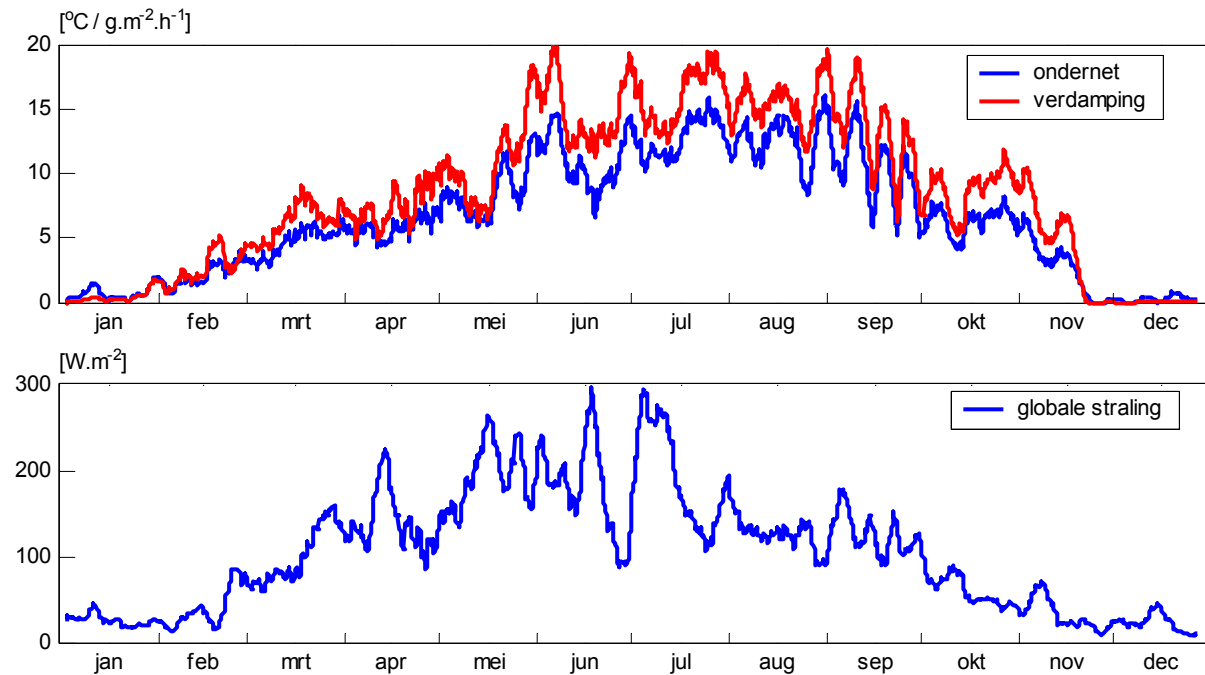
Figuur 5 Gemiddelde dagverloop van de temperatuurverschil van het onder net, tussen de referentie regeling (RV85_Pb5+MB) en een regeling zonder minumbuis en met vochtventilatie-setpoint van 95 % RV (RV95_Pb5+TI).

Wat Figuur 5 duidelijk maakt, is dat de referentie vochtregeling (minimumbuis 45 °C en setpoint RV 85 %) gemiddeld alle uren van de dag van elke seizoen, met uitzondering van de uren in de nacht in de winter en herfst, meer energie-input vraagt. In de herfst en winter zorgt condensatie tegen het koude kasdek gedurende de nacht voor voldoende vochttafvoer en is de warmtevraag om de kasluchttemperatuur op het gewenste setpoint te houden, overheersend. Er is echter geen mogelijkheid (bij een integratie interval van een etmaal) om dit “tekort” aan gewasverdamping “goed te maken” door de verdamping te verhogen in dagdelen waarbij het [vrijwel] geen energie zou kosten. Er is immers gemiddeld over de gekozen perioden geen moment dat de “zuinige” regeling dezelfde energie vraagt dan de referentieregeling.

3.2.2 Integratie periode van enkele dagen

Wat niet in een etmaal kan, zou wellicht over een “meteorologische cyclus” kunnen. Dit is onderzocht door het dezelfde te doen als hierboven, echter met een “integratie” periode van 5 dagen. Figuur 6 geeft het jaarverloop van het 5-daagse gemiddelde van het verschil in temperatuur van het ondernet in de twee strategieën en het bijbehorende verschil in gewasverdamping

weer.

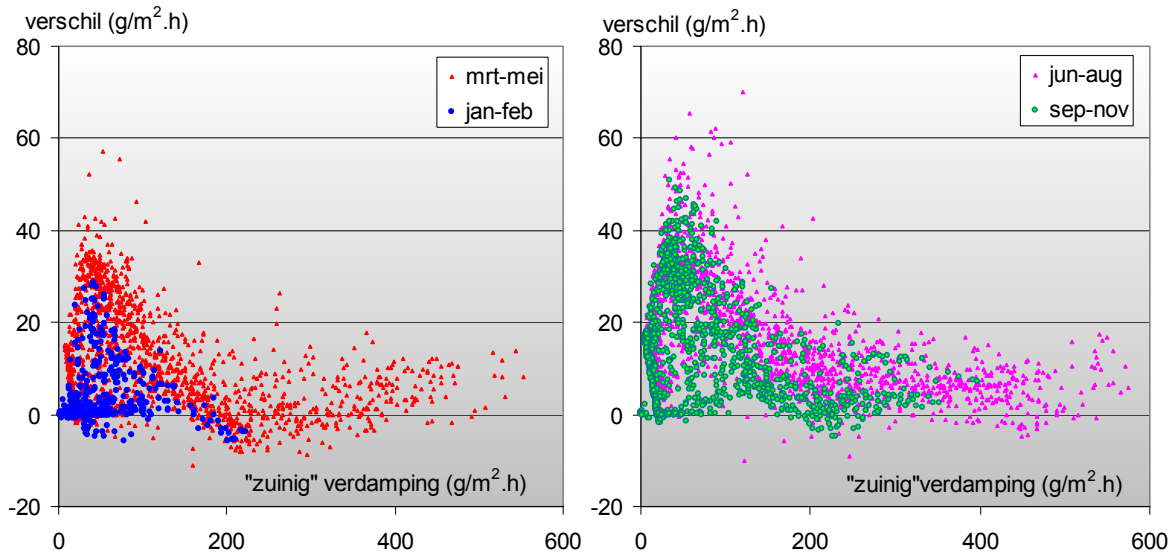


Figuur 6 Gemiddelde verloop over een 5-daagse perioden van het temperatuurverschil van het ondernet tussen de referentie regeling (RB85_Pb5+MB) en een regeling zonder minimumbuis en met een vochtventilatiesetpoint van 95 % RV (RV95_Pb5+TI) en het bijbehorende verschil in gewasverdamping (boven) en het gemiddelde verloop over een 5-daagse perioden van de globale straling van het SEL jaar (beneden).

De relatieve minima van het temperatuurverschil en de verdamping zijn de zonnige perioden (hogere globale straling), waarbij de noodzaak voor bijsturing van vochttafvoer minimaal is, wat als consequentie heeft dat ook het verschil in verdamping tussen de twee regelingen het kleinste is. Dan is ook, zoals Figuur 6 duidelijk maakt, de energie-input (door de buisverwarming) die het verschil in verdamping veroorzaakt het kleinst. Andersom, wil men de verdamping in die zonnige perioden verhogen (om een tekort in andere perioden te vereffenen), dan moet er gestookt worden met als gevolg dat er op die momenten meer gas gebruikt wordt.

3.2.3 Integratie periode over de gehele teelt

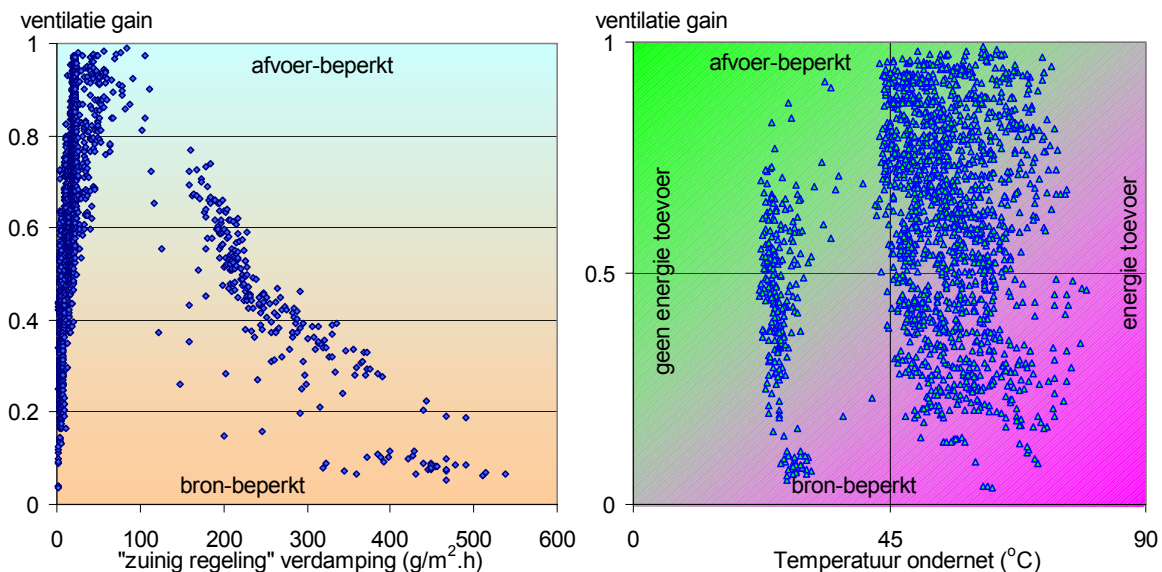
Ook al is er **gemiddeld** geen periode of uur van de dag te identificeren waarbij geschoven kan worden (zoals uit Figuur 5 en Figuur 6 blijkt), is het goed mogelijk dat er momenten in de teelt zijn waarbij dit wel mogelijk is. In Figuur 7 is voor alle uren van de teelt het verschil in verdamping tussen de twee regelingen uitgezet tegen het absolute niveau van de verdamping van de "zuinige regeling" op dat moment.



Figuur 7 Het verschil in verdampingsom per uur tussen de referentie regeling en de meest zuinige regeling, uitgezet tegen het absolute niveau van de verdamping van de “zuinige regeling” op dat moment.

Het totale verschil in verdamping tussen de twee regelingen is 74 kg.m^{-2} , die “ingehaald” zouden moeten worden in de uren waarin er geen (of een negatieve) verschil tussen de twee is. De totale verdamping gedurende de uren die aan deze eis voldoen is 109 kg.m^{-2} . Dat wil zeggen dat in deze uren de verdamping verhoogd zou moeten worden met 70 %.

Hoe ga je deze verdamping dan stimuleren? Extra toevoer van energie willen we niet, dus zal het met vochtafvoer moeten worden bereikt. Zoals in § 2.4 aangegeven, is bij een kleine ventilatie gain de energietoevoer de limiterende factor, terwijl bij een grote ventilatie gain de afvoer van waterdamp de limiterende factor is. De regeling zou dus moeten zorgen dat de verdamping wordt verhoogd in alle uren waarbij de ventilatie gain groot is en er is geen input van verwarmingsenergie benodigd is. In Figuur 8 is voor alle uren dat er geen verschil in verdamping tussen de twee regelingen optreedt (alle punten om en onder de nul lijn van Figuur 7), de “ventilatie gain” uitgezet tegen het absoluut verdampingsniveau van de energiezuinige vochtregeling (links) en tegen de temperatuur van het ondernet (rechts).



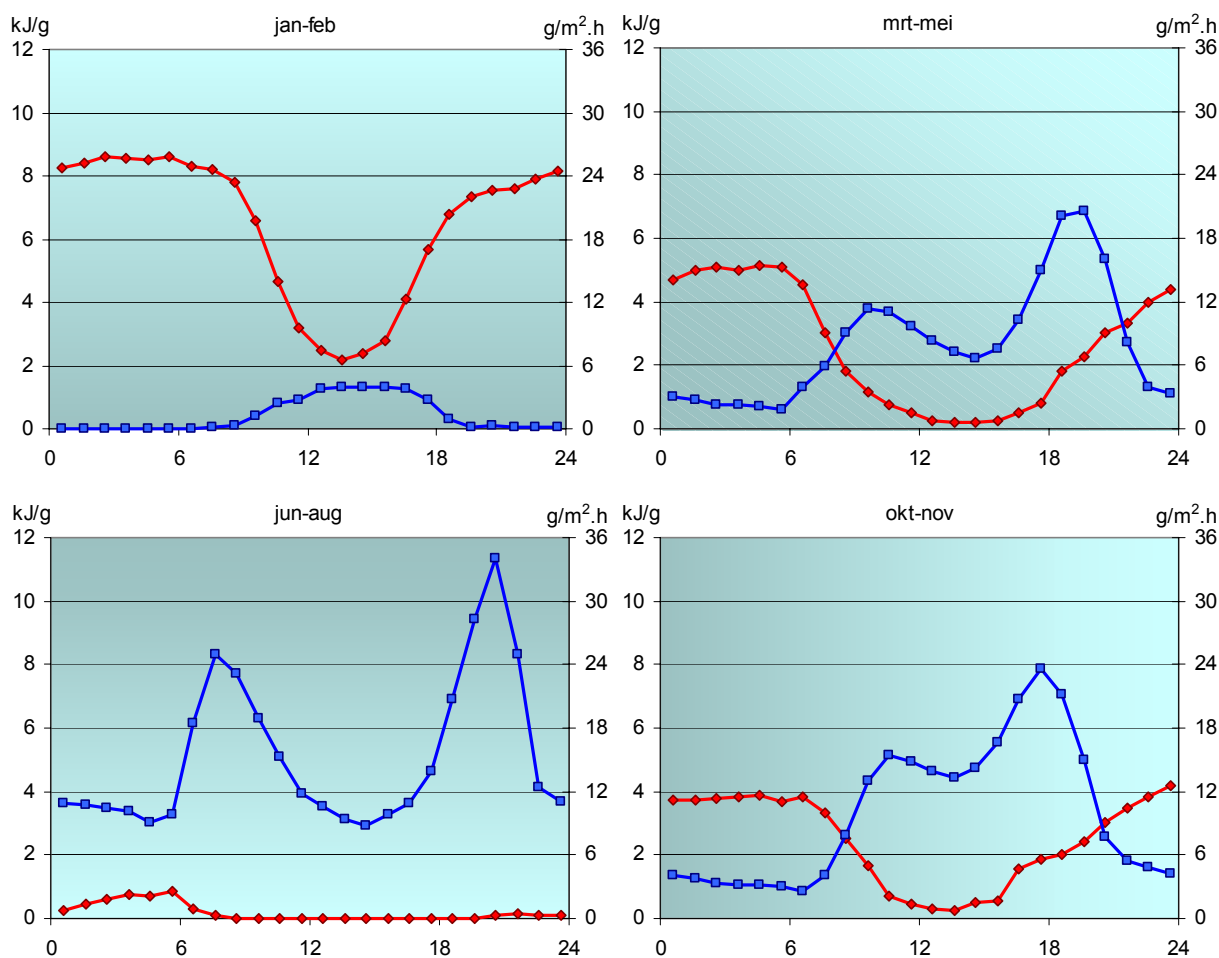
Figuur 8 Ventilatie “gain” voor alle uren waarbij de twee regelingen resulteren in dezelfde verdamping versus het verdampingsniveau (links) en de temperatuur van het ondernet (rechts), die fungeert als maatstaf voor de “kunstmatige” energie-input in de kas.

De uren waarbij het mogelijk is de verdamping te “stimuleren” zonder dat er meer gestookt moet worden, zijn weergegeven door de punten in de groene kwadrant (links boven) van het rechter deel van Figuur 8, en dit is slechts een beperkt aantal.

3.3 Schuiven van de verdamping naar perioden waarbij dat het efficiëntst gebeurt

Is het denkbaar dat, ook als ervoor gestookt moet worden, men energie kan besparen door verdamping “te schuiven” (b.v. binnen één etmaal) naar momenten waar vocht in een efficiëntere wijze wordt afgevoerd dan dat het geval is met de “referentie” regeling?

Dit is geanalyseerd voor een “integratie periode” van een etmaal. Hiervoor is van ieder uur van het jaar de benodigde energie berekend om 1 gram waterdamp af te voeren. Dit noemen we ook wel de specifieke kosten, welke de som is van de latente warmte van 1 g waterdamp en de voelbaar warmte inhoud van de luchthoeveelheid die moet worden afgevoerd om één gram waterdamp weg te ventileren. De luchthoeveelheid is afhankelijk van het vochtconcentratieverschil tussen binnen en buiten, en de voelbare warmte-inhoud van de afgevoerde kaslucht afhangt van het temperatuurverschil tussen binnen en buiten. Het resultaat (gemiddelde over de uren van een dag, voor elke periode) is weergegeven in Figuur 9, samen met het verschil in verdamping tussen de twee regelingen (referentie, RV85_Pb5+MB en de zuinige regeling RV95_Pb5+TI)



Figuur 9 Gemiddelde specifieke energie kosten (de energie benodigd om 1 gram water damp d.m.v. ventilatie af te voeren) rood, en het gemiddelde verschil in verdamping (blauw) tussen de referentie (RV85_Pb5+MB) en de zuinige regeling (RV95_Pb5+TI), voor de vier periodes van een tomaten teelt.

Het figuur laat zien dat er in de winter weinig valt te schuiven (het verschil tussen de twee regelingen treedt op bij de laagste energie kosten), en in de zomer valt er vrijwel geen energiebesparing te halen, omdat het afvoeren van vocht vrijwel niets kost. Enige besparing kan gehaald worden in het voor- en najaar, door het schuiven van de ochtend en avond pieken (met specifieke kosten van ongeveer 3kJ) richting het midden van de dag.

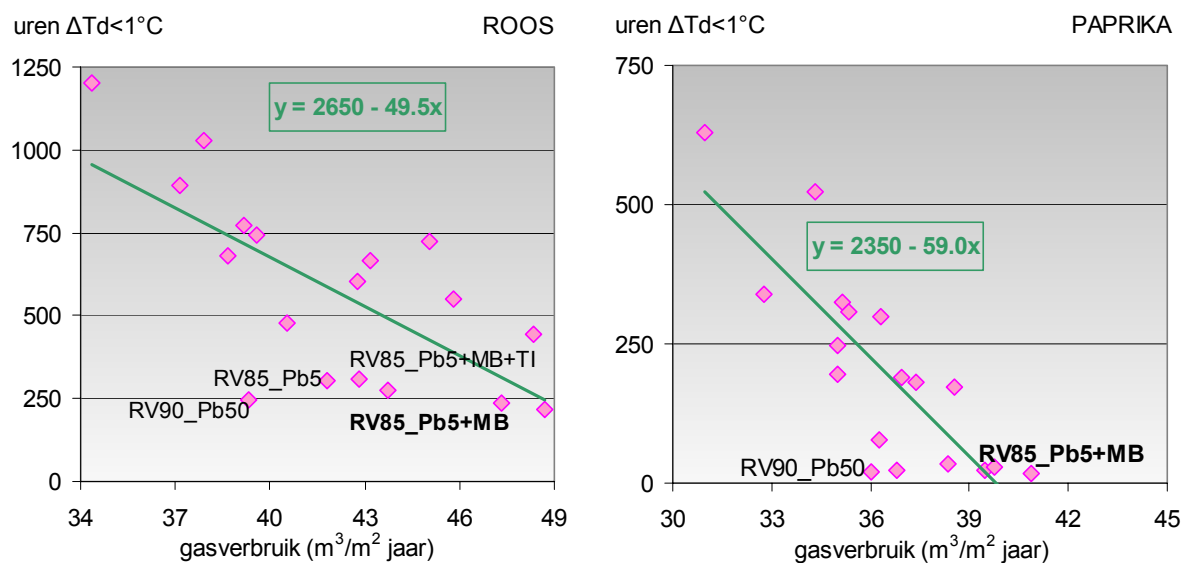
Het is mogelijk om een schatting te maken van de energiebesparing die zo iets zou kunnen opleveren. Bijvoorbeeld de avondpiek van de periode maart - mei: 4 uur met een gemiddelde verschil van 20 g.m^{-2} uur verschuiven naar de vroege middag = $80 \text{ g} * 3 \text{ kJ.g}^{-1} = 240 \text{ kJ} * 90 \text{ dagen} = 21.6 \text{ MJ} = 0.7 \text{ kuub gas}$, plus ongeveer hetzelfde in het najaar, zou een energie besparing van een kleine 3 % kunnen opleveren. Hierbij is voor het gemak aangenomen dat het verschil in zijn geheel kan worden verschoven (dus bovenop de al aanwezige $10 \text{ g.m}^{-2}.\text{uur}^{-1}$), en dat alle 20 g kunnen worden verdampt tegen de berekende marginale kosten van 1 gram, hetgeen wat optimistisch zou kunnen zijn. Daar tegen, hebben wij de veel kleinere "ochtend winst" verwaarloosd, dus de schatting van een mogelijke besparing van 2 a 3 % lijkt redelijk.

Er moet dan ook geconcludeerd worden dat er bij een gewas waarbij de verdamping kunstmatig zo hoog wordt gehouden als bij tomaat, er weinig ruimte is om energie te besparen door "vochtintegratie", als de randvoorwaarde dat het verdampingstotaal hetzelfde moet blijven, niet wordt los gelaten.

Andersom, er valt heel veel energie te besparen, als een relatief geringe daling in de verdampingstotaal wordt toegestaan. Naast de besparing, welke is af te leiden uit tabel 2, zou dit ook de mogelijkheden voor vochtintegratie enorm verruimen, waardoor extra besparing valt te halen.

3.4 Invloed van de regelingen op het dauwpuntverschil

Zoals al in de introductie aangegeven, is er een tweede en minstens even belangrijke reden om vocht te regelen, en dat is het voorkomen van condensatie op het gewas. Er zal geen acceptatie zijn voor het verlagen van het verdampingsniveau, tenzij telers er van worden overtuigd dat dit niet ten koste gaat van deze tweede doelstelling. Daarom is het noodzakelijk om te analyseren in hoeverre deze twee doelstellingen gekoppeld zijn, en zoniet, of er mogelijkheden zijn om de verdamping te verlagen zonder dat het gewas een veel hoger kans heeft om ziektes op te lopen. Als maatstaf voor de kans van condensatie op het gewas is gekozen voor het aantal uren in het jaar waarbij de berekende gewastemperatuur slechts $1 \text{ }^\circ\text{C}$ of minder boven het dauwpunt van de kaslucht is. Dit is weergegeven voor roos en paprika in Figuur 10, voor alle berekende scenario's, uitgezet tegen de bijbehorende gasverbruiken.



Figuur 10 Aantal uren in het jaar waarbij het berekende temperatuurverschil tussen gewas en het dauwpunt van de kaslucht $< 1^\circ\text{C}$ is met het bijbehorende gasverbruik voor roos (links) en paprika (rechts). De referentie regeling is in vet aangegeven.

Er is duidelijk een veel zwakker verband tussen deze twee variabelen, en in Figuur 10 zijn enkele “heel efficiënte” regelingen te herkennen. De resultaten voor tomaat zijn vergelijkbaar. Als de enige doelstelling van de vochtregeling, was het zorgen dat de gewastemperatuur minstens 1 °C boven het dauwpunt van de kaslucht blijft, dan kon het veel efficiënter dan met de referentieregeling. In feite zijn alle punten links onder de lijn efficiënter dan “gemiddeld”. De referentie valt bij tomaat zelfs boven de lijn, en bij paprika op de lijn. In het volgende paragraaf maken wij een analyse van deze resultaat.

3.5 Effect van de stuuralgoritme

Zoals in § 2.3 is aangegeven, zijn er 3 basisprincipes voor de vochtregeling gebruikt:

- standaard RV regeling waarbij op een overschrijding van het setpoint RV de ramen worden geopend
- dauwpunttemperatuur regeling, waarbij op het temperatuurverschil gewas en het dauwpunt van de kaslucht de ramen worden geopend
- setpointverhoging regeling, waarbij op het temperatuurverschil gewas en het dauwpunt van de kaslucht het setpoint verwarmen en ventilatie worden verhoogd.

Een uitgebreid vergelijk tussen de 3 vochtregelprincipes is in Bijlage 5 weergegeven. Hier zijn de belangrijkste resultaten overgenomen, waarvan een samenvatting is opgenomen in Tabel 3.

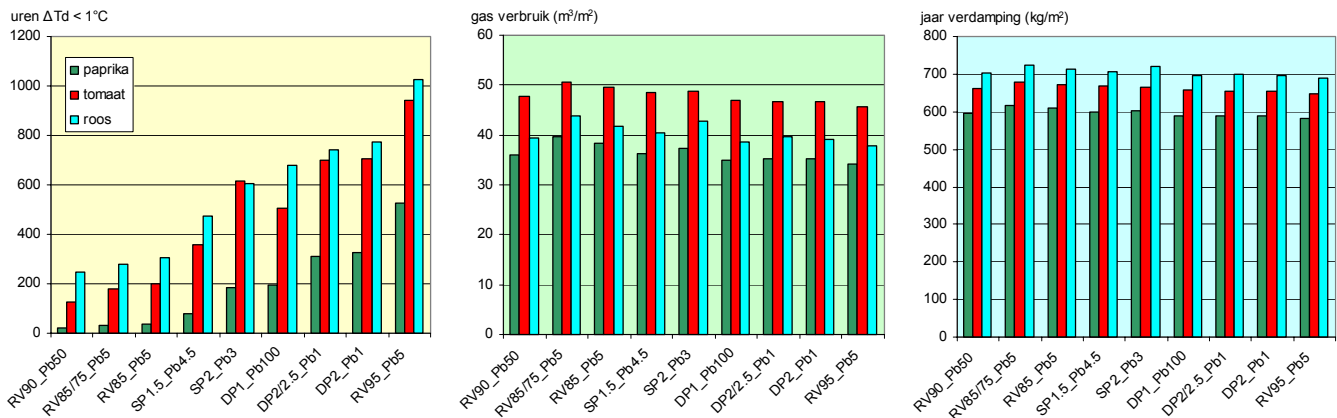
Tabel 3 Performance van de verschillende regelingen ten opzichte van de referentie, voor de drie target grootheden: aantal uren dat het gewas 1 °C of minder verwijderd is van het dauwpunt; gebruik van gas een totale verdamping (% van de referentie).

Code	tomaat			paprika			roos		
	uren ΔTd<1°C	gas % ref.	verdamping % ref.	uren ΔTd<1°C	gas % ref.	verdamping % ref.	uren ΔTd<1°C	gas % ref.	verdamping % ref.
RV95_Pb5+TI	1190	77	90	629	78	91	1200	73	89
SP2_Pb3+TI	906	80	91	338	83	93	894	78	92
RV95_Pb5	940	84	92	524	87	95	1026	80	92
DP2_Pb1	704	85	93	324	89	96	773	83	93
DP2/2.5_Pb1	698	85	93	308	90	96	742	84	93
DP1_Pb100	504	86	94	195	89	96	680	82	93
RV90_Pb50	126	87	95	20	91	97	248	83	94
SP1.5_Pb4.5	359	89	95	78	92	98	476	86	95
SP2_Pb3	615	89	95	182	95	98	604	90	96
RV85_Pb5	200	90	96	35	97	99	305	88	95
RV85/80_Pb5	178	92	97	30	101	100	277	92	97
SP2_Pb3+MB+TI	291	94	97	248	89	95	667	91	97
RV85_Pb5+MB+TI	48	97	99	24	93	97	307	90	97
RV95_Pb5+MB	202	98	99	299	92	97	724	95	98
DP2/1_Pb1+MB	140	98	99	190	94	97	551	97	99
SP2_Pb3+MB	289	99	99	171	98	99	446	102	100
RV85_Pb5+MB	34	100	100	22	100	100	236	100	100
RV85/80_Pb5+MB	30	101	100	18	104	101	216	103	101

Temperatuurintegratie heeft een positief effect op het energieverbruik. Er is echter, met name bij grote bandbreedtes, de mogelijkheid dat op momenten dat het setpoint verwarmen verlaagd wordt de RV en/of de dauwpunttemperatuur van de kaslucht het vochtsetpoint nadert. Als gevolg hiervan is het dus mogelijk dat een deel van het besparingspotentieel (van het verwarmen) teniet gedaan wordt om de vochtinhouding in de hand te houden. Uit Tabel 3 kan voor een tweetal varianten (RV85_Pb5+MB en SP2_Pb3+MB) de gevolgen op het energieverbruik, de verdamping en het aantal uren overschrijding van

het vochtcriterium ($\Delta T_d < 1^\circ\text{C}$) voor de 3 gewassen gelezen worden. De kleinste energiebesparing wordt bij tomaat gerealiseerd, echter hier is ook de kleinste toename in het aantal uren overschrijding van het vochtcriterium. Bij roos en paprika kan de besparing, afhankelijk van de regeling, variëren tussen 7 en 11%, echter hierbij neemt het aantal uren overschrijding van het vochtcriterium met 30 tot 50% toe.

Voor een negental regelingen zonder temperatuurintegratie en of gebruik van een minimumbuis is de performance t.a.v. de drie target grootheden (uren $\Delta T_d < 1^\circ\text{C}$; gas verbruik en verdamping) in Figuur 11 weergegeven.



Figuur 11 Samenvatting van de belangrijkste resultaten, voor de “kale” regelingen, d.w.z. zonder minimumbuis of temperatuurintegratie.

Voor wat betreft de performance ten aanzien van de verdamping, wordt het nauwe verband tussen gasverbruik en de verdamping bevestigd. Wel is belangrijk op te merken dat het gasverbruik relatief sneller daalt dan de verdamping, waardoor de efficiëntie toeneemt met lagere verdampingsniveaus. Daarnaast is het opvallend dat toepassing van een minimumbuis het effect overheerst van alle andere principes: welk principe dan ook. Een regeling met een minimumbuis heeft een energieverbruik (en een verdampingstotaal) vrijwel gelijk aan de referentie. Het toepassen van temperatuurintegratie naast de minimumbuis verlaagt meer het gasverbruik dan de verdamping.

Interessant is de performance ten aanzien van het tegengaan van condensatie op het gewas. Het principe lijkt niet zozeer een invloed te hebben (dat alle RV regelingen met setpoint 85 % beter scoren heeft meer te maken met het setpoint dan met het regel principe), terwijl de grootte van de P-band belangrijker is dan het gekozen setpoint. Vergelijk bijvoorbeeld RV90_Pb50 met RV85_Pb5. Beide regelingen hebben vrijwel hetzelfde gasverbruik en verdamping en toch minder uren “nat”. Hetzelfde geldt voor DP1_Pb100 vs DP2_Pb1 en SP1.5_Pb4.5 vs SP2_Pb3.

3.5.1 Standaard vochtregeling

Door de standaard vochtregeling (minimumbuis en setpoint RV 85) te vervangen door één zonder minimumbuis wordt ca. 10 % energie bespaard. Indien er, zoals in de praktijk erg gebruikelijk is, in de nacht een setpoint RV verlaging van 85 naar 80 % wordt doorgevoerd blijft hier ca. 8 % van over. De setpointverlaging in de nacht wordt vaak ingesteld om de kans op natslaan van het gewas bij te snelle opwarming van de kas te voorkomen. Door het uitschakelen van de minimumbuis wordt het aantal uren dat de RV in de kas op en rond de 85 % zit wat verhoogd, echter de regeling is goed in staat om te hoge RV niveaus te voorkomen.

3.5.2 Vochtregeling op dauwpunt

Schimmelinfecties kunnen vaak pas toeslaan indien een onderdeel van de plant gedurende enige tijd echt nat is geweest. Om deze situatie te voorkomen moet er in de regeling voor gezorgd worden dat er altijd een positief verschil blijft bestaan tussen de gewastemperatuur en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht. Indien het verschil tussen de gewastemperatuur en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht

onder het setpoint komt, zijn er 2 mogelijkheden verder uitgewerkt, of de ramen worden geopend, of de setpointtemperatuur verwarmen en ventilatie worden aangepast.

ramen openen

Niet alleen in deze vochtregeling op dauwpunt maar ook in de standaard vochtregeling worden de ramen op het vochtcriterium geopend. De gerealiseerde raamstanden voor beide regelingen verschillen nogal sterk. Omdat de totale verdampingssom weinig verschilt, moet worden aangenomen dat de gekozen setpoints van de dauwpunttemperatuurregeling niet optimaal zijn. De kleinste dauwpunttemperatuur verschillen komen enkele uren na zonsopkomst en net na zonsondergang voor.

setpoint verhoging

Indien in plaats van het openen van de ramen bij overschrijding van het dauwpuntcriterium het setpoint verwarmen en ventileren wordt verhoogd, zal door de stijgende kasluchttemperatuur de gewastemperatuur gaan stijgen, en daarmee het verschil met dauwpunt van de lucht vergroot kunnen worden. Door deze actie zal de gemiddelde kasluchttemperatuur in vergelijking met de andere regelingen iets hoger worden, echter niet als daarbij ook temperatuurintegratie wordt toegepast. De performance van beide laatste principes ten aanzien van het eigen target criterium (temperatuurverschil) kan zeker beter worden met een aangepaste keuze van setpoints en/of P-band. Dit kan onderwerp zijn van verder onderzoek.

4 Conclusies

De belangrijkste resultaten van deze voorstudie zijn:

1. de mogelijkheid om energie te besparen door “verdampingsintegratie”, met behoud van de nu gangbare verdampingsom is beperkt (een paar procent)
2. het toelaten van een kleine daling van de verdamping (bijvoorbeeld 5 %) in het totaal zou de mogelijkheid voor energie besparing door vochtintegratie enorm verruimen, en de resulterende besparing zou dan ON TOP komen van de 11 % tot 13 % directe vermindering van energieverbruik
3. de verdamping hangt veel meer af van de hoeveelheid energie input dan van het regelprincipe, d.w.z. twee verschillende principes die resulteren in een gelijk energieverbruik geven ook vrijwel dezelfde verdamping.
4. andersom, de performance van een regeling ten aanzien van het voorkomen van nat slaan van het gewas is veel meer afhankelijk van de regelstrategie (target grootte, set-point, P-band) dan van het energieverbruik.

Het lijkt dus dat er een goede mogelijkheid is dat er in de praktijk 10 % á 20 % energiebesparing gehaald kan worden door het aanpassen van de principes waarop de nu gangbare vochtregeling is gebaseerd. Voordat het zover is, moeten wij echter onze kennis verruimen langs twee wegen: één is het verkennen van de grenzen van het gewas, bijvoorbeeld het mogelijk bestaan van een fysiologisch “minimum transpiratiestroom” en mogelijke consequenties op productkwaliteit. Daarnaast is aanpassing van de klimaatregeling de logische volgende stap. Dat vereist onderzoek naar het beste principe (target grootte; verdamping en/of temperatuurverschil; regelgrootte; RV; VPD; kas/buis temperatuur; schermen; kieren) en de beste uitvoering (bijvoorbeeld wel of geen integrerende set-points; P- en/of I-band).

4.1 Aanbevelingen

De belangrijkste conclusie van deze studie is dat, terwijl “vochtintegratie” met behoud van gangbare verdampingsniveaus een paar procenten energie besparing zou kunnen opleveren, er een goede mogelijkheid is dat er in de praktijk 15 % á 20 % energiebesparing gehaald kan worden door vochtintegratie te koppelen aan een (kleine) verlaging (b.v. 5 %) van de totale verdampingsom.

Veel projecten, zoals bijvoorbeeld het “minimumbuis onderzoek” uitgevoerd door het PPO, geven voldoende indicatie dat het “stimuleren” van het gewas zoals beoogd door de huidige vochtregelingen, niet altijd resulteert in een hogere productie (b.v. Esmeijer, 1998). De kennis t.a.v. de rol van verdamping in productie en productkwaliteit gerelateerde processen is onvoldoende om de grens tussen nuttige en “luxe” verdamping vast te stellen. Te weinig is nog bekend over via welke processen de productie en productkwaliteit beïnvloed worden door verdamping. Hierbij verdienen met name effecten van verdamping op wortelactiviteit en op de opname van nutriënten (in het bijzonder calcium en magnesium) door de plant en verdeling ervan binnen de plant aandacht.

Echter, het is wel mogelijk dat de tweede doelstelling van vochtregeling (het droog houden van het gewas) veel stringenter eisen stelt aan het klimaat dan het behouden van een minimum verdampingsstroom. Daarom lijkt het zinvol om verder na te gaan wat de consequenties voor de verdamping zijn als deze doelstelling gehaald zou worden in een efficiëntere wijze dan nu het geval is. Hierbij wordt gedacht aan een regelstrategie die de efficiëntste manier bepaalt, en daarbij gebruik maakt van alle actuatoren (zoals schermen, stoken, ventileren) en regelmiddelen (zoals P- en/of I-band, kieren), rekening houdend met een veiligheidsmarge voor mogelijke temperatuurgradiënten in de kas en het gewas, te bepalen afhankelijk van de [klimaat]omstandigheden en de toegepaste regelactie. In dit verband wordt het tevens van belang om rekening te houden met de invloed die nieuwe (hoogisolierende) kasdekmaterialen kunnen uitoefenen op de waterdamp stromen.

Voor beheersing van verdamping lijkt een intelligente klimaatregeling het meest perspectiefvol. Strategieën om verdamping te verlagen via sturing (van watergehalte en/of EC) in het wortelmedium kunnen alleen effectief zijn door het opwekken van een huidmondjes reactie, wat de productie en productkwaliteit zeker ten nadele komt.

Om de mogelijkheid tot energiebesparing door verdampingbeheersing via de klimaatregeling volledig te benutten, is een regelalgoritme nodig die waarborgt dat de gewenste verdampingsstroom wordt verdeeld over een gekozen integratieperiode, zodanig dat de afvoer van vocht in de meest energie-efficiënte wijze geschied. Hierbij moet rekening gehouden worden met de randvoorwaarde dat het natslaan van het gewas voorkomen moet worden. Er is echter ook een mogelijke synergie tussen deze twee doelstellingen. Een simulatiestudie langs de lijn van dit werk kan indicaties geven om tot een goed ontwerp van zo'n regelalgoritme te komen. De uiteindelijk fine-tuning moet echter gebeuren in een praktijkkas, waarmee ook de kans op acceptatie door de praktijk vergroot kan worden.

Literatuur

- Bakker, J.C., 1994. Vraagtekens bij doel minimum buis. Groenten+Fruit/Glasgroenten, 4(2):10-11.
- Bakker, J.C., G.P.A. Bot, H. Challa, N.J. van de Braak, 1995. Greenhouse Climate Control, an integrated approach. Wageningen pers,1995, isbn 90-74134-17-3., 279 blz.
- Bakker, J.C., 1998. Handhaven minimum buis beperkt energiebesparing, Groenten+Fruit/Glasgroenten, 8(45): 22-23.
- Bakker, R., N.J.A. Van der Velden & A.P. Veraegh, 1999. Leeftijd bedrijven en energiebesparende opties in de glastuinbouw. Den Haag, LEI Rapport 1.99.01.
- Bot, G.P.A., 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. PH. D. Thesis Agricultural University Wageningen, The Netherlands.
- Breuer, J.J.G. en N.J. van de Braak, 1989 Reference Year for Dutch Greenhouses, Acta Horticulturae 248, 1989
- De Jong, T., 1990. Natural ventilation of large multi-span greenhouses. PH. D. Thesis Agricultural University Wageningen, The Netherlands.
- De Koning, A.N.M., 1994. Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: a quantitative approach, PH. D. Dissertation, Landbouwuniversiteit, Wageningen., 240 blz.
- De Jong, T. & C. Stanghellini, 1994. Gebruik van modellen verbetert vochtregeling. Groenen+Fruit/Glasgroenten, 4(24): 18-19.
- De Zwart H.F., 1996. Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. IMAG-DLO rapport 96-05, 236 blz.
- Dodde, H & K. Sikken, 2002. Vochtgehalte maar onderdeltje van kasklimaat. Oogstplus?tuinbouw, 12 April: 2-5.
- Esmeijer, M., 1998. Stimuleren van verdamping kost energie. Groenten en Fruit/Glasgroenten, 27 Maart: 18-19.
- Esmeijer, M.,1998.Minimale transpiratie in relatie tot energieverbruik, productie en kwaliteit van glastuinbouwgewassen : eindrapportage van het onderzoek over de jaren 1993 - 1997. PBG rapport, 52 blz.
- Esmeijer, M. L. Nijs, 2000. Handleiding voor het opsporen en oplossen van horizontale klimaatverschillen. PBG rapport, 2000, 35 blz.
- Goudriaan, J., 1988. The bare bones of leaf-angle distribution in radiation models for canopy photosynthesis and energy exchange. Agricultural and forest meteorology, 43:155-169
- Kempkes, F.L.K., N.J.van de Braak, J.C. Bakker, C.M.J. Bloemhard, 1998. Effecten van buisligging bij de teelt van tomaat, onderzoek naar verticale temperatuur- en vochtverschillen, energieverbruik en groei, fase 1-3. PBG Rapport 98-134 29 blz.

Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. In: The State and Movement of Water in Living Organisms. 19th Symposium of the society of experimental biology: 205-234.

PBG, 1994. Minimale transpiratie bij tuinbouwgewassen.
<http://www.agro.nl/AppliedResearch/pbg/tomaat.htm>

PBG, 1999. Jaarverslag. Naaldwijk.

Penmann, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Meteorological Society, Londen, A 193:120-145

Ploeger, C., E. Van Rijssel & B.J. Van der Sluis. Toepassing laagwaardige warmte uit condensors. Den Haag, LEI Rapport 2.99.02.

Stanghellini, C., T. de Jong, 1995. A model of humidity and its applications in a greenhouse, agricultural and forest meteorology 76 (1995) 129-148.

Stanghellini, C., 1995. Vapour balance. In: J.C. Bakker, G.P.A. Bot, H. Challa and N.J. v.d. Braak (Eds.), Greenhouse Climate Control: an integrated approach. Wageningen Pers, Wageningen: 141-150.

Stanghellini, C., 1987. Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management. PH. D. Dissertation, Landbouwniversiteit, Wageningen.

Swinkels G.L.A.M., J.P.G. Huijs en H.F. de Zwart, 2000. Standaardteelten, IMAG Nota P2000-85, 44pp

Swinkels G.L.A.M. Kempkes F.L.K. de Zwart H.F.. Vernooy C.J.M., 2000. Praktijkevaluatie van het gebruik van kasklimaatcomputers in de glastuinbouw IMAG-nota P2000-54.

Yoo H., E. Pak, 1993. Theoretical model of the charging process for stratified thermal storage tanks. Solar Energy, 51(1993)6 pp. 513-519.

Visser, P., 2002. Minimumbuis temperen zonder extra risico. Groenten en Fruit/Glasgroenten 34: 24-25.

Bijlage 1 KASPRO

Het simulatiemodel (KASPRO) is een uit samenhangende componenten samengesteld model van de eigenschappen van een kas, gewasgegevens, ingestelde setpoints en buitenklimaat, dat de relevante variabelen berekent als functie van tijd. Dit maakt berekening van de energiestromen en gewasproductie mogelijk.

De basis van het model wordt gevormd door de energie-, water- en CO₂-balansen van de in beschouwing genomen samenhangende onderdelen van het systeem. Het resulteert in een set van niet lineaire, eerste orde differentiaal vergelijkingen die numeriek worden opgelost.

Het kasklimaatmodel heeft als startpunt de kasklimaatregelaar. Kaslucht is een component waarvan de temperatuur, vochtigheid en CO₂-concentratie als primaire variabelen worden beschouwd. De kasklimaatregelaar vergelijkt deze waarden met setpoints. De setpoints zijn functies van tijd en buitenklimaat en aangenomen wordt dat de teler ze van parameters voorziet.

Op grond van de vergelijkingen zal de regelaar het volgende doen:

- De stand van de mengklep van de warmwatertoevoer wordt aangepast, ten einde de temperatuur van de verwarmingbuizen te wijzigen. Meestal wordt de temperatuur van twee afzonderlijke verwarmingssystemen geregeld, waarvan één met pijpen dicht bij de grond en één met pijpen in of boven het gewas.
- De stand van de luchtramen wordt aangepast voor warmte, vocht en CO₂-uitwisseling tussen de kas- en buitenlucht.
- De CO₂-gift naar de kas wordt gestart en gestopt.

Naast het kasklimaat, stuurt de regelaar de apparaten aan die van belang zijn voor de warmtevoorziening (ketel en evt. warmtepomp, opslagtank etc.) en de CO₂-productie van de ketel. De regelactiviteiten hebben direct of indirect invloed op het brandstofverbruik. Dit is duidelijk het geval bij verhoging van de buistemperatuur, hoewel de brandstof om in de warmtebehoefte te voorzien, al uren eerder opgewekt kan worden en tijdelijk worden opgeslagen in een warmteopslagtank.

Geopende ramen hebben een effect op de energieconsumptie wanneer de regelactiviteiten worden uitgevoerd op grond van het setpoint luchtvochtigheid gedurende perioden van energievraag. De CO₂-gift veroorzaakt een brandstofverbruik indien CO₂ wordt verkregen uit uitlaatgassen van de ketel of de WK-installatie tijdens perioden zonder energievraag.

Omdat het warmtedistributiesysteem in kassen gewoonlijk bestaat uit een warmwatercircuit van pijpen met een groot thermisch vermogen met typische afkoelingseigenschappen, wordt extra aandacht besteed aan de beschrijving van het dynamisch gedrag (De Zwart, 1996). De tank voor korte termijn warmteopslag met zijn grote thermische vermogen is gemodelleerd met een uitgebreid meer lagen model overeenkomstig de uitgangspunten gepresenteerd door Yoo en Pak (1993). Naast de kasklimaatregelaar zijn de kasluchtomstandigheden ook afhankelijk van de warmte, vocht en CO₂-uitwisseling tussen de kaslucht en zijn directe omgeving. Om deze interacties te beschrijven onderscheidt het model samenhangende componenten voor het gewas, de bodem en het kasdek.

De grond onder de kas vertegenwoordigt een grote warmteopslagcapaciteit met een sterk dempend effect op fluctuaties van de kasluchttemperatuur. Om een goede afspiegeling van dit effect te verkrijgen is de grond onderverdeeld in meerdere lagen.

Het kasdek vormt een belangrijke belemmering voor warmteverlies naar de buitenlucht. Indien de temperatuur van het dek echter onder het dauwpunt van de kaslucht komt, veroorzaakt het dekoppervlak ontvochtiging van de kas.

De buitenomstandigheden dienen als omgevingsfactoren voor het model. De buitenluchttemperatuur en de hemeltemperatuur beïnvloeden de warmteverliezen door convectie en straling bij het kasdek en daardoor de temperatuur van het dek. De buitentemperatuur, vochtigheid en CO₂-concentratie hebben een directe

invloed op de primaire toestandsvariabelen via luchtuitwisseling door geopende ramen of kieren. De windsnelheid is een belangrijke indirecte weerconditie omdat deze invloed heeft op de convectieve warmte-uitwisseling aan het dek en in belangrijke mate de luchtuitwisseling door de ramen bepaalt.

Een belangrijk weergegeven is de globale straling. Directe en diffuse straling wordt geabsorbeerd, gereflecteerd en doorgelaten door het dek, het gewas en de grondoppervlakte. Bovendien is straling op gewashoogte belangrijk voor de fotosynthese. Voor de berekening van de warmte-, vocht- en CO₂-stromen tussen de samenhangende componenten, zijn de relaties voor de warmtestroming ontleend aan een aantal auteurs. De warmtestraling is berekend met gebruikmaking van relaties gebaseerd op de wet van Stefan-Boltzmann, en bevat *view*factoren, absorptie en emissie. Interceptie van de straling door het gewas is behandeld in overeenstemming met Goudriaan (1988). De transmissie van licht door het dek is berekend middels een methode beschreven door Bot (1983). De convectieve warmte-uitwisseling aan de binnen en buitenkant van het dek is beschreven in de relaties eveneens gepresenteerd door Bot. De ventilatiestromen, in tuinbouwkundige context is gebaseerd op natuurlijke ventilatie, en is berekend op basis van de theorie gepresenteerd door De Jong (1990). De gewasverdamping, een belangrijk onderdeel van het model, is afgeleid van het werk van Stanghellini (1987). De convectieve warmteoverdracht van verwarmingsbuizen en convectieve warmte-uitwisseling van de bodem is eveneens beschreven door Bot. De warmtegeleiding in de grond is benaderd vanuit de algemene warmtegeleidingtheorie.

Ten gevolge van de complexiteit en de niet lineairiteit van het model, is de oplossing van de differentiaalvergelijkingen uitgevoerd in numerieke voorwaartse integratie. De stapgrootte wordt steeds zodanig gekozen dat geen numerieke instabiliteit ontstaat. Dat betekent dat het tijdsduur per integratiestap vaak niet meer dan 15 sec bedraagt. Wanneer het buitenklimaat en de klimaatregelaar activiteiten stabiel zijn, neemt de stapgrootte toe tot 2 minuten, hetgeen overeen komt met de meetfrequentie van de klimaatregelaar.

Vergelijking van de resultaten van het model met metingen in een semi-praktijk kas (4 afdelingen van 200 m² elk) toonden een zeer goede overeenkomst. Absolute verschillen tussen model en metingen voor de luchttemperatuur voor gemiddelde 10 minuten waarden bedroegen minder dan 0.5 °C in 90 % van de tijd. Het energieverbruik (warmte) werd gesimuleerd met een nauwkeurigheid van 95 % en de regelactiviteiten met betrekking tot ramen en de CO₂-gift toonden een goede gelijkenis. (de Zwart, 1996). Voor de beschrijving van het buitenklimaat wordt een dataset gebruikt die uitgaat van typisch Nederlandse weersomstandigheden. Deze dataset is wordt aangeduid als het SEL-jaar (Breuer en Van de Braak, 1989).

Bijlage 2 Belangrijkste setpoints en kasparameters

Variabele	tomaat		paprika		roos		eenheid
	datum	waarde	datum	waarde	datum	waarde	
Akas:		39010		39010		39010	m ²
Padbreedte:		3		3		3	m
Hgutter:		4.5		4.5		4.5	m
Roofslope:		22.5		22.5		22.5	°
Kapbreedte:		4		4		4	m
Vakmaat:		4.5		4.5		4.5	m
FrSunAir:		0.045		0.045		0.06	–
Dekmateriaal:		Enkelglas		Enkelglas		Enkelglas	–
Leakage:		1.3e-4		1.3e-4		1.3e-4	m ³ .m ² .h ⁻¹
Windowlength:		2.25		2.25		2.25	m
Windowheight:		1.2		1.2		1.2	m
fr_Window:		0.0556		0.0556		0.0556	–
PrimNet:		Low		Low		Low	–
Ondernettype:		51-er		51-er		51-er	mm
nLowPerKap:		5		5		5	–
Bovennetype:		28-er		28-er		28-er	mm
nUppPerKap:		2.5		2.5		2.5	–
Pketel:		250		250		250	W.m ²
Ketelverlies:		1		1		1	W.m ²
eta_ketel:		95		95		95	–
Vultemp:		95		95		95	°C
Condensor:		Ja		Ja		Ja	–
Buffervolume:		100		100		100	m ³ .ha ⁻¹
AlsBufVol:		Stoppen		Stoppen		Stoppen	–
Gewas:		Tomaat		Paprika		Roos belicht	–
Plantdatum:	11/12		25/11		01/01		–
Ruimdatum:	20/11		7/11		01/01		–
SpDag:	11/12	19	25/11	22.5	1/03	19.5	°C
"	10/01	18	16/12	22.5	8/09	18	°C
"	31/03	19	6/01	22			°C
"	20/11	5	27/01	21			°C
			07/11	5			°C
SpNacht:	11/12	18	25/11	22.5	1/03	18.5	°C
"	10/01	17	16/12	20	8/09	17	°C
"	31/03	18	6/01	18			°C
"	20/11	5	27/01	19			°C
			07/11	5			°C
DodeZone:	20/11	20	7/11	5	15/04	0.5	°C
"	11/12	1	25/11	5	1/11	1.5	°C
			16/12	3			°C

			6/01	2		°C
			27/01	1		°C
LichtVbeg:	100			100	100	W.m ²
LichtVend:	300			300	300	W.m ²
LichtV:	10/01	2		2	2	°C
"	31/03	0				°C
SpRV:		85		85	85	%
KpVocht:		2		2	2	%.% ⁻¹ (RV)
SpCO2:	11/12	1000	25/11	1000	1200	Ppm
"	20/11	100	7/11	200		Ppm
CO2bron:		Ketel		Ketel	Ketel	–
kgCO2:		180		180	180	kg.ha ⁻¹ .h ⁻¹
Vorstgrens:		-1		-1	-1	°C
StartWhet:		60		60	50	%
WinLeeMin:		0		0	0	°
WinWhetMin:		0		0	0	°
MaxWin:		45		45	45	°
KpVent:		25		15	10	%.°C ⁻¹
MinBuisDag:	11/12	45	20/11	35	45	°C
"	20/11	0	7/11	5		°C
MinBuisNacht:	11/12	45	25/11	35	30	°C
"	20/11	0	7/11	5		°C
MinBuisBeg:		100		100	100	W.m ²
MinBuisEnd:		300		300	300	W.m ²
T2ndAcc:		65		55	90	°C
TLowMax:		89		70	70	°C
TUppMax:		89		70	89	°C
Scherm:		nee		ja	nee	–
IglobOpen			25/11	100		W.m ²
			6/01	5		W.m ²
TbuitMax				10		°C
MaxVochtKier				4		%
Belichting					01/09	ja
					01/05	nee
Lampvermogen						40
MaxIGlob						125
UitPerEtmaal						4
						h

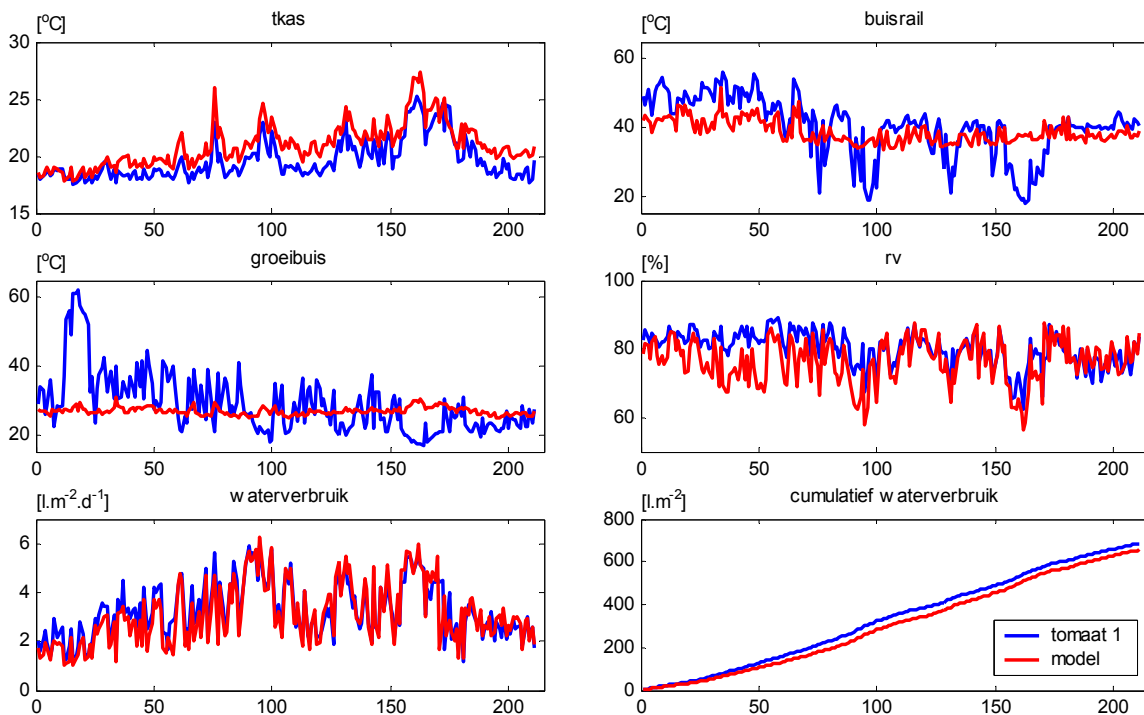
Bijlage 3 Model validatie

Tomaat

Van een aantal tomaten bedrijven zijn de gegevens verwerkt. In de verdere uitwerking zal eerst één van deze bedrijven, tomaat_1, uitgebreid worden uitgewerkt en van een 2^e bedrijf waar niet jaarrond gemeten is, worden de resultaten globaal weergegeven.

Tomaat_1

Uit de beschikbare gegevens is een aaneengesloten periode met data van 3 maart 1997 tot en met 30 september 1997 gebruikt. Omdat het model ook klimaatgegevens als buitentemperatuur en stralingsniveau nodig heeft, zijn van het PPO–Naalwijk de weergegevens over deze periode gebruikt. Omdat de exacte klimaatinstellingen van de bedrijven waar de praktijkgegevens verzameld zijn, niet bekend zijn, is het standaard bedrijf met bijbehorende klimaatinstellingen gebruikt. (Swinkels, 2000) Een van de standaardinstellingen is bijvoorbeeld een jaarrond minimumbuis temperatuur van 45 °C, die stralingsafhankelijk tussen 100 en 300 W.m² wordt afgebouwd naar de kasluchttemperatuur. In Bijlage 2 is een overzicht gegeven van de belangrijkste gebuikte setpointinstellingen en kasconfiguratie waarden. Vervolgens is over de genoemde periode een simulatie berekening met KASPRO uitgevoerd. In Figuur 12 is voor de periode 3 maart – 29 september de daggemiddelde waarden van de kaslucht-, buisrail- en groeibuis-temperatuur, de RV en het waterverbruik zowel als daggemiddelde als cumulatief over de gehele periode weergegeven. Op de x-as staan de dagen na de start (3 maart).



Figuur 12 Daggemiddelde waarden van de kaslucht-, buisrail- en groeibuis-temperatuur, de RV en het waterverbruik voor de periode 3 maart – 29 september.

Uit Figuur 12 blijkt dat de kasluchttemperatuur in de berekening vrijwel constant op een hoger niveau ligt als in de praktijk gemeten, maar de trend is zeer goed vergelijkbaar met de praktijkmetingen. De momentaan grote verschillen in buis temperatuur van zowel buisrail als groeibuis kunnen zeer wel door tijdelijke setpointwijzigingen van de tuinder worden veroorzaakt. Zo is tijdens de zeer warme periode (rond dag 160)

de buistemperatuur op het bedrijf vrijwel gelijk aan de kasluchttemperatuur. In het model worden op zo'n moment geen setpoint instellingen gewijzigd, terwijl een tuinder vanuit gewaskundig perspectief setpointinstellingen gaat wijzigen (Swinkels et.al., 2000). De piek in groeibuistemperatuur rond dag 20 kan goed het gevolg zijn van een poging van de tuinder om de eerste tros met rijpe vruchten van de plant af te stoken om de plantbelasting te verbeteren.

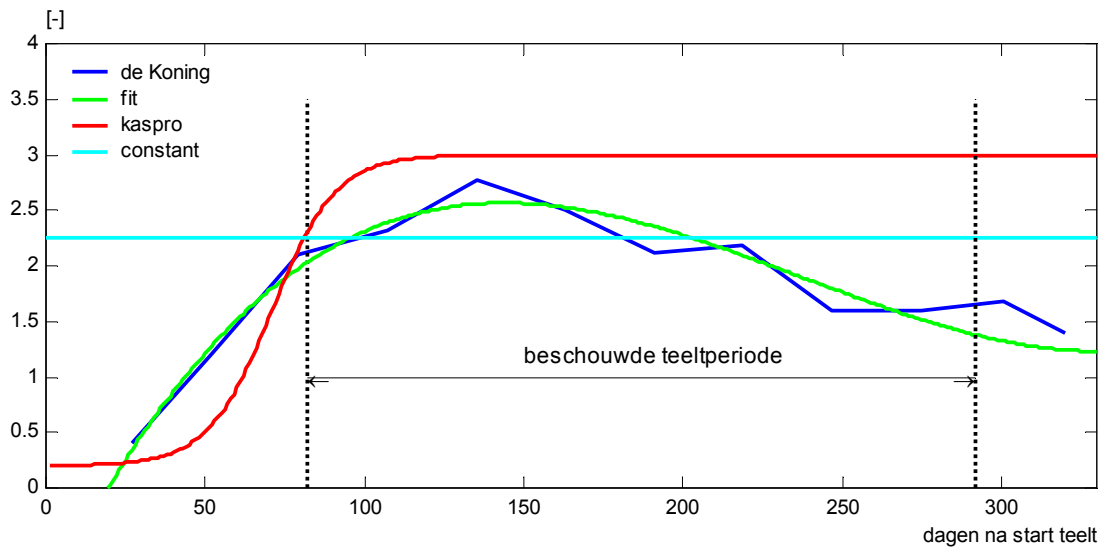
Bij het RV verloop is het verschil tussen de eerste en tweede periode opvallend. (grens rond dag 80). Een directe oorzaak is hier niet van aan te geven. Wordt naar de grafiek met het waterverbruik gekeken, dan blijkt in deze periode het model het gemeten verbruik te onderschatten. Na dag 100 is er in de cumulatie vrijwel geen verschil tussen beiden. Tussen de door het model en de werkelijk gemeten wateropname zit één belangrijk verschil. De door het model gegenereerde verdamping is de daadwerkelijke verdamping, terwijl de gemeten opname door het gewas, de som van de verdamping en de fixatie door het gewas is. In de praktijk wordt van een fixatiefactor van ongeveer 10 % uitgegaan. Met andere woorden, als er 1 liter water wordt opgenomen, dan verdampt hier van 0.9 liter en wordt 0.1 liter in het gewas vastgelegd.

In Tabel 4 zijn de gemiddelden voor de beschouwde periode van de in Figuur 12 weergegeven variabelen weergegeven.

Tabel 4 Gemiddelden van de in Figuur 12 weergegeven variabelen over de periode 3 maart – 29 september.

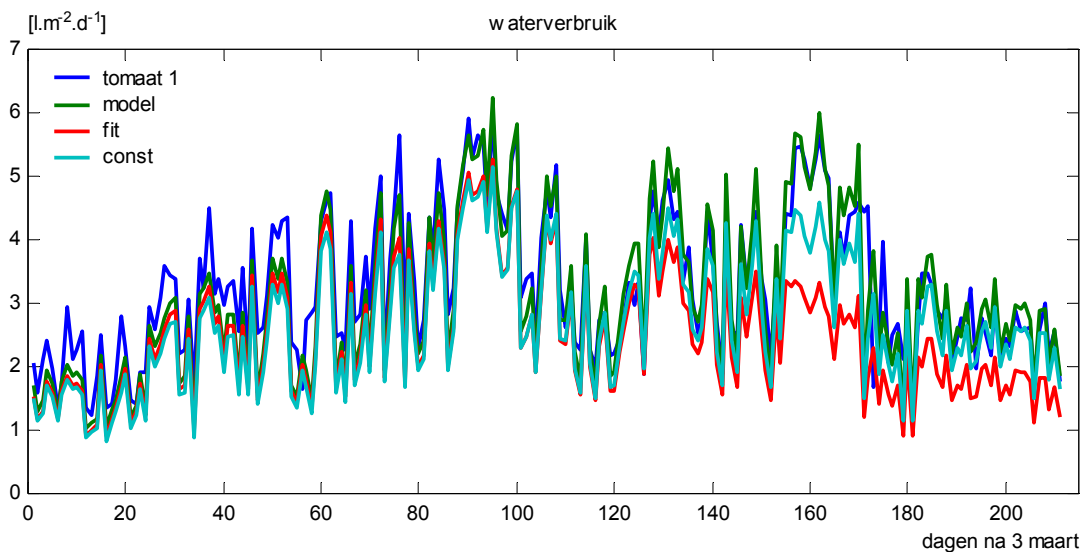
Variabele	Praktijk	model
T kas [°C]	19.6	21.0
T buisrail [°C]	40.3	38.7
T groeibuis [°C]	28.8	26.9
RV [%]	80.1	75.5
Opname / transpiratie [$l.m^2.d^{-1}$]	3.25	3.00
Opname / transpiratie som [$l.m^2$]	686	632

De verschillen in RV, buistemperatuur en verdamping in met name de eerste periode, bevatten een paar tegenstrijdigheden. Het is modelmatig zeer eenvoudig om de buistemperatuur te verhogen (bijvoorbeeld in plaats van een minimumbuistemperatuur van 45 °C, 55 °C instellen). Als gevolg hiervan zal echter de RV wat gaan dalen, immers er zal ook meer geventileerd gaan worden. Voor een verbetering van de match tussen praktijk en model is dit echter een verkeerde richting. Daarnaast zal de verdamping wat toe gaan nemen, echter dan komt de gemeten wateropname dichterbij de verdamping te liggen, waardoor er minder water gefixeerd wordt in het gewas. Een andere mogelijkheid om de vochthuishouding te beïnvloeden is het bladoppervlak van het gewas, die de uiteindelijke verdamping veroorzaakt, te variëren. In de praktijk verschilt de LAI gedurende de teelt regelmatig. In Figuur 13 is een aantal LAI verdelingen weergegeven, onder andere zoals standaard in KASPRO is ingebouwd, als bepaald door de Koning (de Koning, 1994) en een constante van 2.25. Door de ruwe data van de koning is een derde graads polynoom gefit.



Figuur 13 LAI verdelingen zoals in KASPRO, volgens de Koning ruwe data en fit en een constante.

Met deze 3 LAI verdelingen zijn KASPRO berekeningen uitgevoerd om de invloed van de LAI te bepalen. In Tabel 5 en Figuur 14 zijn de resultaten weergegeven.



Figuur 14 Waterverbruik gemeten in de praktijk en berekend met drie verschillende LAI functies in het model; standaard in KASPRO, fit de Koning en constant.

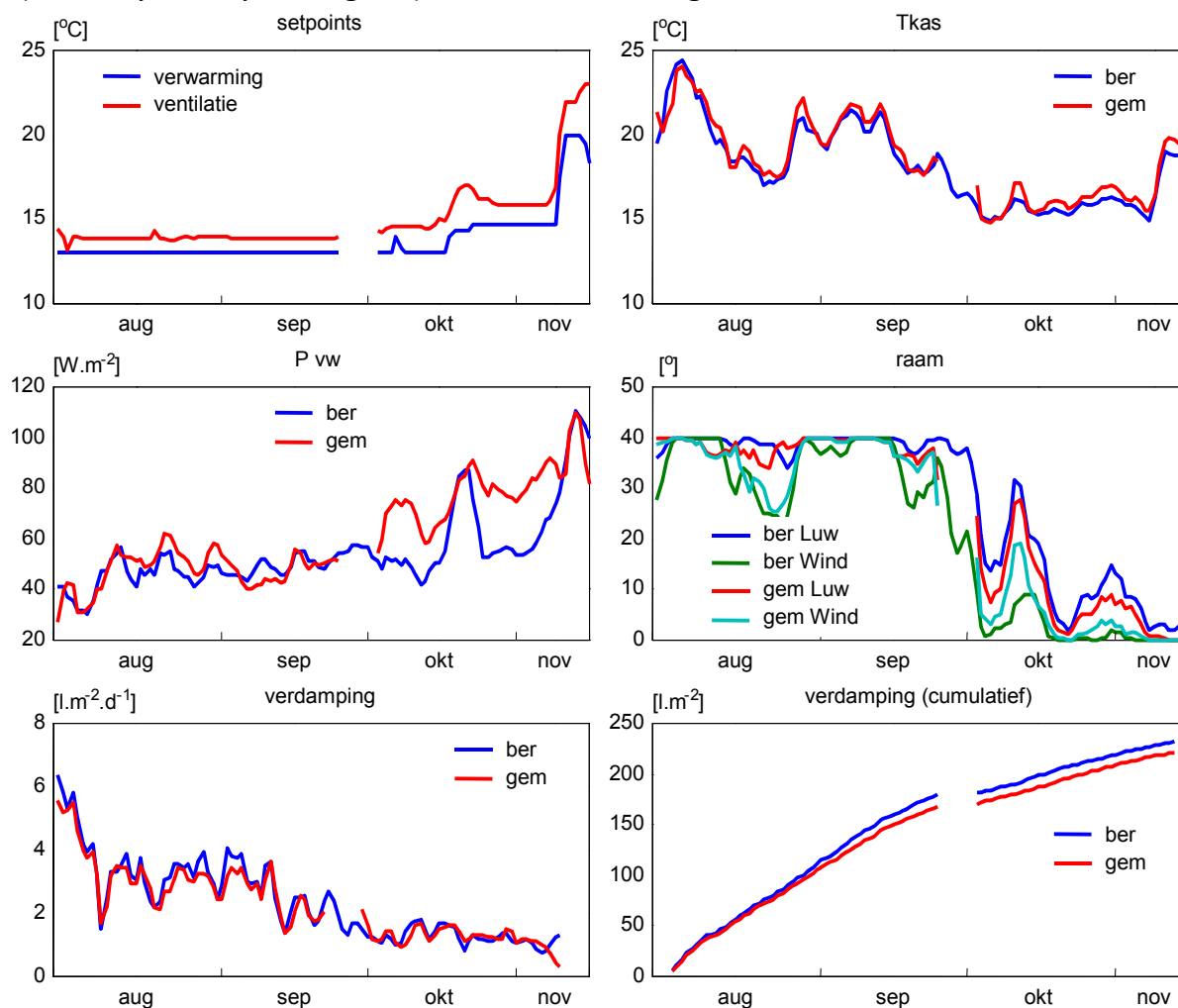
Uit Figuur 14 blijkt duidelijk dat de gekozen LAI functie grote invloed heeft op de transpiratie. Met name in de warme periode rond dag 160, zie ook Figuur 12, heeft dit grote gevolgen voor de transpiratie. Dit resulteert vervolgens in een verhoging van de gemiddelde kasluchttemperatuur en een verlaging van de RV, Tabel 5. Voornamelijk worden de beste resultaten bereikt met de standaard in KASPRO opgenomen LAI ontwikkeling functie.

Tabel 5 Gemiddelden van 4 klimaat variabelen en de water opname, gemeten in de praktijk en berekend met KASPRO over de periode 3 maart - 29 september.

Variabele	praktijk	standaard KASPRO	fit de Koning	constante LAI
T kas [°C]	19.6	20.9	21.2	21.1
T buisrail [°C]	40.4	38.6	38.6	38.3
T groeibuis [°C]	28.8	26.8	27.0	26.8
RV [%]	80.2	76.4	71.0	72.4
Opname / transpiratie [l.m ² .d ⁻¹]	3.3	3.1	2.5	2.7
Opname / transpiratie som [l.m ²]	686	656	524	566

Tomaat_2

Van dit bedrijf is slechts van een relatief korte periode, van eind juli tot half november 1999 met een gat van ongeveer 10 dagen rond 25 september, data beschikbaar. Van dit bedrijf zijn meer gegevens rondom de klimaatinstellingen, als setpoint verwarmen en setpoint ventilatie, bekend. Dit zijn de gerealiseerde daggemiddelde waarden. In Figuur 15 zijn de resultaten van de simulatieberekeningen weergegeven. Opvallend bij dit bedrijf is de lage setpoint verwarmen instelling die tot half oktober 13 °C is.



Figuur 15 De daggemiddelde gemeten en berekende waarden van de setpoints verwarmen en ventileren, kasluchttemperatuur, het afgegeven vermogen van de verwarming, de luchtramen en verdamping voor de periode 27 juli – 14 november.

Daarnaast wordt het hijsverwarmingssysteem (ø 35mm) als primair net gebruikt en komt het buisrailverwarmingssysteem (ø 45mm) daarna pas bij.

Op de groeibuisverwarming wordt een minimumbuis temperatuur gehandhaafd van ongeveer 50 °C. In Figuur 15 is de berekende warmteafgifte van de verwarmingsbuizen weergegeven. Deze is berekend aan de hand van het temperatuurverschil buis – lucht en de buisdiameter. Het berekende vermogen zoals dit is berekend uit de meetgegevens en uit de simulatieberekeningen, wijkt een paar keer fors af. Over het algemeen is dit in de simulatieberekeningen een onderwaardering van het verwarmingsvermogen. In deze perioden blijft de gemeten kasluchttemperatuur ook iets achter op de gemeten kasluchttemperatuur. Dit kan een gevolg zijn van een tijdelijke minimumbuis temperatuurverhoging.

De berekende en gemeten raamstanden voor zowel luw- als wind-zijde komen goed overeen. In de onderste 2 subfiguren van Figuur 15 is de dagelijkse en de cumulatieve verdamping zoals deze zijn gemeten en berekend weergegeven. In de cumulatie wordt een totale verdamping van 232 l.m⁻² berekend, terwijl er een verdampingssom van 220 l.m⁻² is gemeten. Dit is een afwijking van slechts 5 %, zodat ook hier van een goed match tussen modelberekening en praktijkmeting gesproken kan worden. In Tabel 6 zijn de belangrijkste meetwaarden nog eens weergegeven.

Tabel 6 Gemiddelden van de belangrijkste kasklimaatparameters en de transpiratie voor de periode 27 juli – 14 november.

Variabele	praktijk	berekening
T kas [°C]	18.6	18.2
T buisrail [°C]	32.8	29.8
T groeibuis [°C]	51.2	50.9
RV [%]	81	74
raam luwzijde [°]	25.1	27.0
raam windzijde [°]	22.4	20.5
Opname / transpiratie [l.m ² .d ⁻¹]	2.25	2.37
Opname / transpiratie som [l.m ²]	220	232

Paprika

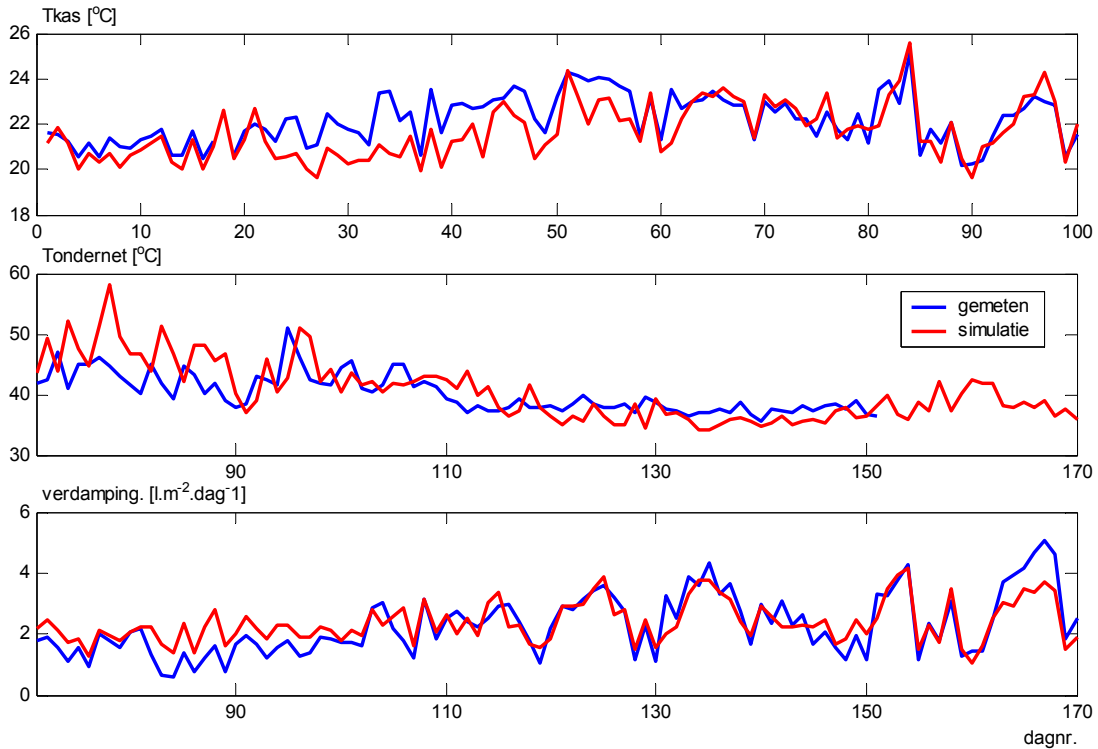
In tegenstelling tot de uitgebreide validatie voor tomaat wordt de validatie en kalibratie voor paprika kort besproken.

Voor de kalibratie van het model voor paprika, zijn teeltgegevens van een paprikaproef bij het PPO-Naaldwijk gebruikt over de periode november tot en met mei. Door de zeer vroege plantdatum van deze proef (oktober), zijn er ten opzichte van de standaard regeling in de derde teeltmaand drastische setpointwijzigingen (een ongeveer 7°C lager setpoint verwarmen als normaal) doorgevoerd om de gewasgroei (strekking van het gewas) weer in balans te brengen. De gevolgen hiervan op de gewasgroei (gewasontwikkeling) zijn niet volledig in beeld te brengen, echter het ligt in de lijn der verwachting dat door deze teeltmaatregelen de gewasgroei fors is achtergebleven ten opzichte van de standaard gewasontwikkeling, met name op de LAI. Dit heeft direct gevolgen voor de resultaten van de modelberekening, immers in het model is een standaard groeicurve (LAI) van het gewas ingebouwd. Tot het moment van ingrijpen op de klimaatsetpoints is er een goede match van de gemeten en berekende verdamping. Daarna ontstaat er een afwijking, welke in het model niet is op te lossen omdat de werkelijke LAI in de proefafdelingen niet gemeten is, en daardoor een eventuele correctie op de LAI in het model niet gemaakt kan worden. Gezien de resultaten in de eerste teeltfase (tot het drastisch ingrijpen op de klimaatsetpoints) en de resultaten bij tomaat (zie vorige paragraaf, kan ervan worden uitgegaan dat de verdamping van paprika door het model voldoende goed gesimuleerd wordt.

Roos

Voor de kalibratie van het model voor roos, zijn teeltgegevens van een rozenproef bij het PPO-Naaldwijk gebruikt over de periode januari tot en met november 1994. Deze gegevens bevatten de meest uitgebreide informatie t.a.v. het gerealiseerde klimaat en setpointinstellingen, echter hebben als nadeel dat waarden van

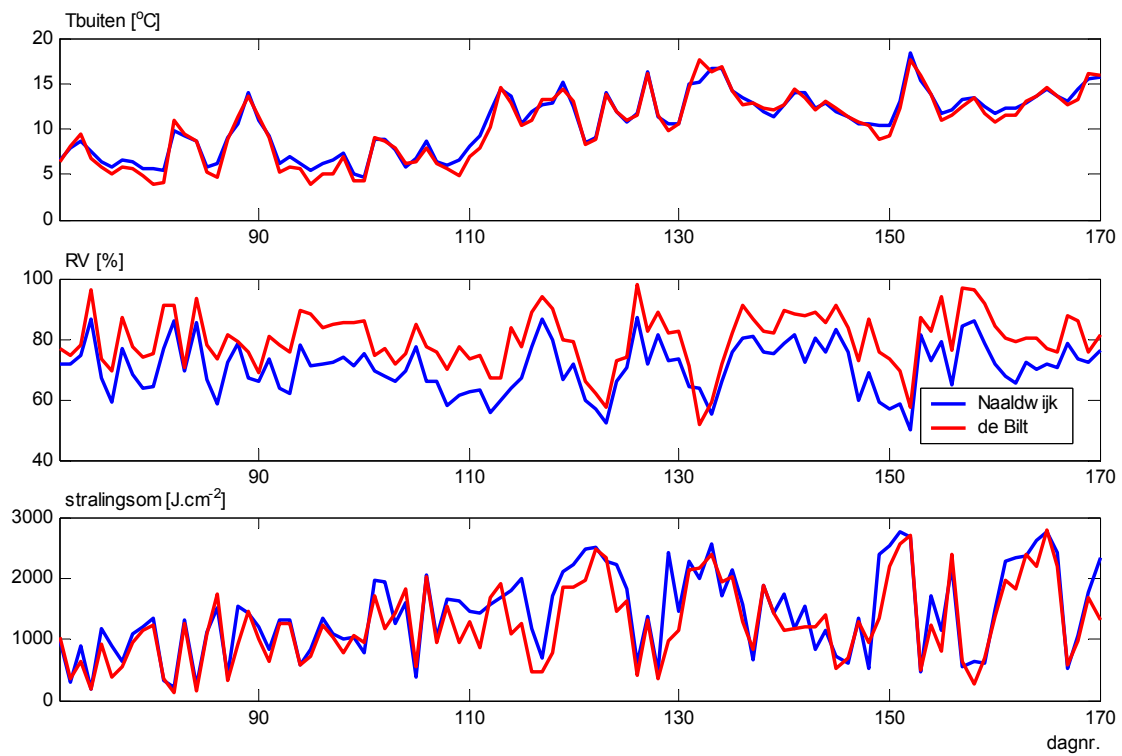
het buitenklimaat, welke op uurbasis nodig zijn voor de simulatieberekeningen, niet voorradig zijn. Als alternatief hiervoor zijn de KNMI gegevens van 1994 in de Bilt gebruikt. Hoewel dit momentane verschillen kan opleveren is dit een beter alternatief dan alleen de gemeten verdamping met de gesimuleerde verdamping te vergelijken, zonder naar het gerealiseerde kasklimaat te kijken. In Figuur 16 zijn de gerealiseerde en gesimuleerde kasluchttemperatuur, buistemperatuur en de verdamping weergegeven. De gepresenteerde gegevens zijn van dagnummer 70 t/m 170 (de periode 10 maart t/m 18 juni). Zoals uit deze figuur blijkt, is met name de buistemperatuur in het begin afwijkend, welke goed het gevolg kan zijn van andere dan de werkelijke buitenklimaatgegevens. De verdamping wordt goed gesimuleerd, in ieder geval wordt de trend goed gevolgd. Het absolute niveau kan momentaan iets afwijken van de gemeten verdamping.



Figuur 16 De gemeten en gesimuleerde daggemiddelde kasluchttemperatuur, buistemperatuur en de dagsom van de verdamping in de periode 10 maart tot 18 juni.

Omdat er van de klimaatgegevens van Naaldwijk wel een daggemiddelde waarde ter beschikking is, is er in Figuur 17 een vergelijk gemaakt voor de buitentemperatuur, RV en stralingssom van Naaldwijk en de Bilt. Alleen voor de RV is er een opvallend verschil. De overige grootheden zijn vrijwel gelijk. Door de hogere RV in de Bilt, zal met name bij grote ventilatievouden iets minder vocht afgevoerd worden in de simulatie, waardoor op dergelijke momenten de gesimuleerde verdamping wat lager uit kan vallen dan in werkelijkheid gemeten is.

Men moet echter niet uit het oog verliezen dat het in deze studie het vooral gaat om het effect van verschillende regelingen te vergelijken, en niet zozeer om absolute waarden van de verdamping te vergelijken.



Figuur 17 De daggemiddelde buitenluchttemperatuur en RV en de stralingsom per dag voor de periode 10 maart - 18 juni van Naaldwijk en de Bilt.

Bijlage 4 Verdamping als functie van actuatoren

Met de energiebalans van het gewas en de transport vergelijkingen van warmte en vocht kan de gewasverdamping worden bepaald volgens vergelijking 1 (Penmann, 1948; Monteith, 1965; Bakker, 1995):

$$E = \frac{\varepsilon r_b \frac{R_n}{L} + 2LAI (\chi_a^* - \chi_a)}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \quad (1)$$

waarin:

E ($\text{g} \cdot \text{m}^2_{\text{grond}} \cdot \text{s}^{-1}$)	= gewasverdamping
ε (-)	= δ/γ (helling van de vochtverzadingscurve bij de momentane temperatuur / psychometrische constante)
r_b ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	= grenslaag weerstand (te berekenen met behulp van een model, bijvoorbeeld Stanghellini, 1987)
R_n ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	= netto straling van het gewas (te berekenen met behulp van een model, bijvoorbeeld Stanghellini, 1987)
L ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)	= Latente warmte van water
LAI (-)	= bladoppervlakte (eenzijdig) per eenheid grondoppervlakte
χ_a ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	= vochtconcentratie van de lucht in de kas (absolute vochtigheid)
	* verzadigde dampspanning
r_s ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	= gewas (huidmondjes) weerstand (te berekenen met behulp van een model, bijvoorbeeld Stanghellini, 1987)

In een kas, echter, is χ_a geen onafhankelijke variabele, omdat deze weer afhangt van de verdamping, samen met de condensatie en de ventilatie. Dit mechanisme is in Figuur 1 weergegeven.

Het bestaan van dit “feed-back” effect, zorgt ervoor dat het “regelen” van luchtvochtigheid in de kas vrijwel onmogelijk is. Daarbij komt het feit dat er in de meeste kassen geen rechtstreekse hulpmiddelen zijn om de vochtigheid te regelen. Dit kan dus alleen indirect door middel van het regelen van de raamstand en buistemperatuur.

Dit betekent dat een regeling die beoogd om de verdamping “rechtstreeks” te sturen, gebruik moet maken van een algoritme waarbij de gewasverdamping wordt beschreven als functie van primaire variabelen, waarbij met “primaire” wordt bedoeld variabelen die rechtstreeks kunnen worden beïnvloed door de tuinder. Hiervoor zijn een paar handelingen nodig. Ten eerst kan vergelijking (1) herschreven worden als een transport vergelijking:

$$E = g_t (\chi_{\text{eff}} - \chi_a) \quad (2)$$

waarbij de volgende definities zijn gebruikt:

$$g_t \equiv \frac{2LAI}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \quad (3)$$

en:

$$\chi_{eff} \equiv \chi_a^* + \varepsilon \frac{r_b}{2LAI} \frac{R_n}{L} \quad (4)$$

g_t (m.s⁻¹) = kan gezien worden als een “samengestelde geleiding” op de verdampingsstroom
 χ_{eff} (g.m⁻³) = is een “effectieve” dampconcentratie op bladniveau, rekening houdend met de stralingswinst van het gewas

Daarnaast, hebben Stanghellini en De Jong, 1995 bewezen dat de vochtbalans aangegeven in Figuur 1 opgelost kan worden voor de luchtvochtigheid (onder stationaire omstandigheden):

$$\chi_a = \frac{g_t \chi_{eff} + g_c \chi_r^* + g_v \chi_o}{g_t + g_c + g_v} \quad (5)$$

χ_r^* (g.m⁻³) = de “effectieve” dampconcentratie op dakniveau (de verzadigde dampspanning bij de temperatuur van het dak)
 χ_o (g.m⁻³) = vochtconcentratie van de buitenlucht
 g_c (m.s⁻¹) = de geleidingen voor de condensatie, te berekenen met behulp van de theorie van massatransport-verschijnselen
 g_v (m.s⁻¹) = de geleidingen voor de ventilatie stromen, te berekenen met behulp van modellen, zoals De Jong, 1990

Als de omstandigheden geen aanleiding geven tot condensatie, dan kan de vergelijking vereenvoudigd worden:

$$\chi_a = \frac{g_t \chi_{eff} + g_v \chi_o}{g_t + g_v} \quad (6)$$

Substitutie van vergelijking (5) in (2) geeft de vergelijking voor de gewasverdamping als functie van primaire variabelen:

$$E = \frac{g_t}{g_t + g_c + g_v} \left[(g_c + g_v) \left(\chi_a^* + \varepsilon \frac{r_b}{2LAI} \frac{R_n}{L} \right) - g_c \chi_r^* - g_v \chi_o \right] \quad (7)$$

De verzadigde dampconcentratie van de lucht is alleen afhankelijk van de luchttemperatuur en g_v (de ventilatie geleiding) van de raamstand (samen met windsnelheid en -richting). Beide hebben ook een gering effect op andere variabelen, zoals buistemperatuur of netto straling en op ε (door middel van luchttemperatuur); raamstand op grenslaag weerstand. Echter zulke tweede orde effecten zullen hier verwaarloosd worden.

Als er geen condensatie optreedt, levert substitutie van (6) in (2) een eenvoudiger vorm:

$$E = \frac{g_t g_v}{g_t + g_v} \left(\chi_a^* - \chi_o + \varepsilon \frac{r_b}{2LAI} \frac{R_n}{L} \right) \text{ oftewel } E = \frac{\chi_a^* - \chi_o + \varepsilon \frac{r_b}{2LAI} \frac{R_n}{L}}{\frac{(1 + \varepsilon)r_b + r_s}{2LAI} + \frac{1}{g_v}} \quad (8)$$

In feite volgt vergelijking (8) uit (7), als gesteld wordt dat bij

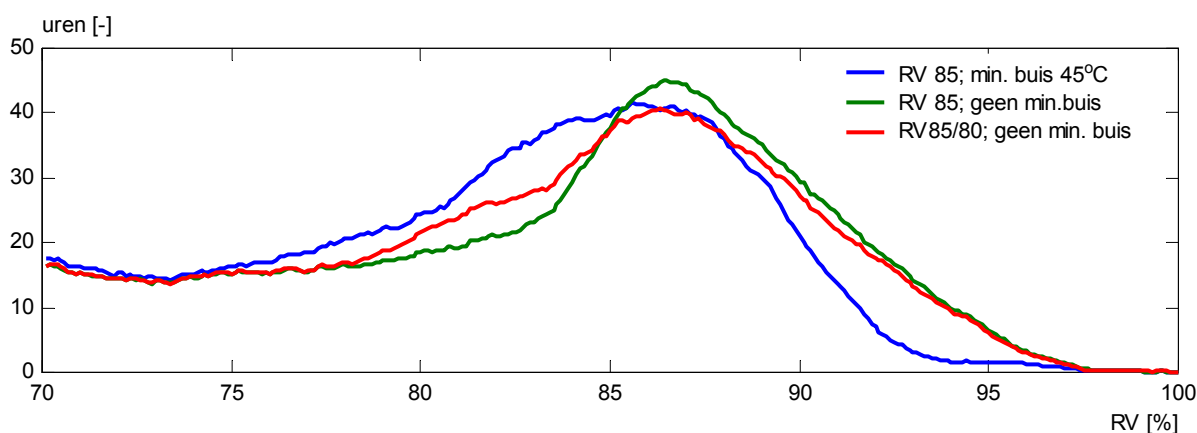
$$T_{kasdek} > T_{dauw,kaslucht} \text{ (geen condensatie)} \rightarrow g_c = 0 \quad (9)$$

Bijlage 5 Analyse van de regelingen

Standaard vochtregeling

In de praktijk wordt het vochniveau over het algemeen geregeld met een setpoint RV. Veelal wordt er ook standaard een minimumbuis temperatuur ingesteld in die periode van de dag dat de RV tot hoge of te hoge niveaus op kan lopen. Daarnaast wordt meestal het setpoint ventilatie dichterbij of zelfs onder het setpoint verwarmen gelegd. De laatste twee genoemde punten worden ook nog wel eens vervangen door een minimumraamstand. In de standaard regeling van KASPRO gaat op het vochtcriterium de luchtramen openen. In de standaard situatie (tomaat) wordt er gebruik gemaakt van een minimumbuis van 45 °C (dag en nacht) die op licht in het stralingstraject tussen 100 en 300 W.m⁻² wordt afgebouwd naar de kasluchttemperatuur. Het setpoint RV is 85 %.

Het inzetten van een minimumbuis temperatuur is een manier van vochtbeheersing die veel energie kost. Om de invloed van de minimumbuis temperatuur op het vochniveau in de kas te bestuderen is er een simulatieberekening gemaakt waarbij alle klimaatinstellingen gelijk zijn gehouden, echter de minimumbuis wordt niet meer ingezet. De gevolgen hiervan op de RV zijn in Figuur 18 als een histogram weergegeven, waarbij op de y-as het aantal uren per interval van 0.1 % RV is aangegeven. Als tweede alternatieve optie is er een berekening uitgevoerd zonder minimumbuis, maar waarbij in de nacht (tussen 3 uur voor tot 3 uur na zonsopkomst) het setpoint RV verlaagd wordt naar 80 %. De nacht is over het algemeen de periode van de dag waarbij hoge vochniveaus het gevaarlijkst zijn. Door het opstoken van de kasluchttemperatuur van nacht- naar dagtemperatuur kunnen gewasdelen, door hun traagheid bij de temperatuurverhoging, gemakkelijk natslaan.



Figuur 18 Histogram van de gerealiseerde RV bij 3 regelstrategieën waarbij op het vochtsetpoint de ventilatieramen worden geopend.

Uit de berekeningen blijkt dat het gebruik van de minimumbuis ruim 10 % extra energieverbruik geeft. Door de setpointverlaging in de nacht blijft hier nog ruim 8 % van over.

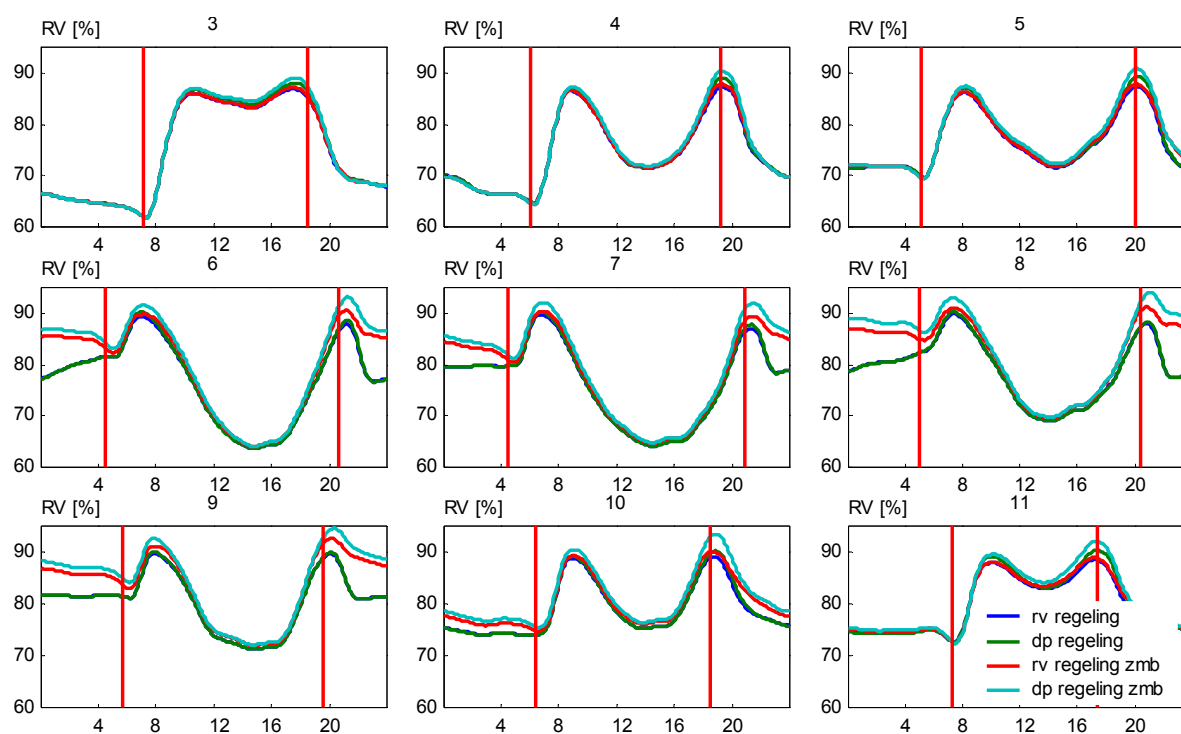
Vochtregeling op dauwpunt

Eén van de voornaamste doelen van het vochtcriterium is het voorkomen van schimmelinfecties in het gewas. Een schimmelinfectie kan optreden zodra een onderdeel van het gewas vochtig of nat is geweest. Met de vochtregeling wordt geprobeerd dit te voorkomen. In plaats van hiervoor de RV als vochtcriterium te gebruiken, kan er ook naar het dauwpunttemperatuurverschil van het gewas met de kaslucht gekeken worden. Immers indien deze gelijk zijn, zal het gewas natslaan en kan de schimmelinfectie toeslaan. In het model wordt een gewastemperatuur berekend. Dit is een gemiddelde voor de hele plant. Uit metingen is gebleken dat de plant- en luchttemperatuur zowel in verticale als horizontale richting (fors) kan variëren

(Kempkes, 1998; Esmeijer, 2000). Daarom wordt er niet alleen bij de RV als vochtcriterium, maar ook bij het dauwpunttemperatuurverschil als vochtcriterium een (ruime) marge aangehouden om op geen enkele plaats in de kas in de gevarenzone te komen. Indien het dauwpunttemperatuurverschil onder het setpoint komt, zijn er twee mogelijke regelacties verder uitgewerkt: de ramen worden geopend (is gelijk aan de in paragraaf 2.3 besproken regelactie) of het setpoint verwarmen met daarbij het setpoint ventilatie wordt verhoogd.

ramen openen

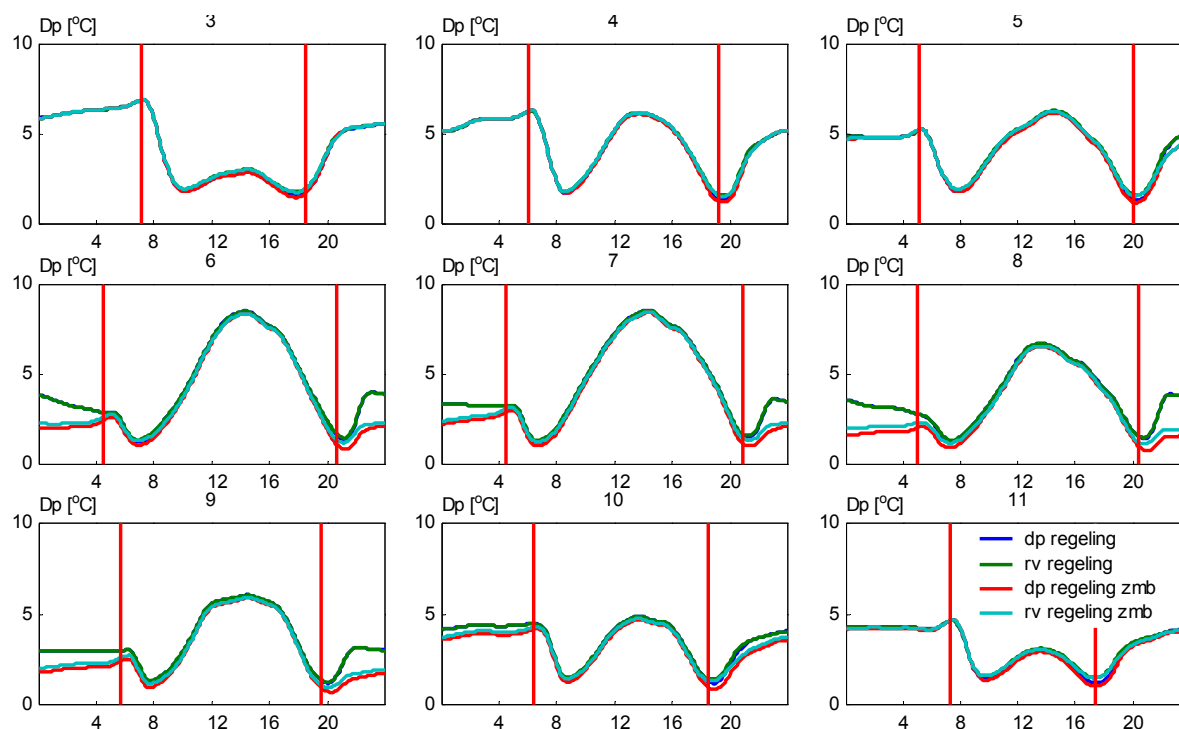
Op een tweetal criteria kunnen de luchtramen geopend worden om vocht af te voeren. Dit is het setpoint RV of het setpoint dauwpunttemperatuurverschil. Voor beiden zijn berekeningen uitgevoerd met de standaardregeling setpoint RV 85 % en jaarrond een minimumbuis van 45 °C. Het setpoint RV is bij de dauwpunttemperatuurverschil regeling vervangen door een temperatuurverschil van 2 °C tussen de gewastemperatuur en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht. Daarnaast zijn deze berekeningen ook nog herhaald maar dan zonder gebruik van een minimumbuis. In Figuur 19 en Figuur 20 zijn de resultaten weergegeven. In deze figuren is voor 9 perioden van 4 weken voor ieder uur van de dag de gemiddelde gerealiseerde RV respectievelijk het dauwpunttemperatuurverschil weergegeven zoals deze door het gebruik van deze twee regelingen zijn ontstaan. De verticale (rode) lijnen in de figuren is het gemiddelde tijdstip van zonop- en zonondergang in de betreffende periode. In Figuur 19 is de gerealiseerde RV



Figuur 19 De gemiddelde gerealiseerde RV voor ieder uur van de dag voor periode 3 tot en met 11 bij twee criteria voor de vochtregeling; RV en het dauwpunttemperatuurverschil (dp) met en zonder (zmb) inzet van minimumbuis.

weergegeven. De hoogste RV's worden enkele uren na zonop en rond zonondergang gerealiseerd. Het effect van de inzet van de minimumbuis is in de perioden 6 tot en met 10 goed te zien. Voor de warmtevraag van de kas hoeft de buistemperatuur in de nacht niet zo hoog te zijn dus zal er meer geventileerd en dus meer vocht afgevoerd gaan worden als gevolg van de verhoogde buistemperatuur. Overdag is in deze perioden bijna geen verschil te zien tussen wel of geen gebruik van de minimumbuis omdat de minimumbuis al snel op licht wordt afgebouwd. Het verschil tussen de twee regelingen is

minimaal indien ook de minimumbuis wordt gebruikt. Zonder minimumbuis is er wel wat verschil tussen de regelingen, waarbij de grootste verschillen in de namiddag rond zonondergang voorkomen. In Figuur 20 is van de zelfde berekeningen het gerealiseerde verschil in gewastemperatuur en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht (kortweg DP) weergegeven.



Figuur 20 De gemiddelde gerealiseerde Dp voor ieder uur van de dag voor periode 3 tot en met 11 bij twee criteria voor de vochtregeling; RV en het dauwpunttemperatuurverschil (DP) met en zonder (zmb) inzet van minimumbuis.

Figuur 19 is vrijwel gelijk aan Figuur 20 zij het dat zij het spiegelbeeld van elkaar zijn. Bij een kleine DP hoort een hoge RV. De verschillen in DP rond zonondergang in periode 8 en 9 zijn niet zo duidelijk als de RV op dat moment, zie Figuur 20. Dit betekent dat indien in de namiddag voor het vochtcriterium de RV wordt gebruikt, er eerder op vocht geventileerd zal gaan worden dan bij het DP als vochtcriterium. In Tabel 7 zijn enkele gerealiseerde jaarrond gemiddelde waarden weergegeven.

Het grote verschil in het aantal uren overschrijding van het RV setpoint en het DP setpoint bij de berekening "DP regeling zonder minimumbuis" kan er op duiden dat het gekozen setpoint (2 °C) niet goed is, of dat de ramen niet sterk genoeg reageren op een overschrijding van het setpoint. Met andere woorden de versterkingsfactor verhogen. Deze is nu ingesteld op 1.

Tabel 7 Gemiddelde gerealiseerde klimaat variabelen bij twee criteria voor de vochtregeling; RV en het dauwpunttemperatuurverschil (DP) met en zonder (zmb) inzet van minimumbuis.

	RV regeling min. buis 45 °C	DP regeling min. buis 45 °C	RV regeling min. buis 0 °C	DP regeling min. buis 0 °C
T kas [°C]	18.9	19.0	18.7	18.7
RV [%]	73.4	73.6	74.5	75.1
verdampingssom [l.m ⁻²]	699	694	673	653
dauwpunttemperatuur kaslucht [°C]	13.8	13.9	13.7	13.9
gewastemperatuur [°C]	18.6	18.6	18.3	18.4
gasverbruik [m ³ .m ⁻² .a ⁻¹]	54.7	53.8	49.5	46.7
raamstand lijzijde	17.4	16.9	15.8	14.1
raamstand geopend op vochtcriterium	1.8	0.3	3.0	0.5
raamstand loefzijde	4.5	4.5	4.3	4.3
uren overschrijding RV setpoint	2215	2241	2993	3083
uren overschrijding DP setpoint	1719	1812	2340	2731

verhogen setpoint verwarmen

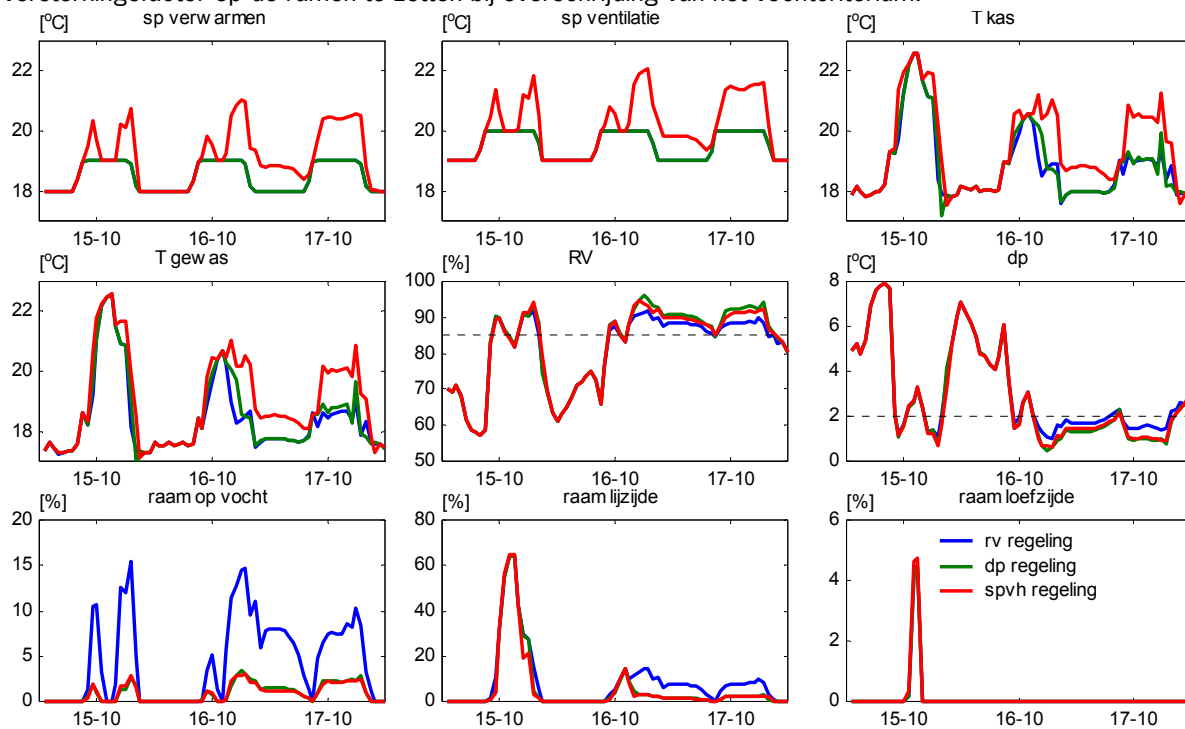
Als alternatief voor het openen van de luchtramen bij overschrijding van het vochtcriterium, kan ook de setpointtemperatuur van de kaslucht verhoogd worden. Dan immers, zal de dauwpunttemperatuur van de kaslucht gaan stijgen. Om dit te realiseren, is in het model de setpoint berekening aangepast. Hierdoor wordt het setpoint verwarmen en tegelijkertijd het setpoint ventilatie lineair verhoogd (tot maximaal 3 °C) in het traject 2 tot 0 °C van het temperatuurverschil tussen het gewas en de dauwpunttemperatuur van de kaslucht. Daarnaast blijven de luchtramen op het vochtcriterium (DP) op gelijke manier openlopen als bij de “ramen openen” zoals in de vorige paragraaf beschreven. In Tabel 8 zijn de belangrijkste resultaten weergegeven.

Tabel 8 Gemiddelde gerealiseerde klimaatvariabelen bij het verhogen van het setpoint verwarming en ventilatie, indien het dauwpunttemperatuurverschil (DP) onder het setpoint daalt bij de standaard instellingen, met temperatuurintegratie en met temperatuurintegratie zonder minimumbuis.

	setp. verhoging op DP.; geen TI min. buis 45 °C	setp. verhoging op DP.; geen TI min. buis 0 °C	setp. verhoging op DP.; met TI min. buis 45 °C	setp. verhoging op DP.; met TI min. buis 0 °C
T kas [°C]	19.1	19.0	18.9	18.7
RV [%]	73.6	74.9	74.2	76.0
verdampingssom [l.m ⁻²]	694	665	680	638
dauwpunttemperatuur kaslucht [°C]	14.0	14.1	13.9	14.1
gewastemperatuur [°C]	18.8	18.6	18.6	18.4
gasverbruik [m ³ .m ⁻² .a ⁻¹]	54.2	48.7	51.7	43.7
raamstand lijzijde	16.4	13.8	16.5	12.3
raamstand geopend op vochtcriterium	0.3	0.5	0.3	0.6
raamstand loefzijde	4.5	4.4	5.1	3.7
uren overschrijding RV setpoint	2186	3044	2468	3433
uren overschrijding DP setpoint	1787	2668	2128	3076

Bij vergelijking van de resultaten uit Tabel 8 (eerste kolom) met die van Tabel 7 (tweede kolom) blijkt dat het gerealiseerde klimaat vrijwel gelijk is. Door de setpoint verhoging zal er wat warmer geteeld gaan worden. Om dit te voorkomen is vervolgens temperatuurintegratie (TI) ingezet. Voor enkele specifieke dagen (met een kleine DP c.q. hoge RV, zijn de twee regelingen vergeleken. Hiervoor zijn de gegevens gebruikt van de raamregeling op vocht zonder minimumbuis (kolom 3 en 4 van Tabel 7) en de setpointverhoging zonder

minimumbuis en zonder TI (kolom2 van Tabel 8). In Figuur 21 is het grafisch verloop van enkele gerealiseerde variabelen in de periode 15 tot 17 oktober, een vochtige periode, voor drie vochtregelingen zonder minimumbuis en TI; raam openen op RV, raam openen op DP en het setpoint verwarmen en ventileren verhogen op DP weergegeven. De stippellijn in de RV en DP grafiek zijn de respectievelijke setpoints. Op de eerste dag wordt er in alle drie de regelingen zo sterk op temperatuur geventileerd, dat deze de ventilatie op vocht overruled. Uit de figuur blijkt ook dat de DP en SP regeling achterblijft bij de RV regeling met betrekking tot gerealiseerde RV en DP. Dit kan mogelijk verbeterd worden door een versterkingsfactor op de ramen te zetten bij overschrijding van het vochtcriterium.



Figuur 21 Grafisch verloop van enkele gerealiseerde variabelen in de periode 15 tot 17 oktober voor drie vochtregelingen zonder minimumbuis en TI; raam openen op RV, raam openen op DP en het setpoint verwarmen en ventileren verhogen op DP.