



Energiebesparing door aangepaste vochtregulatie

Bert Houter¹, Arie de Gelder¹, Edwin Rijpsma¹, Martijn Roos¹, Pim Paternotte¹ en
Feije de Zwart²

¹ PPO Glastuinbouw

² A&F

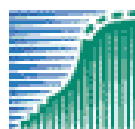
© 2004 Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

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

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V. is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Dit onderzoek is gefinancierd vanuit:

- Energieprogramma PT/LNV
- Onderzoeksprogramma's Systeeminnovaties plantaardige productiesystemen van Wageningen UR.
De cluster van onderzoeksprogramma's wordt gefinancierd door LNV



**landbouw, natuur en
voedselkwaliteit**

Projectnummer: 416.16017

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Sector Glastuinbouw

Adres : Kruisbroekweg 5, 2671 KT Naaldwijk
: Postbus 8, 2670 AA Naaldwijk
Tel. : 0174 – 63 67 00
Fax : 0174 – 63 68 35
E-mail : infoglastuinbouw.ppo@wur.nl
Internet : www.ppo.wur.nl

Inhoudsopgave

pagina

SAMENVATTING.....	5
TUINDERSAMENVATTING	7
1 INLEIDING	11
1.1 Aanleiding	11
1.2 Doelstelling	11
1.3 Projectinvulling	11
2 MATERIAAL EN METHODE	12
2.1 Kascomplex	12
2.2 Teelt.....	12
2.3 Infectiedruk van <i>Botrytis</i>	13
2.4 Meetapparatuur	13
2.4.1 Algemeen.....	13
2.4.2 Meetboxen	13
2.4.3 CO ₂ -meting.....	14
2.4.4 IR-planttemperatuursensoren	14
2.4.5 Weeggoten.....	14
2.5 Behandelingen.....	15
2.5.1 Klimaatbehandelingen	15
2.5.2 Moment van bladplukken	17
2.6 Klimaatregeling.....	17
2.6.1 Overzicht	17
2.6.2 Temperatuurregeling.....	17
2.6.3 Vochtregeling op berekende RV_{vrucht}	17
2.6.4 Vochtkeerregeling in scherm.....	18
2.6.5 Minimum raamregeling	18
2.6.6 Minimum buisregeling.....	18
2.6.7 CO ₂ -regeling	19
2.6.8 Schermregeling	19
2.7 Watergift en bemesting	19
2.8 Gewaswaarnemingen	19
2.9 Energieberekening	19
2.10 Simulatie	20
2.11 Dataregistratie en -verwerking.....	20
3 RESULTATEN	21
3.1 Regelen op berekende RV_{vrucht}	21
3.2 Ingesteld kasklimaat	21
3.2.1 Klimaatinstellingen	21
3.2.2 Temperatuurintegratie.....	21
3.3 Gerealiseerd kasklimaat	22
3.3.1 Geselecteerde perioden	22
3.3.2 Gerealiseerd klimaat in periode 1	22
3.3.3 Gerealiseerd klimaat in periode 2.....	23
3.3.4 Gerealiseerd klimaat in periode 3.....	24
3.3.5 Gemiddeld dagverloop over periode	25
3.4 Planttemperatuur	29
3.5 Gewasverdamping	31
3.6 Gewas	31

3.6.1	Productie en kwaliteit	31
3.6.2	<i>Botrytis</i>	32
4	ANALYSE	34
5	SIMULATIEBEREKENINGEN MET KASPRO	43
5.1	Opzet	43
5.2	Simulatie van experiment.....	43
5.2.1	Uitgangspunten	43
5.2.2	Simulatieresultaten	43
5.3	Simulatie van jaarrond.....	44
5.3.1	Uitgangspunten	44
5.3.2	Resultaten van simulatie van vochtbehandelingen	45
5.3.3	Resultaten van simulatie van praktijkregeling en vergelijking met vochtbehandelingen.....	46
6	DISCUSSIE	48
7	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	52
7.1	Conclusies	52
7.2	Aanbevelingen voor de praktijk.....	52
8	BRONVERMELDING	54
	BIJLAGE 1 KLIMAATINSTELLINGEN	55
	BIJLAGE 2 GEREALISEERD KLIMAAT IN PERIODE 1.....	57
	BIJLAGE 3 GEREALISEERD KLIMAAT IN PERIODE 2.....	59
	BIJLAGE 4 GEREALISEERD KLIMAAT IN PERIODE 3.....	61
	BIJLAGE 5 PRODUCTIE EN KWALITEIT	63
	BIJLAGE 6 <i>BOTRYTIS</i> AANTASTINGEN.....	65
	BIJLAGE 7 BEREKENING VAN AARDGASVERBRUIK.....	66

Samenvatting

Het project *Energiebesparing door aangepaste vochtregulatie* had tot doel de ontwikkeling van een energie-efficiënte strategie voor het geïntegreerde gebruik van minimum buis, minimum raam en doekstand. Daarvoor is in het najaar van 2003 een proef bij PPO uitgevoerd met tomaat met 4 verschillende vochtstrategieën bestaande uit de combinatie van 2 vochtgrenzen (vochtregulatie vanaf 85 of 91 % RV) en het al dan niet toepassen van een vochtafhankelijke minimum buis. De gebruikte luchtvochtigheid in de regeling was gebaseerd op de RV bij de berekende vruchttemperatuur.

De resultaten lieten zien dat de toegepaste vochtregulatie bestaande uit eerst een vochtafhankelijke vochtkier in het scherm (maximum 4 %), gevolgd door een vochtafhankelijke minimum raamstand en tot slot een vochtafhankelijke minimum buistemperatuur een efficiënte regelstrategie is om te voorkomen dat de luchtvochtigheid in de kas te veel opliep. Hierbij wordt de vochtafvoer door condensatie op een koud kasdek zo veel mogelijk bevorderd. Vaste schermkieren, vaste minimum raamstanden of vaste minimum buistemperaturen zijn niet toegepast. Verder werd de verdamping niet extra gestimuleerd.

Bij de toegepaste vochtregulatie werd geregeld op basis van de luchtvochtigheid bij de traag opwarmende vruchten. Dit bleek een energie-efficiënte wijze te zijn. Doordat bij het regelen op de luchtvochtigheid van de vruchten alleen op moment dat het moet ook daadwerkelijk actie wordt ondernomen, kan het vochniveau enkele procenten hoger liggen dan als op de luchtvochtigheid van de kaslucht vocht wordt geregeld. Simulatiere resultaten gaven aan dat afhankelijk van het toegepaste vochniveau op jaarbasis 13 tot 35 % energie bespaard kon worden ten opzichte van een praktijkregeling (geschermd teelt met jaarverbruik van 51 m³/m²) en dat bij de toegepaste vochtregulatie minder kans op natslag was. De toegepaste vochtregulatie is eenvoudig van opzet en sluit aan bij de regelingen en instelmogelijkheden van de moderne klimaatcomputers.

De toegepaste vochtgrenzen hebben in het najaar niet geleid tot grote problemen met *Botrytis*, ondanks dat door het inbrengen van *Botrytis* sporen de infectiedruk in de afdelingen was opgevoerd. Wel nam aan het einde van de teelt bij alle behandelingen de aantasting door *Botrytis* in dezelfde mate toe. Of de vochtgrenzen ook in de praktijk jaarrond verhoogd kunnen worden zonder grote problemen met *Botrytis*, hangt af van teelthandelingen, watergeefstrategie, aanwezige infectiedruk en duur tot einde van teelt.

In het uitgevoerd onderzoek leidde het moment van blad snijden, vroeg (voor 9:30 uur) of laat (na 15 uur), niet tot duidelijk meer of minder *Botrytis*. Hierbij moet worden aangetekend dat er een flinke spreiding was in de mate van aantasting tussen de behandelingen en binnen de afdelingen.

Tuindersamenvatting

Inleiding

Beheersing van de luchtvochtigheid in kassen draagt voor 10 tot 25 % bij aan het totale energiegebruik van kassen. Te hoge luchtvochtigheid in de kas verhoogt ondermeer de kans op (schimmel)ziekten. Door een vochtkier in het scherm wordt vocht afgevoerd uit de teeltruimte onder het scherm. Door een minimum raamstand wordt actief vocht afgelucht. Door warmte van buizen neemt de kasluchttemperatuur toe, waardoor de luchtvochtigheid daalt. Maar door de warmte van buizen wordt wel de verdamping gestimuleerd. Dit vergt meer inzet van energieverpillende acties. Daarom heeft het PPO een energie-efficiënte vochtregulatie ontwikkeld met een juiste afstemming tussen minimum buis, minimum raam en doekstand om de verdamping niet te stimuleren en om de afvoer van vocht tegen een koud kasdek te bevorderen.

Vochtregulatie

Het uitgangspunt binnen de ontwikkelde vochtregulatie is om het scherm zo lang mogelijk te gebruiken. Daarmee wordt energie bespaard. Dreigt de luchtvochtigheid te hoog op te lopen of er treedt condensvorming op het schermdoek op, begin dan zeer voorzichtig een kier in het schermdoek te trekken. Neem bij voorkeur steeds stappen van 0.3 tot 0.5 % en wacht minimaal 5 tot 10 minuten voordat de volgende stap wordt genomen. Door de geringe kier blijft het energieverlies beperkt en blijft het kasdek koud. Des te kouder het kasdek, des te langer er condensvorming op het kasdek plaatsvindt. Door deze voorzichtige kierregeling wordt voorkomen dat opeens te veel gekierd wordt en dat de verwarmingsregeling onrustig wordt. Een onrustige verwarmingsregeling is in het algemeen niet energie-efficiënt. Als bij een vochtkier in het scherm van 3 tot 4 % de luchtvochtigheid nog te hoog is, kan een vochtafhankelijke minimum raamstand worden toegepast. Daarmee wordt vocht door ventilatie afgevoerd. Indien de luchtvochtigheid in de kas daarna nog steeds te hoog is, kan ten slotte een vochtafhankelijke minimum buis worden ingezet.

In het najaar van 2003 heeft PPO deze strategie bij een jaarrond tomatenteelt uitprobeerde. Doelbewust is gekozen voor het najaar, omdat dan de vochtproblemen door een hogere buitenluchtvochtigheid het grootst zijn. In de kas was een Phormium Super vochtdoorlatend scherm geïnstalleerd. Dit onderzoek is met succes uitgevoerd. Vaste schermkieren, vaste minimum raamstanden en vaste minimum buizen zijn niet toegepast. Verder werd de verdamping niet extra gestimuleerd.

Waarop vocht regelen?

Vochtproblemen zullen het eerste optreden op de koudste plantendelen. Bij bijvoorbeeld tomaat, komkommer en paprika zijn het de vruchten die 's morgens in de periode van opstoken kouder zijn dan de kaslucht. Door een eenvoudig condensatiemodel is te berekenen wat de luchtvochtigheid bij de vruchten is. De temperatuur van de vruchten ijlt na op de temperatuur van de kaslucht (zie figuur A). Daarom is de relatieve luchtvochtigheid bij de vruchten 's morgens in het algemeen hoger dan de relatieve luchtvochtigheid van de kaslucht. Bij de voorbeelddag stijgt de RV bij de vruchten tot 100 %, terwijl de RV van de kaslucht niet boven de 90 % uitkomt (zie figuur B). In de namiddag en avond blijven de vruchten langer warm dan de kaslucht, waardoor de RV bij de vruchten juist lager is dan die van de kaslucht. Op dat moment hoeft de minimum buis voor vocht niet of nauwelijks geactiveerd te worden. Dan valt er in ieder geval energie te besparen. Voor vruchtgroenten is de RV bij de vruchten een goede parameter om vocht op te regelen. Voor de sierteeltgewassen moet nog een methode worden ontwikkeld om de RV bij die plantendelen te meten of te berekenen waar de kans op vochtproblemen het grootst is. Een probleem bij bijvoorbeeld roos of gerbera is dat de bloem boven het gewas uitsteekt en daardoor warmte uitstraalt naar het kasdek. Bij weinig of geen instraling of belichting zal de bloem kouder zijn dan de kaslucht. De condensvorming zal daardoor als eerste op de bloemen optreden. Overigens maakt het voor de eerder

beschreven wijze van vochtregulatie niet uit waarop geregeld wordt, kasluchtvochtigheid of luchtvochtigheid bij de plantendelen.

Welk vochniveau?

In de proeven in het najaar zijn 2 vochniveaus aangehouden, *Normaal* waarbij boven een RV van 85 % de vochtregelingen geactiveerd werden en *Hoog* waarbij boven een RV van 91 % actie werd ondernomen (zie tabel). Daarnaast is er een onderscheid gemaakt tussen het al dan niet toepassen van een vochtafhankelijke minimum buis. In dit onderzoek is geregeld op de RV bij de vruchten. Dit verliep succesvol. De aantasting van Botrytis bleef binnen de perken. Eind oktober was slechts 2 % van de planten uitgevallen. Om een indicatie van het jaarrond energiegebruik te krijgen zijn bij deze vochniveaus met de eerder beschreven vochtregulatie door A&F simulaties uitgevoerd met een kasklimaatmodel. Het blijkt dat met het aanhouden van een 6 % hoger vochtregime circa 10 m³ aardgas per m² per jaar bespaard kan worden. Verder zien we dat de totale verdamping met bijna 10 % afneemt. Het model berekende ook de momenten van natslag op de vruchten. In figuur B geeft zo'n moment weer. De kans op natslag wel neemt toe bij een hoger vochniveau. Er zijn zichtbaar momenten dat het vocht niet snel genoeg afgevoerd kon worden.

Doordat bij het regelen op de RV bij de vruchten alleen op moment dat het moet ook daadwerkelijk actie wordt ondernomen, kan het vochniveau enkele procenten hoger liggen dan als op de RV van kaslucht vocht geregeld wordt. Verder geldt dat des te gelijkmatiger de temperatuurverdeling in de kas is, de verschillen in luchtvochtigheid ook geringer zullen zijn. Daardoor kunnen hogere streefwaarden voor luchtvochtigheid worden aangehouden.

Vergelijking met praktijkregeling

Bij de simulatiestudie zijn ook 2 praktijksituaties doorgerekend waarbij op kaslucht RV geregeld werd. In de ene praktijksituatie wordt uitgegaan van een kas met scherm en van de andere zonder gebruik van scherm (zie tabel). De praktijkregeling bestond uit een minimum buisregeling van 30 tot 50 °C die stralingsafhankelijk werd afgebouwd. Een minimum raam kwam in bij een RV boven de 80 % mits het buiten warmer was dan 5 °C. Het scherm werd gesloten als de buitentemperatuur lager was dan 8 °C, dit in tegenstelling tot de 10 °C bij de PPO-proef.

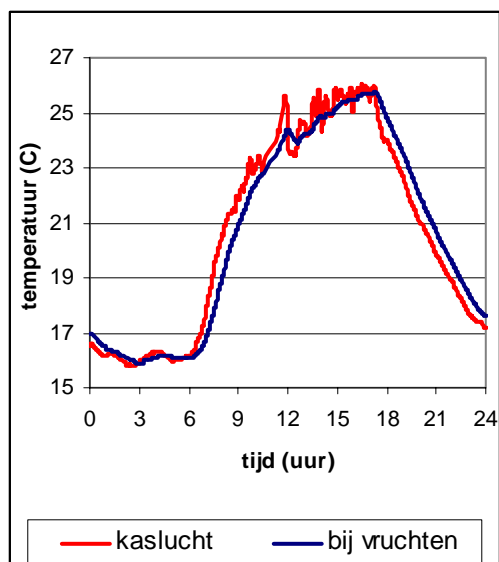
De resultaten geven aan dat bij de praktijksituatie aanzienlijk meer energie nodig is en dat het gewas meer verdampt. Wat verder opvalt, is dat ondanks het aanzienlijk hogere energiegebruik en lagere vochtstreefwaarde er meer uren natslag zijn berekend. Blijkbaar wordt de minimum buis in deze praktijksituatie niet altijd op het juiste moment ingezet. Ook het stimuleren van de verdamping kan de vochtproblemen hebben vergroot.

Conclusie

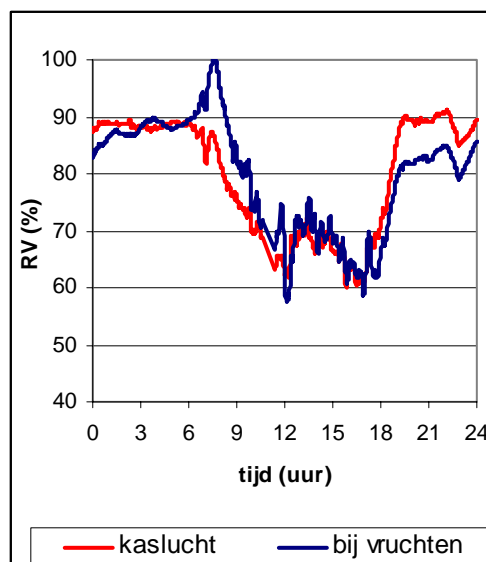
Het kasonderzoek en de simulatiestudie geven aan dat een laag aardgasverbruik niet automatisch een grotere kans op natslag tot gevolg heeft. De ontwikkelde vochtregulatie bestaande uit eerst vochtafhankelijke vochtier in scherm, gevolgd door een vochtafhankelijke minimum raam en daarna pas een vochtafhankelijke minimum buis blijkt energie-efficiënt te zijn. Door op de RV bij de vruchten vocht te regelen kan een iets hoger vochniveau worden aangehouden. In de kasproef bleek dat het sluiten van het scherm onder de 10 °C buitentemperatuur geen problemen geeft.

De toegepaste vochtregulatie is eenvoudig van opzet en sluit aan bij de regelingen en instelmogelijkheden van de moderne klimaatcomputers. Deze strategie kan voor het gehele etmaal hetzelfde worden ingevuld. Daarmee is de kans op foutieve of conflicterende instellingen geringer.

De energiebesparing die uiteindelijk bereikt wordt, is afhankelijk van (1) de wijze van vochtregelen, (2) het gegeven waarop vocht geregeld wordt – RV van kaslucht of RV bij vruchten – en (3) het niveau waarop vocht geregeld wordt. Het bij voorbaat inzetten van een minimum buis is soms erger dan de kwaal, omdat een minimum buis de verdamping van het gewas verhoogt.



Figuur A: Verloop van kasluchttemperatuur met de daarop najlende vruchttemperatuur.



Figuur B: Verloop van RV van kaslucht en RV bij vruchten.

Tabel: Jaarrond simulatie van aardgasverbruik, verdamping en natslag van de ontwikkelde vochtregulatie in vergelijking met een praktijkregeling.

Behandeling	traject vochtafh. vochtier in scherm van 0 tot 4 %	traject vochtafh. minimum raamstand van 0 tot 40 %	traject vochtafh. minimum buis van 0 tot 40 °C	aardgasverbruik (m ³ /m ²)	verdamping (l/m ²)	natslag (uren)
Normaal - MB	85 tot 89 %	90 tot 94 %	geen	41.5	714	179
Normaal + MB	85 tot 89 %	90 tot 94 %	98 tot 100 %	44.2	725	149
Hoog - MB	91 tot 95 %	96 tot 100 %	geen	32.9	655	189
Hoog + MB	91 tot 95 %	96 tot 100 %	98 tot 100 %	33.9	662	174
praktijk + scherm		praktijkregeling		51.0	760	216
praktijk - scherm		praktijkregeling		57.4	762	242

toelichting:

Normaal = normaal vochniveau
Hoog = hoog vochniveau

- MB = zonder minimum buis
+ MB = met minimum buis

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De beheersing van de luchtvochtigheid draagt voor 10 tot 25 % bij aan het totale energiegebruik van kassen (Stanghellini *et al.*, 2003). Te hoge luchtvochtigheid in de kas verhoogt de kans op (schimmel)ziekten. Daarnaast wordt de verdamping geremd wat de opname van bepaalde voedingselementen kan belemmeren. In de praktijk worden daarom geforceerd vaste minimum buistemperaturen of vaste minimum raamstanden aangehouden. Echter door de warmte van de buizen wordt de verdamping gestimuleerd. Dit vergt meer inzet van energieverspillende acties. Op een koud kasdek wordt door condensatie vocht afgevoerd. Meestal zijn enkele procenten kier in het schermdoek al voldoende om vocht af te voeren (Kempkes *et al.*, 2000). Bij te veel kieren wordt ook te veel warmte afgevoerd. Die warmte moet weer door de buizen worden geleverd, wat weer de verdamping stimuleert.

1.2 Doelstelling

Het project heeft tot doel de ontwikkeling van energie-efficiënte strategie voor het geïntegreerde gebruik van minimum buis, minimum raam en doekstand om de verdamping niet te bevorderen en om de afvoer van vocht tegen een koud kasdek te stimuleren.

1.3 Projectinvulling

Naar aanleiding van de onderzoeken van Kempkes *et al.* (2000) en Stanghellini *et al.* (2003) is voor de volgende opzet van de vochtregulatie gekozen:

- Zo veel mogelijk gebruik maken van het scherm;
- Stimuleren van vochtafvoer door condensatie op koud kasdek. Daarom geen grote vochtkier toepassen;
- Om te hoge luchtvochtigheden te vermijden als eerste een vochtafhankelijke vochtkier in scherm inzetten (geen vaste kier);
- Vervolgens een vochtafhankelijke minimum raamstand toepassen (geen vaste minima !);
- Pas als vochtafhankelijke minimum raamstand niet meer toereikend is, wordt een vochtafhankelijke minimum buistemperatuur ingezet (geen vaste minimum buis !).

De vochtregelingen van vochtkier, minimum raam en minimum buis zijn op basis van de RV bij de koudste delen van de plant, zoals in de PPO-experimenten in de praktijk door De Graaf is gedaan (Visser, 2003). De regelingen zullen eenvoudig van opzet zijn, zodat een snelle overname door de praktijk mogelijk is.

De toelaatbare vochtgrenzen zullen hoger zijn dan in de praktijk gangbaar zijn, specifiek met het doel om die bovengrens op te zoeken. Als voorbeeldgewas is tomaat genomen, omdat hiervan een volgroeid gewas beschikbaar was. Om inzicht te krijgen in het effect van het moment van bladplukken (verwijderen van oude bladeren van onder uit het gewas) op *Botrytis* aantasting zullen vroeg en laat bladeren worden verwijderd.

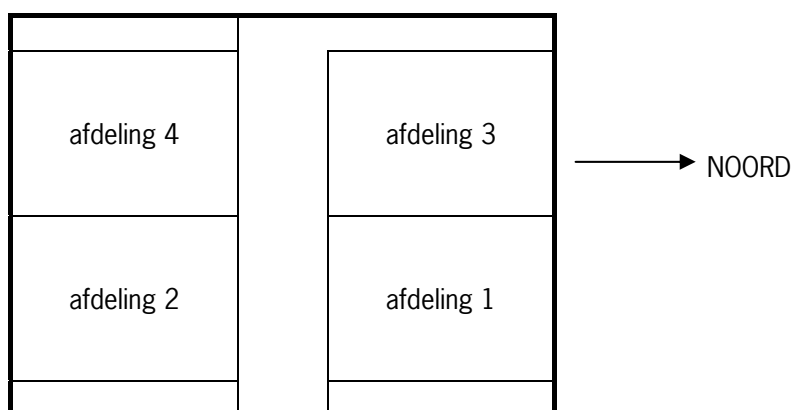
Verder zullen van diverse locaties de planttemperatuur worden bepaald.

2 Materiaal en methode

2.1 Kascomplex

De experimenten zijn uitgevoerd in kas 112 van het PPO in Naaldwijk (zie Figuur 1). Dit complex is opgebouwd uit 4 identieke afdelingen van 156 m² uitgerust met een buisrail van 2 buizen van 51 mm per 1.60 m en een groeiverwarming (hijsv verwarming van 1 buis van 27 mm per 1.60 m). Verder was een vochtdoorlatend Phormium Super scherm geïnstalleerd. Dit is een gewezen acryldoek met een lichtdoorlatendheid van 85 % en levert volgens de leverancier een energiebesparing van 45 % in gesloten toestand op. Ter voorkoming van te veel vocht afvoer op de buitengevels, bestaande uit enkel glas, is op 2 oktober 2003 een gesloten folie bevestigd.

De groeibuis werd alleen in begin van de teelt op 1.5 m hoogte actief gebruikt. Daarna is de buis op een hoogte van 0.5 m bevestigd, waarbij de buis alleen als aanvulling op het hoofdnet is gebruikt.



Figuur 1 Oriëntatie van afdelingen en corridors van kas 112.

2.2 Teelt

In alle afdelingen werd het losse tomaattype cv Aromata geteeld. De teelt is op een normale tijd gestart voordat de behandelingen van het experiment zijn aangebracht. Deze planten waren op 16 november 2002 gezaaid en op 10 december 2002 in de kas neergezet. De plantdichtheid was 2.5 planten per m². Op 7 januari 2003 werden de planten op het gat gezet om te bewortelen in de steenwol mat in een libra-bak met 4 plantrijen per kap van 3.20 m (dus geen V-systeem). De eerste trossen werden gebeugeld. Bij één op de drie planten werd half maart een extra stengel aangehouden. Vanaf 17 maart is er 2 tot 3 maal per week geoogst. Op 25 september is de kop uit het gewas gehaald. De teelt werd op 6 november 2003 beëindigd.

Leeggeplukte trossen zijn tot juli steeds van de plant afgetrokken. Wekelijks is blad gesneden. Gewasresten zijn steeds na de gewashandelingen uit de afdelingen verwijderd.

De teelt werd begeleid door de heer J. Mulder namens de tomatencommissie. Eens in de 1 tot 2 weken werd daarbij samen met de bedrijfsleider en gewasonderzoeker tomat de temperatuurstrategie voor verwarming en ventilatie bijgesteld. De stand van het gewas was daarbij uitgangspunt voor het temperatuurregime.

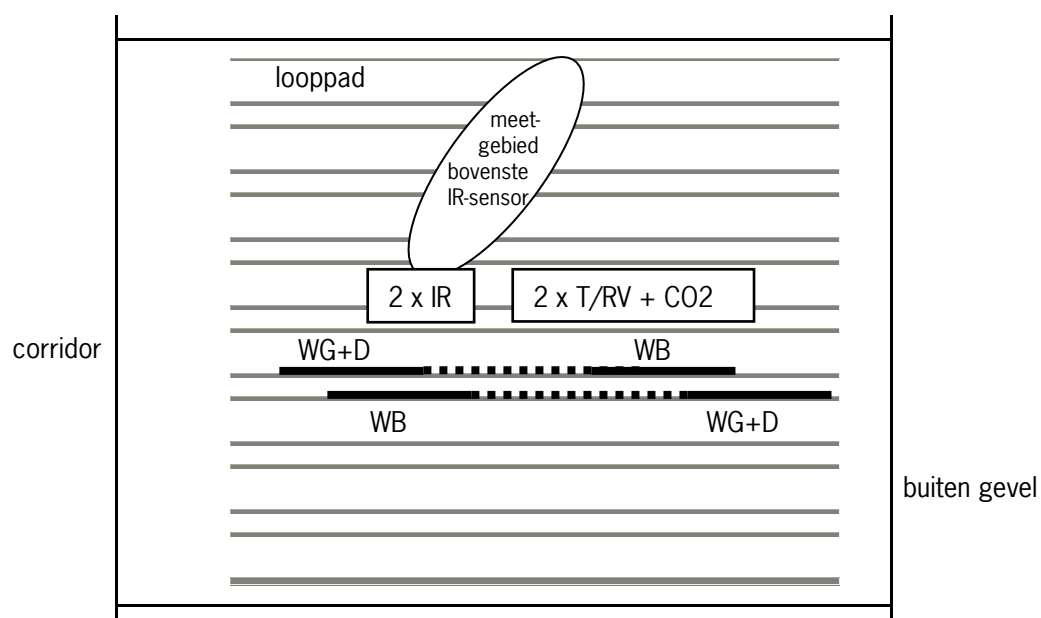
2.3 Infectiedruk van *Botrytis*

Om er zeker van te zijn dat in de afdelingen voldoende *Botrytis* sporen aanwezig waren, zijn de planten op 23 en 29 september 2003 kunstmatig besmet met *Botrytis* door laat in de middag een sporensuspensie in de kas te spuiten. Er is per keer 2 liter suspensie per afdeling verspoten. De sporenc concentratie was op 23 september 5000 sporen per ml en op 29 september 75000 sporen per ml.

2.4 Meetapparatuur

2.4.1 Algemeen

In iedere afdeling was dezelfde meetapparatuur geïnstalleerd (zie Figuur 2).



Figuur 2 Indeling van afdeling met meetapparatuur.

Toelichting:

- Per afdeling 8 looppaden tussen de dubbele plantrijen.
- Per afdeling 2 meetboxen met temperatuur- en RV-meting. Verder een CO₂-aanzuigpunt.
- De beide IR-planttemperatuursensoren waren naar het noordwesten gericht ter voorkoming van directe instraling van de zon in de lens. Aangegeven is het meetgebied van de bovenste sensor. Deze sensoren zijn boven elkaar bevestigd (zie ook Figuur 3).
- WG+D is een weeggoet met drainmeting; WB is weegbalk. Met de stippellijn is aangegeven dat de WB het hangend plantgewicht meet van de planten die beworteld zijn in de matten van de WG. Zie ook paragraaf 2.4.5.

2.4.2 Meetboxen

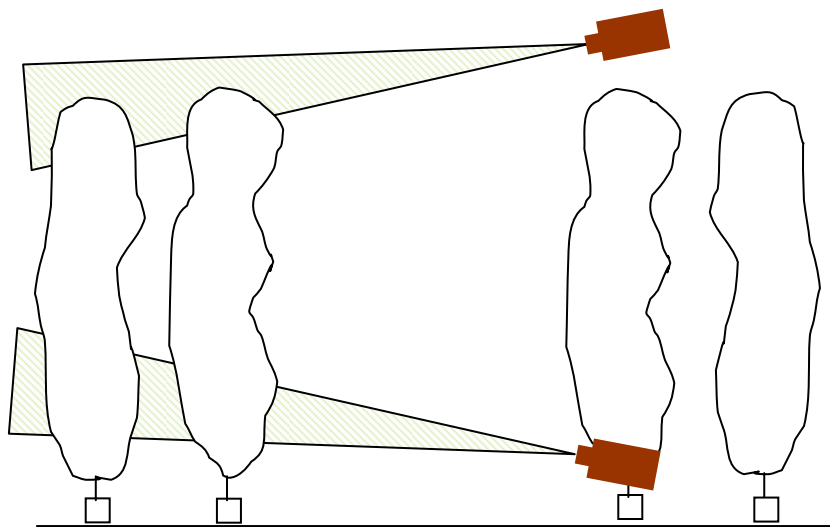
In elke afdeling is de temperatuur en luchtvochtigheid van de kaslucht met 2 meetboxen met droge en natte bol bepaald. Deze meetboxen hingen op vergelijkbare hoogte tussen het gewas. Het klimaat is geregeld op het gemiddelde van beide meetboxen.

2.4.3 CO₂-meting

De CO₂-meting vond plaats met een centrale CO₂-meter op een multiplexer die lucht uit de 4 afdelingen zoog.

2.4.4 IR-planttemperatuursensoren

In elke afdeling zijn 2 IR-planttemperatuursensoren van het type Brinkman geïnstalleerd. Deze sensoren zijn gangbaar in de glastuinbouw. De ene sensor was circa 25 tot 50 cm boven de kop van het gewas bevestigd en schuin op de kop van het gewas gericht. Het oppervlak dat daarbij dan werd bemeaten was 0.40 tot 1.50 m² (handleiding Brinkman Tuinbouw Techniek, 2004). De andere sensor was op een hoogte van circa 40 cm vanaf het grondoppervlak schuin omhoog gericht. Deze sensor mat daarmee de temperatuur onderin het gewas.

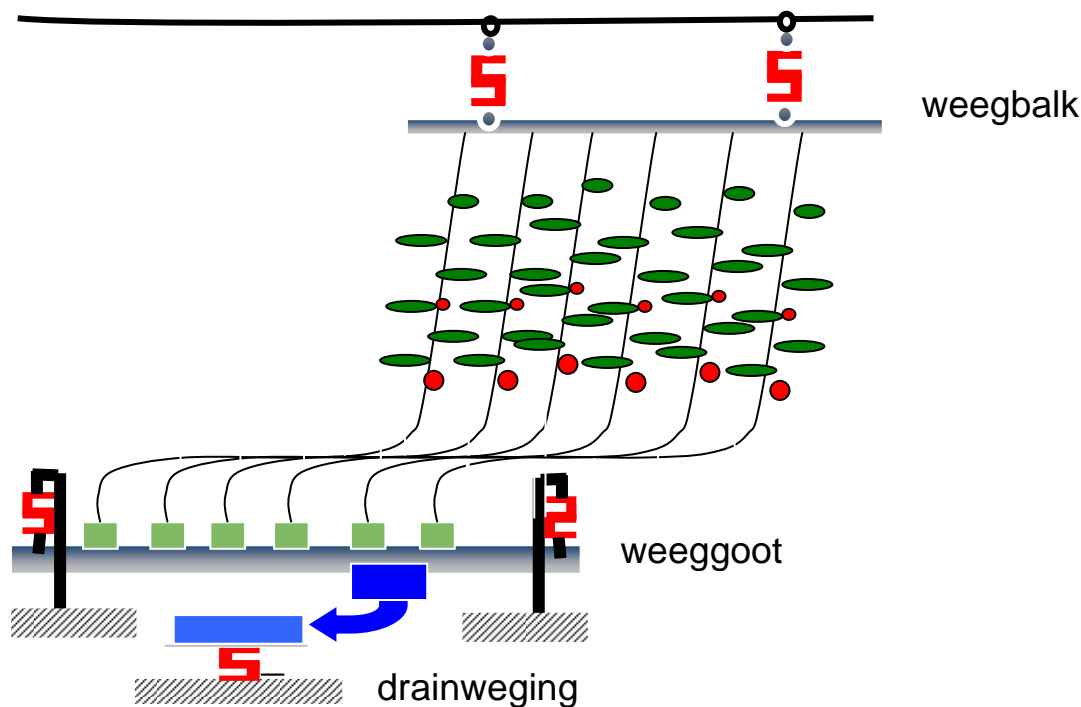


Figuur 3 Schematisch overzicht van IR-planttemperatuursensoren, zowel van onder als van boven op het gewas gericht.

2.4.5 Weeggoten

In elke afdeling zijn 2 weeggootinstallaties geïnstalleerd, aan beide zijden van de gewasrij een installatie. Daarmee konden effecten van west- en oostrij (zon of schaduw afhankelijk van het moment op de dag) afzonderlijk worden vastgesteld en eventueel worden weggemiddeld.

De installaties bestonden uit een weeggoot met daarop 6 planten, zie Figuur 4. Van deze goot werd continu het gewicht bepaald. De drain uit deze goot werd ook met een weeginstallatie bepaald. Verder hingen de 8 stengels van deze 6 planten aan een weegbalk. Omdat de stengels van de tomatenplanten steeds langer werden, werd periodiek de weegbalk verschoven. Hingen de planten aan het begin van de teelt recht boven de weeggoot aan het begin van de gewasrij, aan het einde van de teelt hingen de planten aan het einde van de gewasrij.



Figuur 4 Schematisch overzicht van weegopstelling.

Van de weeginstallaties kunnen continue gegevens van watergift, drain, verdamping en groei worden afgeleid. De weeginstallaties waren door de afdelingen Technische Dienst en Informatica van PPO Glastuinbouw ontwikkeld.

2.5 Behandelingen

2.5.1 Klimaatbehandelingen

De 4 klimaatbehandelingen die in de 4 afdeling zijn toegepast, bestonden uit een combinatie van niveau voor de vochtstrategie (Normaal of Hoog) en het al dan niet toepassen van een vochtafhankelijke minimum buis (resp. aangeduid met + MB en - MB). Zeker het vochniveau *Hoog* ligt hoger dan standaard. Uit literatuur (o.a. Jarvis, 1977) is bekend dat *Botrytis cinerea* sporen bij 93 - 100 % luchtvochtigheid of in vrij water kiemen. In dit onderzoek is gekeken hoever de luchtvochtigheid onder teeltomstandigheden opgevoerd kan worden.

Dit resulteerde in de volgende 4 behandelingen, die op vrijdag 5 september (week 36) zijn ingesteld.

Tabel 1 Overzicht van behandelingen.

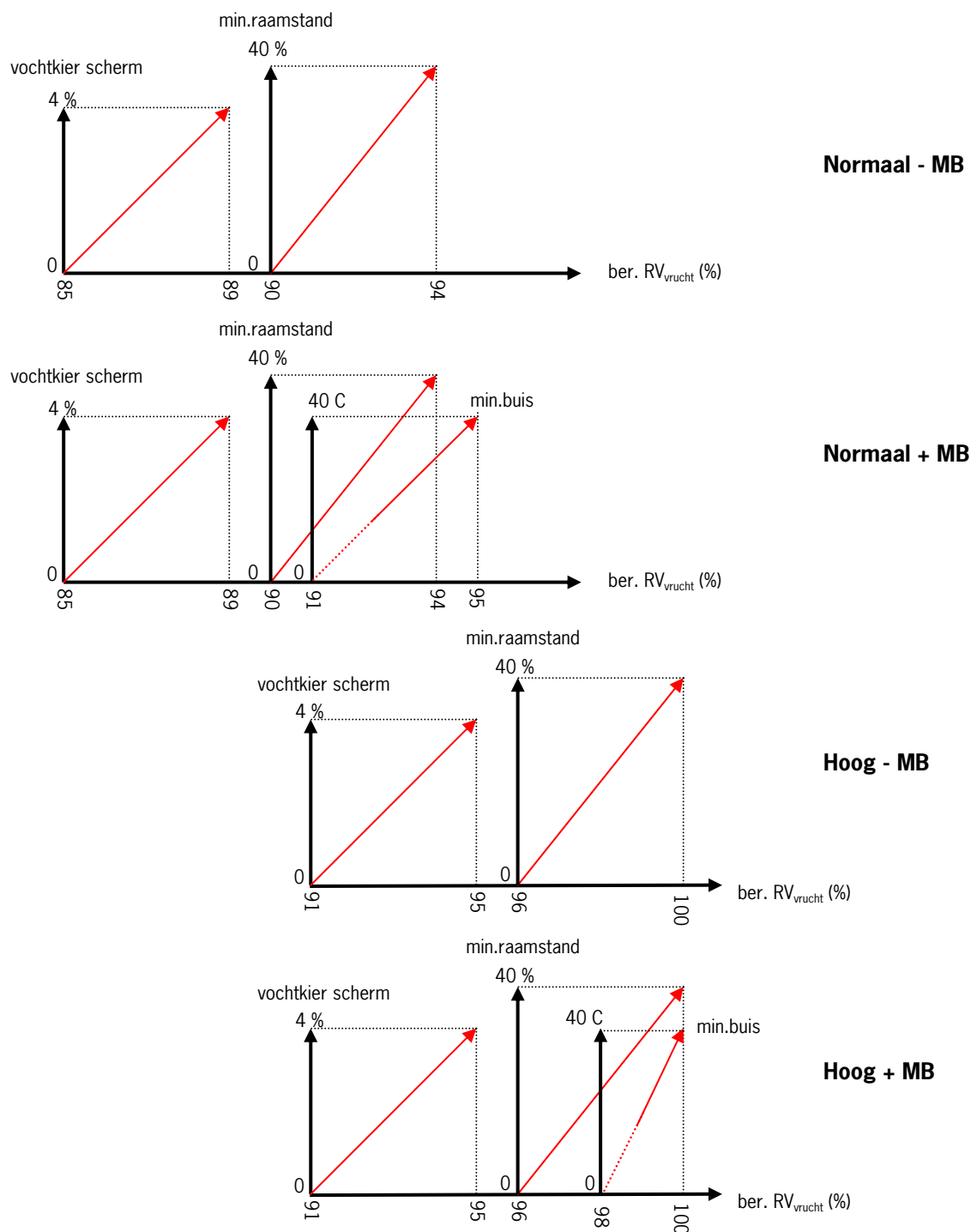
behandeling	traject vochtafhankelijke vochtkier in scherm van 0 tot 4 %	traject vochtafhankelijke minimum raamstand van 0 tot 40 %	traject vochtafhankelijke minimum buis van 0 tot 40 °C	in afdeling
Normaal – MB	85 tot 89 %	90 tot 94 %	geen	4
Normaal + MB	85 tot 89 %	90 tot 94 %	91 - 95 %	1
Hoog – MB	91 tot 95 %	96 tot 100 %	geen	3
Hoog + MB	91 tot 95 %	96 tot 100 %	98 - 100 %	2

Toelichting:

Normaal = normaal vochniveau
Hoog = hoog vochniveau

– MB = geen vochtafhankelijke minimum buis
+ MB = met vochtafhankelijke minimum buis

Ter verduidelijking van de toegepaste vochtstrategie is in onderstaande figuur de volgorde aangegeven waarin de regelorganen vochtafhankelijk worden gebruikt. Eerst wordt een vochtafhankelijke vochtkier in het scherm berekend, gevolgd door een vochtafhankelijke minimum raamstand en eventueel daarna een vochtafhankelijke minimum buis. Er worden dus geen vaste vochtkier, geen vaste minimum raamstand of vaste minimum buistemperatuur toegepast.



Figuur 5 Schematische voorstelling van vochtregeltrajecten van de 4 behandelingen.

De gebruikte luchtvochtigheid in de regeling is gebaseerd op de RV bij de berekende vruchttemperatuur, *berekende* RV_{vrucht} zie paragraaf 2.6.3. De exacte invulling van de regelingen wordt besproken in paragraaf 2.6. De resultaten van de hoofdbehandelingen staan in hoofdstuk 3.

2.5.2 Moment van bladplukken

Vanaf begin september zijn in elke afdeling zijn 2 momenten van blad snijden aangehouden, namelijk blad snijden voor 9:30 uur en na 15 uur (zomertijd), aangeduid met respectievelijk *Vroeg* en *Laat*. De achterliggende gedachte was dat bij *Laat* blad snijden de wonden minder goed opdrogen en dat de planten daardoor vatbaarder waren voor *Botrytis*.

2.6 Klimaatregeling

2.6.1 Overzicht

In dit onderzoek is zo veel mogelijk gebruik gemaakt van de standaard klimaatregeling zoals die bij het PPO beschikbaar was. Alleen zijn in de software enkele specifieke aanpassingen voor de vochtregulatie gedaan, namelijk de vochtregeling op basis van *berekende* RV_{vrucht} (paragraaf 2.6.3), vochtkierregeling in scherm (paragraaf 2.6.4), minimum raamregeling (paragraaf 2.6.5) en minimum buisregeling (paragraaf 2.6.6).

2.6.2 Temperatuurregeling

De verwarmings- en ventilatieregeling werden geregeld op basis van de kasluchttemperatuur gemeten in een meetbox. De meetbox temperatuur is ook gebruikt voor de temperatuurintegratieregeling. Deze regeling vergelijkt bij de overgang van dag naar nacht welke temperatuur gemiddeld over een etmaal gewenst is (wordt ingesteld) en wat overdag al gemiddeld gerealiseerd is. Vervolgens wordt berekend welke constante nachttemperatuur noodzakelijk is om op de gewenste etmaaltemperatuur uit te komen.

2.6.3 Vochtregeling op berekende RV_{vrucht}

De vochtregelingen van vochtkier in scherm, minimum raam en minimum buis zijn op basis van de RV bij de koudste delen van de plant, zoals in de PPO-experimenten in de praktijk door De Graaf is gedaan (Visser, 2003). In geval van tomaat ijlen de vruchten het meeste na op de kasluchttemperatuur en daarmee zijn dit de plantdelen waarop het eerst condensatie zal optreden. Natslag op de vrucht zal optreden als de dauwpunttemperatuur hoger is dan de berekende vruchttemperatuur, ofwel de RV bij de vrucht is 100 %. In de vochtregeling wordt de RV bij de berekende vruchttemperatuur bepaald. Dit wordt aangeduid met *berekende* RV_{vrucht} .

Volgens Baas & Warmenhoven (2003) is de tijdconstante voor opwarming van een tomatenvrucht van 4.5 tot 5 cm 44 minuten (bij weinig luchtstroming). Bij de berekende vruchttemperatuur wordt er van uitgegaan dat de vruchttemperatuur 2 x tijdsconstante najilt. Bij een plotselinge kasluchttemperatuur verandering komt dit neer op dat de vrucht na 1:30 uur 90 % van temperatuurverandering heeft ingehaald. De 1:30 uur is een vergelijkbare waarde die De Graaf (pers.mededeling) in de regelingen in diverse praktijkexperimenten heeft gebruikt. De dempingwaarde op basis van 1 minuut waarnemingen is daarbij 97.45 %. In formulevorm is dit:

$$\text{ber.vruchttemp}_{t+1} = 97.45 \% \times \text{ber.vruchttemp}_t + (1 - 97.45 \%) \times \text{temp.kaslucht}_{t+1}$$

2.6.4 Vochtkeerregeling in scherm

In eerste instantie was de opzet van de vochtkeerregeling in het scherm als volgt:

- Eerste stap van vochtkeer was afhankelijk van de vochtoverschrijding (*berekende RV_{vrucht}* t.o.v. streefwaarde vochtkeer). De grootte van de stap was proportioneel: 4 % vochtkeer bij 4 % vochtoverschrijding.
- Het scherm was met stappen van 1 % aan te sturen.
- De maximale vochtkeer was 4 %.
- Vervolgens werd elke 5 minuten de absolute luchtvochtigheid vergeleken met die van 5 minuten daarvoor. Als het vochtiger was geworden, dan werd 1 % verder gekierd tot de maximale kier van 4 %. Als het droger werd, dan werd de kier met 1 % verkleind tot minimaal 1 % vochtkeer.
- Het scherm werd weer volledig gesloten als de *berekende RV_{vrucht}* onder de vochtstreefwaarde van de vochtkeer kwam.

Deze regeling is op 24 september geactiveerd op het moment dat het scherm die nacht zeker zou sluiten, zodat de werking op afstand 's avonds gevolgd kon worden. Echter de vochtkeerregeling bleek niet volledig naar tevredenheid te werken. Daarom is de regeling op 30 september vervangen door een proportionele vochtkeerregeling, ondanks dat deze regeling relatief onrustig was.

De werking van de proportionele vochtkeerregeling was als volgt:

- Elke 1 minuut is bekeken of de streefwaarde overschreden werd. Was dit het geval, dan werd afhankelijk van de vochtoverschrijding de daarbij behorende proportionele vochtkeer aangehouden.
- Tussen de kiervinstellingen werd een wachttijd van 5 minuten aangehouden.
- De maximum vochtkeer was 4 % bij een vochtoverschrijding van 4 % RV.

2.6.5 Minimum raamregeling

De vochtafhankelijke minimum raamregeling werkte proportioneel: maximum 40 % raamstand aan de luwe zijde bij 4 % vochtoverschrijding (*berekende RV_{vrucht}* t.o.v. streefwaarde minimum raam). Tussen de vochtafhankelijke raamverinstellingen werd een wachttijd van 5 minuten aangehouden.

2.6.6 Minimum buisregeling

De vochtafhankelijke minimum buisregeling werkte proportioneel: maximum 40 °C buistemperatuur van het hoofdnet bij 2 % (bij behandeling *Normaal + MB*) en 4 % (bij behandeling *Hoog + MB*) vochtoverschrijding (*berekende RV_{vrucht}* t.o.v. streefwaarde minimum buis). Tussen de vochtafhankelijke buistemperatuurverinstellingen werd een wachttijd van 5 minuten aangehouden. De vochtafhankelijke minimum buis wordt gerekend vanaf 0 °C. Om bij behandeling *Hoog + MB* nog voldoende regelruimte te hebben is daarom de hellingshoek van de vochtinvloed steiler (20 °C / % RV) dan bij de behandeling *Normaal + MB* (10 °C / % RV).

Aangezien het vochttraject van het minimum raam en minimum buis elkaar deels overlappen, is bij de vochtafhankelijke minimum buis een wachttijd van 15 minuten aangehouden na het actief worden van de vochtafhankelijke minimum raam. De reden dat de vochttrajecten van minimum raam en minimum buis veel dichter op elkaar liggen dan bij de vochtkeer in het scherm, is dat de vochtafvoer bij de vochtkeer in het scherm minder snel is (een diffusie proces) en bij het minimum raam een sneller proces is (geforceerde luchtstroming). Verder werd een vochtafhankelijke minimum buis berekend vanaf 0 °C. Pas halverwege het vochttraject van de minimum buis, dus rond de 20 °C, kwam de minimum buis boven de kastemperatuur.

2.6.7 CO₂-regeling

In de afdeling is overdag zuivere CO₂ gedoseerd. Afhankelijk van de luchtuitwisseling is de CO₂-streefwaarde van 1000 tot 400 ppm afgebouwd.

2.6.8 Schermregeling

Het doel was zoveel mogelijk energie te besparen. Daarom werd het scherm tussen 17 en 10 uur (wintertijd) gesloten als het buiten kouder was dan 10 °C. 's Morgens werd het scherm voor 10 uur geopend als buiten meer dan 200 W/m² aan globale straling werd gemeten. Zoals in paragraaf 2.6.4 is vermeld, is de schermregeling pas op 24 september geactiveerd.

2.7 Watergift en bemesting

De watergift werd per afdeling ingesteld en geregeld. Er werd op basis van een verdampingsmodel water gegeven. De watergift werd pas om 2 uur na zonsopkomst gestart, omdat uit het onderzoek van Van Gulp & Dik (1996) volgde dat bij later starten de risico's van *Botrytis* worden verkleind. Begin september werd de laatste beurt aan het einde van de middag gegeven. Dit werd in de loop van het najaar vervroegd tot halverwege de middag. Er werd een drainpercentage van 30 tot 40 % nagestreefd. De laatste weken van de teelt is wat droger geteeld.

Het bemestingsschema was in alle behandelingen identiek en vergelijkbaar met wat in de praktijk wordt toegepast. Eens in de twee weken werden analysemonsters uit de matten genomen. Diverse keren in de week werden EC en pH in diverse matten, drain, voorraad- en voedingsbakken gecontroleerd.

2.8 Gewaswaarnemingen

Vanaf 18 augustus is van 2 vaste paden per afdeling de kg-productie en kwaliteit beoordeeld.

Vanaf 25 september tot het einde van de proef is wekelijks het aantal stengellesies *Botrytis* en de lengte van de stengellesies *Botrytis* waargenomen aan 144 stengels per subbehandeling van bladsnijmoment per afdeling.

2.9 Energieberekening

Voor bepaling van het energiegebruik van de afzonderlijke behandelingen is gebruik gemaakt van de berekeningsmethode van Nawrocki (1985). Input hierbij zijn:

- kasluchttemperatuur
- aanvoertemperatuur van hoofd- en groeinet
- retourtemperatuur van hoofd- en groeinet

Deze methode is beschreven in bijlage 7.

2.10 Simulatie

Door middel van simulatie met Kaspro zijn de energiebesparing ten opzichte van de praktijksituatie bepaald. Ter verificatie van de energiebesparingmogelijkheden van de verschillende behandelingen heeft het A&F met het simulatieprogramma Kaspro berekeningen uitgevoerd. De resultaten van deze simulaties staan in hoofdstuk 5.

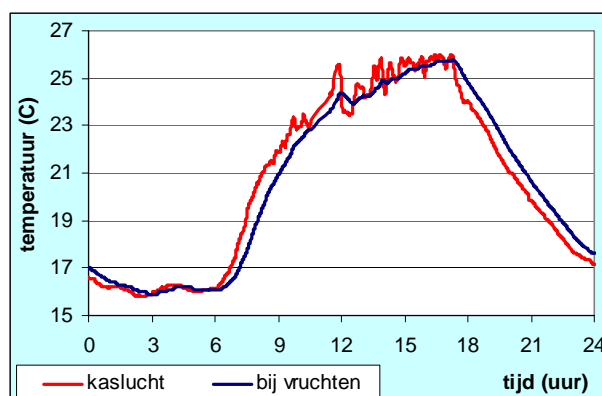
2.11 Dataregistratie en -verwerking

Gedurende de proefperiode zijn 1-minuut gegevens van metingen en berekeningen in bestanden weggeschreven. Op grond van deze informatie is het dagelijkse verloop van de regelingen en het gedrag van de regelorganen (scherm, buizen en ramen) gevolgd.

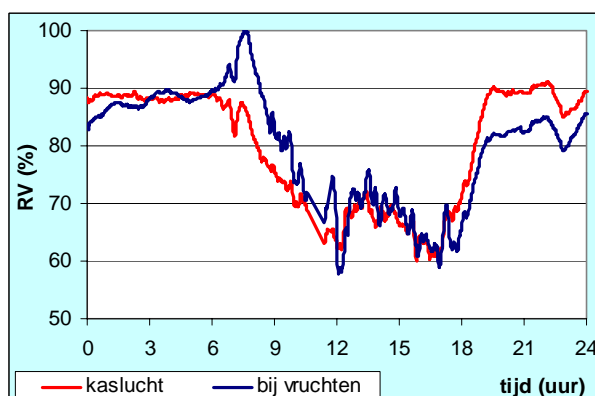
Bij de dataverwerking zijn de 1-minuut gegevens gecomprimeerd tot 5-minuut waarden. Deze data zijn gebruikt voor de verdere data-analyse die resulteerde in uurwaarden, bijvoorbeeld de bepaling van het aantal minuten dat de luchtvochtigheid boven 95 % lag of het aantal minuten dat gekierd werd.

3 Resultaten

3.1 Regelen op berekende RV_{vrucht}



Figuur 6 Temperatuur van kaslucht met naijlende vruchttemperatuur.



Figuur 7 RV van kaslucht en RV bij vruchten.

In Figuur 6 wordt als voorbeeld het verloop op 4 september weergegeven van de berekende naijlende vruchttemperatuur volgens de rekenregels van paragraaf 2.6.3. In de ochtend zijn de vruchten kouder dan de kaslucht en in de namiddag en avond juist warmer. Doordat de vruchttemperatuur in de ochtend achterblijft op de kasluchttemperatuur, stijgt de RV bij de vruchten tot 100 % (zie Figuur 7). In de namiddag en avond is de berekende RV_{vrucht} duidelijk lager dan de RV van de kaslucht.

3.2 Ingesteld kasklimaat

3.2.1 Klimaatinstellingen

Een overzicht van belangrijkste klimaatinstellingen en wijzigen daarvan is weergegeven in bijlage 1. Zoals in paragraaf 2.2 is gemeld, zijn het verwarmings- en ventilatieregime bepaald door de stand van het gewas.

3.2.2 Temperatuurintegratie

De temperatuurintegratie bleek bij dit experiment verstoring te werken als gevolg van de opzet van de bestaande regeling. Aan het begin van de nachtperiode werd daarbij de gewenste nachttemperatuur berekend om de opgegeven etmaaltemperatuur te realiseren bij de al gerealiseerde dagtemperatuur. Dit had het gevolg dat voor de behandelingen gedurende de nacht verschillende nachttemperaturen werden gerealiseerd. Bij de overgang naar de dagtemperatuur waren deze nachttemperaturen uitgangspunt om vanaf daar op te stoken. Dit resulteerde in verschillende momenten waarop de dagtemperatuur werd bereikt. Dit had vervolgens tot gevolg dat al meteen verschillende gemiddelde dagtemperaturen werden gerealiseerd, wat weer gevolgen had voor de gewenste temperatuur van de daarop volgende nacht. Omdat dit gedrag de beoordeling van de vochtregeling ernstig verstoortte, is op 14 oktober besloten om de temperatuurintegratie-regeling uit te schakelen. Dit was dus om proeftechnische redenen en niet om teelttechnische redenen.

3.3 Gerealiseerd kasklimaat

3.3.1 Geselecteerde perioden

Het regelgedrag van de verschillende vochtregulatiebehandelingen zal worden besproken aan de hand van 3 perioden van 4 dagen. De keuze van de periode is gebaseerd op:

- verschillende omstandigheden: meer of minder warmtevraag, al dan niet schermen, meer of minder ventilatie;
- complete dataset;
- aaneengesloten periode.

Tabel 2 Overzicht van de geselecteerde perioden voor data-analyse.

Periode	dagen	kenmerk
1	18 t/m 21 september	- nauwelijks warmtevraag - niet geschermd - aanvullende vochtafhankelijke minimum buis nodig
2	4 t/m 7 oktober	- iets grotere warmtevraag - geschermd - a.g.v. vochtafhankelijke minimum raamstand neemt warmtevraag toe
3	25 t/m 28 oktober	- grote warmtevraag, waardoor gewenste buistemperatuur meestal hoger was dan de vochtafhankelijke minimum buis - geschermd

Deze perioden worden hieronder afzonderlijk besproken.

3.3.2 Gerealiseerd klimaat in periode 1

- buitenklimaat

De figuren van het gerealiseerde klimaat van 18 tot en met 21 september staan in bijlage 2. In Figuur 1 is te zien dat deze periode stralingsrijk was en met maximum buitentemperaturen van bijna 25 °C warm voor die tijd van het jaar was.

- kasklimaat

Figuur 2 en 3 geven respectievelijk de streefwaarden voor verwarming en ventilatie weer. In deze periode is temperatuurintegratie toegepast. De gerealiseerde kasluchttemperatuur wordt getoond in Figuur 4. Over het algemeen is een vergelijkbare temperatuur bij de 4 behandelingen gerealiseerd, alleen op de middelste dagen verschillen de temperaturen iets van elkaar als gevolg van correctie door temperatuurintegratie (zie de streefwaarden in Figuur 2 en 3). Om te voorkomen dat de gemiddelde etmaaltemperatuur te hoog uit kwam, mocht de temperatuur 's nachts wegzakken naar 14 °C.

Het verloop van de RV van de kaslucht is weergegeven in Figuur 5. Als gevolg van de behandelingen zijn de verschillen in de gerealiseerde RV maximaal 4 %. De RV is maximaal 90 tot 95 %. In hoofdstuk 4 wordt verder ingezoomd op de behandelingenverschillen. Als gekeken wordt naar de RV bij de berekende vruchttemperatuur $berekende RV_{vrucht}$ (Figuur 6), dan zien we dat 's morgens de $berekende RV_{vrucht}$ bijna de 100 % bereikte. Er trad dus bijna natslag op.

- vochtregulatie

In periode 1 is niet geschermd (zie Figuur 7), omdat de buitentemperatuur boven de 10 °C lag. Een vochtafhankelijke vochtmier in het scherm is dan ook in deze periode niet van toepassing. In deze periode is bijna op alle ochtenden de vochtafhankelijke minimum raamstand van maximaal 40 % volledig benut (zie Figuur 8). Op de behandelingseffecten wordt in hoofdstuk 4 ingegaan. De momenten waarop de minimum raamstand geldig was, werd niet op basis van temperatuur gelucht (zie Figuur 9). Zoals in Figuur 6 te zien was, liep de *berekende* RV_{vrucht} 's morgens tot bijna 100 % op. Aangezien de vochtafhankelijke minimum raamstanden niet meer regelruimte bood, kwam bij behandeling *Normaal + MB* en *Hoog + MB* een vochtafhankelijke minimum buis met maximaal 40 °C in (zie Figuur 10). Omdat de kastemperatuur gemakkelijk de gewenste streefwaarde realiseerde, was geen aanvullende verwarming noodzakelijk (zie Figuur 11). In Figuur 11 zijn de pieken in de berekende buistemperatuur de momenten dat een vochtafhankelijke minimum buis inkwam.

- energiegebruik

In periode 1 is nauwelijks energie gebruikt (zie Figuur 12). Alleen op momenten van minimum buis was er een energievraag.

3.3.3 Gerealiseerd klimaat in periode 2

- buitenklimaat

De figuren van het gerealiseerde klimaat van 4 tot en met 7 oktober staan in bijlage 3. In Figuur 1 is te zien dat deze periode minder stralingsrijk was. De laatste dag was onstuimig met veel wind en regen.

- kasklimaat

Figuur 2 en 3 geven respectievelijk de streefwaarden voor verwarming en ventilatie weer. In deze periode is temperatuurintegratie toegepast. De gerealiseerde kasluchttemperatuur wordt getoond in Figuur 4. Over het algemeen waren de verschillen tussen de gerealiseerde temperaturen van de 4 behandelingen gering, behalve op de momenten dat voor de behandeling onderling verschillende streefwaarden werden berekend (zie de streefwaarden in Figuur 2 en 3). Vooral op de eerste dag van deze periode is het versturende effect van temperatuurintegratie, zoals beschreven in paragraaf 3.2.2, te zien: 's morgens wordt een hogere temperatuur berekend, met als gevolg dat een hogere etmaaltemperatuur werd gerealiseerd waarbij de volgende nacht juist een lagere temperatuur werd berekend. In vergelijking met de eerste periode is het verschil tussen minimum en maximum etmaaltemperatuur geringer.

Het verloop van de RV van de kaslucht is weergegeven in Figuur 5. Als gevolg van de behandelingen zijn de verschillen in gerealiseerde RV maximaal 6 %. De RV varieerde grof weg tussen 85 en 95 %. In hoofdstuk 4 wordt verder ingezoomd op de behandelingsverschillen. Als gekeken wordt naar de RV bij de berekende vruchttemperatuur *berekende* RV_{vrucht} , dan zien we dat 's morgens de *berekende* RV_{vrucht} in tegenstelling tot in periode 1 nu nauwelijks boven de 95 % uitkwam (zie Figuur 6).

- vochtregulatie

In periode 2 is geschermd (zie Figuur 7), omdat de buitentemperatuur in diverse nachten onder de 10 °C lag. Omdat de *berekende* RV_{vrucht} gedurende de schermperiode boven de ingestelde vochtstreefwaarden voor een vochtmier lag, is een vochtafhankelijke vochtmier gebruikt. In hoofdstuk 4 wordt verder ingezoomd op de behandelingsverschillen.

Om te voorkomen dat de *berekende* RV_{vrucht} te ver op liep, is ook gebruik gemaakt van een vochtafhankelijke minimum raamstand (zie Figuur 8). In vergelijking met periode 1 is in periode 2 langer gebruik gemaakt van een minimum raamstand maar wel van een geringere stand. Als Figuur 8 met Figuur 9 vergeleken wordt, dan is nauwelijks meer geventileerd dan de berekende minimum raamstand. Op de behandelingseffecten wordt in hoofdstuk 4 ingegaan.

Op slechts enkele uren is bij de behandelingen waarbij een vochtafhankelijke minimum buis mocht inkomen ook een waarde groter dan 0 °C berekend. Deze waarde lag nog onder de kasttemperatuur, waardoor deze minimum buis geen effect had.

De reden dat de *berekende* RV_{vrucht} niet boven de 95 % uit kwam, is dat de vochtregulatie nog niet volledig de regelruimte had benut (bij raam van 40 % en bij buis van 40 °C). Blijkbaar was de vochtafvoer door de lagere buitentemperatuur veel effectiever dan in periode 1.

- energiegebruik

In het grootste deel van periode 2 was een warmtevraag (zie Figuur 12). Hierbij was de warmtevraag 's morgens vroeg het grootste en 's middags het laagste.

3.3.4 Gerealiseerd klimaat in periode 3

- buitenklimaat

De figuren van het gerealiseerde klimaat van 25 tot en met 28 oktober staan in bijlage 4. In Figuur 1 is te zien dat de eerste dag somberder was dan de andere dagen. De buitentemperatuur varieerde tussen 0 en 10 °C.

- kasklimaat

Figuur 2 en 3 geven respectievelijk de streefwaarden voor verwarming en ventilatie weer. In deze periode was geen temperatuurintegratie meer toegepast. De gerealiseerde kasluchttemperatuur wordt getoond in Figuur 4. De verschillen tussen de gerealiseerde temperaturen van de 4 behandelingen zijn zeer gering.

Het verloop van de RV van de kaslucht is weergegeven in Figuur 5. Als gevolg van de behandelingen waren de verschillen in gerealiseerde RV nu groter dan in periode 1 en 2. De RV varieerde grof weg tussen 85 en 95 %, behalve op moment dat de zon er goed door kwam, waarbij geventileerd werd. In hoofdstuk 4 wordt verder ingezoomd op behandelingsverschillen. Als gekeken wordt naar de RV bij de berekende vruchttemperatuur *berekende* RV_{vrucht} dan zien we dat 's morgens de *berekende* RV_{vrucht} net als in periode 2 en in tegenstelling tot in periode 1 nu nauwelijks boven de 95 % uit komt.

- vochtregulatie

In periode 3 is geschermd (zie Figuur 7). In de 3^{de} en 4^{de} nacht is lang niet altijd maximaal gekierd. Blijkbaar was de vochtafvoer op het koude kasdek (kouder dan in periode 2) voldoende. Daarom is in deze nachten nauwelijks gebruik gemaakt van een vochtafhankelijke minimum raamstand (Figuur 10) en nog minder van een vochtafhankelijke minimum buis (zie Figuur 11). In hoofdstuk 4 wordt verder ingezoomd op de behandelingsverschillen.

- energiegebruik

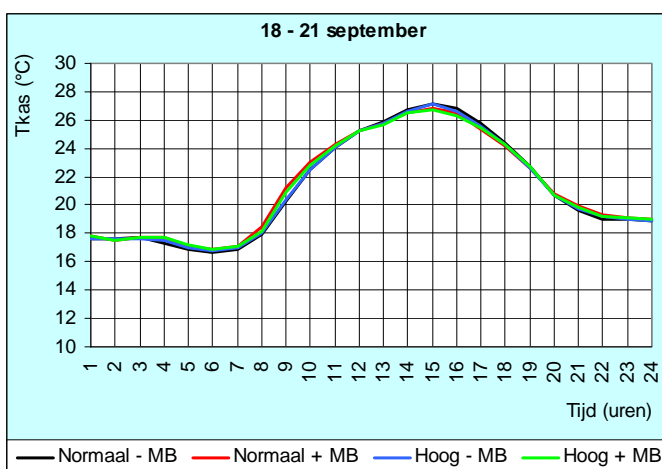
In het grootste deel van periode 3 was een warmtevraag (zie Figuur 12). Hierbij was de warmtevraag 's morgens vroeg het grootste en 's middags het laagste.

3.3.5 Gemiddeld dagverloop over periode

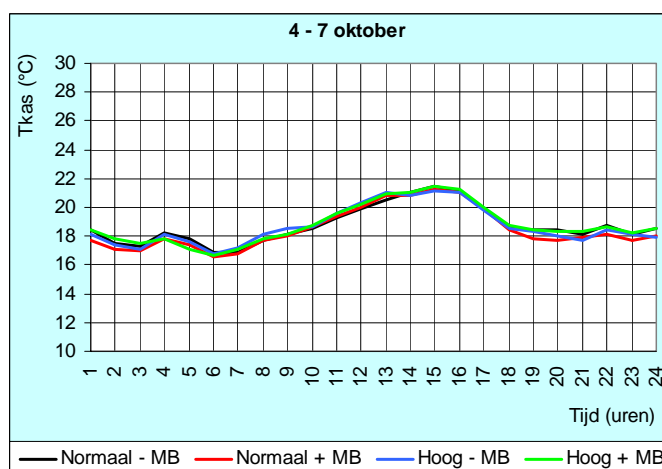
Om inzicht te krijgen in het gemiddelde dagverloop over de periode zijn afzonderlijke uurwaarden van elke dag gemiddeld. Bijvoorbeeld de waarde van 3 uur is het gemiddelde van de waarden van 3 uur van 18 t/m 21 september. Daarmee kunnen de perioden onderling beter met elkaar worden vergeleken. Al moet wel de aantekening worden gemaakt dat de extremen worden afgevlakt.

- kasttemperatuur

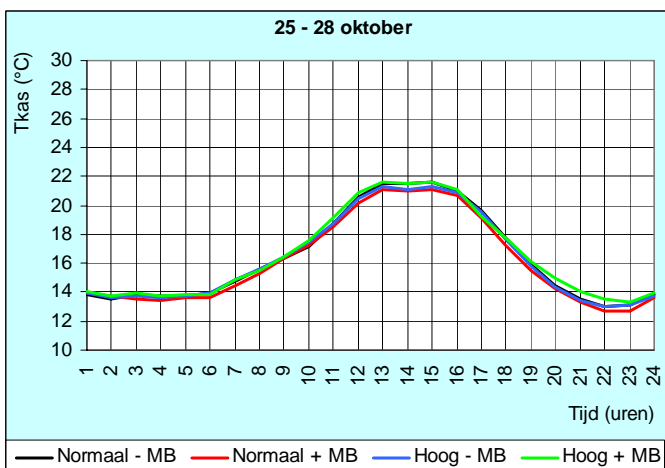
In Figuur 8 t/m Figuur 10 is het gemiddelde dagverloop van de kasttemperatuur te zien.



Figuur 8 Gemiddeld dagverloop van gemeten kasttemperatuur van 18 t/m 21 september (periode 1).



Figuur 9 Gemiddeld dagverloop van gemeten kasttemperatuur van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



Figuur 10 Gemiddeld dagverloop van gemeten kasttemperatuur van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

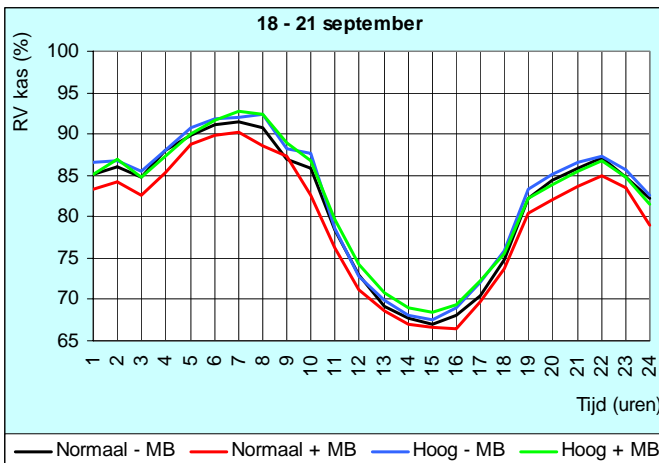
Tabel 3 Gemiddelde kasttemperatuur per periode.

Vochtbehandeling	Gemiddelde kasttemperatuur (°C)		
	Periode 1	Periode 2	Periode 3
Normaal - MB	21.1	18.7	16.4
Normaal + MB	21.3	18.5	16.1
Hoog - MB	21.2	18.7	16.3
Hoog + MB	21.2	18.8	16.5

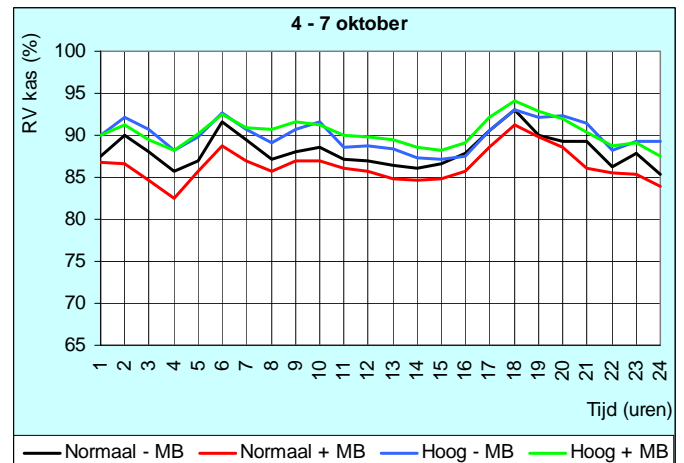
Als gevolg van het zomerse weer is in periode 1 een veel hogere dagtemperatuur bereikt dan in periode 2 en 3. In periode 3 mocht de nachttemperatuur wegzakken, omdat de teelt bijna beëindigd was. Wat verder opvalt, is dat de verschillen tussen de behandelingen gering zijn. Gemiddeld genomen zijn de verschillen in periode 3 nog het grootste (zie Tabel 3).

- RV kaslucht

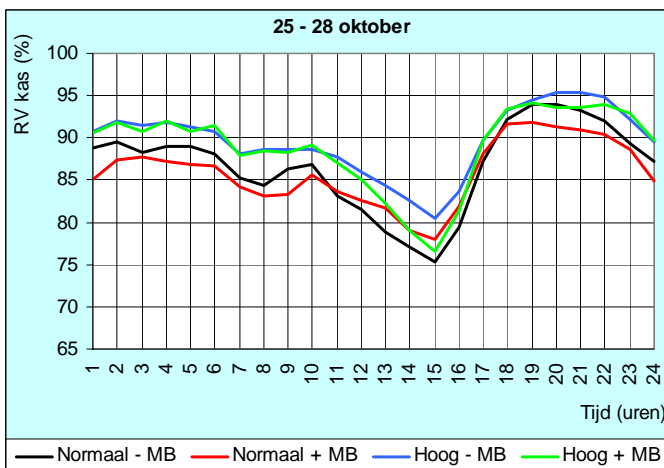
Figuur 11 t/m Figuur 13 geven het gemiddelde dagverloop van de RV van de kaslucht weer.



Figuur 11 Gemiddeld dagverloop van gemeten RV kaslucht van 18 t/m 21 september (periode 1).



Figuur 12 Gemiddeld dagverloop van gemeten RV kaslucht van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



Figuur 13 Gemiddeld dagverloop van gemeten RV kaslucht van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

Tabel 4 Gemiddelde RV kaslucht per periode.

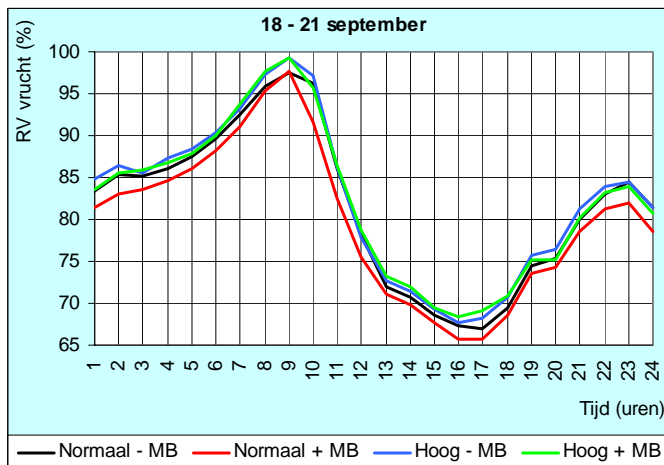
Vochtbehandeling	Gemiddelde RV kaslucht (%)		
	Periode 1	Periode 2	Periode 3
Normaal - MB	81.5	88.2	86.7
Normaal + MB	79.8	86.4	85.9
Hoog - MB	82.3	90.0	89.7
Hoog + MB	82.1	90.3	88.9

In periode 1 zakte de RV van de kaslucht overdag flink aanzien door de zomerse omstandigheden de kastemperatuur steeg en er flink geventileerd werd. In periode 2 en 3 lag het vochniveau de gehele dag op een hoger niveau. Bij periode 3 steeg de RV in de namiddag meer dan in periode 2. Dit hangt samen met het temperatuurverloop over de dag. Het temperatuurverloop van periode 2 was veel vlakker dan van periode 3 (zie Figuur 9 en Figuur 10).

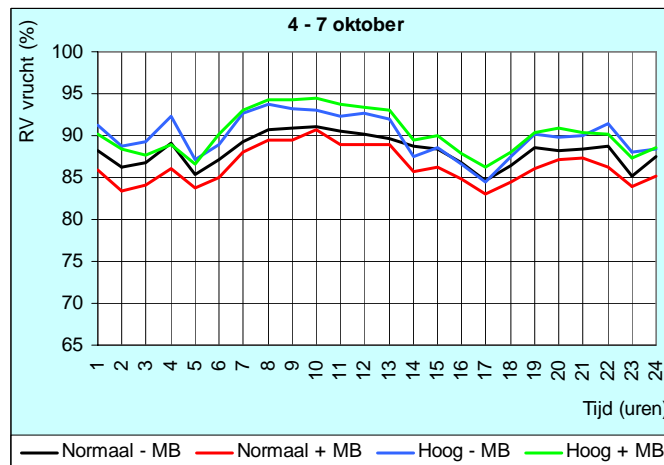
Aangezien in alle perioden actief op vocht geregeld is, zijn behandelingseffecten zichtbaar. De laagste RV werd bereikt bij de behandeling *Normaal + MB*, gevolgd door *Normaal - MB*. In periode 3 was de afdeling van behandeling *Normaal - MB* overdag droger dan die van behandeling *Normaal + MB* (zie Figuur 13). Het verschil tussen de beide behandelingen met een hoge RV streefwaarde (*Hoog - MB* en *Hoog + MB*) was niet groot.

- berekende RV_{vrucht}

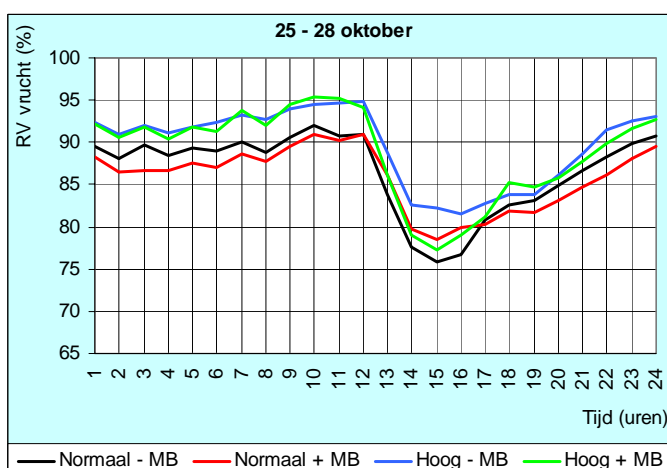
Het gemiddelde dagverloop van de *berekende RV_{vrucht}* is weergegeven in Figuur 14 t/m Figuur 16.



Figuur 14 Gemiddeld dagverloop van berekende RV_{vrucht} van 18 t/m 21 september (periode 1).



Figuur 15 Gemiddeld dagverloop van berekende RV_{vrucht} van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



Figuur 16 Gemiddeld dagverloop van berekende RV_{vrucht} van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

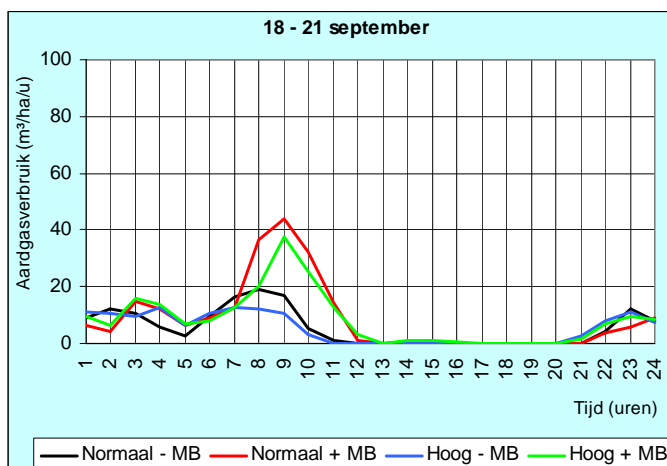
Tabel 5 Gemiddelde berekende RV_{vrucht} per periode.

Vochtbehandeling	Gemiddelde berekende RV_{vrucht} (%)		
	Periode 1	Periode 2	Periode 3
Normaal - MB	81.6	88.2	86.6
Normaal + MB	79.9	86.3	85.9
Hoog - MB	82.4	90.0	89.7
Hoog + MB	82.2	90.3	88.9

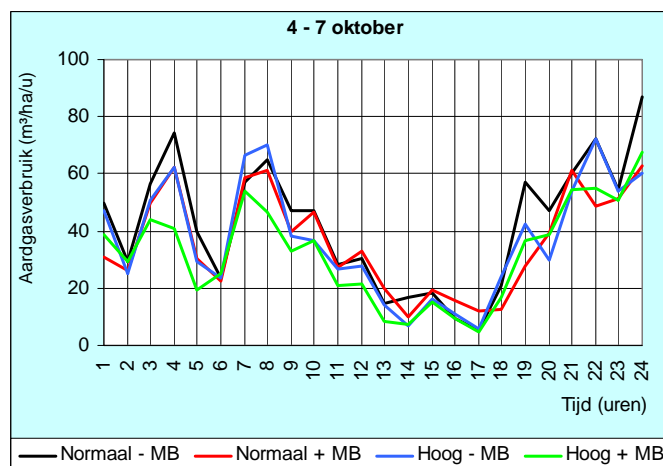
Net als bij de RV van de kaslucht komen de behandelingseffecten goed naar voren bij de *berekende RV_{vrucht}* . Dit is ook te verklaren, omdat actief op de *berekende RV_{vrucht}* geregeld is. Opvallend is dat in de ochtenduren de *berekende RV_{vrucht}* verder steeg dan de RV van de kaslucht (Figuur 11 t/m Figuur 13). Dit komt doordat de vruchten trager opwarmen dan de kaslucht. In de namiddag is dat het omgekeerde: de *berekende RV_{vrucht}* was lager dan de RV van de kaslucht. Dan zijn de vruchten warmer dan de kaslucht.

De laagste *berekende RV_{vrucht}* werd bereikt bij de behandeling *Normaal + MB*, gevolgd door *Normaal - MB*. Het verschil tussen de beide behandelingen met een hoge RV streefwaarde (*Hoog - MB* en *Hoog + MB*) is niet groot. Dit komt doordat bij de behandeling *Hoog + MB* de invloed van een vochtafhankelijke minimum buis pas bij een *berekende RV_{vrucht}* van rond 99 % RV voelbaar werd.

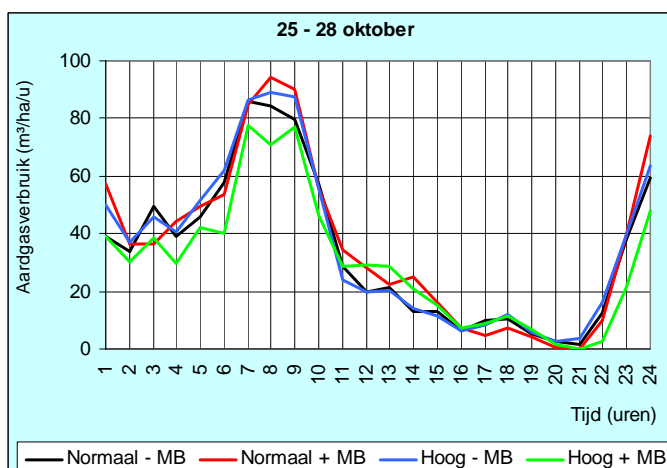
- energiegebruik



Figuur 17 Gemiddeld dagverloop van berekend aardgasverbruik van 18 t/m 21 september (periode 1).



Figuur 18 Gemiddeld dagverloop van berekend aardgasverbruik van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



Figuur 19 Gemiddeld dagverloop van berekend aardgasverbruik van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

Tabel 6 Gemiddeld aardgasverbruik per periode.

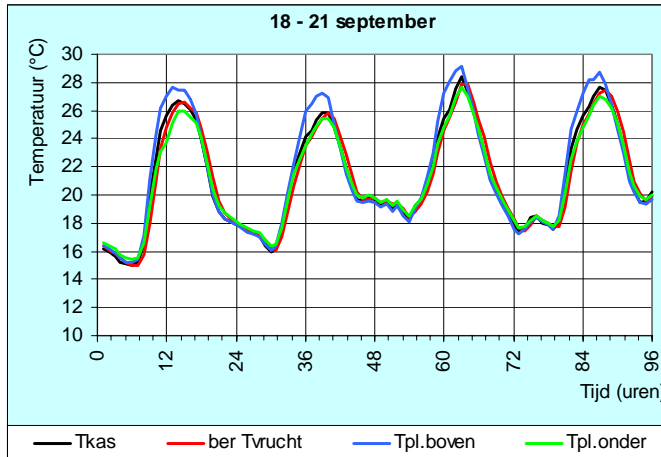
Vochtbehandeling	Gemiddeld aardgasverbruik (m ³ /ha/u)		
	Periode 1	Periode 2	Periode 3
Normaal – MB	5.5	42.2	34.0
Normaal + MB	8.8	36.2	36.5
Hoog – MB	5.4	37.3	35.6
Hoog + MB	8.4	32.3	30.1

In Figuur 17 is duidelijk de invloed van de vochtbeheersstrategie zichtbaar. Bij het aanhouden van een vochtafhankelijke minimum buis werd de piek in het aardgasverbruik in de ochtend bijna verdubbeld. Dit resulteerde in een meer dan 50 % hoger gemiddeld aardgasverbruik over de gehele eerste periode (zie Tabel 6).

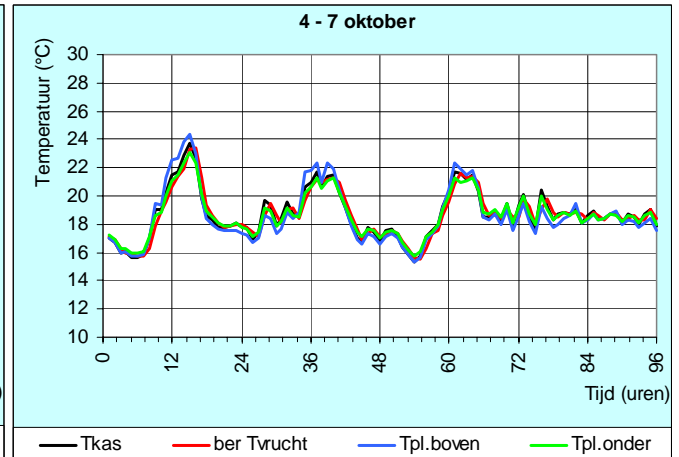
In periode 2 en 3 is in 3 van de 4 gevallen het aardgasverbruik bij de behandelingen zonder een vochtafhankelijke minimum buis meer dan 10 % hoger dan de behandelingen met een vochtafhankelijke minimum buis, terwijl in deze periode niet of nauwelijks een vochtafhankelijke minimum buis is gebruikt (zie Figuur 10 in Bijlage 3 en 4). De verschillen tussen de behandelingen kunnen daarmee alleen verklaard worden door de locatie van de afdelingen ten opzichte van zon, windrichting en meer of minder beschutting. Voor harde gegevens over de effecten van de vochtstrategieën op het energiegebruik wordt verwezen naar de simulatieresultaten (zie hoofdstuk 5).

3.4 Planttemperatuur

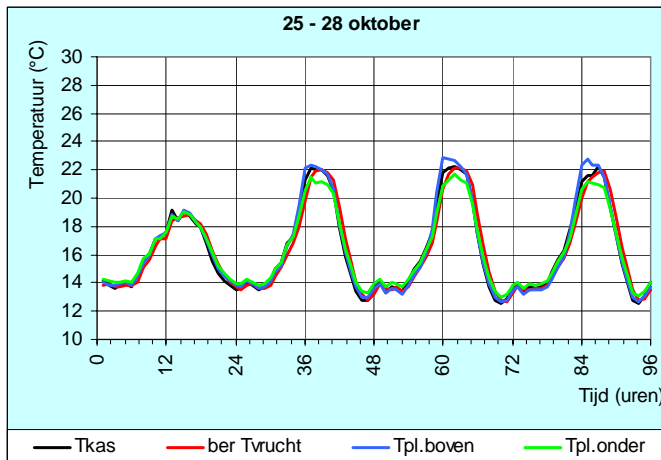
Om inzicht te geven in het verloop van de planttemperatuur worden de resultaten gepresenteerd van de behandeling *Hoog – MB*. De resultaten van de andere behandelingen laten een vergelijkbaar verloop zien.



Figuur 20 Verloop van gemeten kasluchttemperatuur, berekende vruchttemperatuur, gemeten planttemperatuur boven en onder het gewas van 18 t/m 21 september (periode 1).

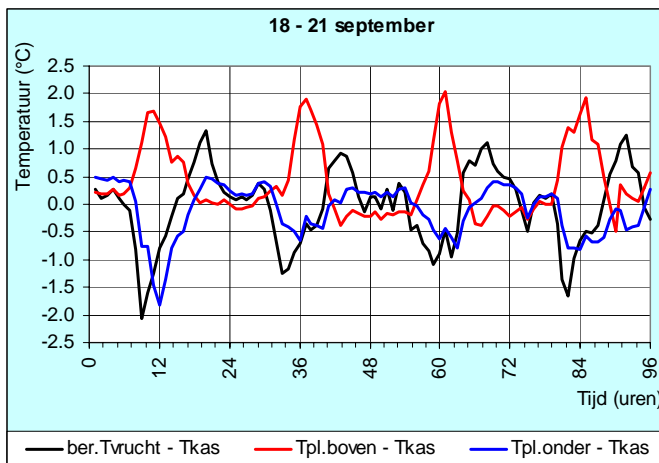


Figuur 21 Verloop van gemeten kasluchttemperatuur, berekende vruchttemperatuur, gemeten planttemperatuur boven en onder het gewas van 4 t/m 7 oktober (periode 2).

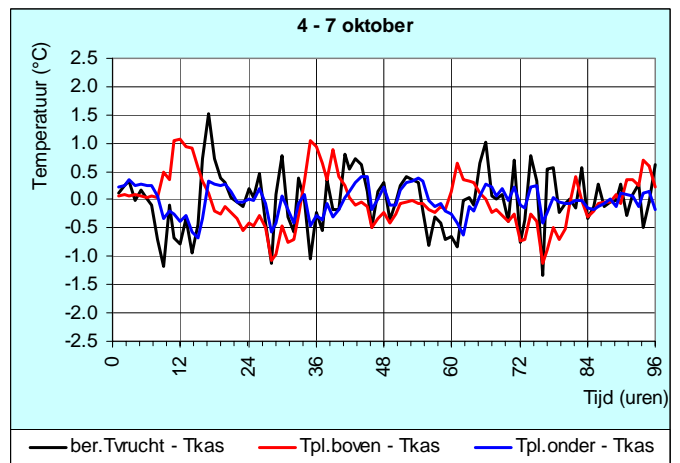


Figuur 22 Verloop van gemeten kasluchttemperatuur, berekende vruchttemperatuur, gemeten planttemperatuur boven en onder het gewas van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

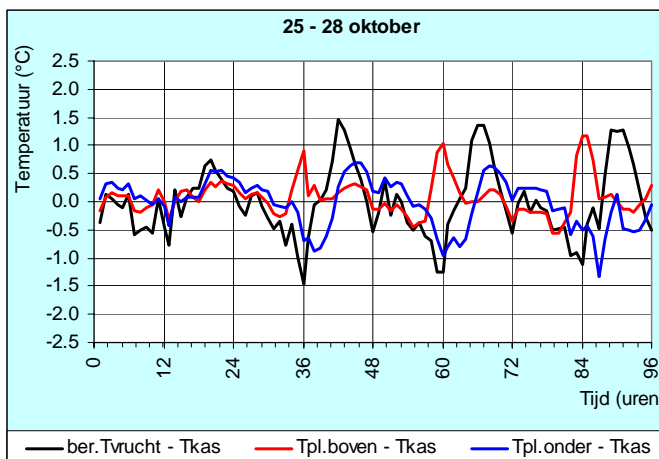
In grote lijnen volgen de gemeten planttemperaturen boven en onder (resp. *planttemperatuur_{boven}* en *planttemperatuur_{onder}*) goed de dynamiek van de kasluchttemperatuur, waarbij overdag de gemeten *planttemperatuur_{boven}* meestal de kastemperatuur overschrijdt. De verschillen tussen de temperatuurmetingen zijn beter zichtbaar als gekeken wordt naar het verschil ten opzichte van de kastemperatuur (zie Figuur 23 t/m Figuur 25).



Figuur 23 Temperatuurverschil t.o.v. kasluchttemperatuur van berekende vruchttemperatuur, gemeten planttemperatuur boven gewas en onder gewas van 18 t/m 21 september (periode 1).



Figuur 24 Temperatuurverschil t.o.v. kasluchttemperatuur van berekende vruchttemperatuur, gemeten planttemperatuur boven gewas en onder gewas van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



Figuur 25 Temperatuurverschil t.o.v. kasluchttemperatuur van berekende vruchttemperatuur, gemeten planttemperatuur boven gewas en onder gewas van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

De *planttemperatuur*_{boven} was overdag op stralingsrijke dagen (periode 1) tot 2 °C hoger dan de kasluchttemperatuur. 's Nachts daalde de *planttemperatuur*_{boven} tot 1 °C onder de kasluchttemperatuur. Over het algemeen volgde de *berekende* T_{vrucht} 's nachts en in vroege ochtend goed de *planttemperatuur*_{onder}. Overdag bleven de *planttemperatuur*_{onder} en de *berekende* T_{vrucht} tot 2 °C onder de kasluchttemperatuur, waarbij de *berekende* T_{vrucht} op het moment dat de zon kracht kreeg (*planttemperatuur*_{boven} liep sterk op), meer achterliep op de kasluchttemperatuur dan *planttemperatuur*_{onder}. De temperatuur die de IR-sensor onder in het gewas meet, is een mix van de temperatuur van stengels, bladeren en vruchten, waarbij de vruchten het traagste opwarmen.

3.5 Gewasverdamping

Uit de meetgegevens van de weeginstallaties zijn overzichten van verdamping gemaakt. Tijdens periode 1 waren de weeginstallaties nog niet 100 % operationeel, zodat geen vergelijking tussen de vochtbehandelingen kon worden gemaakt. Statistische analyse van meetgegevens van verdamping, klimaat en regelorganen van periode 2 en 3 gaven geen oorzakelijke verbanden aan die gerelateerd waren aan de vochtbehandelingen. Bij die analyse is onderscheid gemaakt tussen de dag- en nachtperiode, want overdag is de straling de verklarende factor voor verdamping. Dat tijdens de nacht geen effect werd gevonden, kan komen door de grote spreiding in energiegebruik die niet voortkwam uit de behandelingen (zie toelichting bij Figuur 17 t/m Figuur 19 en Tabel 6 op pagina 28).

De meetgegevens van watergift en drain zijn gebruikt voor het dagelijks volgen en bewaken van de waterhuishouding van het gewas. Verder zijn de verdampingsgegevens gebruikt voor de tuning van het model Kaspro (zie hoofdstuk 5).

3.6 Gewas

3.6.1 Productie en kwaliteit

In augustus voordat het experiment begon en er een normale tomatenteelt stond, was er een storing geweest in het watersysteem. In de weken 34 t/m 36, vlak voor de start van de experimenten aan het einde van week 36, waren daardoor gemiddeld 25 % van de geoogste vruchten aangetast door neusrot en zwelscheuren.

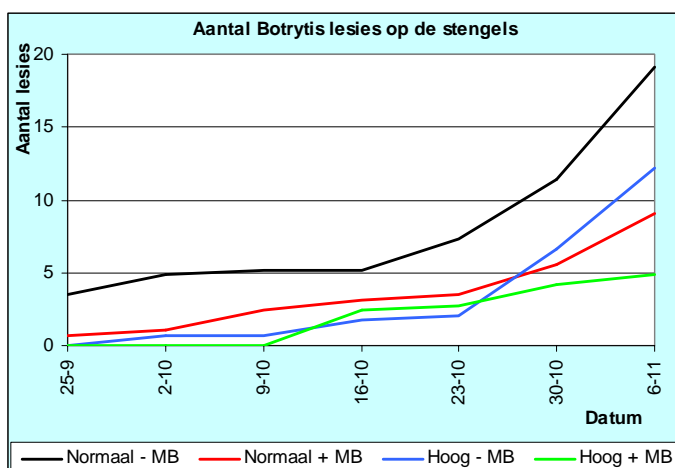
In Bijlage 5 wordt in diverse figuren een overzicht gegeven van de productie en de kwaliteit. Uit Figuur 1 en 2 volgt dat er enige variatie is geweest in de geoogste productie per week tussen de verschillende behandelingen. Echter cumulatief zijn de verschillen niet groot (zie Figuur 3 en 4). Een hardnekkige aantasting van rupsen bij de behandeling *Normaal – MB* en van witte vlieg bij de behandeling *Hoog – MB* hebben wellicht de productie negatief beïnvloed. Als gekeken wordt naar het gemiddelde vruchtgewicht (Figuur 5), dan zijn de verschillen tussen de behandelingen gering. De dip in het gemiddelde vruchtgewicht bij de behandeling *Normaal + MB* in week 38 kwam door een tijdelijk opgelopen EC in de mat. Dit heeft waarschijnlijk ook enige productie gekost.

In de eerste weken van de start van de vochtbehandelingen trad nog in geringe mate aantasting door neusrot en zwelscheuren op als gevolg de eerder genoemde storing in augustus (zie Figuur 6 en 7). Behandelingseffecten kunnen moeilijk hard gemaakt worden, waarbij ook rekening gehouden moet worden met een uitgroei duur van de vruchten van 7 tot 8 weken.

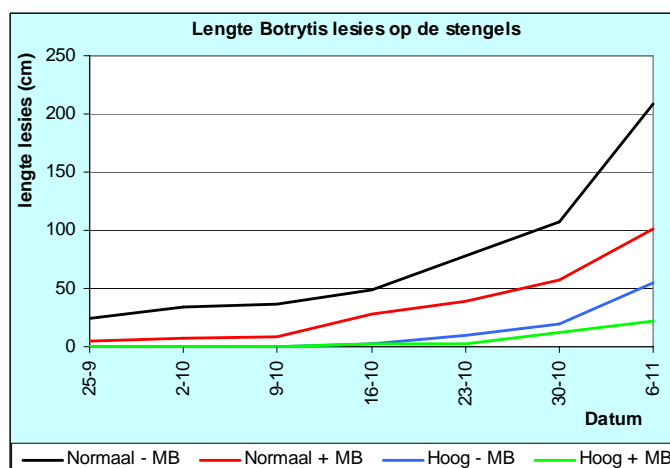
3.6.2 Botrytis

De resultaten van de *Botrytis* waarnemingen van het aantal stengellessies en de lengte van de stengellessies staan in tabel 1 en 2 van Bijlage 6. Bij geen van de behandelingen kwam *Botrytis* aantasting op vruchten en bladeren voor.

Eind september kwamen er nog nauwelijks *Botrytis* aantastingen voor, ondanks dat door het inbrengen van *Botrytis* sporen de infectiedruk was opgevoerd. De enige uitschieter was de behandeling *Normaal - MB* met *Laat* bladsnijden, terwijl in dezelfde afdeling bij *Vroeg* bladsnijden nauwelijks *Botrytis* voor kwam.

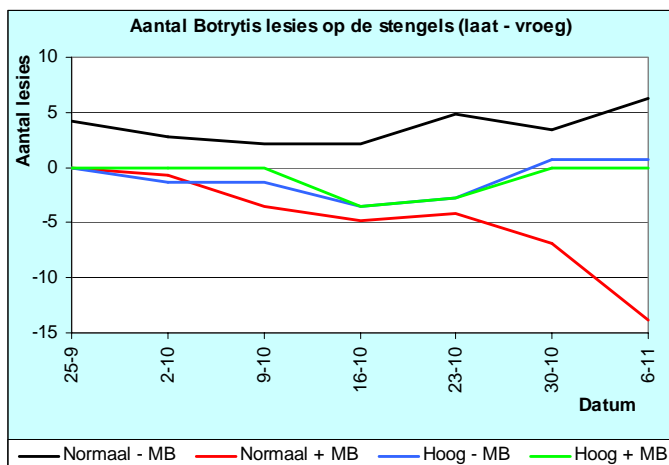


Figuur 26 Aantal *Botrytis* lesies op 100 stengels als gemiddelde van de behandelingen vroeg en laat bladsnijden.

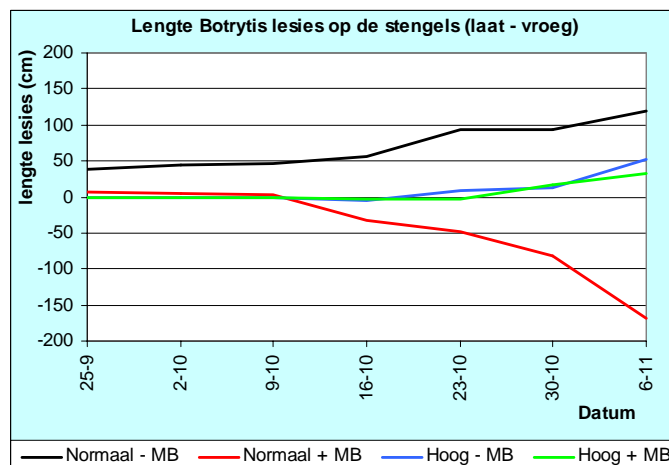


Figuur 27 Lengte van *Botrytis* lesies op 100 stengels als gemiddelde van de behandelingen vroeg en laat bladsnijden.

In de loop van oktober namen de *Botrytis* aantastingen toe. De resultaten van Figuur 26 en Figuur 27 geven aan dat er geen duidelijk behandelingseffect is op het aantal en de lengte van de lesies. De behandelingen verschillen onderling in het beginniveau. Vervolgens nemen bij alle behandelingen het aantal en de lengte van de lesies in min of meer gelijke mate toe. In deze figuren zijn *Vroeg* en *Laat* bladsnijden gemiddeld.



Figuur 28 Verschil in aantal Botrytis lesies op 100 stengels tussen laat en vroeg bladsnijden.



Figuur 29 Verschil in lengte van Botrytis lesies op 100 stengels tussen laat en vroeg bladsnijden.

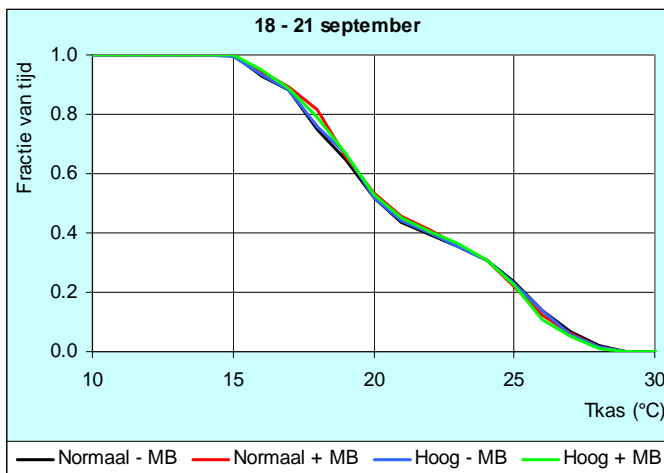
Evenmin is er een effect zichtbaar van het *Vroeg* of *Laat* bladsnijden (zie Figuur 28 en Figuur 29). Hierbij is het verschil genomen tussen *Laat* en *Vroeg* bladsnijden. Bij de vochtbehandeling *Normaal + MB* had *Laat* bladsnijden minder aantasting tot gevolg dan *Vroeg* bladsnijden, dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld bij de vochtbehandeling *Normaal - MB*.

Op 24 oktober waren er gemiddeld over de 4 behandelingen minder dan 2 % van de plant uitgevallen. In de praktijk is een uitval van 5 % tijdens de teelt niet ongevoelbaar (Anonymus, 2004a; Kaarsemaker, pers.med.).

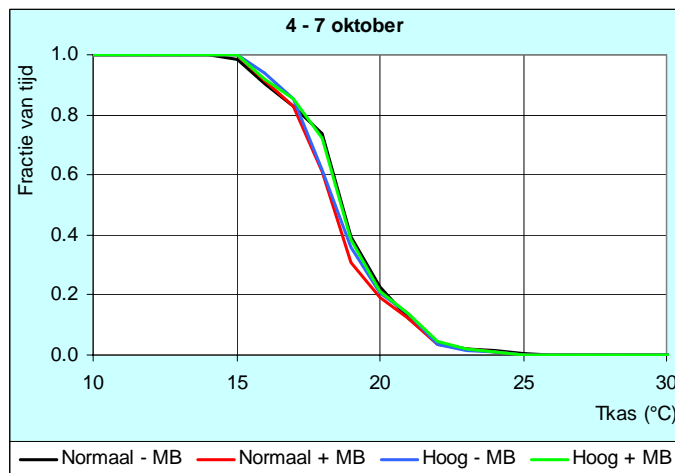
4 Analyse

Om inzicht te krijgen in het effect van de behandelingen op het gebruik van de regelorganen zijn voor de 3 perioden afzonderlijke frequentiecurven gemaakt, waarbij de fractie van de tijd bepaald is dat een bepaalde klimaatfactor of regelorgaan boven (dit is groter of gelijk aan) een bepaalde waarde is gekomen.

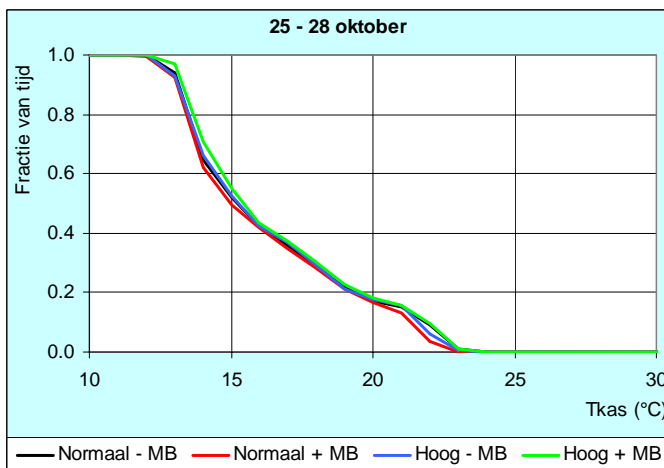
- kasttemperatuur



Figuur 30 Frequentiecurve van kasttemperatuur van 18 t/m 21 september (periode 1).



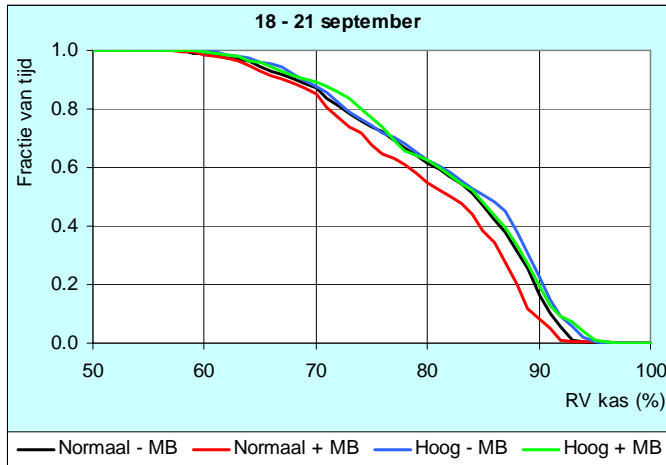
Figuur 31 Frequentiecurve van kasttemperatuur van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



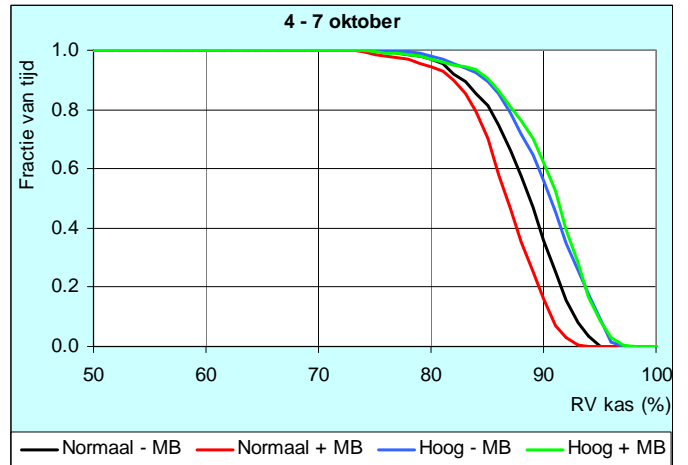
Figuur 32 Frequentiecurve van kasttemperatuur van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

De frequentieverdelingen van de kasttemperatuur laten geen behandelingseffect zien (zie Figuur 30 t/m Figuur 32). De spreiding die er is, kan komen door locatie effecten en temperatuurintegratie. Overigens worden temperatuureffecten weggeregeld door meer of minder verwarming of ventilatie. Bijvoorbeeld als verhoudingsgewijs een hogere vochtafhankelijke minimum buis wordt toegepast, dan zal het in de afdeling warmer worden. Die warmte zal dan voor een groot deel afgelucht worden, waardoor de temperatuurstijging van de kasttemperatuur gering zal zijn.

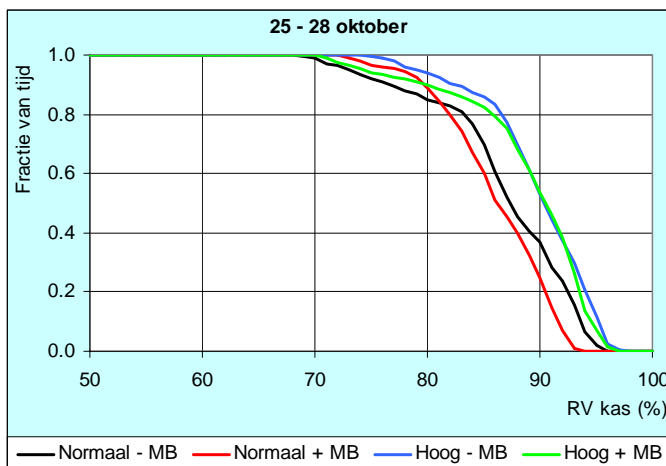
- RV kaslucht



Figuur 33 Frequentiecurve van RV kas van 18 t/m 21 september (periode 1).



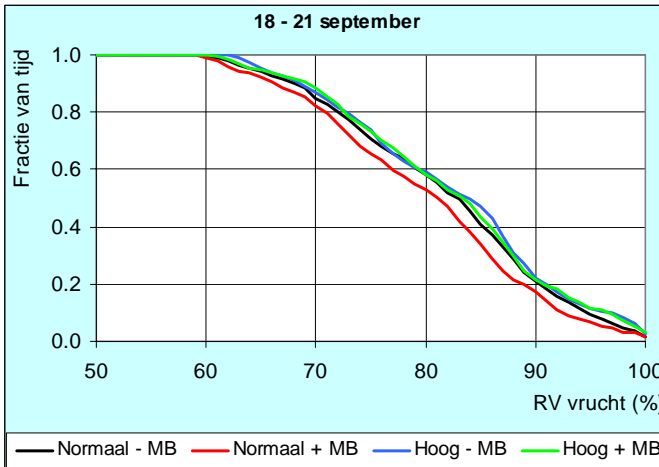
Figuur 34 Frequentiecurve van RV kas van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



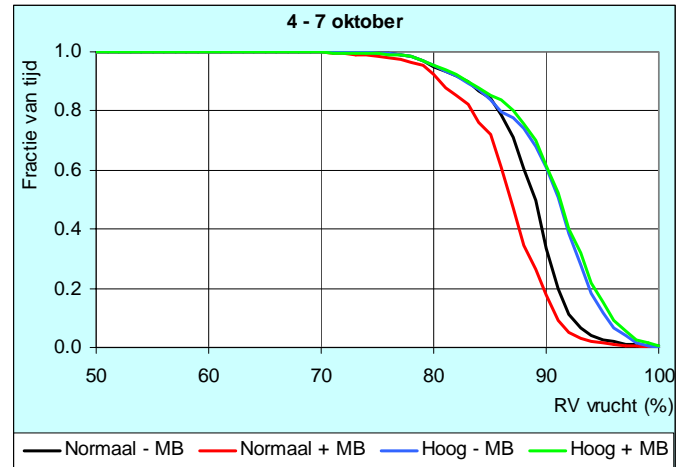
Figuur 35 Frequentiecurve van RV kas van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

Uit de frequentiecurven van de RV van de kaslucht, Figuur 33 t/m Figuur 35, volgt dat de behandeling *Normaal + MB* verhoudingsgewijs iets droger is geweest dan de andere behandelingen. De behandelingen *Hoog + MB* en *Hoog - MB* hadden in het algemeen de hoogste RV. De verschillen tussen deze twee behandelingen zijn niet duidelijk. Overigens zullen de verschillen tussen deze twee behandelingen pas bij een berekende RV_{vrucht} van rond 99 % RV zichtbaar worden, omdat dan pas bij de behandeling *Hoog + MB* de invloed van een vochtafhankelijke minimum buis voelbaar wordt.

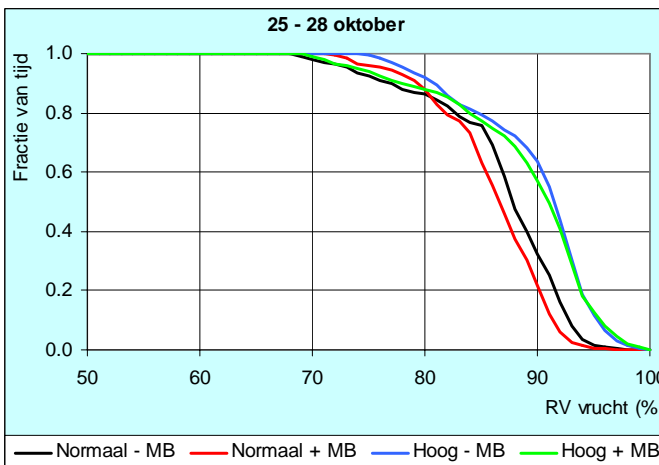
- berekende RV_{vrucht}



Figuur 36 Frequentiecurve van berekende RV_{vrucht} van 18 t/m 21 september (periode 1).



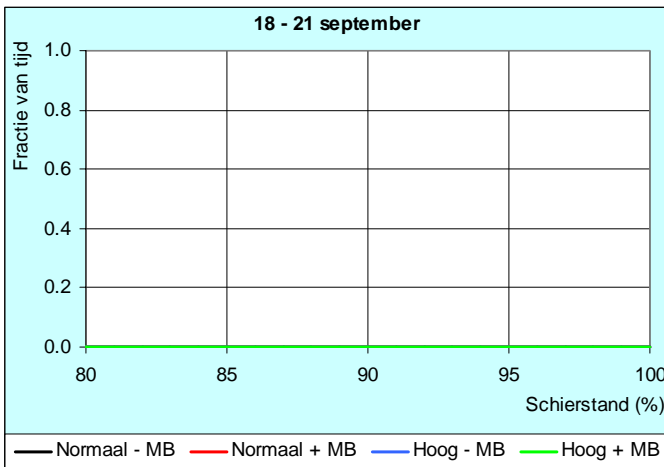
Figuur 37 Frequentiecurve van berekende RV_{vrucht} van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



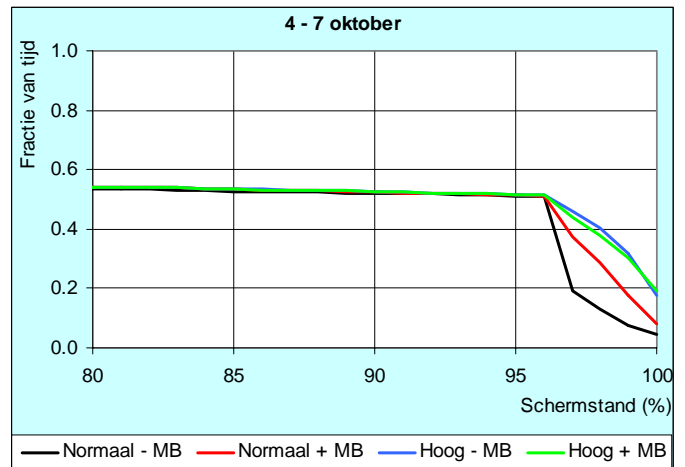
Figuur 38 Frequentiecurve van berekende RV_{vrucht} van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

Uit de frequentiecurven van de *berekende RV_{vrucht}* Figuur 36 t/m Figuur 38, volgt dat de behandeling *Normaal + MB* in het regeltraject vanaf 85 % *berekende RV_{vrucht}* verhoudingsgewijs droger is geweest dan de andere behandelingen. De behandelingen *Hoog + MB* en *Hoog - MB* hadden de hoogste *berekende RV_{vrucht}* . De verschillen tussen deze twee behandelingen zijn niet duidelijk. Overigens zullen de verschillen tussen deze twee behandelingen pas bij een *berekende RV_{vrucht}* van rond 99 % zichtbaar worden, omdat dan pas bij de behandeling *Hoog + MB* de invloed van een vochtafhankelijke minimum buis voelbaar wordt.

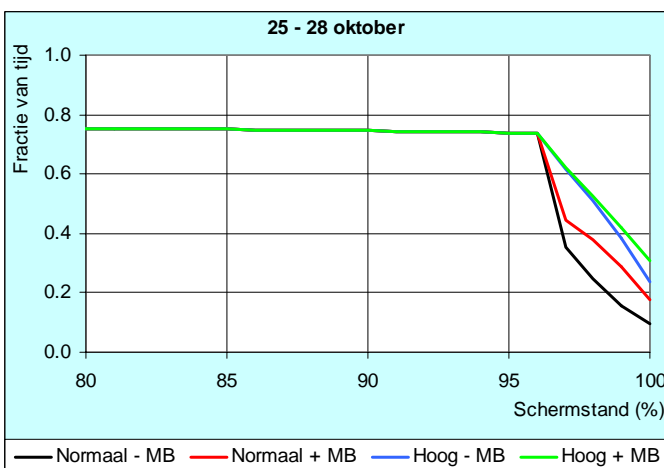
- schermstand



Figuur 39 Frequentiecurve van schermstand van 18 t/m 21 september (periode 1).



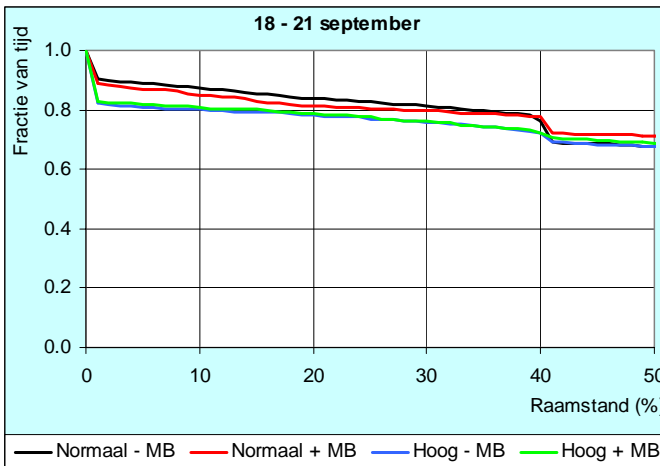
Figuur 40 Frequentiecurve van schermstand van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



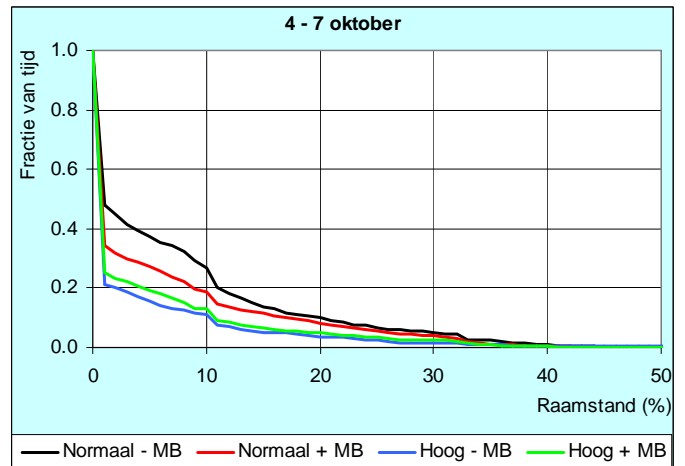
Figuur 41 Frequentiecurve van schermstand van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

In de eerste periode is niet geschermd. In periode 2 is iets meer dan 50 % van de tijd geschermd. In periode 3 is dit meer dan $\frac{3}{4}$ van de tijd. Aangezien de *berekende* RV_{vrucht} van behandeling *Normaal - MB* hoger was dan *Normaal + MB*, is bij de eerste genoemde meer vochtafhankelijk gekierd. Aangezien de *berekende* RV_{vrucht} van de behandelingen *Hoog - MB* en *Hoog + MB* over elkaar heen vallen, is het kiergedrag ook vergelijkbaar.

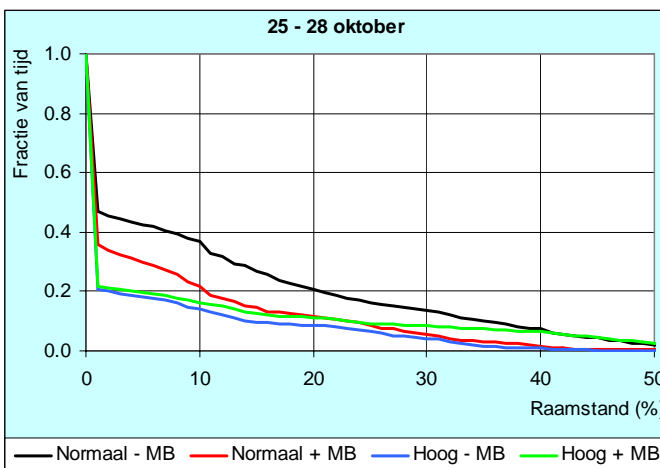
- raamstand



Figuur 42 Frequentiecurve van raamstand van 18 t/m 21 september (periode 1).



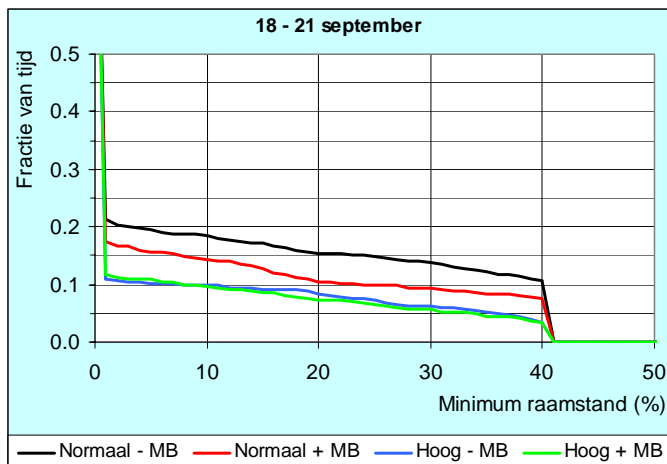
Figuur 43 Frequentiecurve van raamstand van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



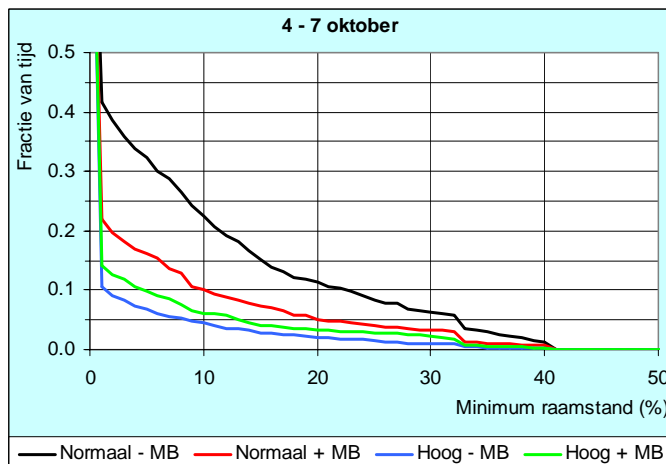
Figuur 44 Frequentiecurve van raamstand van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

Als eerst naar de berekende raamstand wordt gekeken, dan valt in periode 1 op dat er een knik is bij 40 % raamstand. Dit is verklaarbaar doordat maximaal 40 % vochtafhankelijk is gelucht. In periode 2 en 3 is niet of nauwelijks meer gelucht dan 40 %. Overigens was de maximum raamstand 200 %. Dit is 100 % aan beide zijden. Wat opvalt, is dat bij de behandeling *Normaal - MB* meer gelucht is dan bij de andere behandelingen. Dat meer gelucht is dan bij de behandeling *Normaal + MB* valt te verklaren doordat bij de behandeling *Normaal - MB* geen ondersteuning is geweest van een vochtafhankelijke minimum buis waardoor langer gelucht moet worden voor hetzelfde effect. Deze verklaring wordt ondersteund met de frequentiecurven van de vochtafhankelijke minimum raamstand (zie Figuur 45 t/m Figuur 47).

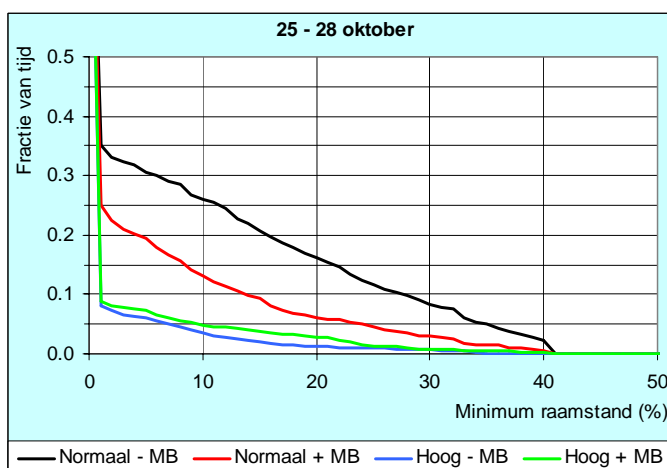
- berekende vochtafhankelijke raamstand



Figuur 45 Frequentiecurve van vochtafhankelijke minimum raamstand van 18 t/m 21 september (periode 1).



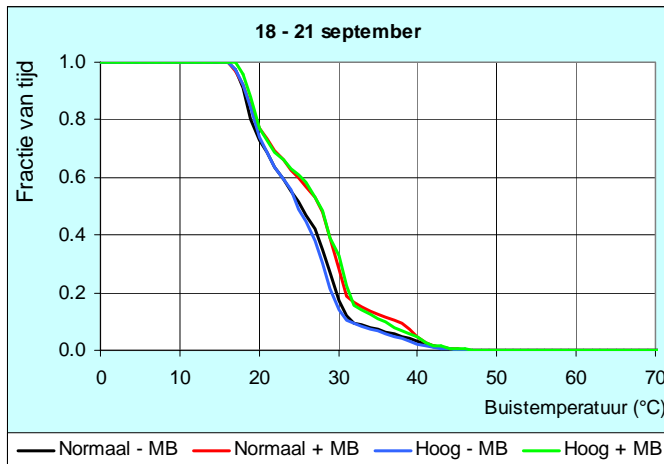
Figuur 46 Frequentiecurve van vochtafhankelijke minimum raamstand van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



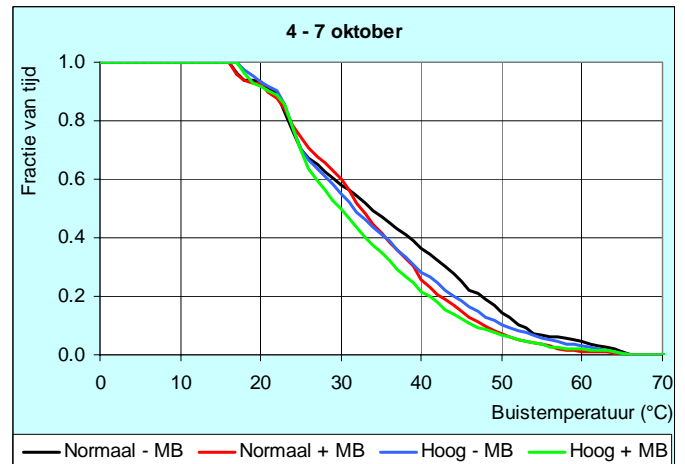
Figuur 47 Frequentiecurve van vochtafhankelijke minimum raamstand van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

Om het vochtafhankelijk luchten te beoordelen is het beter om specifiek naar de berekende vochtafhankelijke minimum raamstand te kijken (Figuur 45 t/m Figuur 47). Hieruit blijkt dat bij de behandelingen *Normaal - MB* en *Normaal + MB* een hogere minimum raamstand wordt berekend dan bij de behandelingen *Hoog - MB* en *Hoog + MB*. Dat bij *Normaal - MB* een hogere minimum raamstand wordt berekend dan bij *Normaal + MB* is verklaarbaar door de hogere *berekende RV_{vrucht}* bij eerst genoemde behandeling. Doordat 1 % meer RV-overschrijding 10 % meer minimum raamstand betekende, schuift de frequentiecurve flink op.

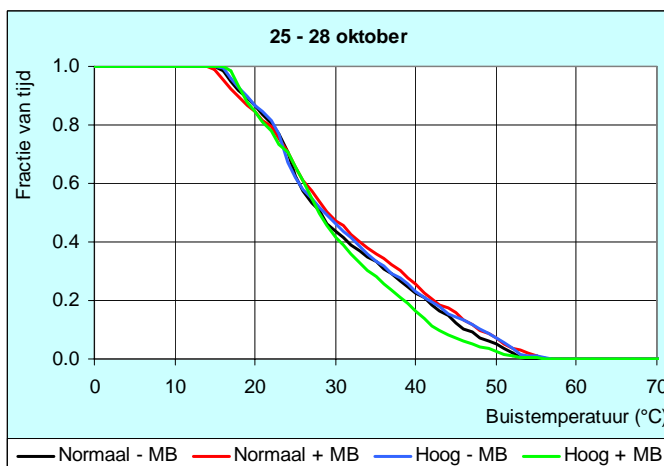
- buistemperatuur



Figuur 48 Frequentiecurve van berekende aanvoertemperatuur van hoofdnet van 18 t/m 21 september (periode 1).



Figuur 49 Frequentiecurve van berekende aanvoertemperatuur van hoofdnet van 4 t/m 7 oktober (periode 2).

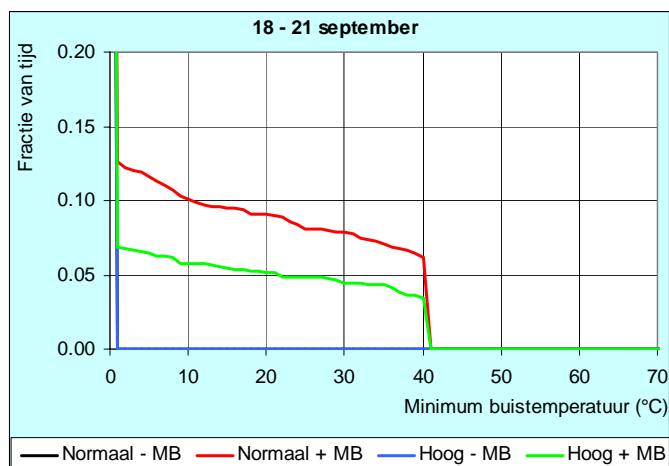


Figuur 50 Frequentiecurve van berekende aanvoertemperatuur van hoofdnet van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

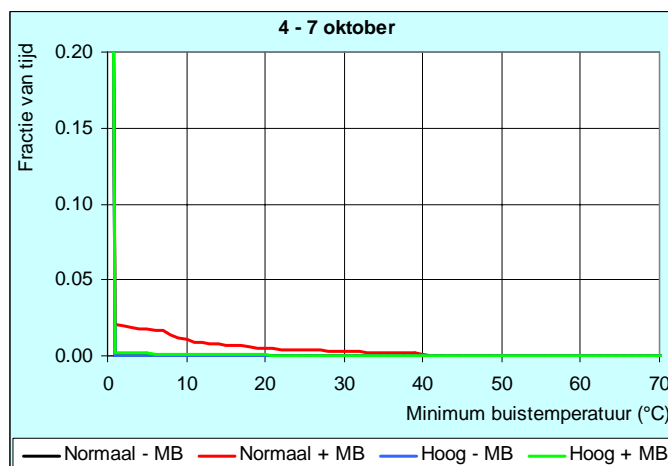
De frequentiecurven van de berekende aanvoertemperatuur van het hoofdnet zijn in Figuur 48 t/m Figuur 50 weergegeven. Wat opvalt, is dat in periode 1 de beide behandelingen met een vochtafhankelijke minimum buis wat hoger liggen dan de andere twee behandelingen. Dit is bepaald door de vochtafhankelijke minimum buis, zie Figuur 51 t/m Figuur 53.

Waarom in periode 2 de frequentiecurve van de behandeling *Normaal - MB* boven de andere curven ligt, is niet duidelijk. Evenmin kan geen sluitende verklaring gegeven worden waarom zowel in periode 2 als 3 de curve van de behandeling *Hoog + MB* het laagste ligt. Mogelijk dat de locatie van de afdeling daar van invloed op is geweest.

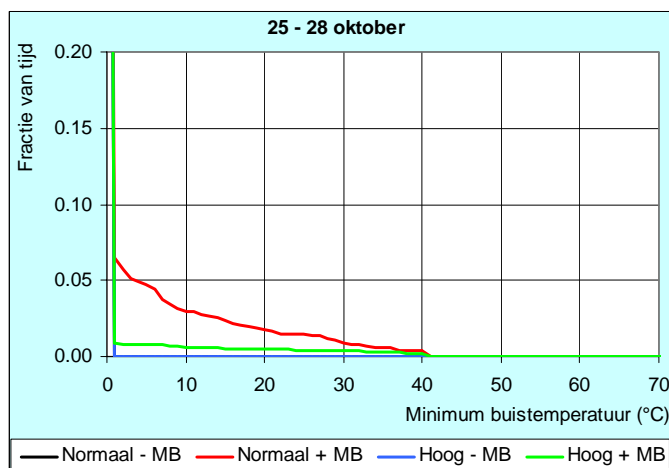
- berekende vochtafhankelijke minimum buis



Figuur 51 Frequentiecurve van vochtafhankelijke minimum buistemperatuur van hoofdnets van 18 t/m 21 september (periode 1).



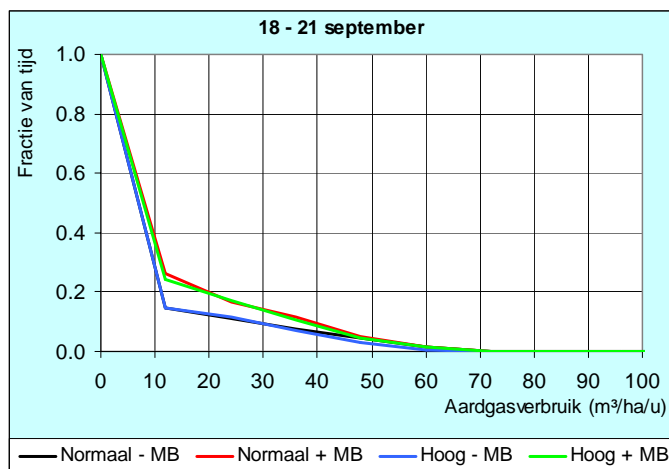
Figuur 52 Frequentiecurve van vochtafhankelijke minimum buistemperatuur van hoofdnets van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



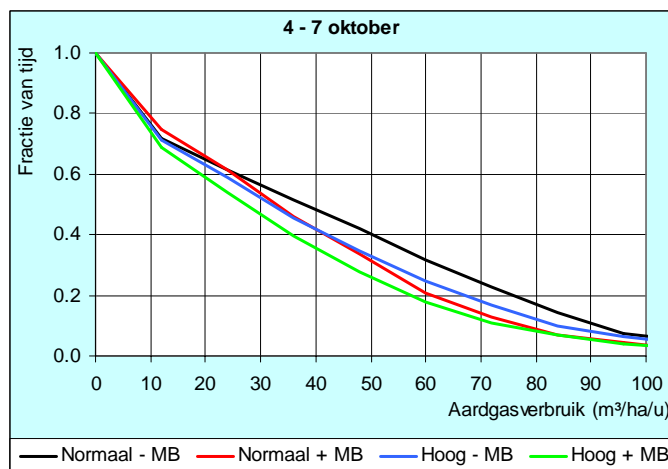
Figuur 53 Frequentiecurve van vochtafhankelijke minimum buistemperatuur van hoofdnets van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

Uit de frequentiecurven van de vochtafhankelijke minimum buis, Figuur 51 t/m Figuur 53, volgt dat in periode 1 gedurende maximaal 10 % van de tijd een vochtafhankelijke minimum buis is toegepast. Daarbij is bij de behandeling *Normaal + MB* het minimum buis gebruik bijna twee maal zo hoog als bij de behandeling *Hoog + MB*. In periode 2 en 3 is niet of nauwelijks een vochtafhankelijke minimum buis berekend.

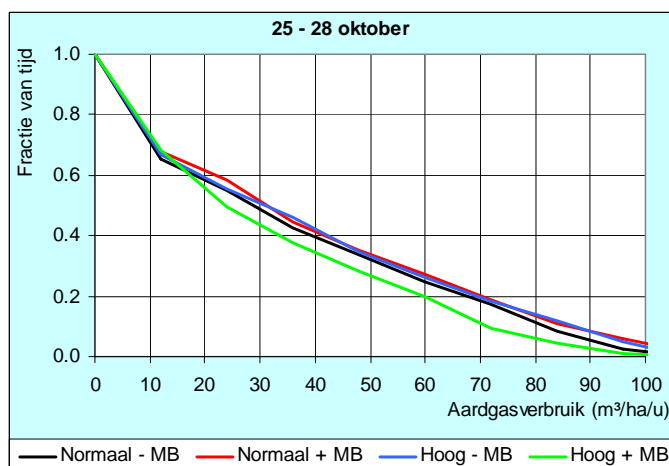
- energiegebruik



Figuur 54 Frequentiecurve van berekend aardgasverbruik van 18 t/m 21 september (periode 1).



Figuur 55 Frequentiecurve van berekend aardgasverbruik van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



Figuur 56 Frequentiecurve van berekend aardgasverbruik van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

Uit de frequentiecurven van het energiegebruik van de eerste periode, Figuur 54, blijkt datgene dat op grond van de vochtbehandelingen verwacht mocht worden: de behandelingen met een vochtafhankelijke minimum buis liggen hoger dan die zonder. Uit de frequentiecurven van periode 2 en 3 (resp. Figuur 55 en Figuur 56) kunnen geen harde conclusies getrokken worden (zie ook de toelichting bij Tabel 6 op pagina 28).

5 Simulatieberekeningen met Kaspro

5.1 Opzet

Voor het doorvertalen van de meetresultaten die in het experiment naar voren zijn gekomen naar de praktijksituatie, zijn simulatieruns met het simulatieprogramma Kaspro (De Zwart, 1996) uitgevoerd. In Kaspro is naast de praktijk-vochtregeling eenzelfde vochtregulatie opgenomen zoals in het experiment is gebruikt.

Er zijn 2 verschillende situaties doorgerekend:

- simulatie van het experiment met het doel om de energiebesparingmogelijkheden van de behandelingen te bepalen (paragraaf 5.2).
- simulatie van een jaarronde teelt met een vergelijking met een praktijkregeling (paragraaf 5.3).

5.2 Simulatie van experiment

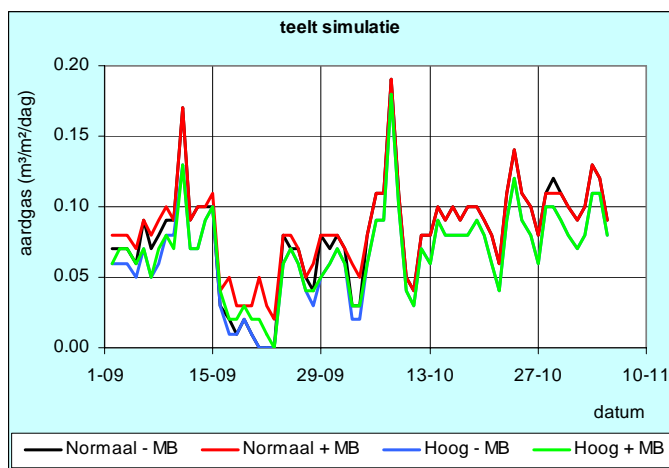
5.2.1 Uitgangspunten

Om een beeld te krijgen van de energiebesparingmogelijkheden van de vochtbehandelingen zijn runs uitgevoerd met Kaspro. Daarmee worden effecten van de locatie van de afdeling uitgesloten. Het is van belang dat het model de vochtinhouding van de afdelingen (luchtvochtigheid en verdamping) goed simuleert. Dit bepaalt mede de inzet van vochtregulerende acties, zoals een vochtafhankelijke minimum buis.

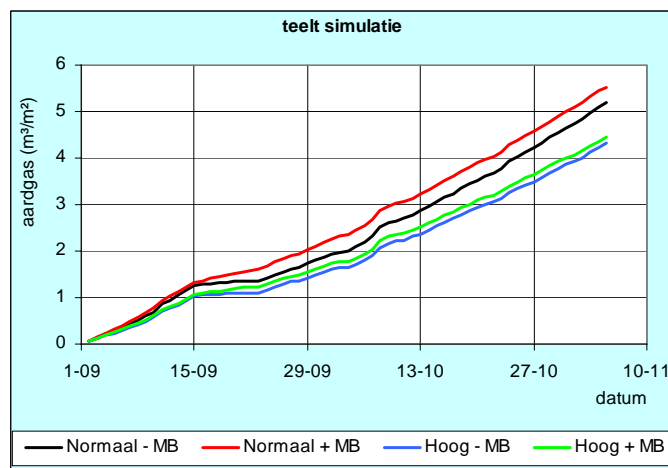
Uitgangspunten voor de simulatie van het experiment zijn:

- Weergegevens van PPO;
- Vergelijkbare regelinstantellingen, ventilatiecapaciteit en vochtregulatie als bij het experiment;
- Vergelijkbare gewasomvang als bij het experiment. Deze is gecontroleerd met een vergelijking van de gemeten en de gesimuleerde verdamping.

5.2.2 Simulatieresultaten



Figuur 57 Gesimuleerd aardgasverbruik van vochtbehandelingen tijdens experiment.



Figuur 58 Gesimuleerd cumulatief aardgasverbruik van vochtbehandelingen tijdens experiment.

Uit Figuur 57, Figuur 58 en Tabel 7 blijkt dat de behandelingen *Normaal + MB* en *Hoog + MB* een hoger aardgasverbruik hebben dan de behandelingen zonder vochtafhankelijke minimum buis, resp. *Normaal – MB* en *Hoog – MB*. De verschillen tussen al dan niet een vochtafhankelijke minimum buis zijn niet groot.

Tabel 7 Gesimuleerd aardgasverbruik van vochtbehandelingen tijdens het experiment.

Vochtbehandeling	Aardgasverbruik (m ³ /m ²)
Normaal – MB	5.61
Normaal + MB	5.96
Hoog – MB	4.66
Hoog + MB	4.80

5.3 Simulatie van jaarrond

5.3.1 Uitgangspunten

Om een vergelijking te maken met een praktijkregeling is van het volgende uitgegaan:

- Representatief klimaatbestand voor het weer van de laatste 10 jaar;
- Vergelijkbare vochtregulatie als bij het experiment;
- Instellingen en regelingen van praktijksituatie. Voor deze praktijksituatie bereikte A&F een goede overeenkomst.

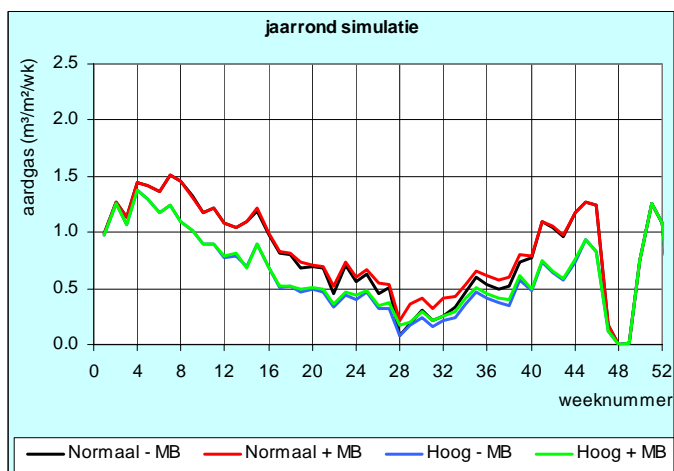
Hoofdpunten voor praktijksituatie:

- Scherm: Schermen als het buiten kouder was dan 8 °C met een SLS10-Ultra plus (gesloten, zonder ontbrekende bandjes). Overdag werd het scherm bij 10 W/m² instraling geopend. Bij kouder weer was dat later.
- Minimum buis: Vanaf 23 uur werd een minimum buis van 30 °C aangehouden. Bij zonsopkomst werd deze verhoogd naar 40 °C en 3 uur later naar 50 °C. Overdag werd de minimum buis stralingsafhankelijk afgebouwd over het traject van 100 naar 250 W/m².
- Luchtvochtigheid: vochtafhankelijke minimum raam als RV groter dan 80 %. Bij een buitentemperatuur onder 5 °C: 1 % minimum raam per 1 % vochtoverschrijding. Bij een buitentemperatuur boven 12 °C: 2 % minimum raam per 1 % vochtoverschrijding. Tussen 5 en 12 °C is de overgang lineair.

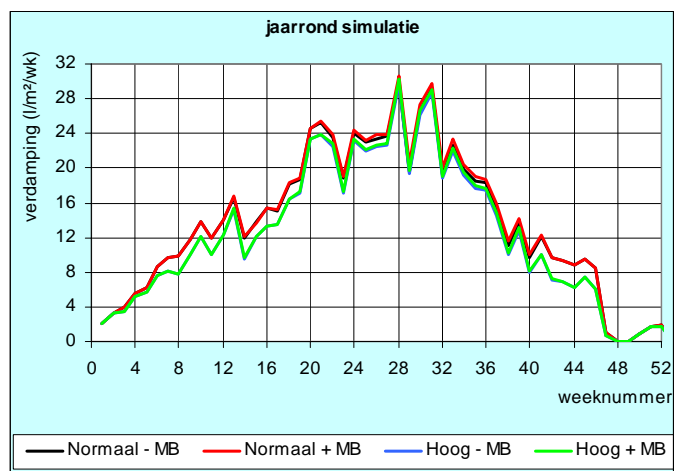
Hoofdpunten voor experimentele situatie:

- Vergelijkbare vochtinstellingen als bij experiment.
- Vergelijkbare schermstrategie als bij experiment.
- Verwarming- en ventilatie-instellingen als voor de praktijksituatie.
- Vergelijkbare kasuitrusting, waaronder schermtypen, als voor de praktijksituatie.

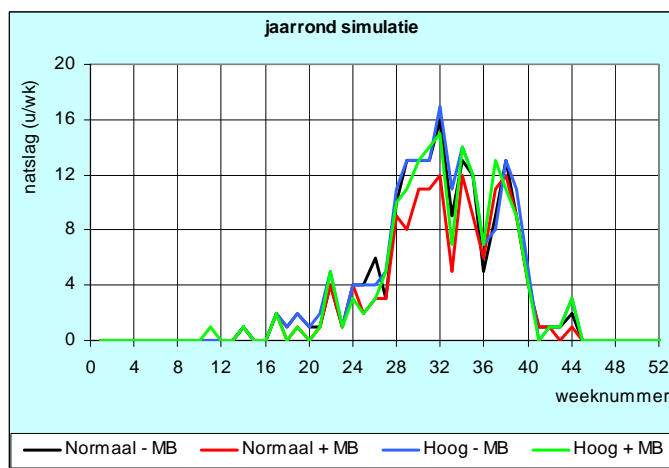
5.3.2 Resultaten van simulatie van vochtbehandelingen



Figuur 59 Jaarrond simulatie van aardgasverbruik van vochtbehandelingen uit experiment.



Figuur 60 Jaarrond simulatie van verdamping van vochtbehandelingen uit experiment.



Figuur 61 Jaarrond simulatie van natslag van vochtbehandelingen uit experiment.

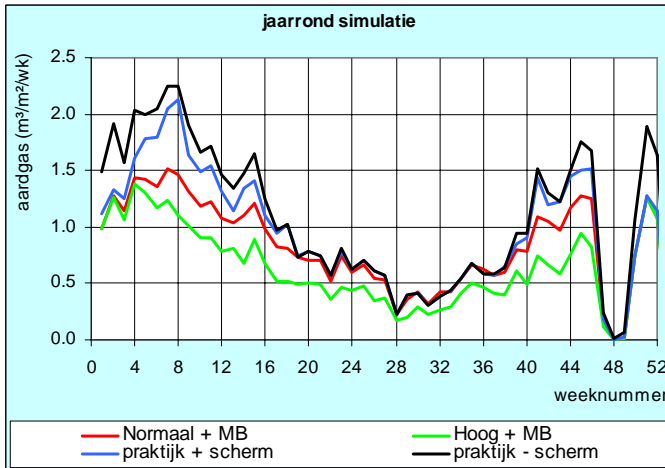
De resultaten van de jaarrond-simulatie van de 4 vochtbehandelingen van het experiment staan in Figuur 59 t/m Figuur 61. De cumulatieven staan in Tabel 8 (pagina 47).

De verschillen in gesimuleerd aardgasverbruik tussen de behandelingen met een *Hoog* en *Normaal* vochniveau zijn aanzienlijk (cumulatief 8 tot 10 m³/m²). De invloed van al dan niet een vochtafhankelijke minimum buis is in winter en voorjaar nauwelijks aanwezig. In de zomer en najaar is er enig effect te zien (Figuur 59). Op jaarrond basis kost een vochtafhankelijke minimum buis voor de gegeven vochtregulatie rond 1 m³/m². Dit komt doordat in de zomer en nazomer de vochtproblemen het grootste zijn, wat blijkt als naar het gesimuleerde aantal uren natslag (*berekende* $RV_{vrucht} \geq 100\%$) wordt gekeken (Figuur 61). Mogelijk dat het aantal uren natslag geringer had kunnen zijn, als de regelruimte voor een vochtafhankelijke minimum raamstand en/of een vochtafhankelijke minimum buis groter waren.

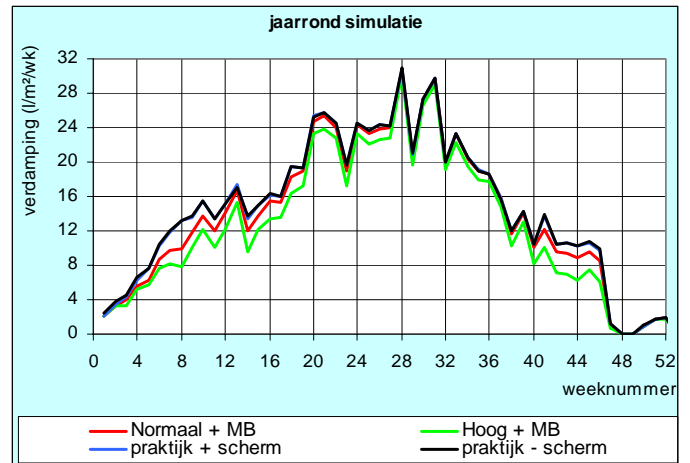
De verschillen in gesimuleerde verdamping tussen de behandelingen zijn gering. De verschillen zijn in september nog het grootste. Dit verklaart ook waarom er bij de analyse van de gemeten verdamping in oktober geen behandelingseffecten zijn gevonden (zie paragraaf 3.5).

5.3.3 Resultaten van simulatie van praktijkregeling en vergelijking met vochtbehandelingen

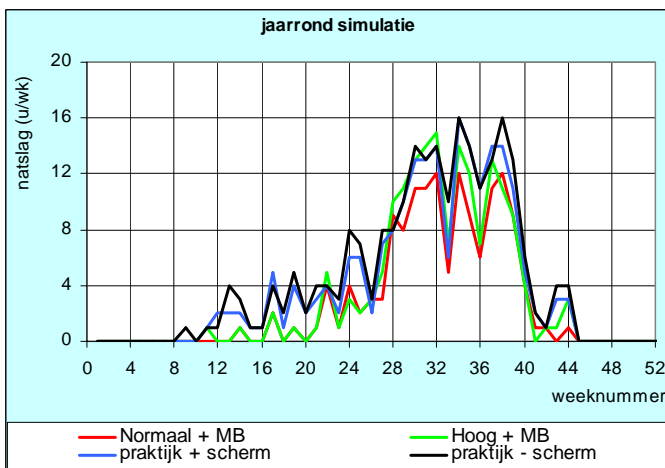
In onderstaande figuren is een vergelijking gemaakt van een praktijksituatie (met en zonder scherm) met de vochtbehandelingen uit het experiment waarbij een vochtafhankelijke minimum buis ingezet mocht worden. De cumulatieven staan in Tabel 8 (pagina 47).



Figuur 62 Vergelijking van jaarrond simulatie van aardgasverbruik van vochtbehandelingen uit experiment met praktijkregeling.



Figuur 63 Vergelijking van jaarrond simulatie van verdamping van vochtbehandelingen uit experiment met praktijkregeling.



Figuur 64 Vergelijking van jaarrond simulatie van uren natslag van vochtbehandelingen uit experiment met praktijkregeling.

De verschillen in aardgasverbruik tussen de praktijkregelingen en vochtbehandelingen uit het experiment zijn aanzienlijk. Bij de behandelingen met minimum buis is de besparing bij *Normaal* 13 % (100 % - 86.5 %) en bij *Hoog* 35 % (100 % - 66.4 %). Bij een ongeschermd teelt zijn de besparingen nog hoger (resp. 23 % en 41 %). De besparing bij de geschermd teelten komt voor een deel doordat de praktijkregeling tot 8 °C werd geschermd, terwijl bij de vochtbehandelingen uit het experiment dit tot 10 °C werd gedaan. Het aanhouden van een 6 % hoger vochniveau (*Hoog* in plaats van *Normaal*) levert gemiddeld 9 m³/m² per jaar op (gemiddelde van -MB en +MB).

In het voorjaar is het verschil tussen de praktijkregelingen en *Normaal + MB* gering, terwijl het gesimuleerde aantal uren natslag bij de praktijkregelingen hoger was. Opvallend is dat alle vochtbehandelingen uit het experiment ondanks het lager aardgasverbruik minder gesimuleerde uren natslag hadden dan de praktijkregelingen (zie Tabel 8). Verder wordt er bij de praktijkregelingen een iets hogere verdamping berekend, vooral in het voorjaar en najaar.

Tabel 8 Cumulatieven van jaarrond simulatie van aardgasverbruik, verdamping en natslag van vochtbehandelingen uit experiment en praktijkregeling.

vochtbehandeling	aardgasverbruik			verdamping			natslag		
	m ³ /m ²	% t.o.v. praktijk + scherm	% t.o.v. praktijk - scherm	l/m ²	% t.o.v. praktijk + scherm	% t.o.v. praktijk - scherm	uren	% t.o.v. praktijk + scherm	% t.o.v. praktijk - scherm
Normaal – MB	41.5	81.3	72.3	714	94.0	93.7	179	82.9	74.0
Normaal + MB	44.2	86.5	77.0	725	95.4	95.1	149	69.0	61.6
Hoog – MB	32.9	64.5	57.4	655	86.3	86.0	189	87.5	78.1
Hoog + MB	33.9	66.4	59.1	662	87.1	86.8	174	80.6	71.9
praktijk + scherm	51.0	100.0	89.0	760	100.0	99.7	216	100.0	89.3
praktijk – scherm	57.4	112.4	100.0	762	100.3	100.0	242	112.0	100.0

6 Discussie

- regelstrategie

De toegepaste vochtregulatie bestaande uit:

- eerst een vochtafhankelijke vochtkier in scherm,
- gevolgd door een vochtafhankelijke minimum raamstand,
- tot slot een vochtafhankelijke minimum buistemperatuur,

bleek een efficiënte regelstrategie te zijn om te voorkomen dat de luchtvochtigheid in de kas te veel opliep. Hierbij werd de vochtafvoer door condensatie op een koud kasdek zo veel mogelijk bevorderd. Verder werd de verdamping niet extra gestimuleerd.

Dit onderzoek bevestigt het onderzoek van Kempkes *et al.* (2000), dat een vochtkier in het scherm een goed hulpmiddel is om de luchtvochtigheid in een kas te beheersen. Uit eerder onderzoek bleek een vochtkier van 4 % voldoende. Voor het regelen van de vochtkier is het gewenst dat kleine stapjes worden genomen op basis van de trend van de luchtvochtigheid. Bij stapjes van 0.3 tot 0.5 % is het raadzaam om 5 tot 10 minuten te wachten. In dit onderzoek is met een proportionele vochtkier gewerkt. Een integrerende vochtkierregeling was hier beter op zijn plaats geweest.

Zoals bij de analyse van de resultaten is vermeld (hoofdstuk 4), was in de warme maand september een vochtafhankelijke minimum raamstand van maximaal 40 % niet toereikend om voldoende vocht af te voeren en was aanvullend een minimum buis van maximaal 40 °C nodig. Toch trad er op enkele dagen volgens de *berekende RV_{vrucht}* bij alle behandelingen natslag op. Wellicht dat de vochtafhankelijke minimum raamstand meer regelruimte gegeven had moeten worden en/of de vochtafhankelijke minimum buis hoger had moeten kunnen worden.

In de maand oktober waren de weerscondities gewijzigd: er vond condensatie op het kasdek plaats. De vochtregeling bestond bijna alleen uit een vochtafhankelijke vochtkier en een vochtafhankelijke minimum raamstand. Een vochtafhankelijke minimum buis was niet of nauwelijks nodig. Wanneer een vochtafhankelijke minimum raam werd toegepast, werd het warmteverlies van de kas groter waardoor de buizen extra warmte moesten leveren. Daarmee kan geconcludeerd worden dat de inzet van de vochtregulerende middelen ook afhangt van de buitencondities. Hierop aansluitend verdient het de aanbeveling om de regelruimte voor de vochtafhankelijke minimum raamstand ook afhankelijk te maken van de buitencondities (windsnelheid, buitentemperatuur en –luchtvochtigheid). Is het kouder, dan kan met een kleinere raamstand worden volstaan om dezelfde hoeveelheid vocht af te luchten.

Bij de simulatievergelijking met de praktijkregeling bleek dat bij de toegepaste vochtregulatie van de experimenten minder natslag optrad. De gesimuleerde natslag in de zomerperiode kan mogelijk verkleind worden door meer regelruimte voor een vochtafhankelijke minimum raamstand en/of een vochtafhankelijke minimum buis.

De toegepaste vochtregulatie is eenvoudig van opzet en sluit aan bij de regelingen en instelmogelijkheden van de moderne klimaatcomputers. Een snelle introductie van deze vochtregulatie moet daarmee in de praktijk mogelijk zijn. Verder is de vochtstrategie voor het gehele etmaal hetzelfde en zijn er geen stralingsafhankelijke aanpassingen op bijvoorbeeld minimum buis toegepast. De kans op fouten of op conflicterende instellingen is daardoor geringer.

- regelen op basis van *berekende RV_{vrucht}*

Bij de toegepaste vochtregulatie is geregeld op basis van de luchtvochtigheid bij de traag opwarmende vruchten, *berekende RV_{vrucht}*. Dit bleek een energie-efficiënte wijze te zijn. Dit is een bevestiging van het onderzoek van De Graaf (Visser, 2002). Zeker op dagen met een groot verschil tussen dag- en nachttemperatuur zal de *berekende RV_{vrucht}* 's morgens bij het opstoken hoger zijn dan de RV van de kaslucht. Als de *berekende RV_{vrucht}* te veel op dreigt te lopen, zal vocht afgevoerd moeten worden. Soms is daarbij een minimum buis nodig om natslag te voorkomen. In de namiddag als de kastemperatuur daalt, is de *berekende RV_{vrucht}* juist lager dan de RV van de kaslucht. Vaak kan dan worden volstaan met vocht afluchten. Een vochtafhankelijke minimum buis is dan veelal niet nodig. Daarmee wordt energie bespaard.

Met het regelen op basis van de *berekende RV_{vrucht}* kan kritischer op vocht worden geregeld. Daardoor kunnen iets hogere vochtstreefwaarden worden aangehouden dan bij het regelen op de RV van de kaslucht. Des te gelijkmatiger de temperatuurverdeling in de kas, des te hoger kunnen de vochtstreefwaarden zijn.

- temperatuurintegratie

Voor de praktijk zijn er geen beperking om naast de besproken vochtregulatie ook temperatuurintegratie toe te passen. Echter om proeftechnische redenen was het van belang dat op het moment van opstoken uitgegaan werd van enigszins vergelijkbare temperaturen, omdat vooral tijdens het opstooktraject de vochtproblemen optreden. De beschikbare temperatuurintegratie-regeling van het PPO had die mogelijkheid niet; temperatuurintegratie-regelingen die in de praktijk worden gebruikt, hebben meer mogelijkheden.

Uit het onderzoek van Esmeijer (2004) volgde dat bij gebruik van temperatuurintegratie soms natslag optrad. Door nu gebruik te maken van een vochtregeling op basis van berekende RV bij de vruchten kan deze natslag voor een groot deel worden voorkomen.

- vochtgrenzen en *Botrytis*

De toegepaste vochtgrenzen lagen hoger dan in de praktijk gangbaar is. Dit heeft in het najaar niet geleid tot grote problemen met *Botrytis*, ondanks dat door het inbrengen van *Botrytis* sporen de infectiedruk in de afdelingen was opgevoerd. Zelfs bij de vochtbehandeling *Hoog – MB* waren de aantastingen niet groter dan bij de andere behandelingen (zie paragraaf 3.6.2). Wel nam aan het einde van de teelt bij alle behandelingen de aantasting door *Botrytis* in dezelfde mate toe. Aangezien de experimenten met de hoge vochtgrenzen pas in september zijn gestart, kan niet geconcludeerd worden dat als deze hoge vochtgrenzen vanaf het begin van de teelt worden toegepast ook geen grote problemen met *Botrytis* zal geven.

In een recent literatuuroverzicht stellen Dik & Wubben (in voorbereiding) dat *Botrytis* aantasting bij een stookteelt van tomaat meestal beperkt blijft tot stengelinfectie en wel op wonden van verwijderde bladeren en trossen. Een directe stengelinfectie wordt niet beïnvloed door de RV, waarschijnlijk omdat de infectie plaatsvindt op de vochtige wonden. Wonden blijven bij een hogere luchtvochtigheid langer vatbaar, dan bij lagere luchtvochtigheid. Het aanhouden van een al dan niet vochtafhankelijke minimum buistemperatuur beïnvloedt de luchtvochtigheid. Soms blijft een stengelinfectie tot 12 weken latent aanwezig.

In het uitgevoerde onderzoek leidde het moment van blad snijden, vroeg (voor 9:30 uur) of laat (na 15 uur), niet tot duidelijk meer of minder *Botrytis*. Hierbij moet worden aangetekend dat er een flinke spreiding was in de mate van aantasting tussen de behandelingen en binnen de afdelingen.

Aantasting van tomatenvruchten door *Botrytis* komt bij stookteelten weinig voor. Aantasting van bladeren komt vaker voor. Dit kan samenhangen met het optreden van bladrandjes en/of bladpuntjes. Hierbij treedt afsterving van de randen en toppen van de bladeren op. Dit is een ideale plaats voor infectie door *Botrytis*. De oorzaak van bladrandjes en bladpuntjes is niet exact duidelijk. Vermoed wordt dat het verband houdt met

plotselinge klimaatovergangen bijvoorbeeld te veel luchten bij koud weer (Anonymus, 2004b). Mogelijk dat het betrekken van de gemeten planttemperatuur in de regeling een hulpmiddel is om tijdig te attenderen of in te grijpen op plotselinge klimaatovergangen. Enkele andere factoren die de epidemische ontwikkeling van *Botrytis* volgens Dik & Wubben (in voorbereiding) beïnvloeden zijn temperatuur, verwijdering van aangetast en dood plantmateriaal, teelthandelingen en de watergeefstrategie (worteldruk).

Uit het bovenstaande blijkt dat de vochtgrenzen in de praktijk niet zondermeer jaarrond verhoogd kunnen worden zonder grote problemen met *Botrytis*. Dit is mede afhankelijk van teelthandelingen, watergeefstrategie, aanwezige infectiedruk en duur tot einde van teelt.

- energiegebruik

Uit het uitgevoerde onderzoek kunnen de volgende energiebesparingspunten worden aangedragen:

- Het gebruik van een scherm belemmert niet de vochtbeheersing.
- Een vochtkier van 4 % is voldoende. Daarmee wordt voldoende vocht afgevoerd door condensatie op het koude kasdek, terwijl dit niet ten koste gaat van veel extra energieverliezen.
- Met het regelen op basis van de *berekende RV_{vrucht}* kan kritischer op vocht worden geregeld. Daardoor kunnen de vochtstreefwaarden enkele procenten RV hoger liggen dan als op RV van de kaslucht geregeld wordt.
- Simulatie resultaten geven aan dat afhankelijk van het toegepaste vochniveau op jaarbasis 13 tot 35 % energie bespaard kan worden ten opzichte van een praktijkregeling (geschermd teelt met jaarverbruik van 51 m³/m²). Bij de geschermd praktijkregeling werd tot 8 °C buitentemperatuur geschermd, terwijl bij de gesimuleerde vochtbehandelingen tot 10 °C buitentemperatuur is geschermd.

De energiebesparing die uiteindelijk wordt bereikt, is afhankelijk van:

- de wijze van vochtregelen, de vochtregulatie;
- de wijze waarop vocht geregeld wordt (RV van kaslucht of RV bij vruchten);
- het niveau waarop vocht geregeld wordt.

De toegepaste vochtregulatie heeft geen invloed op de piekbelasting. De piekbelasting wordt eerder beïnvloed door de pieken in de warmtevraag. Op dat moment zijn er meestal geen vochtproblemen.

Het laatste jaar is in de praktijk de tendens zichtbaar dat met name bij tomatenteelt gekozen wordt voor een scherm waarbij 1 op 20 tot zelfs 1 op 10 bandjes wordt weggelaten om voldoende vochtafvoer te realiseren (Visser, 2004). Dit houdt in dat eigenlijk voor een vaste kier van 5 tot 10 % wordt gekozen. Daarmee wordt aan energiebesparing ingeleverd. Ook biedt dit minder mogelijkheden om in het begin van de teelt onder winterse omstandigheden de luchtvochtigheid op peil te houden. Een gesloten energiescherm (zonder ontbrekende bandjes) in combinatie met een nauwkeurige vochtkierregeling heeft meer voordelen. Echter volgens tuinders leidt het gebruik van vochtkieren tot een ongelijke temperatuurverdeling in de kas.

- productie en kwaliteit

Als gevolg van een storing in de watervoorziening voordat het experiment werd ingezet, traden problemen op met neusrut en zwelscheuren. Dit heeft de beoordeling van effecten van de luchtvochtigheid op het gewas en productiekwaliteit moeilijk gemaakt. Vooralsnog zijn er geen aanwijzingen dat er behandelingseffecten op de productie en kwaliteit zijn. Verder moet rekening gehouden worden met de uitgroei duur van de vruchten van 7 tot 8 weken. Effecten van behandelingen op jonge vruchten worden veel later bij de oogst waargenomen.

Bij de simulaties was de gesimuleerde verdamping voor de praktijkregeling fors hoger dan die bij de vochtbehandelingen. Op basis van diverse onderzoeken concludeert Esmeijer (1998) dat de verdamping in de teelt van verschillende vruchtgroenten 10 tot 30 % verlaagd kon worden zonder opbrengst in te leveren.

- planttemperatuur

Vergelijking van de gemeten planttemperaturen onder en boven in het gewas geven aan dat deze temperaturen flink van elkaar kunnen verschillen en dat die afwijken van de kasluchttemperatuur (zie paragraaf 3.4).

In de maand september bleek de gemeten planttemperatuur boven in het gewas overdag tot 2 °C hoger te liggen dan de kasluchttemperatuur. Het gewas absorbeert de zonnestraling en warmt vervolgens de kaslucht op. 's Nachts daalt de planttemperatuur boven in het gewas tot 1 °C onder de kasluchttemperatuur. Dit komt door de uitstraling van het gewas naar het koudere kasdek.

De planttemperatuur onder in het gewas loopt overdag minder op dan de kasluchttemperatuur. De berekende vruchttemperatuur als zijnde een traag opwarmend plantendeel waarop het eerst condensatie zal optreden, volgt in het algemeen goed de planttemperatuur onder in het gewas. Echter de temperatuur van de IR-planttemperatuur is het gemiddelde van de plantobjecten die de kamera in beeld heeft.

Voor de vochtregeling heeft het regelen op basis van de luchtvochtigheid bij berekende vruchttemperatuur voor alsnog de voorkeur. De luchtvochtigheid bij de planttemperatuur boven in het gewas is niet geschikt, omdat deze temperatuur sterk door de zonnestraling wordt beïnvloed, terwijl de vruchten en stengels zich in de schaduw van bladeren onder het gewas bevinden. Een beter alternatief voor de berekende vruchttemperatuur zou een gemeten vrucht- of stengeltemperatuur zijn. Echter de bevestiging van sensoren op vruchten en stengels vergt veel naloop na gewaswerkzaamheden. Beter zou het zijn om de vrucht- en stengeltemperatuur te emuleren met sensoren op een kunststengel of kunstvrucht. Deze sensoren hebben nauwelijks naloop nodig.

- andere gewassen

Dit onderzoek is uitgevoerd voor tomaat. De toegepaste vochtregulatie en het regelen op basis van de RV bij de vruchten kunnen zondermeer toegepast worden bij de andere vruchtgroenten. Voor de sierteeltgewassen moet nog een methode worden ontwikkeld om de RV van die plantendelen te meten of te berekenen waar de kans op vochtproblemen het grootst is. Een probleem bij bijvoorbeeld roos of gerbera is dat de bloem boven het gewas uitsteekt en daardoor warmte uitstraalt naar het kasdek. Daarnaast stelt bijvoorbeeld roos eisen aan de luchtvochtigheid tijdens de teelt voor een goede houdbaarheid (Marissen *et al.*, 2004). Overigens maakt het voor de eerder beschreven wijze van vochtregulatie niet uit waarop geregeld wordt, luchtvochtigheid van de kaslucht of luchtvochtigheid bij de plantendelen.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

De resultaten van het project *Energiebesparing door aangepaste vochtregulatie* laten zien dat de toegepaste vochtregulatie bestaande uit eerst een vochtafhankelijke vochtkier in het scherm (maximum 4 %) gevolgd door een vochtafhankelijke minimum raamstand en tot slot een vochtafhankelijke minimum buistemperatuur een efficiënte regelstrategie is om te voorkomen dat de luchtvochtigheid in de kas te veel oploopt. Hierbij wordt de vochtafvoer door condensatie op een koud kasdek zo veel mogelijk bevorderd. Verder wordt de verdamping niet extra gestimuleerd. Het gebruik van een energiescherm heeft geen nadelig effect op het beheersen van de luchtvochtigheid.

Bij de toegepaste vochtregulatie is geregeld op basis van de luchtvochtigheid bij de traag opwarmende vruchten. Dit bleek een energie-efficiënte wijze te zijn. Doordat bij het regelen op de luchtvochtigheid van de vruchten alleen op moment dat het moet ook daadwerkelijk actie wordt ondernomen, kan het vochniveau enkele procenten hoger liggen dan als op de luchtvochtigheid van de kaslucht vocht wordt geregeld. Simulatieresultaten geven aan dat afhankelijk van het toegepaste vochniveau op jaarbasis 13 tot 35 % energie bespaard kan worden ten opzichte van een praktijkregeling (geschermd teelt met jaarverbruik van 51 m³/m²) en dat daarbij minder kans op natslag optreedt. Bij de geschermd praktijkregeling werd tot 8 °C buitentemperatuur geschermd, terwijl bij de gesimuleerde vochtbehandelingen tot 10 °C buitentemperatuur is geschermd.

De toegepaste vochtgrenzen hebben in het najaar niet geleid tot grote problemen met *Botrytis*, ondanks dat door het inbrengen van *Botrytis* sporen de infectiedruk in de afdelingen was opgevoerd. Wel nam aan het einde van de teelt bij alle behandelingen de aantasting door *Botrytis* in dezelfde mate toe. Of de vochtgrenzen ook in de praktijk jaarrond verhoogd kunnen worden zonder grote problemen met *Botrytis*, hangt af van teelthandelingen, watergeefstrategie, aanwezige infectiedruk en duur tot einde van teelt.

In het uitgevoerde onderzoek leidde het moment van blad snijden, vroeg (voor 9:30 uur) of laat (na 15 uur), niet tot duidelijk meer of minder *Botrytis*. Hierbij moet worden aangetekend dat er een flinke spreiding was in de mate van aantasting tussen de behandelingen en binnen de afdelingen.

7.2 Aanbevelingen voor de praktijk

Uit het uitgevoerde onderzoek kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan:

- Gebruik van een energiescherm.
- Gebruik eerst een vochtafhankelijke vochtkier in scherm van maximaal 4 %. Neem kleine stapjes van 0.3 tot 0.5 % en wacht vervolgens 5 tot 10 minuten tussen de verstellingen.
- Is de vochtkier in het scherm maximaal, pas vervolgens een vochtafhankelijke minimum raamstand toe.
- Zet vervolgens een vochtafhankelijke minimum buistemperatuur in.
- Stook tijdig op: zorg dat de gewenste dagtemperatuur bereikt is op het moment dat de zon enige kracht begint te krijgen.
- Stook langzaam op: 90 minuten per °C.

Dit is een efficiënte regelstrategie om te voorkomen dat de luchtvochtigheid in de kas te veel oploopt en waarbij vochtafvoer door condensatie op een koud kasdek zo veel mogelijk wordt gestimuleerd. Vaste schermkieren, vaste minimum raamstanden of vaste minimum buistemperaturen zijn voor de vochtregulatie niet nodig.

De toegepaste vochtregulatie is eenvoudig van opzet en sluit aan bij de regeling en instelmogelijkheden van de moderne klimaatcomputer. Indien de regelruimte voor de vochtafhankelijke minimum raamstand ook beïnvloed kan worden door de buitencondities (windsnelheid, buitentemperatuur en –luchtvochtigheid), dan heeft dat de voorkeur.

In het najaar kan een vrij hoog vochniveau worden getolereerd. Regelen op basis van de RV bij de berekende vruchttemperatuur of door een condensatiemodel (afhankelijk van de klimaatcomputer) heeft de voorkeur. Doordat bij het regelen op de luchtvochtigheid van de vruchten alleen op moment dat het moet ook daadwerkelijk actie wordt ondernomen, kan het vochniveau enkele procenten hoger liggen dan als op de luchtvochtigheid van de kaslucht vocht wordt geregeld. Des te geringer de ruimtelijke temperatuurverschillen in de kas zijn, des te hoger het vochniveau kan zijn en des te groter de energiebesparing.

Vergelijking met de gesimuleerde praktijkregeling geeft aan dat bij de toegepaste vochtbehandelingen minder kans op natslag is dan bij de praktijkregeling en dat bij een lager energiegebruik.

8 Bronvermelding

- Anonymus, 2004a. Grillige productie ondanks regelmatige vruchtaanmaak. Groenten & Fruit, week 26, p. 22.
- Anonymus, 2004b. PT-meter leidt tot matigen instellingen. Groenten & Fruit, week 17, p. 23.
- Baas, R. & M. Warmenhoven, 2003. Planttemperatuur in relatie tot omgevingsfactoren: metingen voor mogelijke toepassing in klimaatregeling. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, 28 pp.
- Brinkman Tuinbouw Techniek, 2004. Brochure Planttemperatuurmeters in kassen.
- Dik, A.J. & J.P. Wubben (in voorbereiding). Epidemiology of *Botrytis cinerea* diseases in greenhouses. In: Botrytis: biology, pathology and control (eds.: Y. Elad, B. Williamson, P. Tudzynski & N. Delen). Kluwer Academic Publishers.
- Esmeijer, M.H., 1998. Minimale transpiratie in relatie tot energieverbruik, productie en kwaliteit van glastuinbouwgewassen, Eindrapportage van het onderzoek over de jaren 1993-1997. PBG, Rapport 154, Naaldwijk, 52 pp.
- Esmeijer, M.H., 2004. Tomatenteelt met een beperkte gasaansluitwaarde. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, 41 pp.
- Jarvis, W.R., 1977. Botryontinia and Botrytis species: taxonomy, physiology, and pathogenicity. Monograph No. 15, Research Branch, Canada Department of Agriculture.
- Kempkes, F.L.K., N.J. van de Braak, G. Houter & A.T.M. Zwinkels, 2000. Schermkieren in de praktijk, onderzoek naar verbeterde regeling, temperatuurverschillen en gewasontwikkeling bij paprika. IMAG rapport P2000-30, 44 pp.
- Marissen, N., C. Slootweg & M. ten Hoope, 2004. Grenswaarden voor luchtvochtigheid bij energiebesparing in siergewassen. Effecten van de luchtvochtigheid op de houdbaarheid van rozen. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, nr. 421327, 79 pp.
- Nawrocki, K.R., 1985. Meting warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie van verwarmingspijpen in kassen. IMAG rapport 73.
- Stanghellini, C., C. Blok, M. Esmeijer & F. Kempes, 2003. Strategieverkenning verdamping. Verlaagde verdamping als middel om energie te besparen. IMAG Nota P2003-02 / PPO Publicatie GT13056, 41 pp.
- Van Gurp, H. & A. Dik, 1996. Lang druppelen geeft meer Botrytis. Groeten en Fruit, 5 jan., p. 22-23.
- Visser, P., 2002. Minimumbuis temperen zónder extra risico. Groenten & Fruit, week 34, p. 24-25.
- Visser, P., 2004. Langer schermen met opener doek. Groenten & Fruit, week 25, p. 32-33.
- Zwart, H.F. de, 1996. Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. Ph.D.Thesis, Wageningen Agricultural University.

Bijlage 1 Klimaatinstellingen

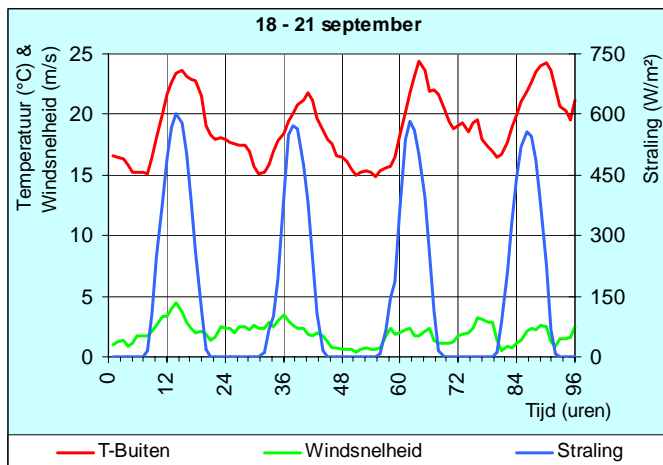
In onderstaand overzicht zijn de belangrijkste klimaatinstellingen weergegeven en het moment waarop zij eventueel zijn aangepast. Een toelichting bij enkele instellingen staat op de volgende pagina.

instelling	eenheid	was	5/9	15/9	16/9	19/9	24/9	14/10	24/10
VENTILATIE									
periode 1		zon ↑	zon ↑			zon ↑			
- tijd	uur:min	0:00	-1:00			-3:00			
- streefwaarde	C	18.5	21.5						
periode 2		klok	zon ↓						
- tijd	uur:min	12:00	0:00						
- streefwaarde	C	21.5	17.5						
periode 3		klok	-						
- tijd	uur:min	16:00	-						
- streefwaarde	C	23.0	-						
periode 4		klok	-						
- tijd	uur:min	20:00	-						
- streefwaarde	C	17.5	-						
opwarmsnelheid	min / °C	60							
afkoelsnelheid	min / °C	30							
stralingsaanpassing (periode 2 en 3)									
- begin stralingstraject	W/m ²	200			0				
- verandering	C / (W/m ²)	0.02			0				
- max.verandering	C	2			0				
naloop	%	50							
maximum raam	%	200							
VERWARMING									
periode 1		zon ↑	zon ↑			zon ↑			
- tijd	uur:min	1:00	-1:00			-3:00			
- streefwaarde	C	17.5	20.5	19.0					
periode 2		klok	zon ↓	zon ↓				zon ↓	zon ↓
- tijd	uur:min	12:00	0:00	-1:00					
- streefwaarde	C	20.5	16.5	15.0				14.0	13.0
periode 3		klok	-						zon ↓
- tijd	uur:min	16:00	-						4:00
- streefwaarde	C	20.5	-						14.0
periode 4		zon ↓	-						
- tijd	uur:min	0:00	-						
- streefwaarde	C	16.5	-						
opwarmsnelheid	min / °C	30		60		90			
afkoelsnelheid	min / °C	30							
stralingsaanpassing		GEEN							
max.buis	C	65.0							
temp.integratie	aan/uit				AAN			UIT	
SCHERM									
- T-buiten grens dicht	C	UIT					AAN		
- stralingsgrens open	W/m ²						10.0		
- altijd open tussen	uur						200		
							10 - 17		

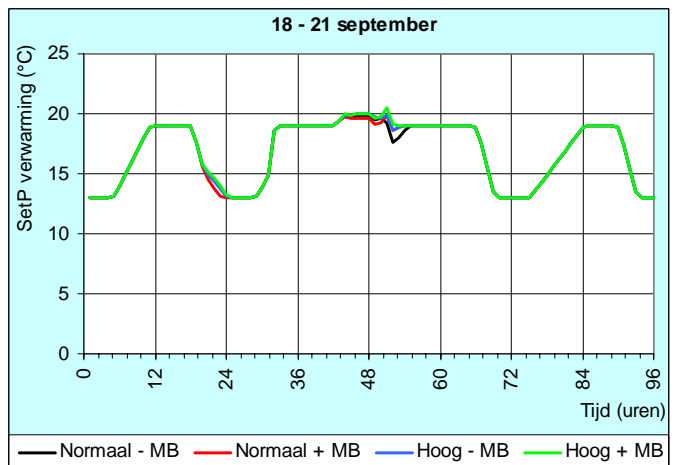
Toelichting:

- Bij de ventilatie- en verwarmingsregeling kunnen maximaal 4 perioden worden gebruikt. Per periode kan worden aangegeven wat het startmoment is. Dit kan een kloktijd zijn (wintertijd) of astronomisch zijn ten opzichte van zonsopkomst (zon ↑) of zonsondergang (zon ↓). Vanaf het startmoment wordt eerst begonnen met een opwarm- of afkoeltraject.
- De P-banden waren seizoensafhankelijk. Dit hield in dat bijvoorbeeld bij een ingestelde P-band van 3 °C deze 's zomers 3 °C is maar dat deze naar de winter toe langzaam verdubbelt tot 6 °C.
- Het scherm werd tussen 17 en 10 uur (wintertijd) gesloten als het buiten kouder was dan 10 °C. 's Morgens werd het scherm eerder dan 10 uur geopend als buiten meer dan 200 W/m² aan globale straling werd gemeten.

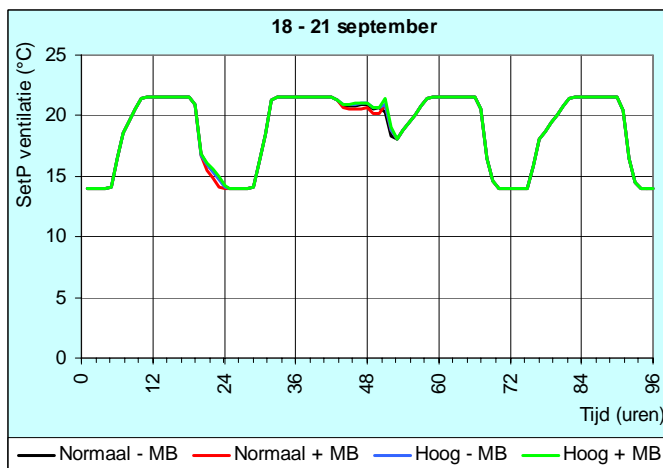
Bijlage 2 Gerealiseerd klimaat in periode 1



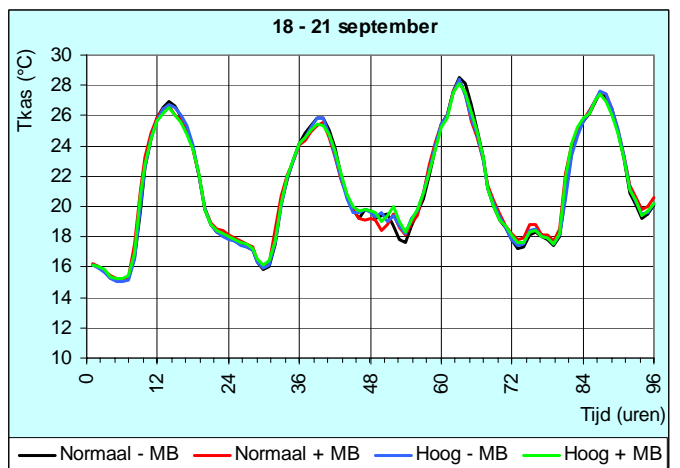
Figuur 1 Buitenklimaat van 18 t/m 21 september (periode 1).



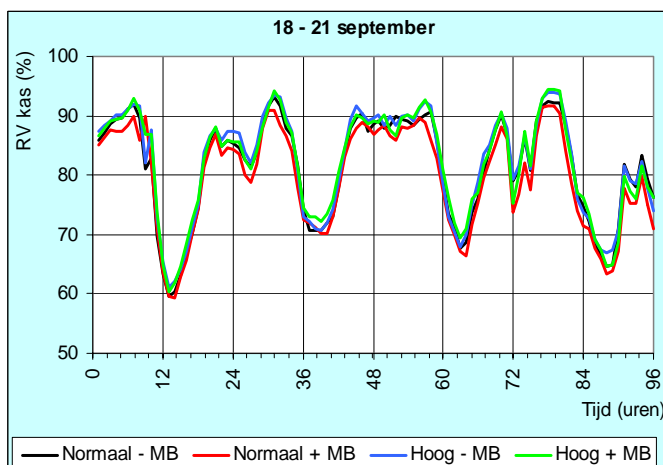
Figuur 2 Streefwaarde voor verwarming incl. stralingsaanpassing van 18 t/m 21 september (periode 1).



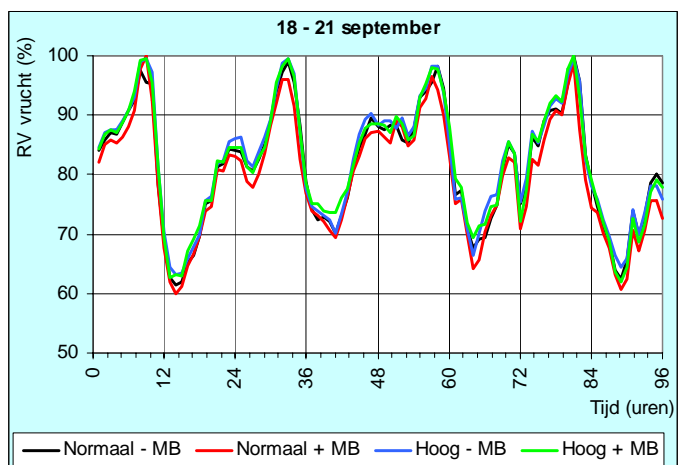
Figuur 3 Streefwaarde voor ventilatie incl. stralingsaanpassing van 18 t/m 21 september (periode 1).



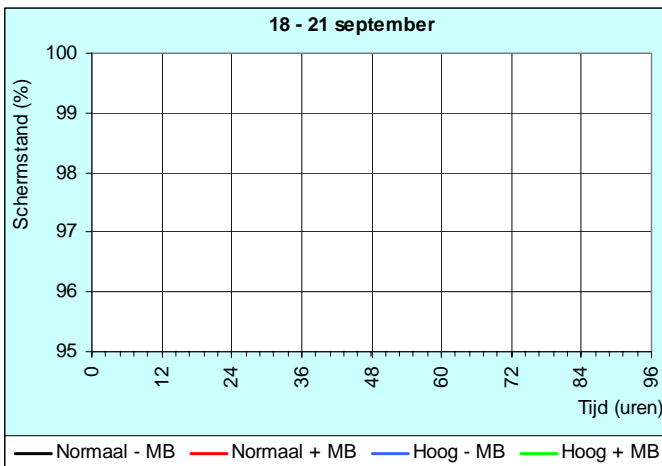
Figuur 4 Gemeten kasttemperatuur van 18 t/m 21 september (periode 1).



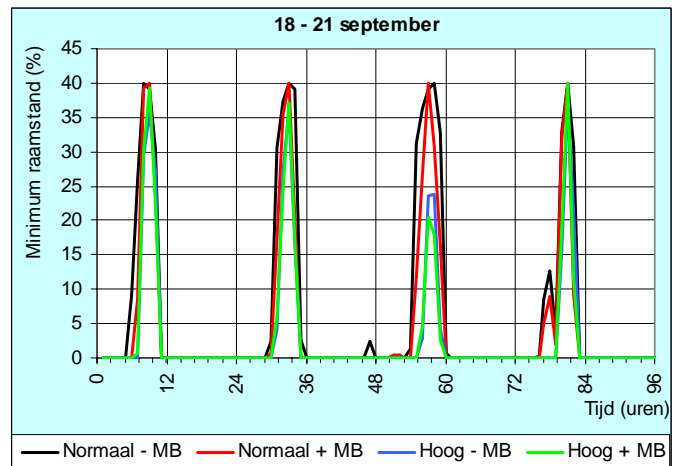
Figuur 5 Gemeten RV van kaslucht van 18 t/m 21 september (periode 1).



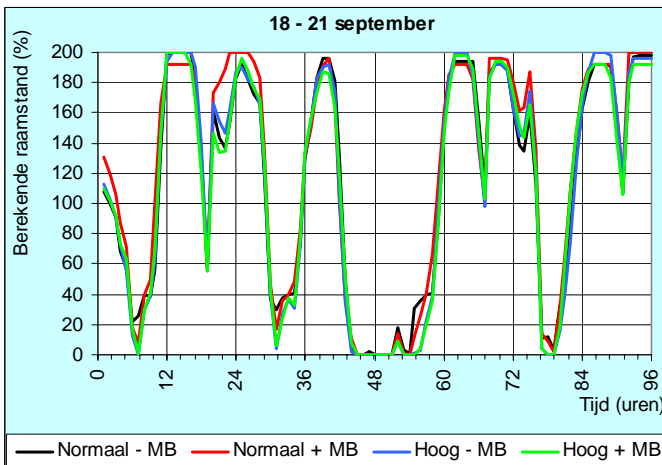
Figuur 6 RV bij berekende vruchttemperatuur van 18 t/m 21 september (periode 1).



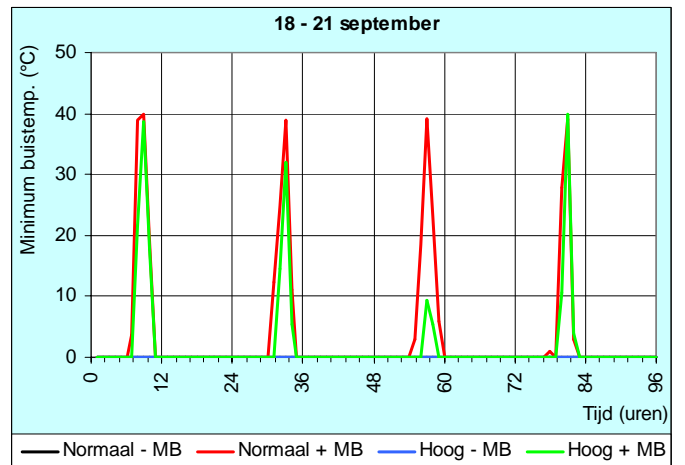
Figuur 7 Gemeten schermstand van 18 t/m 21 september (periode 1).



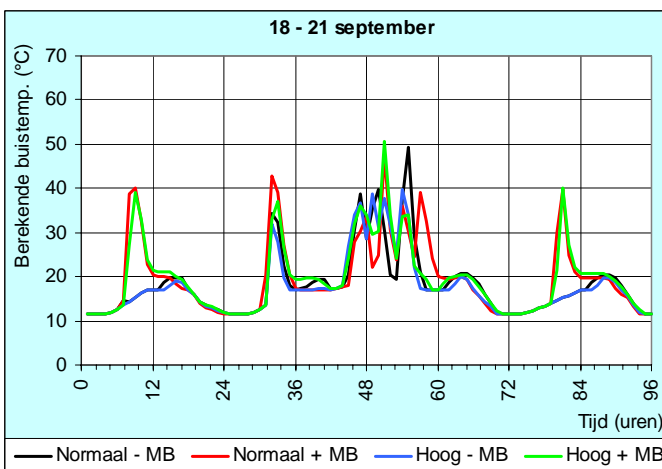
Figuur 8 Berekende vochtafhankelijke minimum buistemperatuur van hoofdnet van 18 t/m 21 september (periode 1).



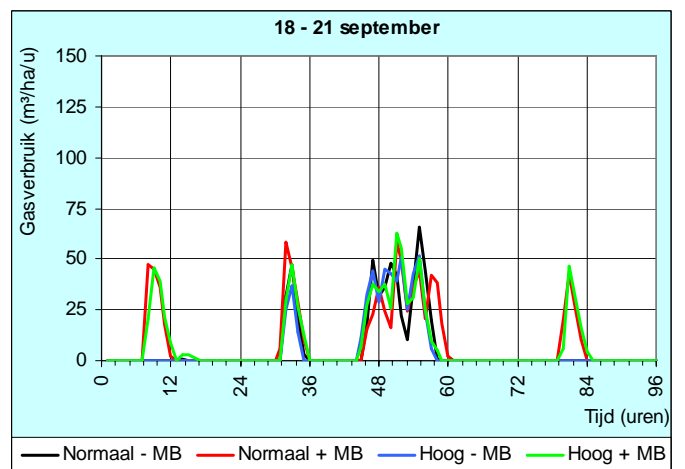
Figuur 9 Berekende raamstand (200 % = beide zijden volledig open) van 18 t/m 21 september (periode 1).



Figuur 10 Berekende vochtafhankelijke minimum buistemperatuur van hoofdnet van 18 t/m 21 september (periode 1).

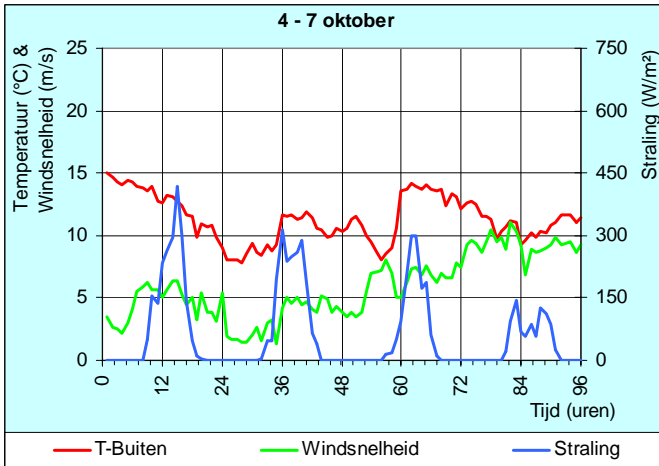


Figuur 11 Berekende buistemperatuur (aanvoer van hoofdnet) van 18 t/m 21 september (periode 1).

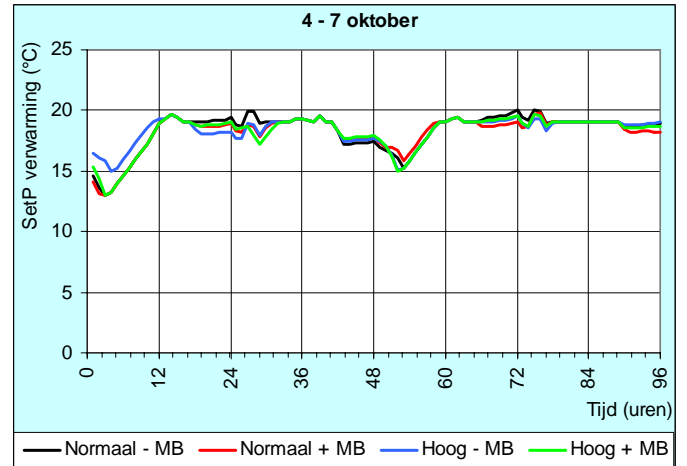


Figuur 12 Berekende energiegebruik van 18 t/m 21 september (periode 1).

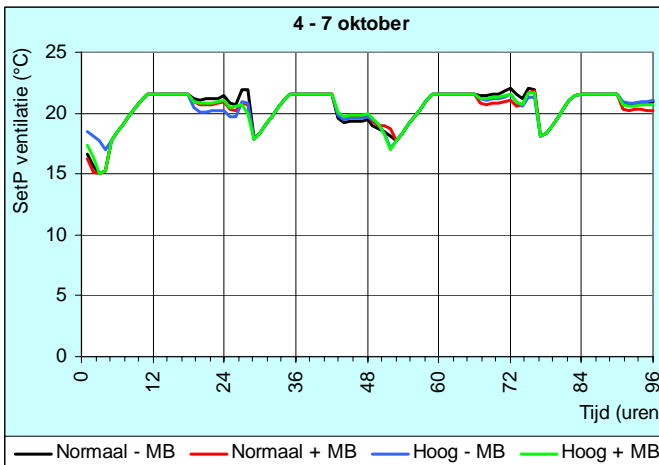
Bijlage 3 Gerealiseerd klimaat in periode 2



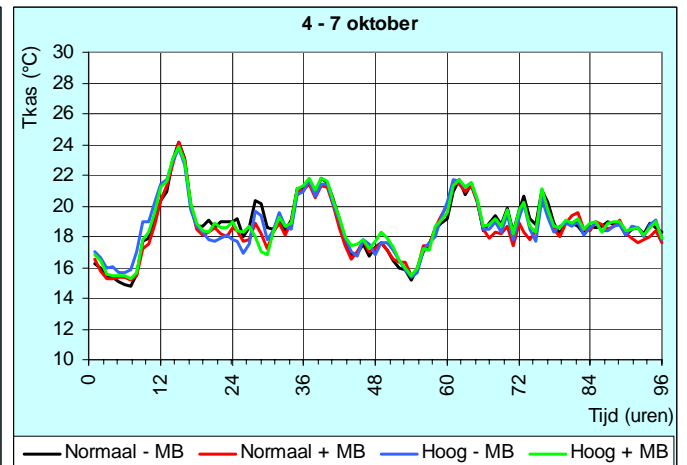
Figuur 1 Buitenklimaat van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



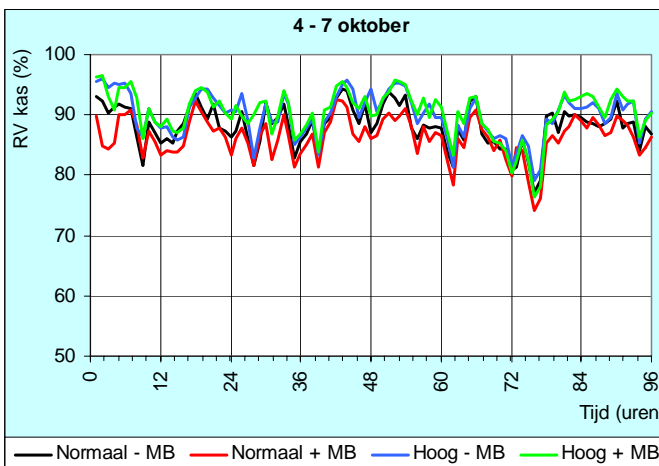
Figuur 2 Streefwaarde voor verwarming incl. stralingsaanpassing van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



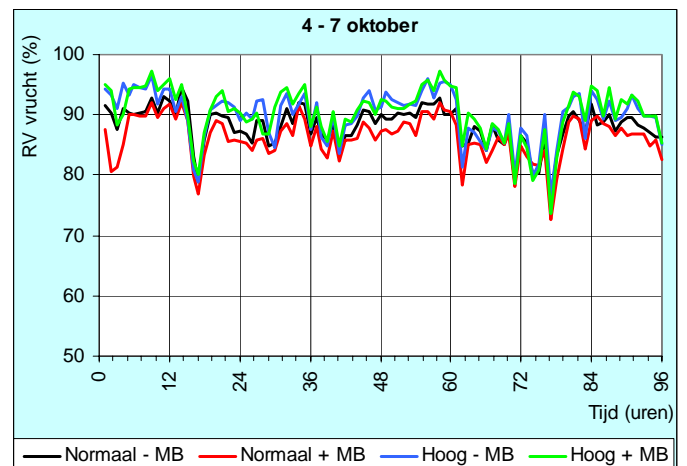
Figuur 3 Streefwaarde voor ventilatie incl. stralingsaanpassing van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



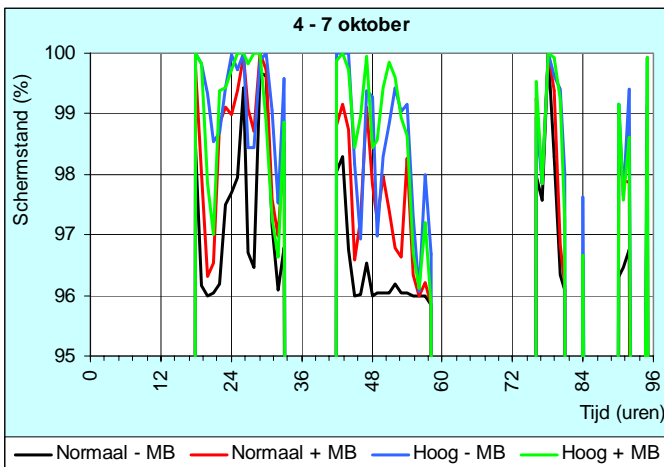
Figuur 4 Gemeten kasttemperatuur van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



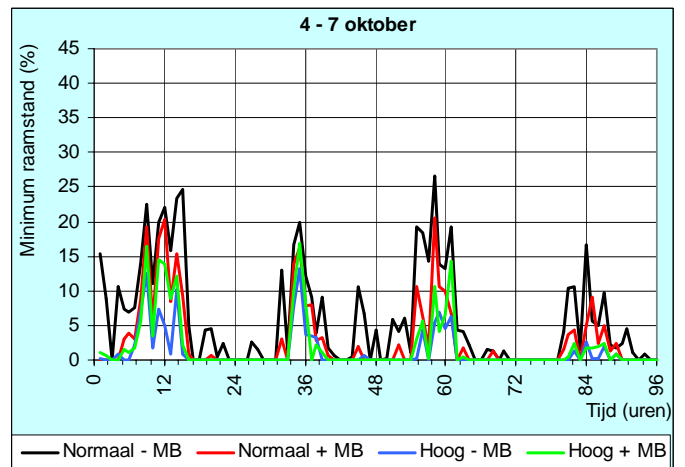
Figuur 5 Gemeten RV van kaslucht van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



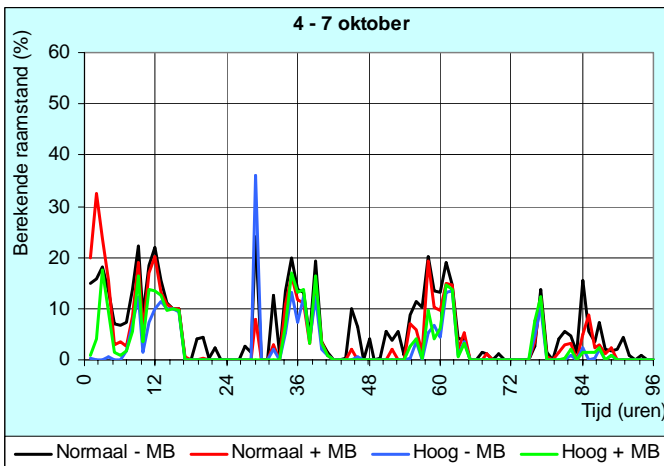
Figuur 6 RV bij berekende vruchttemperatuur van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



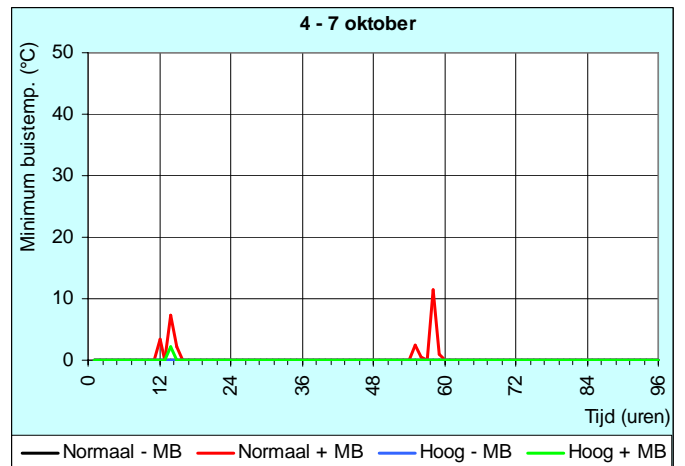
Figuur 7 Gemeten schermstand van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



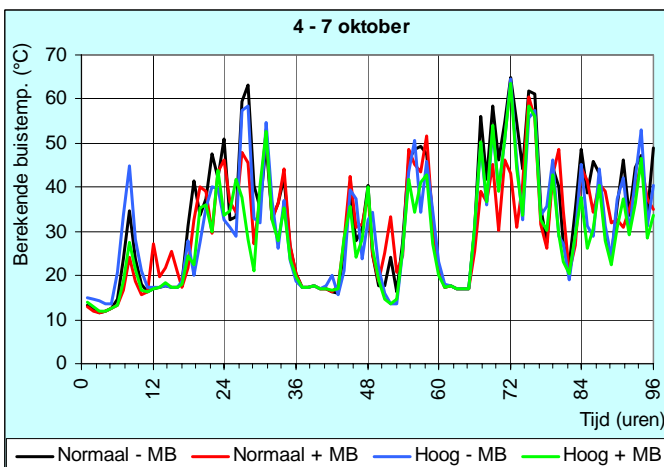
Figuur 8 Berekende vochtafhankelijke minimum buistemperatuur van hoofdnet van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



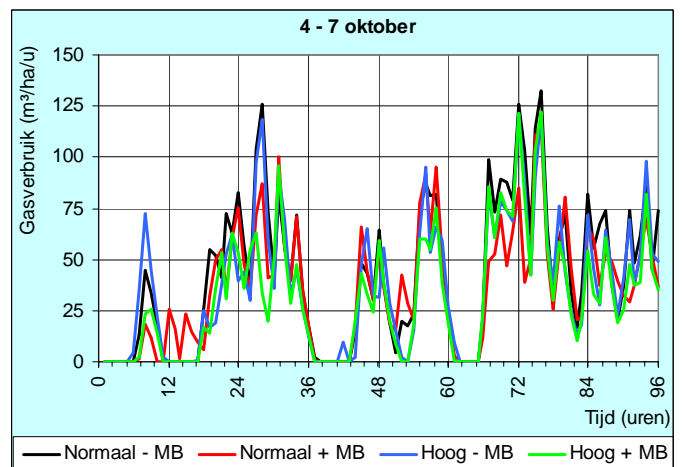
Figuur 9 Berekende raamstand (200 % = beide zijden volledig open) van 4 t/m 7 oktober (periode 2).



Figuur 10 Berekende vochtafhankelijke minimum buistemperatuur van hoofdnet van 4 t/m 7 oktober (periode 2).

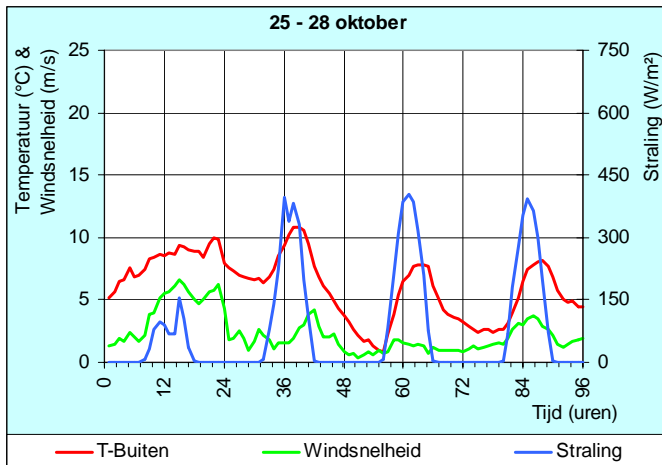


Figuur 11 Berekende buistemperatuur (aanvoer van hoofdnet) van 4 t/m 7 oktober (periode 2).

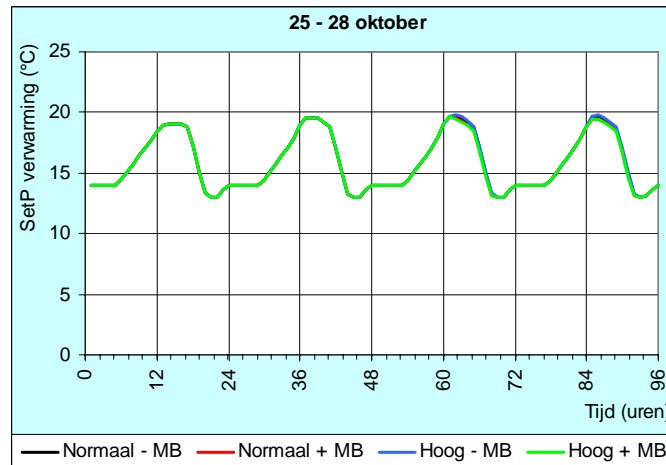


Figuur 12 Berekende energiegebruik van 4 t/m 7 oktober (periode 2).

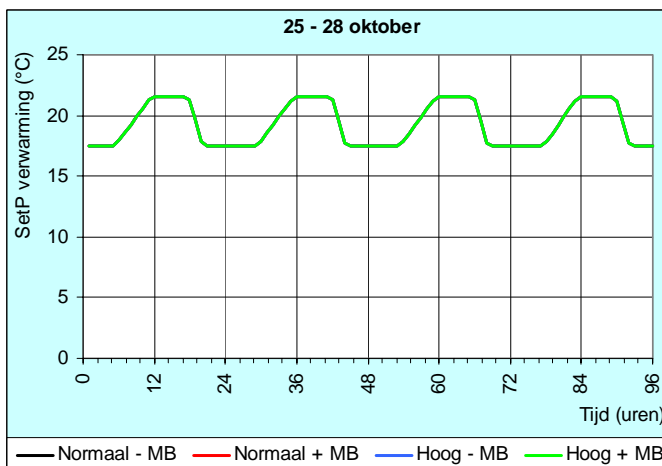
Bijlage 4 Gerealiseerd klimaat in periode 3



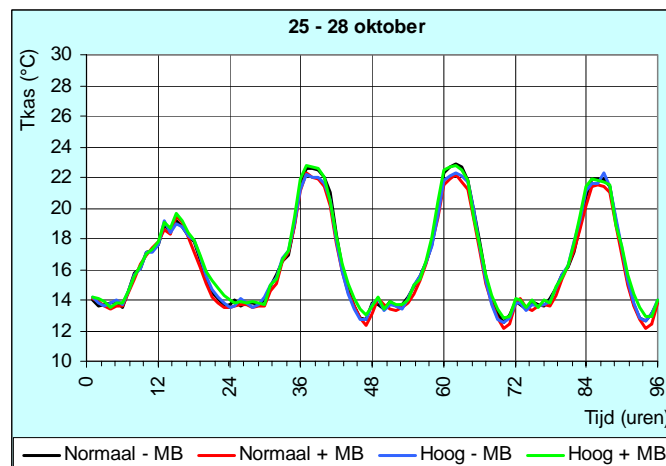
Figuur 1 Buitenklimaat van 25 t/m 28 oktober (periode 3).



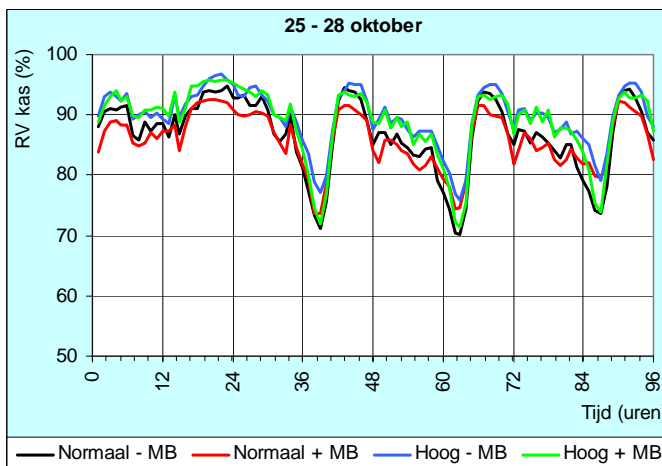
Figuur 2 Streefwaarde voor verwarming incl. stralingsaanpassing van 25 t/m 28 oktober (periode 3).



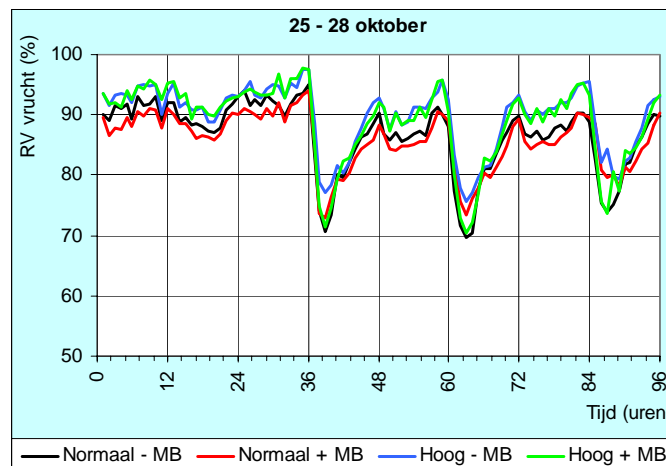
Figuur 3 Streefwaarde voor ventilatie incl. stralingsaanpassing van 25 t/m 28 oktober (periode 3).



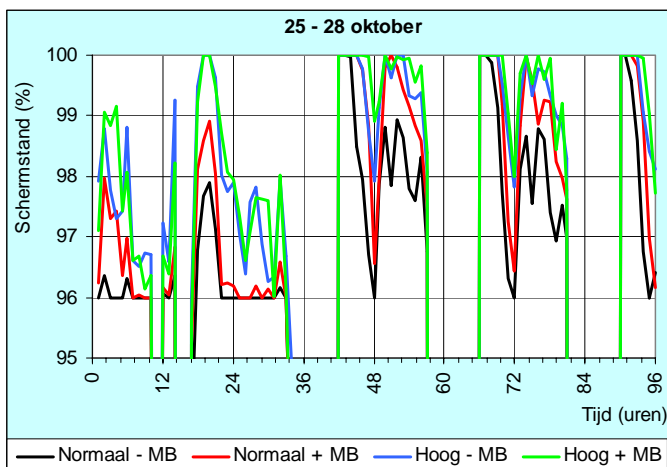
Figuur 4 Gemeten kasttemperatuur van 25 t/m 28 oktober (periode 3).



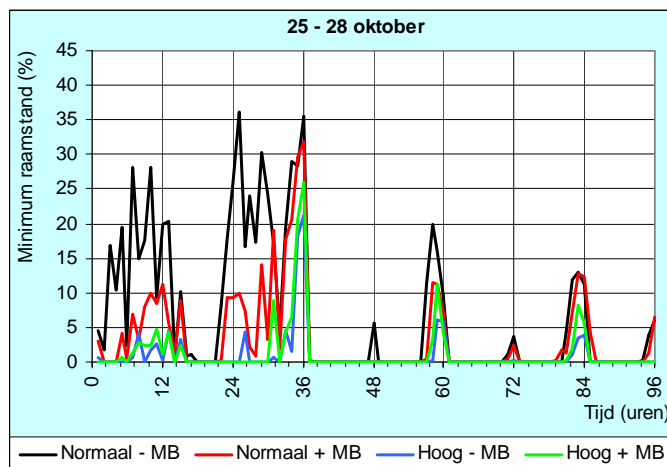
Figuur 5 Gemeten RV van kaslucht van 25 t/m 28 oktober (periode 3).



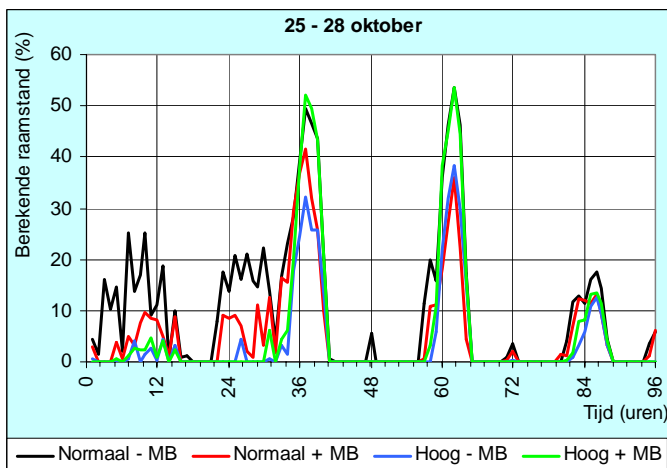
Figuur 6 RV bij berekende vruchttemperatuur van 25 t/m 28 oktober (periode 3).



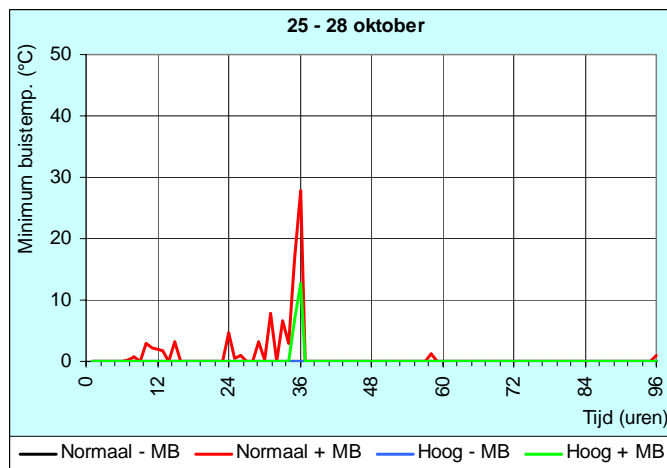
Figuur 7 Gemeten schermstand van 25 t/m 28 oktober (periode 3).



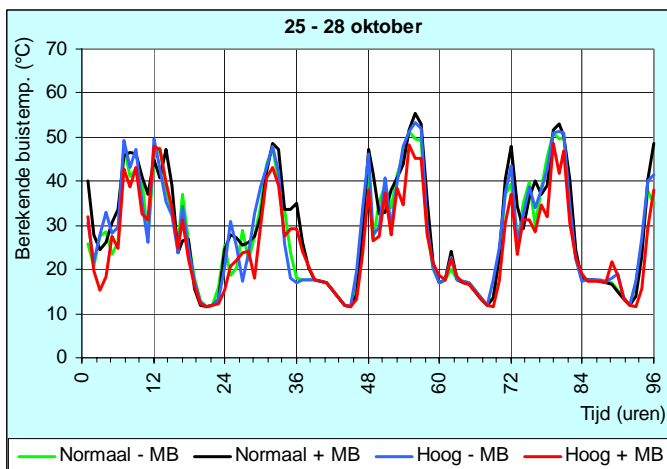
Figuur 8 Berekende vochtafhankelijke minimum buistemperatuur van hoofdnet van 25 t/m 28 oktober (periode 3).



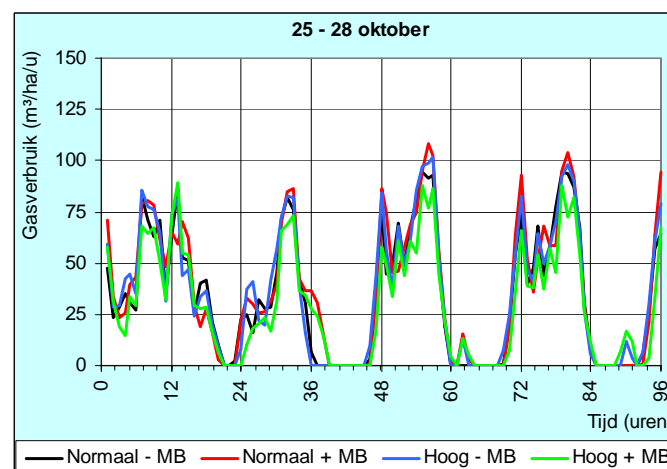
Figuur 9 Berekende raamstand (200 % = beide zijden volledig open) van 25 t/m 28 oktober (periode 3).



Figuur 10 Berekende vochtafhankelijke minimum buistemperatuur van hoofdnet van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

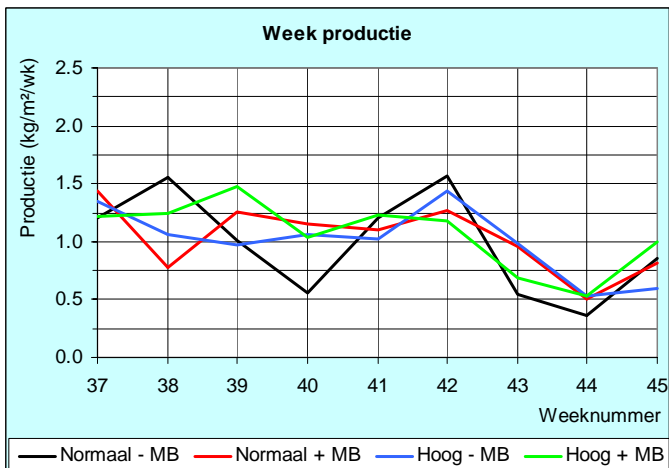


Figuur 11 Berekende buistemperatuur (aanvoer van hoofdnet) van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

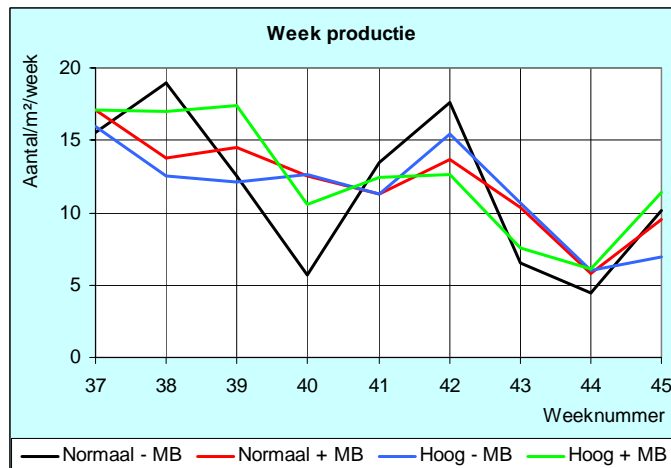


Figuur 12 Berekende energiegebruik van 25 t/m 28 oktober (periode 3).

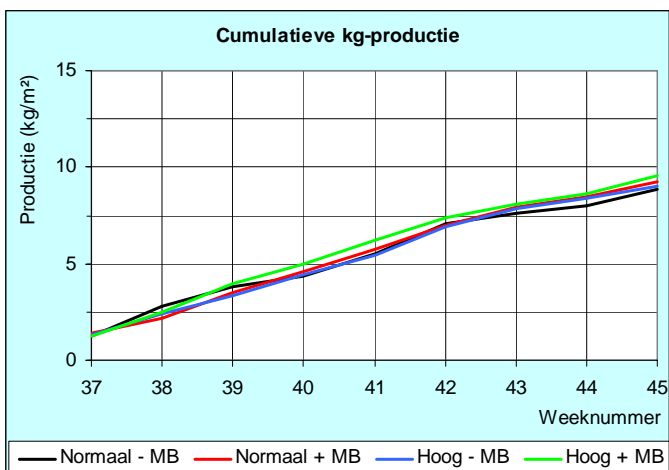
Bijlage 5 Productie en kwaliteit



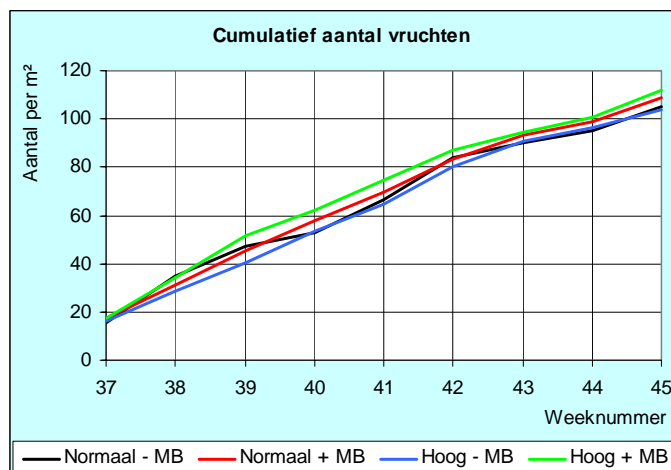
Figuur 1 Weekproductie in kg.



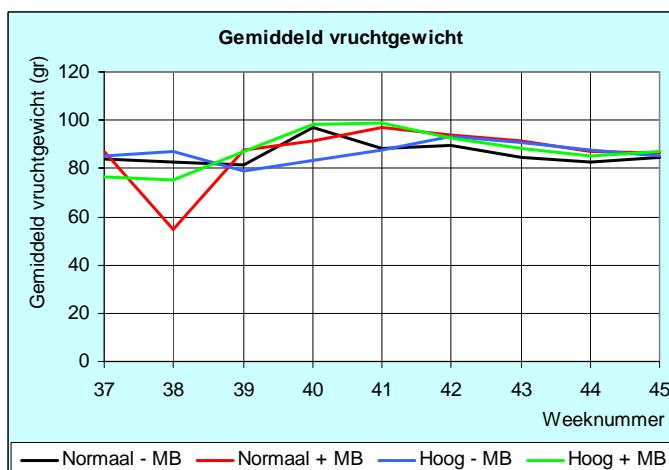
Figuur 2 Weekproductie in stuks.



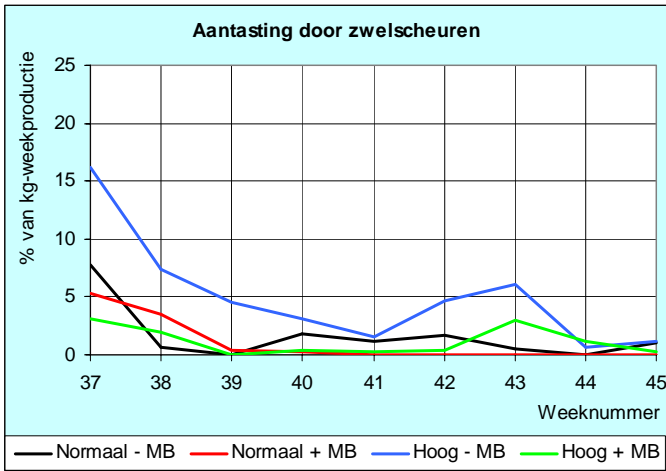
Figuur 3 Cumulatieve productie in kg.



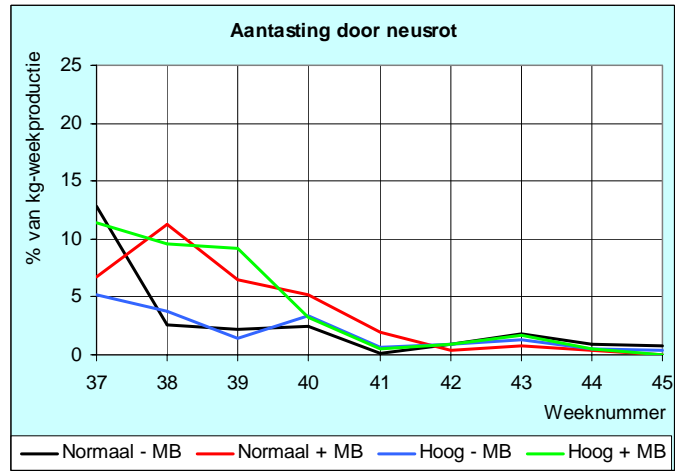
Figuur 4 Cumulatieve productie in stuks.



Figuur 5 Gemiddeld vruchtgewicht.



Figuur 6 Aantasting door zwelscheuren.



Figuur 7 Aantasting door neusrot.

Bijlage 6 *Botrytis* aantastingen

Tabel 1 Aantal *Botrytis* lesies op 100 stengels.

Vochtbehandeling	Bladsnij-moment	25 sept.	2 okt.	9 okt.	16 okt.	23 okt.	29 okt.	5 nov.
Normaal – MB	Vroeg	1.4	3.5	4.2	4.2	4.9	9.7	16.0
	Laat	5.6	6.3	6.3	6.3	9.7	13.2	22.2
Normaal + MB	Vroeg	0.7	1.4	4.2	5.6	5.6	9.0	16.0
	Laat	0.7	0.7	0.7	0.7	1.4	2.1	2.1
Hoog – MB	Vroeg	0.0	1.4	1.4	3.5	3.5	6.3	11.8
	Laat	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	6.9	12.5
Hoog + MB	Vroeg	0.0	0.0	0.0	4.2	4.2	4.2	4.9
	Laat	0.0	0.0	0.0	0.7	1.4	4.2	4.9

vroeg = voor 9:30 uur; laat = na 15 uur (beide zomertijd).

Tabel 2 Lengte van *Botrytis* lesies op 100 stengels (in cm).

Vochtbehandeling	Bladsnij-moment	25 sept.	2 okt.	9 okt.	16 okt.	23 okt.	29 okt.	5 nov.
Normaal – MB	Vroeg	5.2	12.5	13.5	21.2	31.3	60.4	149.3
	Laat	44.4	56.6	60.8	77.1	125.0	153.1	268.1
Normaal + MB	Vroeg	1.4	4.2	6.9	44.4	62.5	97.9	184.7
	Laat	8.3	9.7	9.7	12.5	14.6	16.3	16.7
Hoog – MB	Vroeg	0.0	1.0	1.0	4.2	5.2	12.8	28.5
	Laat	0.0	0.0	0.0	0.0	13.9	26.4	80.6
Hoog + MB	Vroeg	0.0	0.0	0.0	3.8	4.2	4.2	5.9
	Laat	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	20.1	37.5

vroeg = voor 9:30 uur; laat = na 15 uur (beide zomertijd).

Bijlage 7 Berekening van aardgasverbruik

De berekening van het aardgasverbruik is volgens de rekenregels van Nawrocki (1985) zoals beschreven door Esmeijer (2004).

De warmteafgifte van een buis wordt berekend via de warmteoverdrachtcoëfficiënten van een buisrail van 1 m lengte.

$$K_{\text{convectie}} \text{ (W/m}^2 \text{ K)} = c * \{ (T_{\text{buis}} - T_{\text{kas}}) / (d * T_{\text{kas}}) \}^{0,25} \quad (\text{b1})$$

$$K_{\text{straling}} \text{ (W/m}^2 \text{ K)} = 2,077 * 10^{-7} * \{ (T_{\text{buis}} + T_{\text{kas}}) / 2 \}^3 \quad (\text{b2})$$

waarbij:

c = convectiecoëfficiënt hier gekozen van Nawrocki = 5,2
d = diameter van de buis buisrail = 0,051 m groeibuis = 0,027 m
T_{buis} = gemiddelde temperatuur van de aanvoer en de retour van de afdeling.
T_{kas} = kasluchttemperatuur in het midden van de afdeling.

De warmteafgifte per m² per uur wordt vervolgens berekend via:

$$Q(W) = \{ (K_{\text{convectie}} + K_{\text{straling}}) * A * (T_{\text{buis}} - T_{\text{kas}}) \} * (\text{aantal buizen per kap/kapbreedte}) * 3600 \quad (\text{b3})$$

waarbij:

K_{convectie} = volgens formule b1
K_{straling} = volgens formule b2

A = oppervlakte van de buis berekend via:
= $\pi * d * l = 3,14 * d$ als boven * 1 (de lengte was immers 1 meter)

aantal buizen = 4 voor buisrail, 2 voor groeibuis
kapbreedte = 3,2 m
W = Watt = J/s
Uur = 3600 seconden

Alle temperaturen zijn in absolute graden Kelvin.

Van warmte naar gas per hectare per uur:

$$\text{Gasverbruik (m}^3 \text{/ha)} = (Q / 3517) / \text{ketelrendement}$$

waarbij:

1 m³ aardgas = 35,17 MJ
1 hectare = 10.000 m²
ketelrendement = 0,85 (ketel zonder condensor; met condensor ongeveer 0.9)