WAGENINGEN UR
For quality of life

Gewasmanagement in semi-gesloten kassen

Simulaties van gewasgroei en -ontwikkeling

Anne Elings, Esther Meinen, Anja Dieleman en Frank Kempkes



Productschap Tuinbouw
Kas als Energiebron
Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie

Rapport GTB-1124



Referaat

Experimenten van het project 'Gewasmanagement bij geconditioneerd telen' zijn met het Intkam simulatiemodel doorgerekend om te analyseren welke klimaatfactor in welke mate verantwoordelijk is voor verschillen in productie. De belangrijkste conclusies zijn:

- De bladbedekkingsgraad, het specifieke bladgewicht, de totale biomassa, de drogestofverdeling en de vruchtproductie werden goed simuleren. Dit betekent dat onderliggende processen die niet direct met metingen vergeleken konden worden (bijvoorbeeld gewasfotosynthese en onderhoudsademhaling) eveneens betrouwbaar werden gesimuleerd.
- De CO_2 concentratie van de kaslucht, die in grote mate wordt bepaald door de raamopeningen, bepaalt grotendeels productieverschillen. In de open kas gaat veel CO_2 verloren, ten koste van de productie.
- Een zekere hoeveelheid CO_2 kan het beste kan worden aangewend op momenten dat een hoog lichtniveau deze extra CO_2 zo efficiënt mogelijk door het gewas laat gebruiken. De maximale fotosynthesesnelheid is dan namelijk nog niet bereikt. Er moet dus op het midden van de dag, en niet aan de randen van de dag worden gedoseerd.
- Een verticale temperatuurgradiënt heeft effecten op onder meer de assimilatenbeschikbaarheid, de snelheden van trosvorming en trosafrijping, en de plantbelasting, maar op gewasniveau heffen deze elkaar op zodat het effect op productie klein is (gemiddeld 1% extra productie op seizoensbasis).

Abstract

Experiments in the project 'Crop management in conditioned greenhouses' have been evaluated with the Intkam crop growth model to analyse the effects of climate factors on production. De main conclusions are:

- Leaf area index, specific leaf weight, total biomass, dry matter distribution and fruit production were well simulated. This implies that the underlying processes that can not be measured directly (for example crop photosynthesis and maintenance respiration), were well simulated as well.
- Air CO_2 concentration, which is largely determined by window opening, is the main determinant for production differences. Much CO_2 is lost in an open greenhouse, at the cost of production.
- A certain amount of CO_2 can best be employed at moments when high light levels enable most efficient CO_2 use by the crop, as the maximum photosynthesis rate has not been reached at such moments. Therefore, CO_2 should be applied at mid-day, not early morning or late afternoon.
- A vertical temperature gradient has effects on assimilate availability, rates of truss formation and ripening, and fruit load. However, these effects neutralize each other at the crop level. The consequences for production are small (on average 1% extra annual production).

2011 Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Wageningen UR Glastuinbouw.

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen
: Postbus 644, 6700 AP Wageningen
Tel. : 0317 - 48 60 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	Samenvatting			5
1	Inleiding			7
2	Verticale temperatuurgradiënt			9
	2.1	Samenvatting		9
	2.2	Doelstelling		9
	2.3	Materiaal en methoden		9
	2.4	Resultaten		10
		2.4.1	Klimaat	10
		2.4.1.1	Straling en buitentemperatuur	10
		2.4.1.2	CO_2 concentratie in de kas	11
		2.4.1.3	Binnentemperatuur	12
		2.4.1.4	Temperatuurgradiënten	12
		2.4.2	Gewasgroei en –ontwikkeling; waarnemingen en simulaties	15
		2.4.3	Temperatuurgradiënten: fysiologische processen en effecten	19
		2.4.4	Analyse klimaatfactoren	22
	2.5	Discussie		24
3	Temperatuurstrategie			25
	3.1	Samenvatting		25
	3.2	Doelstelling		25
	3.3	Materiaal en methoden		25
	3.4	Resultaten		26
		3.4.1	Klimaat	26
		3.4.1.1	Straling en buitentemperatuur	26
		3.4.1.2	CO_2	27
		3.4.1.3	Binnentemperatuur	27
		3.4.1.4	Temperatuurgradiënten	28
		3.4.2	Gewasgroei en –ontwikkeling; waarnemingen en simulaties	28
		3.4.3	Analyse klimaateffecten	30
	3.5	Discussie		32
4	Koelcapaciteit			33
	4.1	Samenvatting		33
	4.2	Doelstelling		33
	4.3	Materiaal en methoden		33
	4.4	Resultaten		34
		4.4.1	Klimaat	34
		4.4.1.1	Straling en buitentemperatuur	34
		4.4.1.2	CO_2	35
		4.4.1.3	Binnentemperatuur	35
		4.4.1.4	Temperatuurgradiënten	36
		4.4.2	Gewasgroei en –ontwikkeling; waarnemingen en simulaties	36
		4.4.3	Analyse klimaateffecten	38
	4.5	Discussie		39

5	Scenario's	41
6	Discussie	45
7	Literatuur	47
Bijlage I	Relatie tussen de kasluchttemperatuur en de temperatuur in het gewas in het experiment 'Verticale temperatuurgradiënt' – een voorbeeld	49
Bijlage II	Relaties tussen de kasluchttemperatuur en de temperatuur in het gewas (experiment 'Verticale temperatuurgradiënt)	51

Samenvatting

In het kader van het project 'Gewasmanagement bij geconditioneerd telen' zijn een serie experimenten gedaan waarvan er drie met het Intkam simulatiemodel voor kasgewassen zijn doorgerekend. De doelen van deze berekeningen waren om aan te tonen dat de ontwikkeling, groei en productie van een tomatengewas onder wisselende omstandigheden goed door het model gesimuleerd konden worden, en om vervolgens te analyseren welke klimaatfactor in welke mate verantwoordelijk is voor verschillen in productie.

De drie experimenten verschillen met betrekking tot de volgende klimaateigenschappen:
- een bewust aangelegde verticale temperatuurgradiënt langs de gewasdiepte;
- kaslluchttemperaturen aan de randen van de dag;
- kasluchttemperatuur als gevolg van verschillen in koelcapaciteit.

Steeds was er sprake van verschillen in CO_2 concentratie als gevolg van de klimaatstrategie, waarbij de mate van ventilatie de belangrijkste bepalend factor was in de hoeveelheid CO_2 die naar de buitenlucht ontsnapte.

Eerst werd de kwaliteit van het Intkam gewasgroeimodel geëvalueerd door de proeven na te rekenen op basis van de klimaatgegevens en een aantal gewasmaatregelen zoals plantdatum, aantal stengels per plant en toppen. Het model kon de bladbedekkingsgraad, het specifieke bladgewicht, de totale biomassa, de drogestofverdeling en de vruchtproductie van de drie experimenten goed simuleren. Dit betekent dat onderliggende processen die niet direct met metingen vergeleken konden worden (bijvoorbeeld gewasfotosynthese en onderhoudsademhaling) betrouwbaar werden gesimuleerd.

Dit maakte het Intkam gewasgroeimodel geschikt om te analyseren welke klimaatfactor(en) belangrijk was/waren in het verklaren van de productieverschillen. Dit is de CO_2 concentratie van de kaslucht, die in grote mate wordt bepaald door de raamopeningen. In de open kas gaat hierdoor veel CO_2 verloren, ten koste van de productie. Per experiment waren de stralingsniveaus voor alle behandelingen identiek, dus daarvan was ook geen effect te verwachten. Van luchtvochtigheid en kasluchttemperatuur waren ook geen grote effecten te verwachten, omdat bekend is dat in het traject van normale waarden het effect hiervan op fotosynthese beperkt is.

Gegeven het feit dat de CO_2 concentratie van de kaslucht zo belangrijk is, blijkt op basis van scenarioberekeningen dat een zekere hoeveelheid CO_2 het beste kan worden aangewend op momenten dat een hoog stralingsniveau deze extra CO_2 zo efficiënt mogelijk door het gewas laat gebruiken. De maximale fotosynthesesnelheid is dan namelijk nog niet bereikt. Er moet dus op het midden van de dag, en niet aan de randen van de dag worden gedoseerd.

Waarnemingen hadden al uitgewezen dat de onderzochte verschillen in kasklimaat tussen semi-gesloten kassen onderling geen grote effecten op de productie hebben. Simulaties maakten helder waarom:
- Een verticale temperatuurgradiënt heeft effecten op onder meer de assimilatenbeschikbaarheid, de snelheden van trosvorming en trosafrijping, en de plantbelasting, maar op gewasniveau heffen deze elkaar op zodat een effect op productie nauwelijks aanwezig is. Er kan op seizoensbasis gemiddeld 1% extra productie worden verwacht.
- Aan de randen van de dag is door het lage stralingsniveau de fotosynthese dusdanig laag dat een klein temperatuurverschil, waarvan bij hoge straling het effect al beperkt is, geen merkbare groeireductie tot gevolg zal hebben.
- Kleine verschillen in kasluchttemperatuur hebben om dezelfde reden weinig effect op de dagelijkse fotosynthese en daarmee de gewasgroei.

Er kan worden geconcludeerd dat het CO_2 effect het meest bepalend is geweest voor gewasgroei en –productie, en dat de temperatuur van ondergeschikt belang is geweest. Dit laatste geldt ook voor een verticaal temperatuurprofiel in het gewas. Als wordt overwogen om extra CO_2 toe te dienen, dan kan dit het beste midden op de dag gebeuren.

1 Inleiding

Van 2008 tot en met 2010 zijn op de proeffaciliteiten van Wageningen UR Glastuinbouw in Bleiswijk experimenten uitgevoerd om antwoorden te krijgen op vragen die er in de praktijk leven over de reacties van het gewas op het klimaat in geconditioneerde kassen (Dieleman et al., 2009). Hiervoor was het project 'Gewasmanagement bij geconditioneerd telen' opgezet met financiering van het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van LNV (nu EL&I). De ontwikkeling van geconditioneerde kassen begon in de jaren '90 van de 20e eeuw. In een volledig gesloten kas kan het binnenklimaat in principe onafhankelijk van het buitenklimaat worden geregeld. In combinatie met ondergrondse warmteopslag kan het gebruik van fossiele energie worden teruggedrongen (de Zwart, 2008). Semi-gesloten systemen deden hun intrede toen duidelijk werd dat de koeling in de zomer veel energie vergde en natuurlijke ventilatie nodig bleef.

Koeling is dus een belangrijke component. De koelstrategie bestaat in grote lijnen uit:
- Verhoging van de circulatiesnelheid van de lucht. Deze stap heeft een direct effect.
- Verlaging van de aanvoertemperatuur van het water. Deze stap heeft een zekere tijd nodig om effect te hebben op de luchttemperatuur.
- Raamventilatie. Het grote nadeel van raamventilatie is dat het CO_2 niveau in de kas daalt, en wordt dus als laatste ingezet.

Een breed scala aan vragen werd in de experimenten benaderd; onder andere:
- Wat zijn de effecten van verschillende koelvermogens op het kasklimaat en het gewas?
- Wat zijn de effecten van verschillende temperatuurgradiënten op het gewas?
- Wat zijn de effecten van verschillende temperatuurstrategieën op het kasklimaat en het gewas?

In alle gevallen is tomaat het voorbeeldgewas geweest, en er is in alle gevallen een open kas als controle meegenomen.

De experimenten zijn in verschillende rapportages gepresenteerd: Dieleman et al., 2009; Dieleman et al., 2011a; Dieleman et al., 2011b; Eveleens et al., 2009). In dit rapport worden de onderzoeksresultaten met het Intkam model voor gewasgroei en –ontwikkeling nader geanalyseerd om begrip te krijgen van aspecten die niet direct uit de waarnemingen zijn te halen:
- Gewasinformatie die niet te meten is (zoals de verhouding tussen aanbod van en vraag naar assimilaten)
- Wat-als vragen: wat zou de productie zijn geweest als het temperatuurprofiel anders was geweest, of als er op een bepaald moment van de dag meer CO_2 zou zijn toegediend?
- Identificeren van de belangrijkste factoren: welk deel van het productieverschil is aan CO_2 en andere klimaatfactoren toe te schrijven?

De behandelingen zijn nagerekend en geanalyseerd met het INTKAM gewasgroeimodel. Dit model bevat een aantal processen die voor de analyse van het experiment van belang zijn, zodat het informatie kan verschaffen over gewaseigenschappen die niet gemeten kunnen worden. Een voorbeeld hiervan is de onderhoudsademhaling die afneemt als er koeling wordt toegepast (in dit verband kan worden gesproken van een model als 'soft sensor'). Het INTKAM model berekent de huidmondjesgeleidbaarheid op basis van straling, CO_2-concentratie, temperatuur en dampdrukdeficit. In combinatie met de hoeveelheid onderschepte straling die op basis van de bladbedekkingsgraad (LAI) wordt berekend en een aantal fysiologische kenmerken van het fotosyntheseproces, wordt op ieder moment van de dag op een aantal gewasdiepten de bladfotosynthese berekend. Integreren over de gewasdiepte en de tijd levert de dagelijkse fotosynthese op, wat resulteert in een dagelijkse gewasgroei. Hierbij wordt de onderhoudsademhaling verdisconteerd. Sinksterktes van vruchten, bladeren, stengel en wortels bepalen de verdeling van de aangemaakte drogestof over de organen.

De uitgevoerde berekeningen vonden plaats met het standaardmodel en met gebruikmaking van het gerealiseerde klimaat en met de specifieke gewashandelingen per experiment (plantdatum, aanleg 2e stengel, trossnoei, etc.). Het model rekent op basis van drogestofproductie, en berekent versgewichten via het drogestofgehalte van de organen. Voor de experimenten zijn hiervoor de waargenomen drogestofgehalten gebruikt. Er is geen verdere parameterisatie uitgevoerd op basis van metingen aan de bladfotosynthese, ontwikkeling en andere fundamentele processen.

De analyse met het Intkam gewasgroeimodel van de experimenten richtte zich op de volgende aspecten:

- Narekenen van de gewasgroei, -productie, en –ontwikkeling.
- Kwantificeren van de klimaatfactoren op de productie.
- Kwantificeren van de effecten van temperatuurgradiënten.

De opbouw van het verslag volgt niet de volgorde van de experimenten in de tijd, en is als volgt. Omdat de aanwezigheid van een verticale temperatuurgradiënt een van de belangrijkste kenmerken van een geconditioneerde kas is, is begonnen met de analyse van de proef die hiervoor het meeste inzicht levert, te weten het 2009 experiment 'Verticale temperatuurgradiënt' (Dieleman et al., 2011a). Om de praktijkwaarde hiervan te evalueren wordt vervolgens het 2010 experiment 'Temperatuurstrategie' (Dieleman et al., 2011b) geanalyseerd. Het zal blijken dat na deze twee analyses een groot deel van het inzicht al is gegenereerd. Ter volledigheid wordt nog een eenvoudige analyse van het 2008 experiment 'Koelcapaciteit' (Dieleman et al., 2009) gepresenteerd, dat een bevestiging van het inzicht zal blijken op te leveren. Er wordt afgesloten met een modelmatige scenariostudie naar de effecten van inzet van CO_2 op verschillende momenten van de dag om een antwoord te vinden op de vraag wanneer CO_2 inzet het meest efficiënt is.

De auteurs

December 2011

2 Verticale temperatuurgradiënt

2.1 Samenvatting

Koeling van onder of boven in een semi-gesloten kas heeft gevolgen voor de verticale temperatuurgradiënt in het gewas. Er zijn bruikbare relaties opgesteld tussen de kasluchttemperatuur, gemeten bij de kop van het gewas, en op diverse dieptes in het gewas. Hoe hoger de luchttemperatuur, hoe groter het temperatuurverschil tussen de lucht bij de kop en lager in het gewas. Het temperatuurverschil tussen de lucht bij de kop en lager in het gewas is het grootst onderin het gewas bij koeling van beneden.

Het Intkam gewasgroeimodel simuleerde verschillende gewaswaarnemingen goed en was daarmee geschikt om de effecten van aparte klimaatfactoren te analyseren. De CO_2 concentratie van de kaslucht was de meest belangrijke klimaatfactor in het verklaren van de productieverschillen. Het verlies aan CO_2 door de grote raamopeningen in de open kas leidt tot een duidelijk merkbaar productieverlies. Andere klimaatfactoren speelden geen rol.

Het was opvallend dat de temperatuurgradiënt zelf nauwelijks invloed had op de totale productie, vanwege een aantal fysiologische processen, zoals assimilatenbeschikbaarheid, de snelheden van trosvorming en trosafrijping, en de plantbelasting, die op gewasniveau tegen elkaar inwerken.

2.2 Doelstelling

Het experiment 'Verticale temperatuurgradiënt' was gericht op de processen van 1) fotosynthese, 2) assimilatieverdeling onder invloed van orgaantemperaturen, 3) watergift, verdamping en nutriëntenopname, en 4) vruchtkwaliteit. De uitkomsten zijn gerapporteerd door Dieleman et al., 2011a.

De simulatie van gewasontwikkeling en –productie, is voor dit experiment met name gekoppeld aan de effecten van de verticale temperatuurgradiënt op de groei en ontwikkeling van de vruchten.

2.3 Materiaal en methoden

Locatie:	Kassencomplex van Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk.
Omvang afdeling:	144 m^2
Cultivar:	Cappricia
Plantdatum:	23 december 2008
Plantdichtheid:	2.5 planten m^{-2}
Stengeldichtheid:	2.5 stengels m^{-2} en later in de teelt 3.33 stengels m^{-2}
Voeding:	standaard
Gewasbescherming:	zo veel mogelijk biologisch
CO_2 dosering:	230 kg ha^{-1} uur^{-1} (OCAP)
Start behandelingen:	23 maart 2009
Laatste oogst:	17 november 2009
Behandelingen:	zie Tabel 1

Tabel 1. Behandelingen in het experiment 'Verticale temperatuurgradiënt'.

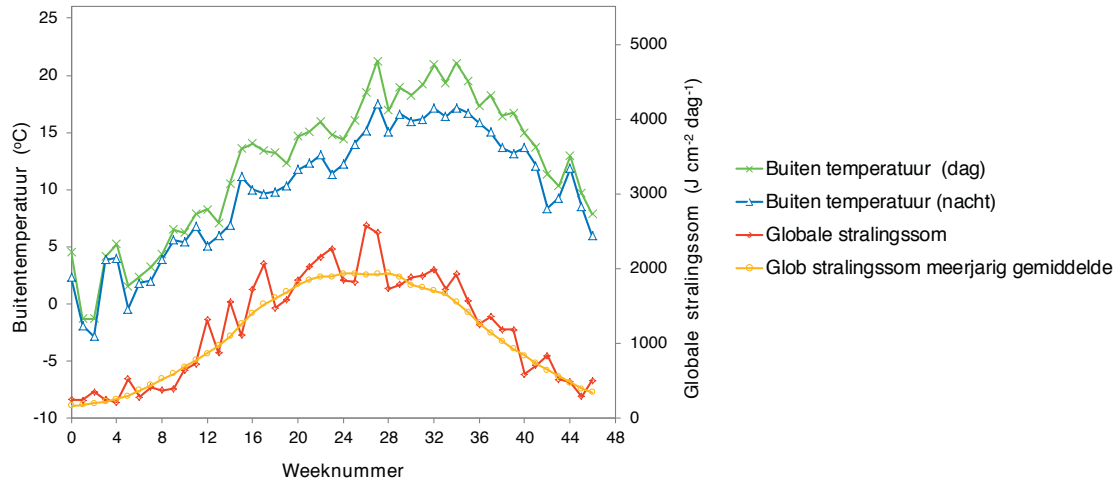
Nummer	Compartiment	Aanduiding in figuren	Behandeling
1	8.06	Open kas	Open kas
2	8.05	Koeling onder	Semi gesloten, koelcapaciteit 350 W m^{-2}, koeling van onderen
3	8.04	Koeling boven	Semi gesloten, koelcapaciteit 350 W m^{-2}, koeling van boven
4	8.08	Koeling onder + T	Semi gesloten, koelcapaciteit 350 W m^{-2}, koeling van onderen, temperatuur sterker gekoppeld aan straling
5	8.07	Koeling boven + T	Semi gesloten, koelcapaciteit 350 W m^{-2}, koeling van boven, temperatuur sterker gekoppeld aan straling

2.4 Resultaten

2.4.1 Klimaat

2.4.1.1 Straling en buitentemperatuur

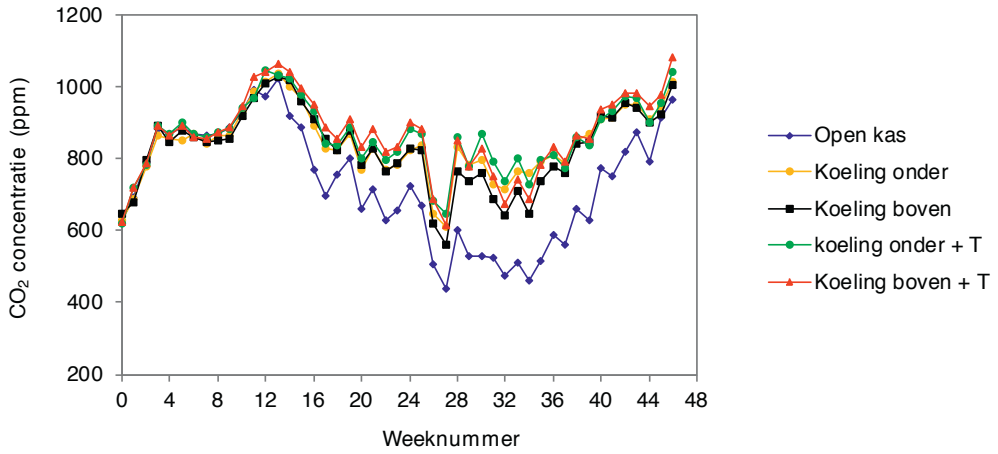
Het jaar 2009 was qua straling een relatief licht jaar (Figuur 1.). De warmste weken vielen in week 28-36 (de maanden juli en augustus), en de koudste periode viel in januari.



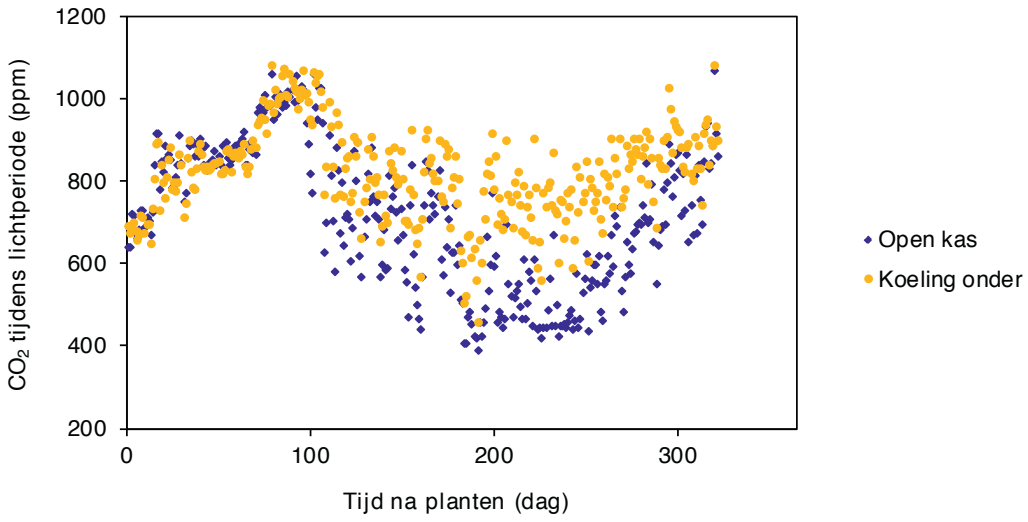
Figuur 1. Weekgemiddelden van het buitenklimaat temperatuur overdag, temperatuur 's nachts en globale stralingssommen per dag. Het meerjarig gemiddelde van de stralingssom is afkomstig uit Letsgrow.

2.4.1.2 CO_2 concentratie in de kas

De CO_2 concentratie van de kaslucht in de open kas lag na aanvang van de behandelingen lager dan de CO_2 concentraties in de semi-gesloten kassen (Figuur 2.). De relatief lage waarden in week 26 zijn het gevolg van de relatief hoge temperaturen en de daarmee samenhangende hoge luchtventilatie waardoor veel CO_2 verloren ging. Niveaus die hoger liggen dan 1000 ppm waren alleen haalbaar geweest bij een volledig gesloten kas (die niet in de proefopzet was opgenomen); weekgemiddelden van maximale niveaus bij een semi-gesloten kas lagen rond de 800 ppm. Gemiddelde dagwaarden laten een brede variatie zien (Figuur 3.) tussen ongeveer 500 en 900 ppm, bij eenzelfde patroon over de tijd.



Figuur 2. CO_2 concentratie (in ppm) tijdens de lichtperiode; weekgemiddelden over de hele teeltperiode.

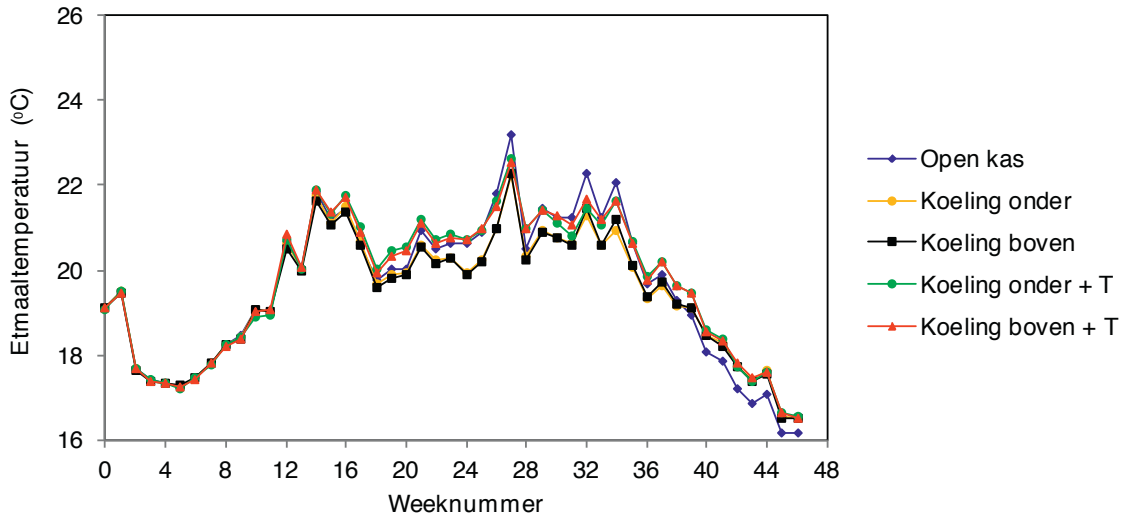


Figuur 3. CO_2 concentratie (daggemiddelden in ppm) tijdens de lichtperiode in de open kas en in de kas met koeling onder.

2.4.1.3 Binnentemperatuur

De kassen werden verwarmd met de buisrailverwarming, groeibuis en via instraling door de zon. De kassen werden mechanisch gekoeld, of werden gekoeld door de ramen te openen.

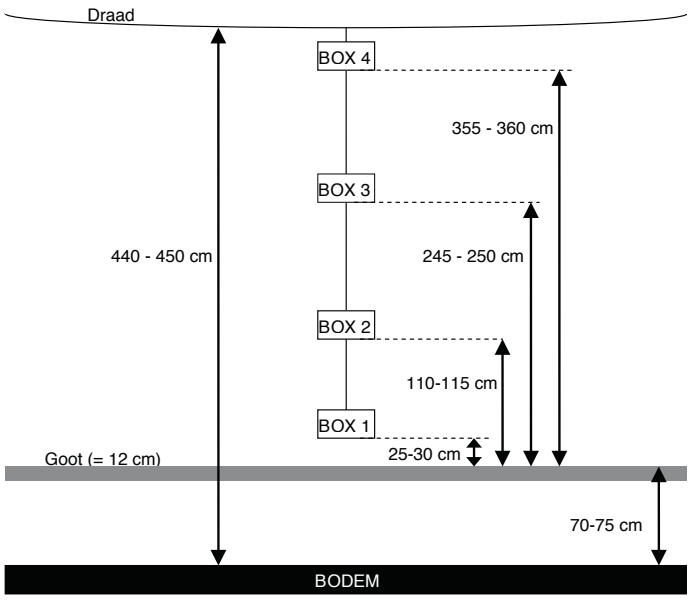
Na het starten van de behandelingen op 23 maart 2009 bleken er kleine temperatuurverschillen tussen de behandelingen te ontstaan. Koeling onder en koeling boven realiseerden een luchttemperatuur die gedurende een groot deel van de teelt lager lag dan die van de andere drie behandelingen. Met name in de zomermaanden was de luchttemperatuur in de open kas het hoogst.



Figuur 4. Gerealiseerde etmaaltemperatuur in de vijf behandelingen.

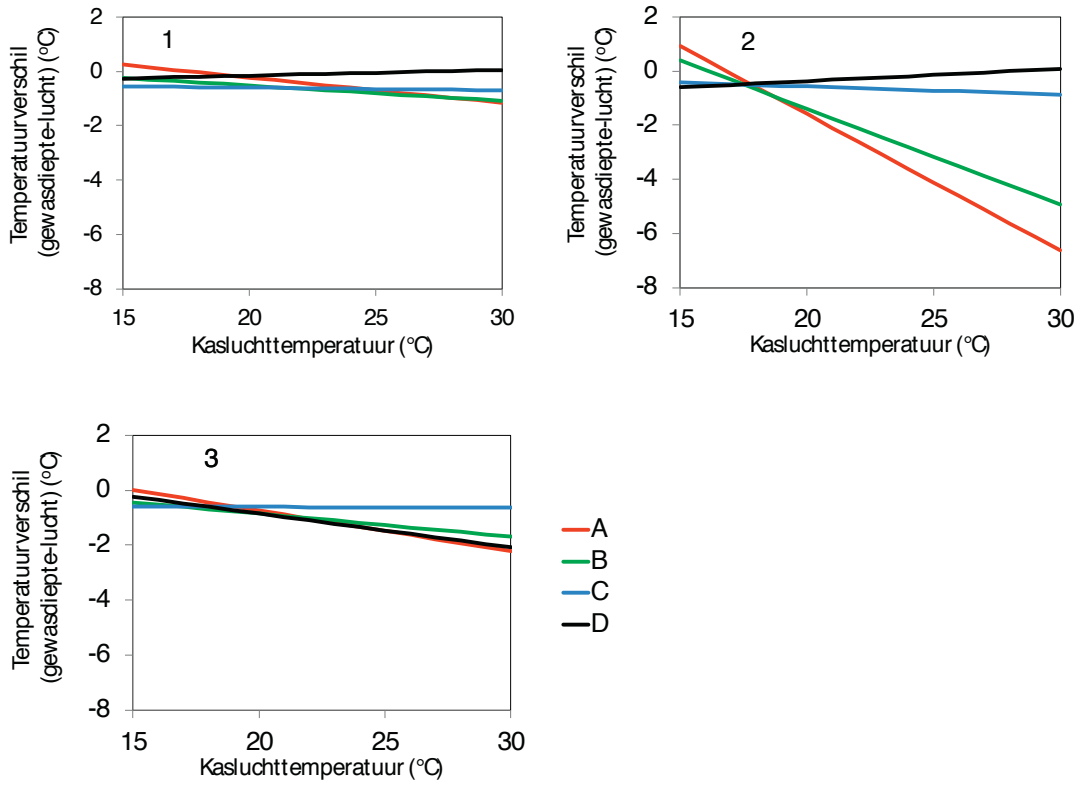
2.4.1.4 Temperatuurgradiënten

De luchttemperatuur in het gewas is op 4 hoogten gemeten, namelijk op 25, 110, 245 en 355 cm boven de goot (Figuur 5.). Als gevolg van koeling en verdamping zal de temperatuur in het gewas anders zijn dan die van de lucht, wat gevolgen heeft voor diverse fysiologische processen (zie paragraaf 2.4.3). De luchttemperaturen zijn iedere 5 minuten gemeten, en in de dataverwerking omgezet naar gemiddelde uurwaarden. Voor modelberekeningen is dit voldoende.



Figuur 5. Schematische weergave van de positie van de temperatuurmeetboxen in het tomatengewas.

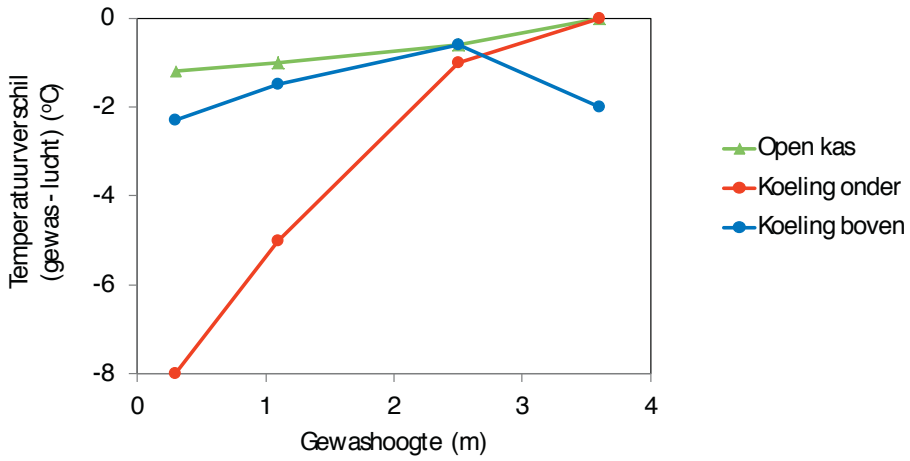
Een verklarende beschrijving van de luchttemperatuur op de diverse gewasdiepten kan alleen met een complex model dat een groot aantal energiestromen en hun afhankelijkheden kwantificeert, wat ver buiten dit project viel. In Qian *et al.* (2009) wordt de temperatuurgradiënt op empirische wijze gekoppeld aan het stralingsniveau buiten de kas.
Bij verdere analyse van de gegevens bleek het ook mogelijk om de luchttemperatuur in het gewas te koppelen aan de luchttemperatuur bij de kop van het gewas (hier hing de meetbox voor de klimaatsturing). Voor ieder uur en iedere gewasdiepte werd het verschil tussen de luchttemperatuur bij de kop van het gewas en de luchttemperatuur in het gewas berekend uit de waarnemingen. Deze waarden werden per maand en per gewasdiepte gegroepeerd, en vervolgens uitgezet tegen de kasluchttemperatuur. Er ontstonden hiermee een groot aantal figuren, met op de x-as de kasluchttemperatuur, en op de y-as het verschil tussen de temperatuur op een zekere gewasdiepte en de temperatuur bij de kop van het gewas. Deze maandelijkse verbanden bleken lineair te zijn. In Figuur 6. is hiervan voor de maand juni 2009 een voorbeeld gegeven, toen de temperatuurgradiënt het meest prominent was. Om het begrip te vergroten ontbreken in Figuur 6. de individuele datapunten – een voorbeeld hiervan kan worden gevonden in Figuur 28. in bijlage 1. Alle regressielijnen zijn weergeven Tabel 11. in tot en met Tabel 15. In Figuur 6-1 is te zien dat in een open kas er slechts beperkte verschillen zijn geregistreerd tussen de luchttemperatuur in de kas in op diverse bladlagen. Bij een hoge kasluchttemperatuur ligt de luchttemperatuur onderin het gewas, als gevolg van verdamping, ongeveer een graad lager. In Figuur 6–3 is te zien dat bij koeling van boven het patroon niet wezenlijk verandert, met uitzondering van de temperatuur bovenin het gewas die bij een sterke koeling op warme dagen iets lager is dan in het geval van een open kas. Bij koeling van onderen is het beeld heel anders. Figuur 6–2 laat zien dat de temperatuurdaling bij de onderste twee meetpunten fors kan zijn, tot 7 graden op de warmste momenten. Bovenin het gewas is het effect van de koeling van beneden uitgewerkt, en bestaat er geen noemenswaardig verschil met een open kas of met koeling van boven.



Figuur 6. Relaties voor de maand juni tussen het temperatuurverschil tussen verschillende gewasdieptes en de kaslucht uitgezet tegen de kaslucht in de open kas (1), koeling van onderen (2) en koeling van boven (3). De gekleurde lijnen geven de gewashoogte aan A=25-30 cm boven de goot; B = 115-120 cm boven de goot, C = 245-250 cm boven de goot en D = 355-360 cm boven de goot (kop van het gewas).

In Figuur 7. zijn de verschillen tussen de temperaturen van de kaslucht en die in het gewas weergegeven in relatie tot de gewasdiepte, als de kaslucht in de maand juni oploopt tot 30 °C. Hier is op een andere manier goed te zien dat koeling van onderen voor een flinke temperatuurdaling zorgt op de onderste twee gewasdiepten, en dat koeling van boven tot een lichte temperatuurdaling bovenin het gewas leidt.

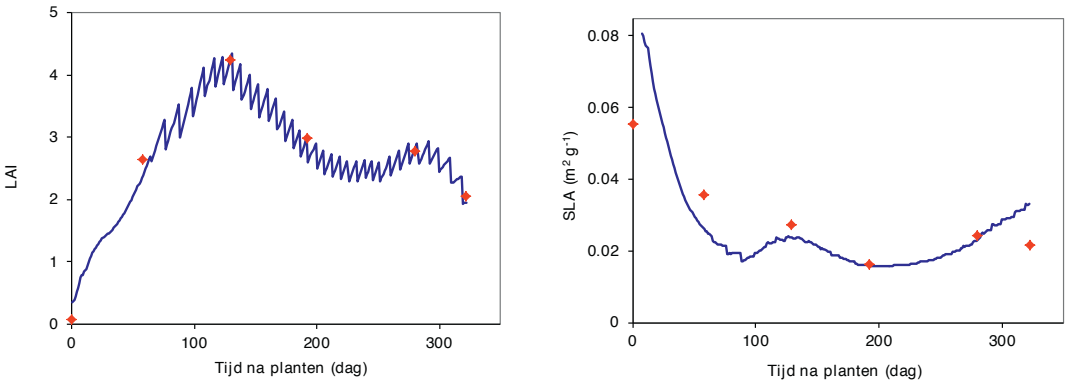
Het is belangrijk op te merken dan in de andere maanden de verschillen kleiner zijn dan in de maand juni (zie Tabel 11. tot en met Tabel 15, Bijlage 1 en 2). Dit is mogelijk gekoppeld aan het feit dat juni een warme maand met veel straling was, zodat de systemen tegen hun maximale capaciteit aan zaten, terwijl in de andere perioden er nog ruimte over was en er dus minder gradiënten ontstonden.



Figuur 7. Temperatuurverschil tussen het gewas op verschillende hoogtes en de kaslucht van 30 °C gemeten bij de kop van het gewas berekend voor de maand juni bij de verschillende kassen.

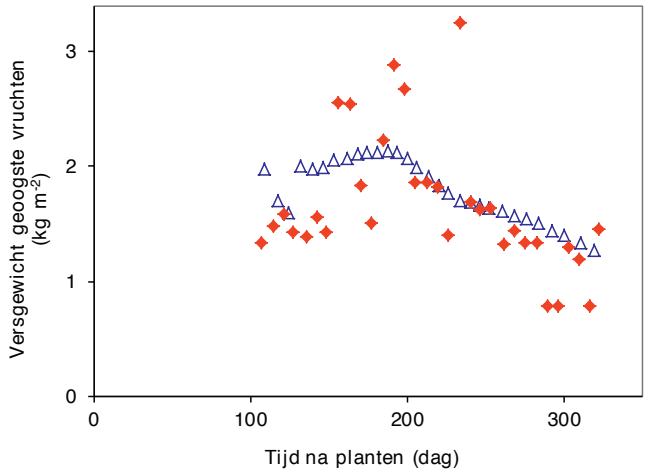
2.4.2 Gewasgroei en –ontwikkeling; waarnemingen en simulaties

Simulatie van de LAI (leaf area index, de bladbedekkingsgraad) en SLA (specific leaf area, specifiek bladoppervlak) was goed voor de open kas (Figuur 8.) en de andere behandelingen (niet gepresenteerd). Dit betekent dat de berekening door het model van de hoeveelheid onderschept licht, dat een belangrijke factor is in de berekening van de fotosynthese, ook betrouwbaar is. Een onder- of overschatting van de LAI zou op dit gebied tot problemen hebben geleid.



Figuur 8. Waargenomen (♦) en gesimuleerde (—) LAI en SLA in de open kas.

Het waargenomen versgewicht van geoogste vruchten was gedurende de teelt nogal variabel (Figuur 9.), voornamelijk als gevolg van enkele uitschieters naar hoge gewichten in de zomermaanden. Het model kon deze variatie niet simuleren, maar wel de trend, met een licht toenemend gewicht tot ongeveer dag 190, en een daling tot aan het einde van de teelt daarna.



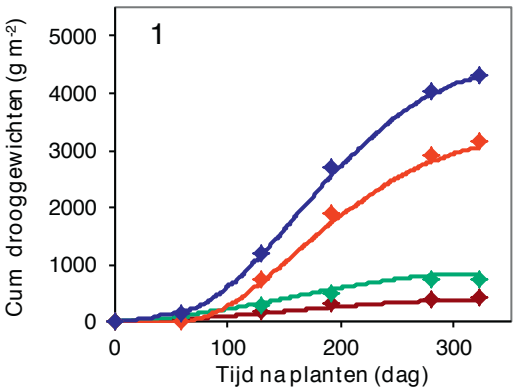
Figuur 9. Waargenomen (♦) en gesimuleerd (Δ) versgewicht van geoogste vruchten de open kas. De waarnemingen geven de versoogst per week aan, en de simulaties de versoogst op het moment dat deze plaatsvindt. Dit verklaart grotere spreiding van de waarnemingen.

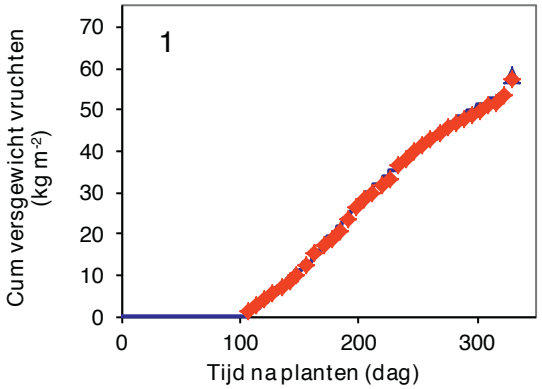
De waargenomen en gesimuleerde orgaangewichten van alle behandelingen zijn gegeven in Figuur 10. en Tabel 2. Per behandeling zijn steeds twee figuren gegeven: 1) de orgaangewichten en het totale gewasgewicht die op zes momenten tijdens de teelt zijn bepaald bij destructieve oogsten, en 2) het cumulatieve gewicht van geoogste vruchten.

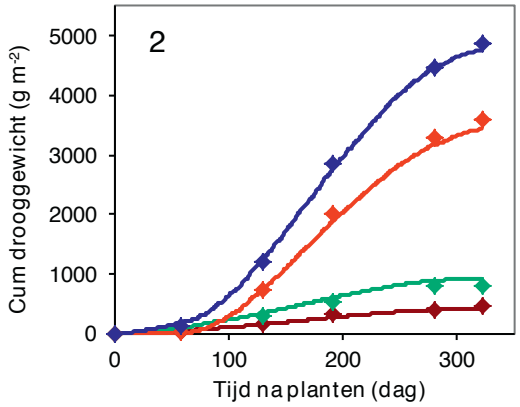
Ten eerste moet het totale gewasgewicht goed zijn, en vervolgens ook de verdeling van de drogestof over de organen. Met een goede simulatie van de LAI is de simulatie van het totale gewasgewicht ook goed, wat aangeeft dat de combinatie van gesimuleerde lichtonderschepping, gewasfotosynthese en totale onderhoudsademhaling overeenkomt met de netto waarneming aan de resultante van deze processen. Ook de cumulatieve drogestofverdeling is goed. De cumulatieve versproductie toont aan het einde van het seizoen toont een sprongetje, dat het gevolg is van de oogst van de nog aan de plant hangende vruchten.

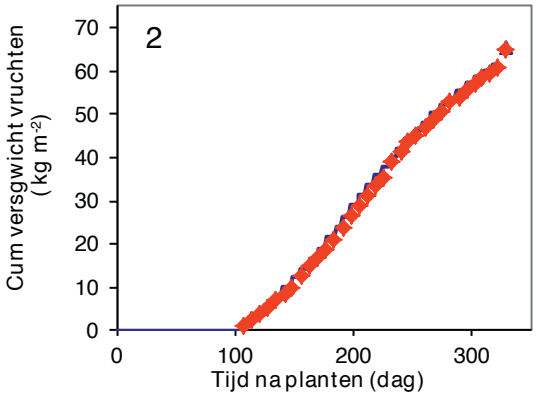
Er bleek dat met name in het geval van koeling van beneden de gesimuleerde productie relatief gevoelig is voor het aangenomen bladplukregime aan het einde van de teelt. Er werd in het experiment na het toppen blad geplukt zolang er vruchten werden geoogst. Omdat er bovenin geen nieuwe aanwas van bladeren is, daalt de LAI (Figuur 8.). Deze teeltwijze is uiteraard ook in het model aangenomen[1].

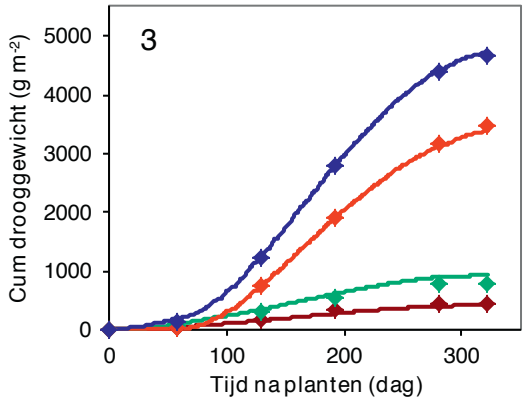
1 Als wordt aangenomen dat na het toppen van het gewas de bladpluk onderin stopt, wordt er aan het einde van de teelt meer licht onderschept, wat ten goede komt aan de productie. Tuinders zijn hier huiverig voor i.v.m. de luchtcirculatie onderin en de kleuring van de trossen.

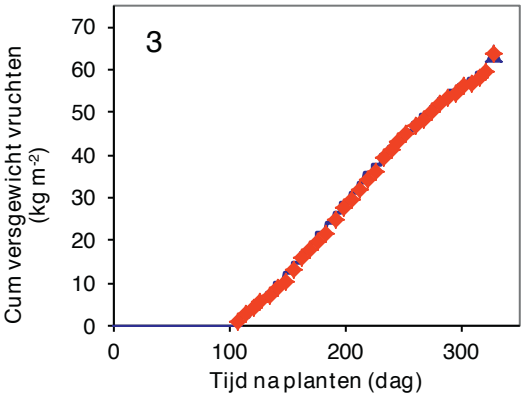

1
Cum drooggewichten (g m-2)
5000
4000
3000
2000
1000
0
0
100
200
300
Tijd na planten (dag)

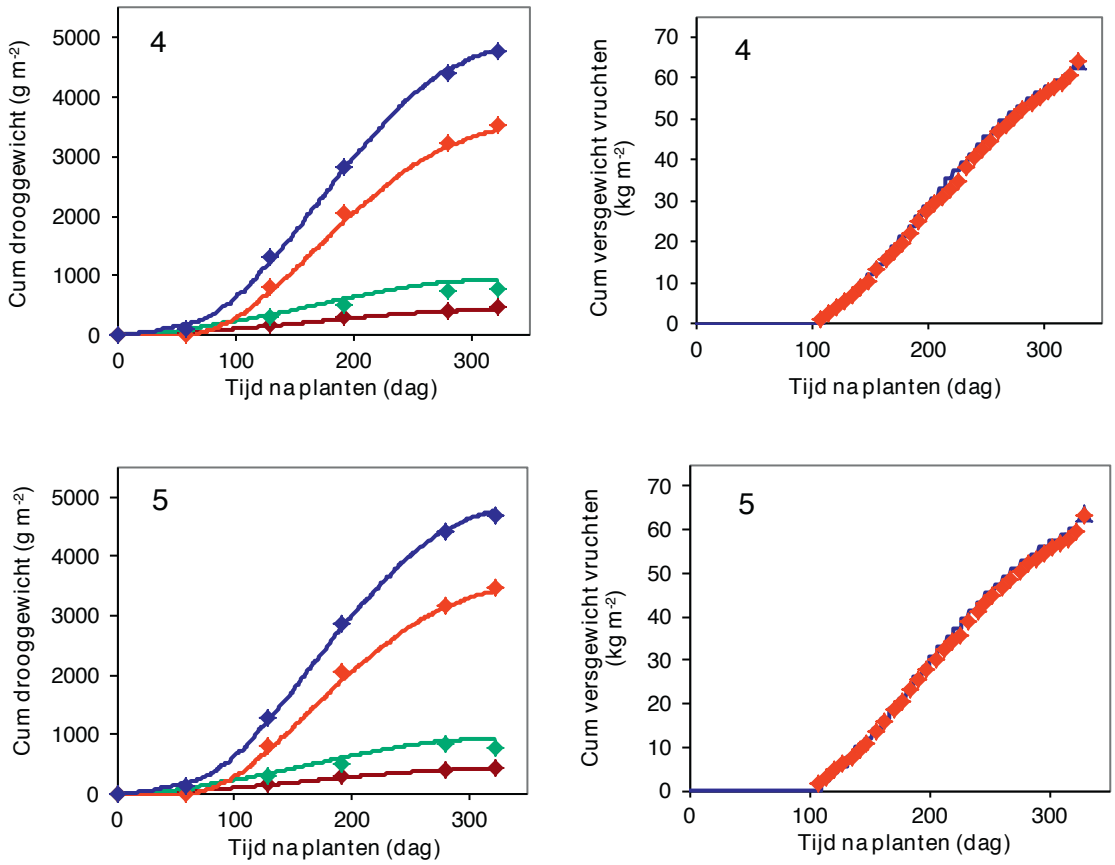

1
Cum versgewicht vruchten (kg m-2)
70
60
50
40
30
20
10
0
0
100
200
300
Tijd na planten (dag)


2
Cum drooggewicht (g m-2)
5000
4000
3000
2000
1000
0
0
100
200
300
Tijd na planten (dag)


2
Cum versgwicht vruchten (kg m-2)
70
60
50
40
30
20
10
0
0
100
200
300
Tijd na planten (dag)


3
Cum drooggewicht (g m-2)
5000
4000
3000
2000
1000
0
0
100
200
300
Tijd na planten (dag)


3
Cum versgewicht vruchten (kg m-2)
70
60
50
40
30
20
10
0
0
100
200
300
Tijd na planten (dag)



Figuur 10. Waargenomen (punten) en gesimuleerde (lijnen) waarden van plant- en orgaangewichten (linkerfiguren), en van de cumulatieve versproductie (rechterfiguren) van de 5 behandelingen (1 = open kas, 2 = semi gesloten; koeling van onderen, 3 = semi gesloten; koeling van boven, 4 = semi gesloten; koeling van onderen, temperatuur sterker gekoppeld aan straling, 5 = semi gesloten; koeling van boven, temperatuur sterker gekoppeld aan straling). (Organen linkerfiguren — stengel; — blad; — vruchten; — totaal bovengronds).

De verschillen tussen de waargenomen droog en vers vruchtgewichten in de semi-gesloten kassen zijn ongeveer gelijk (Tabel 2.). De droog en vers vruchtgewichten liggen in de orde van 8-13% hoger dan de gewichten in de open kas. Het waargenomen verschil tussen van de diverse vormen van koeling was dus maximaal 5%. Er zijn wel enige verschillen in de rangordes van waargenomen vers- en waargenomen drooggewichten, wat het gevolg is van iets verschillende drogestofgehalten van de vruchten. De hoogste productie werd bereikt bij koeling van onderen waarbij het temperatuureffect op de regeling van ondergeschikt belang is (11-13%). Koeling van boven leverde een iets lagere productie dan koeling van onderen (10%).

Een semi-gesloten kas levert duidelijk een hogere productie levert dan een open kas, zowel in termen van droog als vers vruchtgewicht.

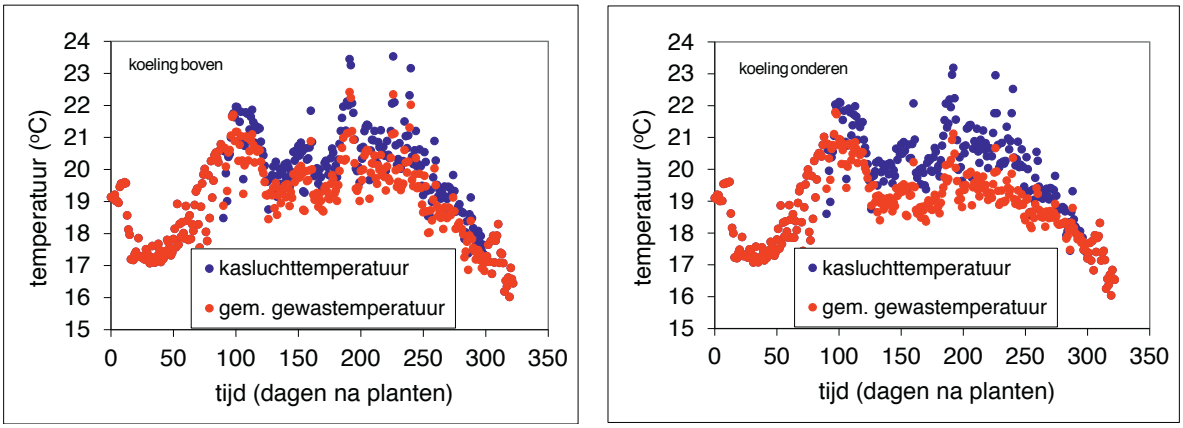
De simulatie van de droog vruchtgewichten komt goed overeen met de waarnemingen (Tabel 2.), net als de simulatie van de vers vruchtgewichten. Daarbij worden de relatieve waarden van, en de rangordes in de producties correct gesimuleerd.

Tabel 2. Overzicht van absolute en relatieve waarden van gemeten en gesimuleerde totale drogestofproductie (waarbij de wortels zijn buiten beschouwing gelaten), en van cumulatief geoogst vers vruchtgewicht, voor de vijf behandelingen.

Behandeling	Vers vruchtgewicht		Droog totaalgewicht	
	Gesimuleerd	waargenomen	gesimuleerd	waargenomen
	Absolute waarden (kg m^{-2})			
Open kas	58.1	57.5	4.28	4.31
Koeling onder	65.5	65.1	4.77	4.86
Koeling boven	63.5	63.5	4.72	4.68
Koeling onder + T	64.0	63.9	4.79	4.78
Koeling boven + T	63.9	63.2	4.77	4.70
	Relatieve waarden (%)			
Open kas	100	100	100	100
Koeling onder	113	113	112	113
Koeling boven	109	110	110	108
Koeling onder + T	110	111	112	111
Koeling boven + T	110	110	111	109

2.4.3 Temperatuurgradiënten: fysiologische processen en effecten

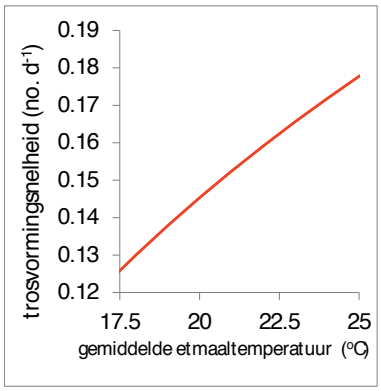
Door koeling daalt de gemiddelde temperatuur in het gewas. In Figuur 11. wordt op etmaalbasis de kasluchttemperatuur vergeleken met de gemiddelde temperatuur in het gewas. In de maanden dat de koeling actief is, is het gemiddelde verschil ongeveer een halve (koeling van boven) tot een hele graad (koeling van onderen).



Figuur 11. De gemiddelde dagelijkse kasluchttemperatuur en de gemiddelde temperatuur in het gewas in geval van koeling van boven (links) en koeling van onderen (rechts).

Als door koeling in het gewas een lagere temperatuur dan bij de kop wordt gehandhaafd gaan er een aantal gewasfysiologisiche processen een rol spelen. Dit zijn:

1) De **trosafsplitsingsnelheid** is afhankelijk van de temperatuur in de kop van het gewas (Figuur 12). Hoe hoger de temperatuur, hoe sneller er een nieuwe tros gevormd zal worden. Bij een gemiddelde etmaaltemperatuur van ongeveer 20 °C wordt er een tros per week aangelegd. Bij koeling van boven is de temperatuur in de kop van het gewas verlaagd (Figuur 7.) en zullen er minder trossen per week worden gevormd. Dit op zichzelf leidt richting een lagere plantbelasting. Bij koeling van onderen is de temperatuur in de kop in bepaalde perioden ook verlaagd (al is dit niet zo in de maand juni, Figuur 7.). In beide gevallen worden er op seizoensbasis een (koeling van boven) of twee (koeling van onderen) trossen minder gevormd op een totaal van 38 trossen. Dit is niet te veronachtzamen, maar ook niet heel erg veel. In deze specifieke gevallen levert koeling van onderen dus een lagere trosafsplitsingsnelheid; blijkbaar is er op voldoende momenten in de tijd een koelend effect in de kop van het gewas.

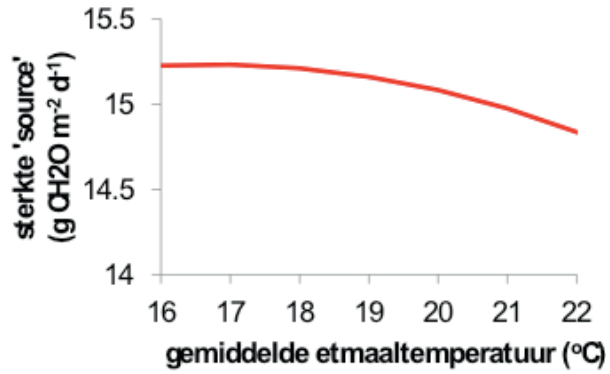


Figuur 12. De trosafsplitsingsnelheid bij tomaat in relatie tot de gemiddelde etmaaltemperatuur[2].

2) De **afrijpingsnelheid** van trossen wordt bepaald door de temperatuur langs het verticale profiel van het gewas. Van zetting tot afrijping moet een bepaalde temperatuursom (uitgedrukt in graaddagen) worden bereikt. Het maakt niet uit of er koeling van boven of van onderen plaatsvindt, want in beide gevallen duurt het langer voor een tros volledig afrijpt en leidt het tot een hogere **plantbelasting**. Hoe kouder het in het gewas is, hoe langer de afrijping duurt en hoe hoger de plantbelasting zal worden. Belangrijk is ook dat er meer dagen voor de vruchten beschikbaar zijn om te groeien. De gemiddelde berekende belasting is 8.28 trossen per stengel als er geen temperatuurgradiënt aanwezig is, 8.35 trossen per stengel in het geval van koeling van boven, en 8.07 trossen per stengel in het geval van koeling van beneden. De lagere, in plaats van hogere, plantbelasting bij koeling van beneden wordt veroorzaakt door het dominante effect van de toch lagere temperatuur in de kop van het gewas (zie punt 1).

3) Binnen het waargenomen gebied van gemiddelde etmaaltemperaturen van ongeveer 16 tot 22 °C (Figuur 4.) is er een licht effect op de **fotosynthese** en daarmee op de sterkte van de '**source**': bij een lagere temperatuur komen er iets meer assimilaten beschikbaar (Figuur 13). Op seizoensbasis resulteerde de koeling van boven in 111 g CH_2O m^{-2} extra, en koeling van beneden in 99 g CH_2O m^{-2} extra.

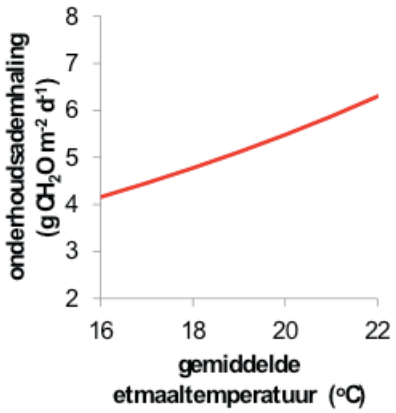
2 Figuur 12, Figuur 13 en Figuur 14 zijn gemaakt door voor dag 150 (31 mei, een zonnige dag) steeds een andere, maar wel voor de hele dag wel een constante temperatuur aan te nemen.



Figuur 13. Sterkte van de source, of assimilatenbeschikbaarheid, als functie van de gemiddelde etmaaltemperatuur.

4) De **drogestofverdeling** wordt bepaald door de kracht waarmee assimilaten door de diverse organen worden aangezogen. Deze kracht heet de '**sinksterkte'**. De sinksterkte zelf wordt primair door de temperatuur beïnvloed, maar de verhouding tussen de sinksterktes van vruchten en de rest van de plant is erg stabiel en wordt niet door de temperatuur beïnvloed. Onder de meeste omstandigheden komt ongeveer 70% van alle assimilaten in de vruchten terecht.

5) Wat in principe ook positief is, is de lagere **onderhoudsademhaling** bij een lagere temperatuur (Figuur 14). Er komen dan in principe meer assimilaten beschikbaar voor de groei. De onderhoudsademhaling hangt echter ook af van de orgaangewichten, zodat de berekende onderhoudsademhaling op seizoensbasis licht stijgt als gevolg van de temperatuurgradiënt: 20 g CH_2O m^{-2} op een totaal van ongeveer 1270 CH_2O m^{-2} (dus nog geen procent).



Figuur 14. Onderhoudsademhaling in afhankelijkheid van de gemiddelde etmaaltemperatuur.

6) De aanmaak van assimilaten, minus de onderhoudsademhaling, resulteert na enige conversies in **totale groei**. De balans van de factoren is dusdanig dat de aanmaak van assimilaten domineert. Maar veel is het niet: de extra groei is in beide gevallen minder dan een procent: ongeveer 40 g m^{-2} drogestof extra op een totaal van ongeveer 4700 g m^{-2}.

7) Bij koeling blijven de trossen langer aan de plant hangen voordat ze zijn afgerijpt (zie punt 2), en daarnaast is de totale groei iets sterker (zie punt 6). Er werken twee processen tegen elkaar in: aan de ene kant eventueel meer trossen per plant zodat de assimilaten over meer vruchten moeten worden verdeeld, en aan de andere kant de iets sterkere totale groei. De extra assimilaten winnen: het berekende gemiddelde drooggewicht van een tros stijgt in het geval van koeling van boven van 41.1 naar 42.6 gram, en in het geval van koeling van onderen zelfs van 41.5 naar 44.5 gram. Dit laatste wordt versterkt door de juist wat lagere plantbelasting.

8) Bij een lagere temperatuur zullen de trossen later afrijpen (zie punt 2). Onder normale omstandigheden wordt het blad bij of net boven de onderste tros weggeplukt. Als de trossen langer aan de plant hangen zal bij dezelfde bladplukstrategie er meer blad aan de plant hangen. Meer blad kan meer lichtonderschepping en productie met zich meebrengen, als in de normale situatie niet al het licht werd onderschept. Dit leidt dan tot een sterkere fotosynthese. Een tuinder kan uiteraard besluiten om de wijze van bladplukken aan te passen, de onderste trossen kaal te laten hangen, en zo de LAI gelijk te houden.

Tabel 3. Overzicht van absolute en relatieve waarden van gesimuleerde totale bovengrondse drogestofproductie met en zonder verticale temperatuurgradiënt (waarbij de wortels buiten beschouwing zijn gelaten), en van cumulatief geoogst vers vruchtgewicht, voor de vijf behandelingen. De relatieve waarde is Tgradient / Geen Tgradient.

Behandeling	Vers vruchtgewicht kg m^{-2}			Droog totaalgewicht kg m^{-2}		
	Tgradient	Geen Tgradient	Relatief (%)	Tgradient	Geen Tgradient	Relatief (%)
Open kas	58.1	57.7	101	4.28	4.26	101
Koeling onder	65.5	64.6	101	4.77	4.72	101
Koeling boven	63.5	64.1	99	4.72	4.68	101
Koeling onder + T	64.0	62.7	102	4.79	4.72	101
Koeling van boven + T	63.9	63.3	101	4.77	4.73	101

Om te illustreren dat op seizoensbasis een temperatuurgradiënt geen of weinig effect heeft op de productie, omdat de hierboven beschreven fysiologische mechanismen weinig effect hebben en elkaar deels opheffen, zijn er simulatiestudies uitgevoerd voor ieder van de vijf behandelingen, waarin per behandeling een vergelijking is gemaakt tussen de productie van een gewas met en een gewas zonder temperatuurgradiënt (Tabel 3.). Gemiddeld over de vijf behandelingen wordt mét verticale temperatuurgradiënt 1% meer productie gesimuleerd voor zowel versgewichtproductie van de vruchten als totaal drooggewicht van de plant. Dit is een zeer bescheiden effect.

2.4.4 Analyse klimaatfactoren

Met het gegeven dat het simulatiemodel de totale bovengrondse biomassa, de drogestofverdeling en de vruchtproductie goed simuleert, kan het model worden ingezet om de effecten van klimaatfactoren te analyseren.

Tabel 4. Relatieve waarden van gesimuleerde totale bovengrondse drogestofproductie, en van cumulatief geoogst vers vruchtgewicht, als uitgaande van het klimaat in de open kas, klimaatfactoren door die van de gekoelde kassen worden vervangen.

1 = open
2 = koeling onder
3 = koeling boven
4 = koeling onder; temperatuur sterker gekoppeld aan straling
5 = koeling boven; temperatuur sterker gekoppeld aan straling

Scenario	Behandeling waarvan klimaatfactor afkomstig is			Vrucht drooggewicht (%)	Droog totaalgewicht (%)
	CO_2	dampdrukdeficiet	temperatuur		
1	open	open	open	100	100
2	2	open	open	111	111
3	3	open	open	109	110
4	4	open	open	111	112
5	5	open	open	110	112
6	open	2	open	100	100
7	open	3	open	100	100
8	open	4	open	99	101
9	open	5	open	99	100
10	open	open	2	102	101
11	open	open	3	100	101
12	open	open	4	99	101
13	open	open	5	99	100
14	2	2	open	111	111
15	2	open	2	113	112
16	open	2	2	102	101
17	2	2	2	113	112
18	3	3	open	109	110
19	3	open	3	109	110
20	open	3	3	100	101
21	3	3	3	109	110
22	4	4	open	111	112
23	4	open	4	110	112
24	open	4	4	99	100
25	4	4	4	110	112
26	5	5	open	110	111
27	5	open	5	110	111
28	open	5	5	99	100
29	5	5	5	110	111

De analyse van klimaateffecten richt zich op de vraag of de productieverschillen veroorzaakt worden door de temperatuurgradiënt, of door andere klimaatfactoren. Om dit te analyseren zijn de klimaatfactoren van de diverse behandelingen steeds verwisseld. De resultaten hiervan zijn samengevat in Tabel 4. Scenario 1 geeft de open kas weer, scenario 17 de behandeling met koeling van onderen, scenario 21 de behandeling met koeling van boven, et cetera. Tussenliggende scenario's hebben een of meer uitgewisselde klimaatfactoren. Zo geeft bijvoorbeeld scenario 16 de behandeling met koeling van onderen maar met het CO_2 niveau van de open kas.

Het blijkt dat het CO_2 niveau van de kaslucht het grootste effect heeft op de productie, en dat andere klimaatfactoren weinig effect hebben. De relatieve waarden van de scenario's waarin de CO_2 concentratie van een van de semi-gesloten kassen is vervangen door die van de open kas (scenario's 16, 20, 24 en 28), liggen allemaal vlakbij, of zijn gelijk aan, 100. De uitwisseling van luchttemperatuur en dampdrukdeficit heeft daarentegen nauwelijks effect op de productie.

2.5 Discussie

Koeling van onderen of boven in een semi-gesloten kas heeft gevolgen voor de verticale temperatuurgradiënt in het gewas. De verkregen kennis is vooralsnog empirisch, en het vereist een uitgebreide studie van de lucht- en energiestromen in het gewas om dit ook werkelijk te kunnen narekenen. Maar er kan wel worden geconstateerd dat er bruikbare relaties kunnen worden opgesteld tussen de kastemperatuur, gemeten bij de kop van het gewas, en op diverse dieptes in het gewas. Hoe hoger de luchttemperatuur, hoe groter het temperatuurverschil tussen de lucht bij de kop en in het gewas. Deze effecten zijn het sterkst onderin het gewas bij koeling van beneden – dan is het temperatuurverschil het grootst.

Het Intkam gewasgroeimodel kon de bladbedekkingsgraad, het specifieke bladgewicht, de totale biomassa, de drogestofverdeling en de vruchtproductie goed simuleren. Dit betekent dat onderliggende processen die niet direct met metingen vergeleken konden worden (bijvoorbeeld gewasfotosynthese en onderhoudsademhaling) betrouwbaar werden gesimuleerd.

Dit maakte het model geschikt om de individuele effecten van aparte klimaatfactoren te analyseren, waarbij de vraag was welke klimaatfactor(en) belangrijk was/waren in het verklaren van de productieverschillen. Het antwoord hierop was helder: de CO_2 concentratie van de lucht. Het verlies aan CO_2 door de grote raamopeningen in de open kas leidt tot een duidelijk merkbaar productieverlies (Mortensen, 1987). Andere klimaatfactoren speelden geen noemenswaardige rol. Nu waren de stralingsniveaus voor alle behandelingen identiek, dus daarvan was ook geen effect te verwachten. Van luchtvochtigheid en kasluchttemperatuur waren ook geen grote effecten te verwachten, omdat bekend is dat in het traject van normale waarden het effect hiervan op fotosynthese beperkt is (Qian et al., 2011).

De open kas had de kleinste verticale temperatuurgradiënt in het gewas, en de open kas met koeling van onderen de grootste verticale temperatuurgradiënt. De gradiënt was het sterkst in de zomermaanden, en beperkter in maanden met minder instraling. Er was bijvoorbeeld geen behandeling met koeling van onderen maar zonder een verticale temperatuurgradiënt, zodat een experimentele bepaling van het effect van de temperatuurgradiënt niet mogelijk is. Maar doordat het Inkam model een verticale benadering heeft, was het toch mogelijk om de gevolgen van een temperatuurgradiënt te analyseren. In paragraaf 2.4.3 zijn een aantal processen beschreven die ten eerste op zichzelf een beperkt effect hebben, en ten tweede op gewasniveau tegen elkaar inwerken, zoals assimilatenaanbod, plantbelasting, en uitgroeiduur. Het gevolg is dat een temperatuurgradiënt nauwelijks invloed heeft op de totale productie: gemiddeld 1% extra productie. Dit wordt ondersteund door het feit dat de CO_2 concentratie van de kaslucht de productieverschillen tussen de behandelingen grotendeels verklaart (zie hierboven). Er blijft geen 'restpost' over die eventueel door een verticale temperatuurgradiënt verklaard zou moeten worden.

Een punt van aandacht is het bladplukregime dat aan het einde van de teelt, na het toppen, wordt gehanteerd. Aan het einde van de teelt is de bladbedekkingsgraad al aan de lage kant, en wordt niet al het beschikbare licht door de bladeren onderschept. Als er wordt doorgegaan met het plukken van het blad ter hoogte van de onderste tros, daalt de bladbedekkingsgraad nog verder. Het niet plukken van blad stelt het gewas in staat om meer licht te onderscheppen, zodat de productie hoger wordt. Dit moet echter wel worden afgewogen tegen de slechtere luchtcirculatie en hogere luchtvochtigheid onderin het gewas, en de mogelijk slechtere kleuring.

Iets dergelijks vindt ook plaats bij koeling van onderen, dat leidt tot het langer aan de plant hangen van een tros. Bladeren zouden dan ook langer aan de plant kunnen blijven hangen om meer licht te onderscheppen.

3 Temperatuurstrategie

3.1 Samenvatting

Het experiment was gericht op het evalueren van de effecten op gewasgroei van snelheden van temperatuurovergangen aan de randen van de dag. Dit werd gerealiseerd door met aangepaste stook- en ventilatielijnen de overgangen van de nacht naar de dag, en van de dag naar de nacht, meer geleidelijk worden gemaakt. De gekozen temperatuurstrategieën leidden tot een zeer beperkt temperatuurverschil aan de randen van de dag. Vanwege de korte duur en de lage lichtniveaus aan de randen van de dag was er geen groot effect op de gewasgroeisnelheid. De verschillen in groei kunnen voornamelijk door verschillen in CO_2 niveau worden verklaard. Hetzelfde analytische resultaat was verkregen in de proef 'Verticale temperatuurgradiënt'.

3.2 Doelstelling

De algemene doelstelling van het experiment was om met temperatuurstragieën in de randen van de dag de balans van generatieve en vegetatieve groei te sturen. Er werden effecten op strekking en op de ontwikkeling van de tros verwacht. Er is in dit experiment gevarieerd met de temperatuurovergangen van de nacht naar de dag, en van de dag naar de nacht om tot verschillen in gewas- en orgaangroei te komen. Om de verschillen in overgang te realiseren is gevarieerd met de stook- en ventilatielijnen. Verdere details zijn te vinden in Dieleman *et al.* (2011b).

3.3 Materiaal en methoden

Locatie:	Kassencomplex van Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk.
Omvang afdeling:	144 m^2
Cultivar:	Cappricia, geënt op Emperador
Plantdatum:	18 december 2009
Plantdichtheid:	2.5 planten m^{-2}
Stengeldichtheid:	2.5 stengels m^{-2} en later in de teelt 3.33 stengels m^{-2}
Voeding:	standaard
Gewasbescherming:	zo veel mogelijk biologisch
CO_2 dosering:	230 kg ha^{-1} uur^{-1} (OCAP)
Start behandelingen:	29 maart 2010
Laatste oogst:	22 november 2010
Behandelingen:	zie Tabel 5

Tabel 5. Behandelingen in het experiment temperatuurstrategie. Alle koeling was van onderen.

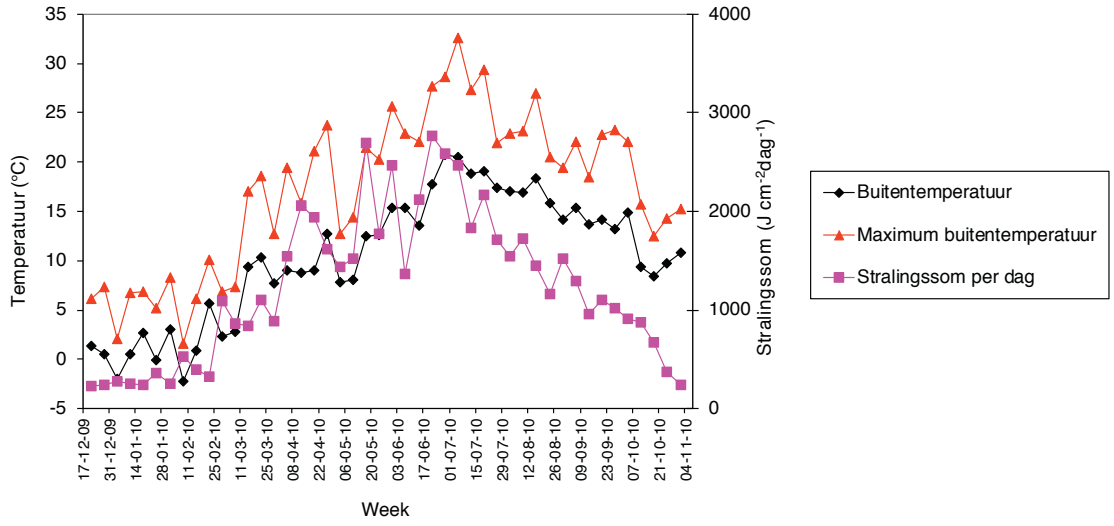
Nummer	Compartiment	Behandeling
1	8.07	Open
2	8.06	Semi gesloten, koelcapaciteit 350 W m^{-2} Standaard snelle overgangen van nacht naar dag, en van dag naar nacht ('snel, snel')
3	8.05	Semi gesloten, koelcapaciteit 350 W m^{-2} langzame opwarming aan begin van de dag snelle overgang van dag naar nacht ('langzaam, snel')
4	8.04	Semi gesloten, koelcapaciteit 350 W m^{-2}, vertraagde opwarming aan het begin en vertraagde koeling aan het einde van de dag ('langzaam, langzaam')
5	8.08	Semi gesloten, koelcapaciteit 350 W m^{-2}, verminderde ventilatie

3.4 Resultaten

3.4.1 Klimaat

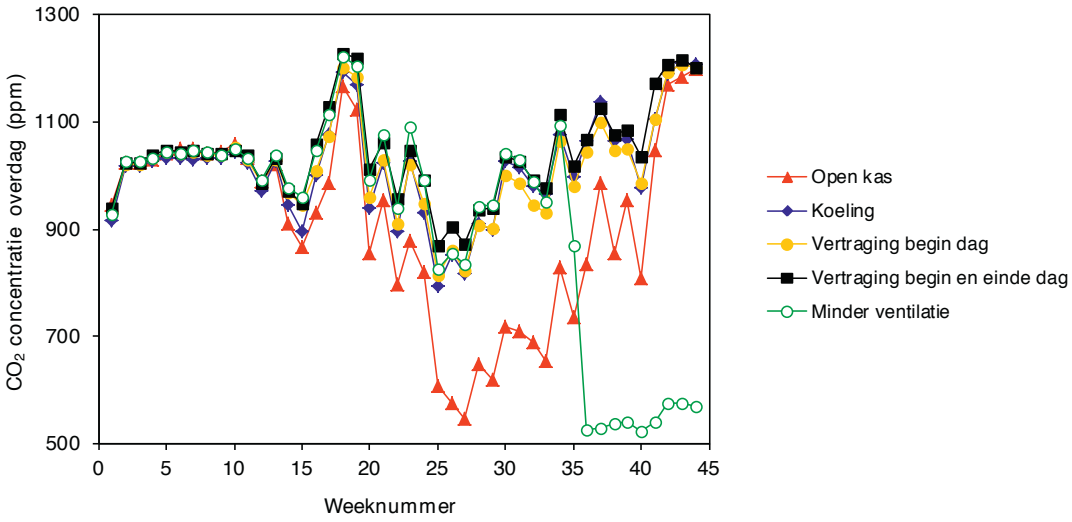
3.4.1.1 Straling en buitentemperatuur

Het buitenklimaat staat weergegeven in Figuur 15, met de vertrouwde patronen en variatie. Het buitenklimaat in 2010 is te typeren als een relatief warm jaar met een zeer warme zomer vooral vanaf half juni tot half juli. De winter periode was koud. In mei en juni zijn er grote schommelingen in de straling. Vanaf de langste dag zijn de maximale buitentemperaturen en dus ook de gemiddelde buitentemperaturen behoorlijk hoog geweest.



Figuur 15. Weekgemiddelden van het buitenklimaat gemiddelde en maximum temperatuur en globale stralingssom per dag.

3.4.1.2 CO_2



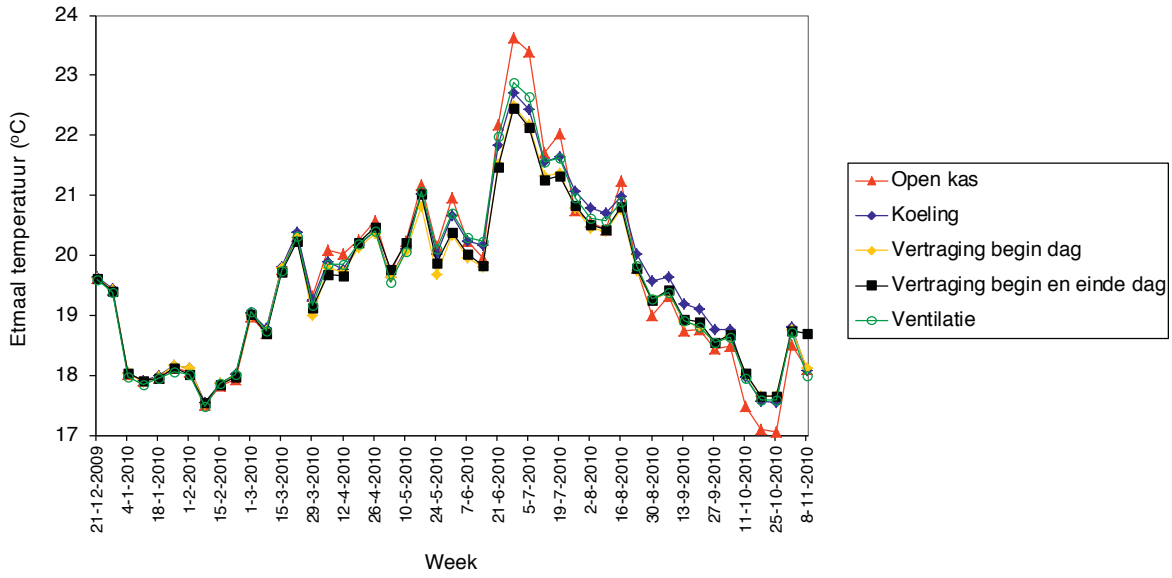
Figuur 16. CO_2 concentratie overdag (in ppm); weekgemiddelden over de hele teeltperiode.

De CO_2 concentraties van de kaslucht beginnen vanaf de eerste week in april uiteen te lopen (Figuur 16), toen de behandelingen werden ingezet. Aanvankelijk vallen de verschillen nog wel mee, al ligt de CO_2 concentratie in de open kas direct lager dan die van de semi-gesloten kassen. Op 23 april is de streefwaard in alle afdelingen verhoogd van 950 naar 1150 ppm. In de zomer, wanneer de temperatuur stijgt en de open kas flink gelucht moet worden, ligt de CO_2 concentratie in de open kas veel lager dan in de semi-gesloten kassen. Aan het einde van het seizoen klimt de CO_2 concentratie in de open kas weer als gevolg van de kleinere raamstanden. Op 3 september is voor compartiment 8.08 de maximale CO_2 concentratie waarbij gedoseerd werd verlaagd naar 500 ppm. De CO_2 concentratie van de verschillende semi-gesloten behandelingen ontlopen elkaar niet veel.

3.4.1.3 Binnentemperatuur

De meetboxen zijn geplaatst zoals eerder beschreven in Figuur 5. De resultantes van de temperatuurstrategieën waren vergelijkbare temperaturen voor de semi-gesloten kassen, een hogere temperatuur voor de open kas in het midden van de zomer, en een afwijking naar beneden voor de open kas aan het einde van de teelt.

In de meeste weken is inderdaad bereikt dat een langzamere overgang aan de uiteinden van de dag tot een andere temperatuur op die momenten leidde. Omdat er in de nacht voor werd gecompenseerd, had dit geen effect op de gemiddelde etmaaltemperatuur. Voor het gewasmodel betekent dit dat de drogestofverdeling niet wordt beïnvloedt omdat dit op etmaalbasis wordt berekend. Ook de totale gewasgroei zal naar verwachting niet erg verschillen, omdat de fotosynthese bij de heersende temperaturen aan de uiteinden van de dag niet erg temperatuurgevoelig is, en omdat dan de lichtniveaus relatief laag zijn.



Figuur 17. Gerealiseerde etmaaltemperatuur in de vijf behandelingen.

3.4.1.4 Temperatuurgradiënten

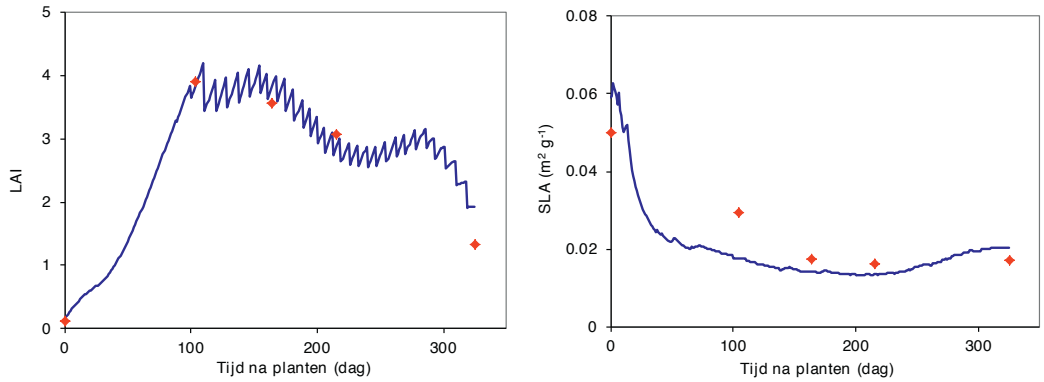
In deze proef waren temperatuurgradiënten aanwezig, net als in het geval van de proef 'Verticale temperatuurgradiënten', die hier speciaal aan was gewijd. Het resultaat van die proef was dat de aanwezigheid van een temperatuurgradiënt, in welke vorm dan ook, op seizoensbasis slechts een zeer klein effect heeft op de productie omdat de diverse fysiologische mechanismen elkaar opheffen. Vanwege de voorspelbare afwezigheid van een substantieel effect, is er in het geval van dit experiment voor gekozen om dit onderdeel achterwege ta laten.

3.4.2 Gewasgroei en –ontwikkeling; waarnemingen en simulaties

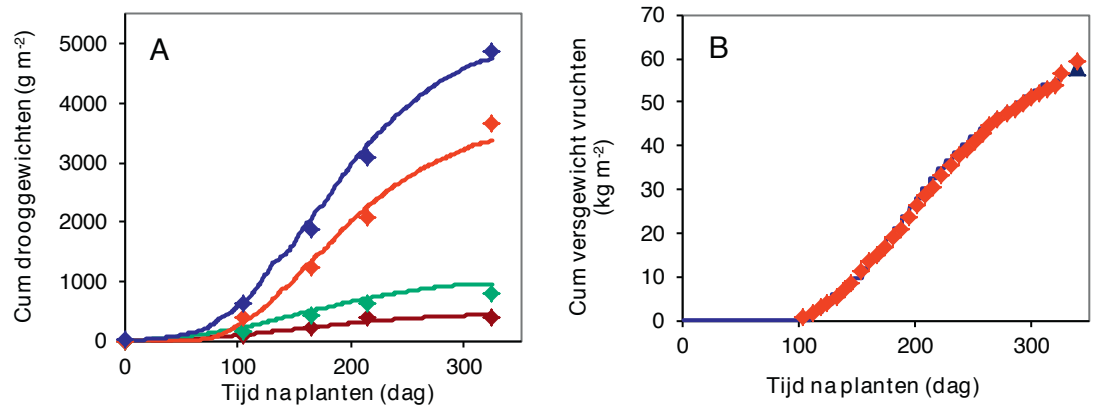
Om niet te veel in herhaling te vervallen, worden de gepresenteerde simulatieresultaten beperkt tot die van de open kas; die voor de andere behandelingen zijn vergelijkbaar in kwaliteit.

Simulatie van de LAI (leaf area index, de bladbedekkingsgraad) en SLA (specific leaf area, specifiek bladoppervlak) was goed (Figuur 18). Meer dan bij het experiment 'Verticale temperatuurstrategie' valt hier de sterke LAI afname aan het einde van de teelt op. Het gewas is op dat moment bovenin getopt, terwijl onderin het bladpukken doorgaat. Dit heeft tot gevolg dat de hoeveelheid blad snel afneemt, en daarmee natuurlijk de assimilatenbeschikbaarheid voor de vruchtgroei.

De simulatie van de drooggewichten en versproductie (Figuur 19.) was eveneens goed, al werd de cumulatieve hoeveelheid droog vruchtgewicht halverwege de teelt iets overschat en aan het einde van de teelt iets onderschat.



Figuur 18. Waargenomen (♦) en gesimuleerde (—) LAI en SLA in de open kas.



Figuur 19. Waargenomen (punten) en gesimuleerde (lijnen) waarden van plant- en orgaangewichten (A), en van de cumulatieve versproductie (B) van de open kas (Organen figuur A — stengel; — blad; — vruchten; — totaal bovengronds).

In Tabel 6. worden per compartiment het drooggewicht van het hele gewas en het vers vruchtgewicht gegeven. De simulaties lagen iets lager dan de waargenomen waarden, maar de relatieve waarden ten opzichte van de open kas waren vergelijkbaar.

Het vers vruchtgewicht werd in de semi-gesloten kassen iets overschat. Hier zijn twee redenen voor aan te voeren. Ten eerste was er in de semi-gesloten kassen gemiddeld 14% botrytis, terwijl dit in de open kas met 3% veel lager was. Hier is in de berekeningen niet voor gecorrigeerd. Er kan natuurlijk wel arbitrair worden gezegd dat de productie er bijvoorbeeld 5% onder te lijden heeft gehad, maar dit blijft giswerk. In ieder geval waren de producties in de semi-gesloten kassen hoger geweest als er geen botrytis was geweest.

Ten tweede is er in de berekeningen gebruik gemaakt van een vast drogestofgehalte van de vruchten om het versgewicht af te leiden uit het drooggewicht. Er waren geen tijdreeksen beschikbaar, terwijl bekend is dat er in de loop van het jaar meestal veranderingen plaatsvinden.

Tabel 6. Overzicht van absolute en relatieve waarden van gemeten en gesimuleerde totale drogestofproductie (waarbij de wortels zijn buiten beschouwing gelaten), en van cumulatief geoogst vers vruchtgewicht, voor de vijf behandelingen.

Behandeling	Vers vruchtgewicht		Droog totaalgewicht	
	Gesimuleerd	waargenomen	gesimuleerd	waargenomen
	Absolute waarden (kg m^{-2})			
Open kas	57.9	59.2	4.75	4.86
Koeling	63.7	62.1	5.01	5.13
Vertraging begin van dag	62.2	60.9	5.03	5.03
Vertraging begin en einde	65.6	63.5	5.08	5.13
Minder ventilatie	60.4	61.4	4.97	4.99
	Relatieve waarden (%)			
Open kas	100	100	100	100
Koeling	110	105	105	106
Vertraging begin van dag	107	103	106	103
Vertraging begin en einde	113	107	107	105
Minder ventilatie	104	104	105	103

3.4.3 Analyse klimaateffecten

Net als in het geval van het experiment 'Verticale temperatuurgradiënt' wijst de analyse van de klimaatfactoren uit dat het CO_2 gehalte van de kaslucht de voornaamste verklarende factor is voor de productieverschillen (Tabel 7.). Ook hier geldt dat de relatieve waarden van gesimuleerde producties van scenario's 16, 20, 24 en 28 gelijk of ongeveer gelijk aan 100% zijn. Dit zijn de scenario's waarbij alleen het CO_2 gehalte van de kaslucht van de verschillende semi-gesloten behandelingen is vervangen door CO_2 gehalte van de kaslucht van de open kas. Uitwisseling van luchttemperatuur of dampdrukdeficit heeft nauwelijks effect.

Tabel 7. Relatieve waarden van gesimuleerde totale bovengrondse drogestofproductie, en van cumulatief geoogst vers vruchtgewicht, als uitgaande van het klimaat in de open kas, klimaatfactoren door die van de gekoelde kassen worden vervangen.

1 = open
2 = koeling
3 = vertraagde opwarming begin van de dag
4 = vertraagde opwarming begin van de dag en vertraagde koeling einde van de dag
5 = verminderde ventilatie

Scenario	Behandeling waarvan klimaatfactor afkomstig is			Vrucht drooggewicht (%)	Droog totaalgewicht (%)
	CO_2	dampdrukdeficiet	temperatuur		
1	open	open	open	100	100
2	2	open	open	110	105
3	3	open	open	107	105
4	4	open	open	107	107
5	5	open	open	104	104
6	open	2	open	100	100
7	open	3	open	100	100
8	open	4	open	100	100
9	open	5	open	100	100
10	open	open	2	100	100
11	open	open	3	102	101
12	open	open	4	101	101
13	open	open	5	100	100
14	2	2	open	110	105
15	2	open	2	110	105
16	open	2	2	100	100
17	2	2	2	110	105
18	3	3	open	106	105
19	3	open	3	107	106
20	open	3	3	102	100
21	3	3	3	107	106
22	4	4	open	112	106
23	4	open	4	113	107
24	open	4	4	101	100
25	4	4	4	113	107
26	5	5	open	103	104
27	5	open	5	104	105
28	open	5	5	100	100
29	5	5	5	104	105

3.5 Discussie

De gekozen temperatuurstrategieën leidden tot een zeer beperkt temperatuurverschil aan de randen van de dag. Vanwege de korte duur en de lage lichtniveaus aan de randen van de dag was geen groot effect op de gewasgroeisnelheid te verwachten. Dit bleek uit de analyse van de effecten van de klimaatfactoren op de groei, die uitwees dat de verschillen in groei voornamelijk door verschillen in CO_2 niveau konden worden verklaard, en niet uit de verschillende temperaturen aan de randen van de dag. Hetzelfde resultaat was verkregen in de proef 'Verticale temperatuurgradiënt'.

De resultaten waren mogelijk anders geweest als er in de nacht niet voor de langzamere verandering aan de randen van de dag was gecompenseerd. Dan waren de gemiddelde etmaaltemperaturen anders geweest, zodat de ontwikkelingsnelheid van het gewas ook anders was geweest. Maar zolang de gemiddelde etmaaltemperatuur op het oude niveau wordt gehouden, is er alleen een zeer klein effect op de fotosynthesesnelheid.

De semi-gesloten kassen hadden meer dan de open kas last van botrytis. Dit blijft een lastig probleem. In eerste instantie natuurlijk voor de teelt zelf, maar ook om een proef na te rekenen en te analyseren. Het is namelijk niet bekend wat het productieverlies als gevolg van botrytis is. Het leidde er in elk geval toe dat de simulaties van de versproducties enigszins werden overschat. Het belangrijkste is echter dat trends goed weergegeven worden.

4 Koelcapaciteit

4.1 Samenvatting

In het experiment 'Koelcapaciteit' werden in de compartimenten verschillende niveaus van koelvermogen aangelegd om verschillen in binnentemperatuur en CO_2 concentratie van de kaslucht te krijgen, en hiervan de effecten op gewasgroei te evalueren.

Net als in de andere experimenten bleek dat de verschillen in gewasgroei en –productie voornamelijk door de CO_2 concentratie van de kaslucht kunnen worden verklaard, en dat de andere klimaatfactoren een marginale rol vervullen. In deze zin had meer koeling het gewenste effect. Of het economisch een verstandige keuze is, is een andere vraag.

4.2 Doelstelling

Tot slot werd het in 2008 uitgevoerde experiment 'Koelcapaciteit' nagerekend. Dit experiment had tot doel om het volgende vast te stellen:

- De effecten van de verschillende klimaten als gevolg van verschillende koelcapaciteiten op groei, ontwikkeling en productie van tomaat.
- De optimale temperatuurstrategie in een geconditioneerde kas.
- De effecten van de verschillende klimaten op de drogestofverdeling in de plant.

Een uitgebreide beschrijving van dit experiment wordt door Dieleman *et al.* (2009) gegeven.

4.3 Materiaal en methoden

Locatie:	Kassencomplex van Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk.
Omvang afdeling:	144 m^2
Cultivar:	Cappricia, geënt op Emperador
Plantdatum:	12 december 2007
Plantdichtheid:	2.5 planten m^{-2}
Stengeldichtheid:	3.75 stengels m^{-2}, vanaf week 9
Voeding:	standaard
Gewasbescherming:	zo veel mogelijk biologisch
CO_2 dosering:	230 kg ha^{-1} uur^{-1}
Start behandelingen:	10 maart 2008
Laatste oogst:	13 november 2008
Behandelingen:	zie Tabel 8

Tabel 8. Behandelingen in het experiment 'koelcapaciteit'. Alle koeling was van onderen.

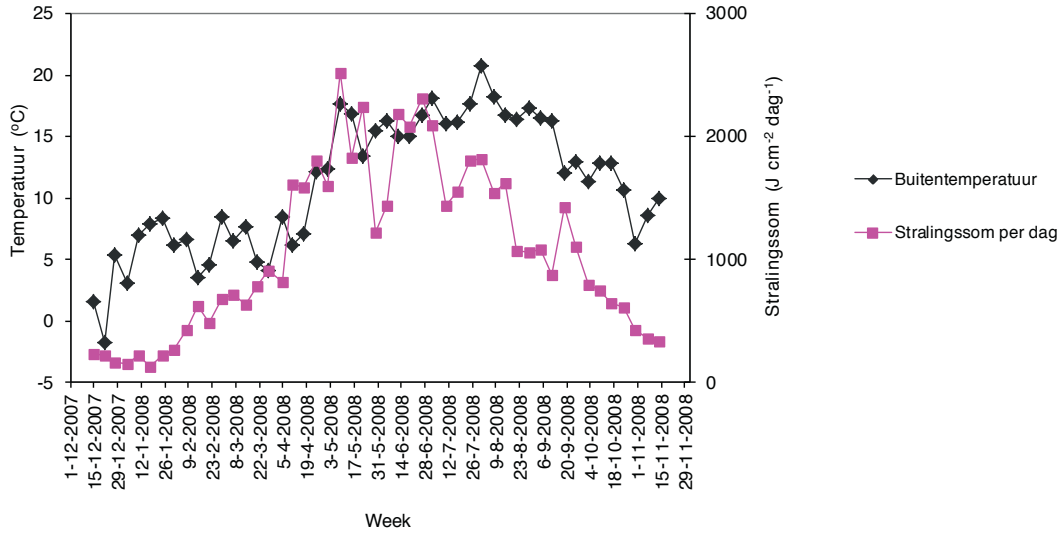
Nummer	Compartiment	Behandeling
1	8.07	Open
2	8.06	Semi gesloten koelcapaciteit 150 W m^{-2}
3	8.05	Semi gesloten koelcapaciteit 350 W m^{-2}
4	8.08	Semi gesloten koelcapaciteit 350 W m^{-2} temperatuurverlaging aan het einde van de dag d.m.v. ventilatie i.p.v. koeling
5	8.04	Semi gesloten koelcapaciteit 700 W m^{-2}

4.4 Resultaten

4.4.1 Klimaat

4.4.1.1 Straling en buitentemperatuur

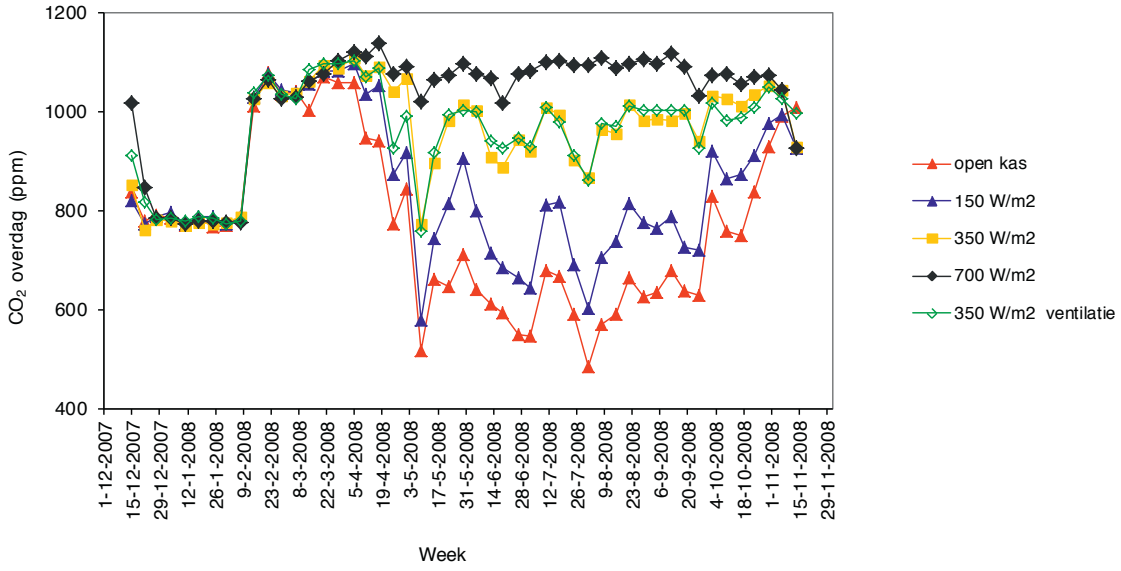
Het buitenklimaat in 2008 is te typeren als een relatief warm jaar maar met weinig perioden van extreme temperaturen. Alleen eind juli (week 31) kwam de etmaal temperatuur gedurende een week boven de 20 °C. Begin mei heeft de zon uitbundig geschenen, maar eind mei was juist een bijzonder bewolkte periode. De stralingssom was vergelijkbaar met het meerjarig gemiddelde.



Figuur 20. Gemiddelde weekwaarde van de straling en de buitentemperatuur.

4.4.1.2 CO_2

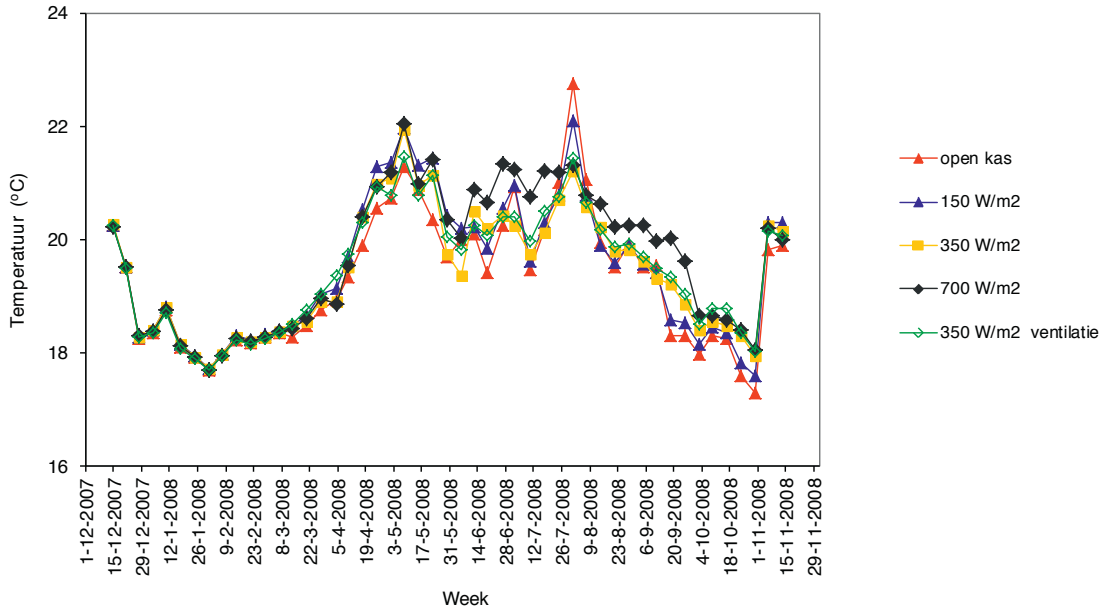
Er zijn duidelijke verschillen in CO_2 concentratie gerealiseerd (Figuur 21). In een behandeling met een hoger koelvermogen werd minder geventileerd, waardoor er minder CO_2 verloren ging en een hogere CO_2 concentratie gerealiseerd kon worden. Daarnaast is er in de behandeling met een koelcapaciteit van 350 W m^{-2} + ventilatie aan het einde van de dag een lager CO_2 gehalte dan in de behandeling met een koelcapaciteit van 350 W m^{-2} + koeling (Dieleman et al., 2009). De ventilatie leidt tot een verlies aan CO_2.



Figuur 21. Gemiddelde weekwaarde van de CO_2 concentratie tijdens de lichtperiode.

4.4.1.3 Binnentemperatuur

De temperatuurverschillen zijn beperkt, en het gevolg van het verschil in koeling ter vervanging van ventileren. Meer koeling (minder ventileren) impliceert een hoger CO_2 gehalte, waardoor een hogere etmaaltemperatuur mag worden aangehouden. In week 31 was dit andersom door de hoge buitentemperatuur en de ventilatie in de open kas onvoldoende was om de kasluchttemperatuur te verlagen, terwijl in gekoelde kassen de kasluchttemperatuur wel verlaagd kon worden.



Figuur 22. Gemiddelde weekwaarde van de binnentemperatuur in de vijf afdelingen.

4.4.1.4 Temperatuurgradiënten

Net als in het experiment 'Temperatuurstrategie' is hier een uitwerking van de verticale temperatuurgradiënt achterwege gelaten vanwege de aanzienlijke hoeveelheid werk en de voorspelbare resultaten.

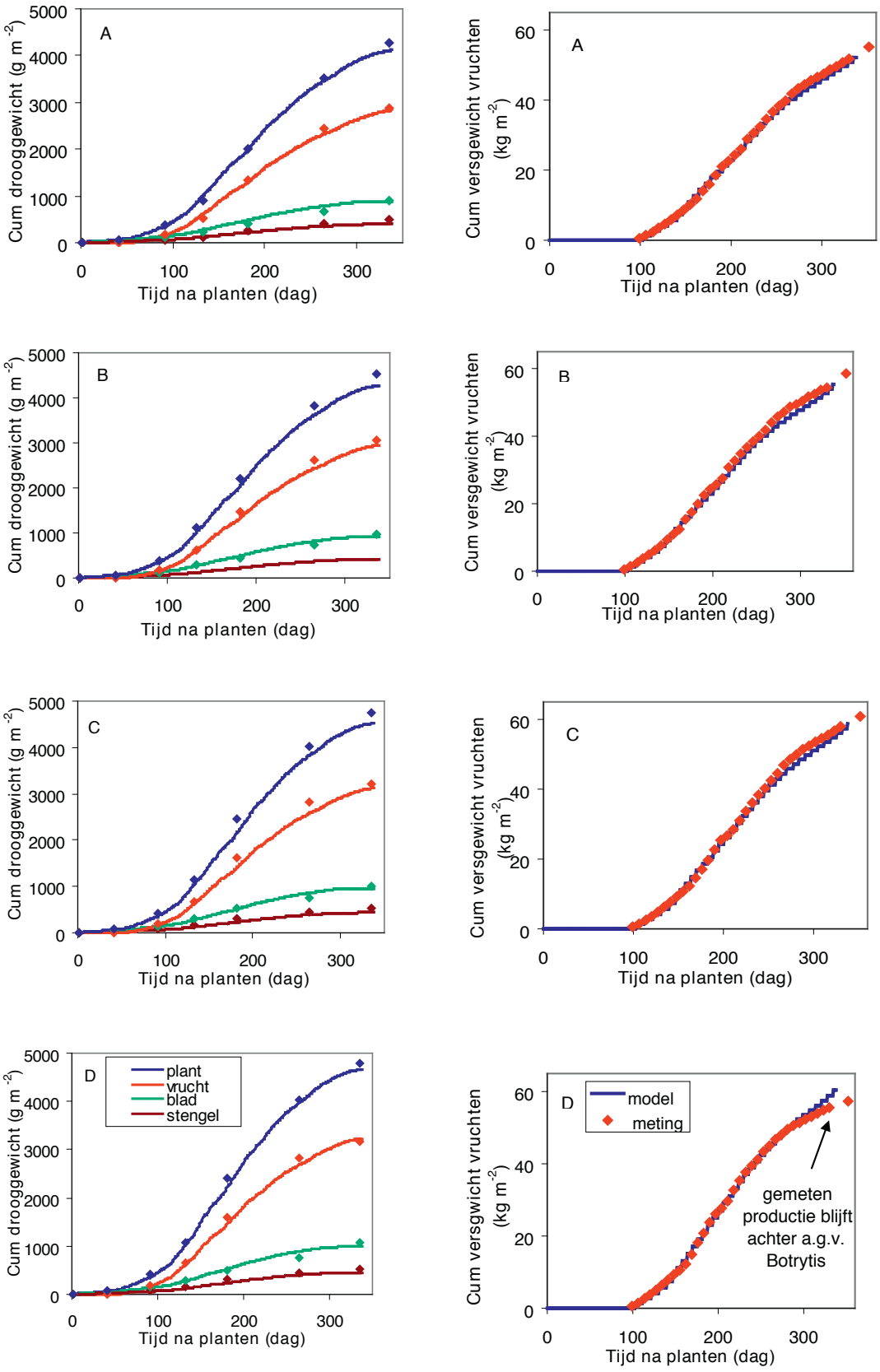
4.4.2 Gewasgroei en –ontwikkeling; waarnemingen en simulaties

De simulatieresultaten zijn weergegeven in Figuur 23. De gewasfotosynthese bepaalt in eerste instantie het totale gewasgewicht. Afgezien van een lichte onderschatting aan het einde van de teelt wordt de totale gewasgroei adequaat gesimuleerd[3], hetgeen impliceert dat de simulatie van het belangrijkste onderliggende proces, de gewasfotosynthese, ook adequaat is. Ook de verdeling van de dagelijkse assimilatenproductie over de organen wordt goed gesimuleerd. Dit geeft aan dat de berekening van de temperatuur-gestuurde sinksterkte van de vruchten, en van de andere organen, in het algemeen goed is.

De gesimuleerde versproductie is de resultante van de drooggewichttoename, het drogestofgehalte van de vrucht, en de uitgroeiduur van de vrucht. Dit volgt tussen 100 en ongeveer 250 dagen na planten een redelijk lineair verloop, waarna een afname in de oogstsnelheid zichtbaar wordt. Dit is een gevolg van de afnemende straling. De simulaties komen goed overeen met de waarnemingen, met een lichte onderschatting tussen 250 en 300 dagen na planten bij 150 en 350 W m^{-2} koelvermogen. De behandeling met 700 W m^{-2} koelvermogen had te lijden van Botrytis infectie aan het einde van de teelt. Besmette planten zijn toen uit het gewas verwijderd, wat niet door het Intkam model werd gesimuleerd, zodat de versproductie werd overschat. Op basis van de simulaties kan de opbrengstderving als gevolg van Botrytis op 6% (3.35 kg m^{-2} op 330 dagen na planten) worden geschat.

De simulaties van het cumulatieve versgewicht vonden overigens plaats tot en met 330 dagen na planten. Dit is de dag waarop voorlaatste oogst plaatsvond. Bij de laatste oogst werd de plant leeggeplukt van rijpe en onrijpe vruchten, wat het huidige model moeilijk kan simuleren. Het cumulatieve gevolg van deze laatste pluk is in de figuren zichtbaar als het enigszins geïsoleerde punt aan de rechterkant.

3 De kwaliteit van een simulatie kan het beste worden beoordeeld op basis van een vergelijking met alle waarnemingen in de tijd. De waarnemingen zijn weliswaar steeds op meerdere planten gebaseerd, maar vertonen onvermijdelijk experimentele ruis. Een oordeel op basis van een enkele waarneming kan daardoor onterecht slecht (of goed) uitvallen.



Figuur 23. Waargenomen (punten) en gesimuleerde (lijnen) waarden van plant- en orgaangewichten (linkerfiguren), en van de cumulatieve versproductie (rechterfiguren) van de 4 behandelingen (A = open kas, B = 150 W m^{-2} koelvermogen, C = 350 W m^{-2} koelvermogen, D = 700 W m^{-2} koelvermogen).

De resultaten zijn nog eens samengevat in Tabel 9. Er vindt op seizoensbasis een lichte onderschatting plaats van de totale bovengrondse drogestofproductie, en van de totale versoogst (met uitzondering van de behandeling met 700 W m^{-2} koelvermogen had te lijden van Botrytis infectie aan het einde van de teelt). Het is echter belangrijk dat de relatieve verschillen tussen de behandelingen goed worden gesimuleerd. Dit biedt een goede basis voor modelmatige fysiologische verdieping.

Tabel 9. Overzicht van absolute en relatieve waarden van gemeten en gesimuleerde totale drogestofproductie (waarbij de wortelen zijn buiten beschouwing gelaten), en van cumulatief geoogst vers vruchtgewicht, voor de vier behandelingen.

Koelcapaciteit	Vers vruchtgewicht		Droog totaalgewicht	
(W m^{-2})	Gesimuleerd	waargenomen	gesimuleerd	waargenomen
	Absolute waarden (kg m^{-2})			
Open kas	50.9	51.8	4.11	4.28
150	52.6	54.4	4.27	4.54
350	56.1	57.9	4.52	4.75
700	58.9	55.5	4.66	4.78
	Relatieve waarden (%)			
Open kas	100	100	100	100
150	103	105	104	106
350	110	112	110	111
700	116	107*	113	112

**: De behandeling met 700 W m^{-2} koelvermogen had te lijden van Botrytis infectie aan het einde van de teelt. Besmette planten zijn toen uit het gewas verwijderd, wat niet door het Intkam model werd gesimuleerd, zodat de versproductie werd overschat.*

4.4.3 Analyse klimaateffecten

Net als in de andere experimenten was de vraag op welke wijze het kasklimaat van invloed is geweest op de totale groei en productie. Omdat de straling voor iedere kas identiek was, blijven CO_2, dampdrukdeficit en luchttemperatuur als mogelijke factoren over.

Met het gewasgroeimodel is dit vrij eenvoudig te analyseren door klimaatgegevens systematisch uit te wisselen. De berekeningen zijn gestart met die van de open kas (scenario 1 in Tabel 10). Vervolgens zijn de CO_2-waarden van de open kas beurtelings vervangen door die van de gekoelde kassen (scenario's 2-4). Dit leverde een simulatie met het klimaat van de open kas voor alle factoren, behalve voor het CO_2-gehalte. Het bleek dat de totale groei bij stijgend CO_2-niveau (corresponderend met groter koelvermogen) met 4, 10 en 14% toenam. De versproductie nam met respectievelijk 5, 11 en 15% toe – vergelijkbare waarden.

Vergelijkbare handelingen met dampdrukdeficiet (scenario's 5-7) en temperatuur (scenario's 8-10) wezen uit dat deze klimaatfactoren *op seizoensbasis* geen noemenswaardig effect hadden. Dit beeld wordt bevestigd door combinaties van uitgewisselde klimaatfactoren (scenario's 11-19), dat nogmaals laat zien dat het CO_2-niveau allesbepalend is.

Tabel 10. Relatieve waarden van gesimuleerde totale bovengrondse drogestofproductie, en van cumulatief geoogst vers vruchtgewicht, als uitgaande van het klimaat in de open kas, klimaatfactoren door die van de gekoelde kassen worden vervangen.

scenario	Behandeling waarvan klimaatfactor afkomstig is			Vers vruchtgewicht (%)	Droog totaalgewicht (%)
	CO_2	dampdrukdeficiet	temperatuur		
1	Open	open	open	100	100
2	150	open	open	105	104
3	350	open	open	111	110
4	700	open	open	115	114
5	Open	150	open	100	100
6	Open	350	open	100	100
7	Open	700	open	100	100
8	Open	open	150	99	100
9	Open	open	350	99	100
10	Open	open	700	100	99
11	150	150	open	104	104
12	150	open	150	104	104
13	150	150	150	103	104
14	350	350	open	111	110
15	350	open	350	110	110
16	350	350	350	110	110
17	700	700	open	115	114
18	700	open	700	116	113
19	700	700	700	116	113

4.5 Discussie

Met het INTKAM gewasgroeimodel konden de totale drogestofproductie en totale versoogst goed worden gesimuleerd, en daarmee ook de verschillen tussen de behandelingen. Ook in dit experiment bleek dat de groei- en productieverschillen tussen de behandelingen zo goed als volledig verklaard konden worden door de verschillen in CO_2-concentratie van de kaslucht. Verschillen in temperatuur en luchtvochtigheid waren niet groot genoeg om verschillen in fotosynthese te realiseren. Dit sluit niet uit dat gedurende een kortere periode bepaalde klimaatfactoren wel een zekere rol kunnen spelen, zonder dat dit op seizoensbasis duidelijk wordt omdat er in een andere periode iets gebeurt met het tegenovergestelde effect.

5 Scenario's

De rekenresultaten in de vorige hoofdstukken wezen uit dat de productiestijging in een semi-gesloten kas ten opzichte van een open kas voornamelijk een gevolg was van de hogere CO_2 concentratie van de lucht, en dat andere klimaatfactoren nauwelijks een rol speelden. De vraag rijst wanneer de toediening van een bepaalde hoeveelheid CO_2 het meest efficiënt is: wanneer kan een kilo CO_2 het beste worden toegediend? In de ochtend, wanneer in een semi-gesloten kas de ramen nog dicht staan en er geen CO_2 verlies naar buiten toe is, of juist in het midden van de dag wanneer het lichtniveau hoog is en een kleine hoeveelheid extra CO_2 (waarbij het merendeel verloren gaat via de open ramen) een relatief groot effect heeft?

Om deze vraag te beantwoorden zijn zowel de kas als het gewas in de berekeningen betrokken. Om te beginnen is een dag gekozen waarop aan de randen van de dag de ramen gesloten bleven, en waarop midden op de dag er een hoog stralingsniveau was. Dit zijn de dagen waarop op de respectievelijke momenten extra groei als gevolg van CO_2 dosering te verwachten is. Dergelijke dagen komen niet vaak voor: in de maanden december tot en met maart is het gedurende het grootste deel van de dag dusdanig koud dat er nauwelijks geventileerd wordt en er eigenlijk sprake is van een gesloten kas, en in de maanden april tot en met augustus is het dusdanig warm dat er gedurende de hele lichtperiode wordt geventileerd (zij het minder dan in een open kas, en de CO_2 dus efficiënter gebruikt wordt). Vanaf september is het gewas in afbouw. Eigenlijk blijft alleen de maand april over, met daarin een beperkt aantal dagen waarop een effect te verwachten is.

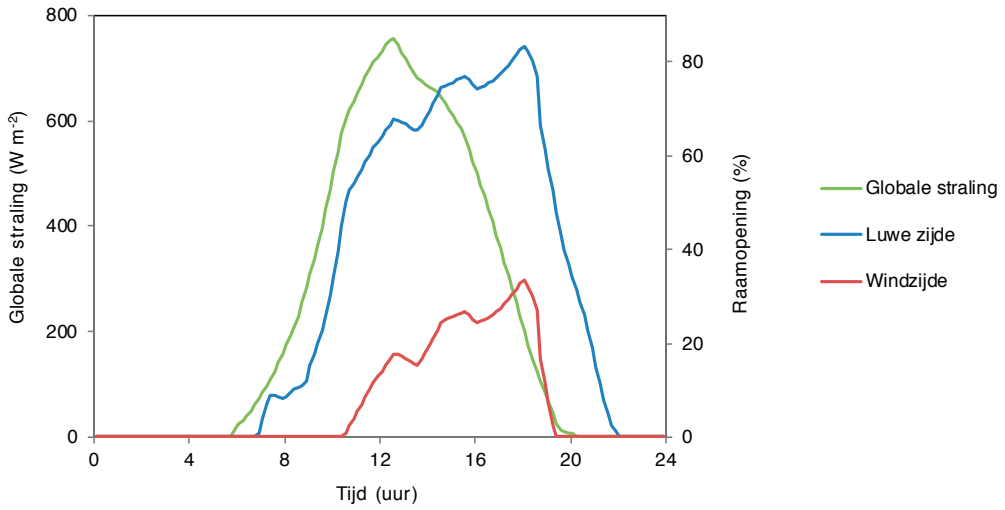
De berekeningen zijn uitgevoerd voor 22 april. Op deze dag ging de zon op om 6:29 uur en werd begonnen met ventileren om 7:00 uur (Figuur 24). Om 8:45 uur waren de ramen 10% open en 50% open om 11:00 uur. De maximale raamopening werd bereikt om 18:00 uur met 83%. Er werd gestopt met ventileren om 21:40 uur, terwijl de zon onder ging om 20:49 uur. Aan het begin van de dag was er een half uur waarin CO_2 werd toegediend zonder dat dit door de ramen kon ontsnappen en 2 uur met een kleine raamopening. Het was een zonnige dag, met een maximaal stralingsniveau van ongeveer 750 W m^{-2} op het midden van de dag.

Het kasmodel KASPRO is gebruikt om op ieder moment van de dag te berekenen wat de CO_2 concentratie van de kaslucht is bij toediening van extra CO_2 in hoeveelheden van 100, 150, 200 en 400 kg CO_2 ha^{-1} uur^{-1}. In de uitgangsituatie met 100 kg CO_2 ha^{-1} uur^{-1} wordt een maximale CO_2 concentratie van ongeveer 1500 ppm gehaald, met 150 kg CO_2 ha^{-1} uur^{-1} wordt een maximale CO_2 concentratie van ongeveer 2000 ppm gehaald, en met 200 kg CO_2 ha^{-1} uur^{-1} of meer wordt een maximale CO_2 concentratie van ongeveer 3000 ppm gehaald. Omdat extra toediening niet tot een hogere CO_2 concentratie leidt, wordt 3000 ppm als het maximaal haalbare beschouwd (met de gebruikte settings).

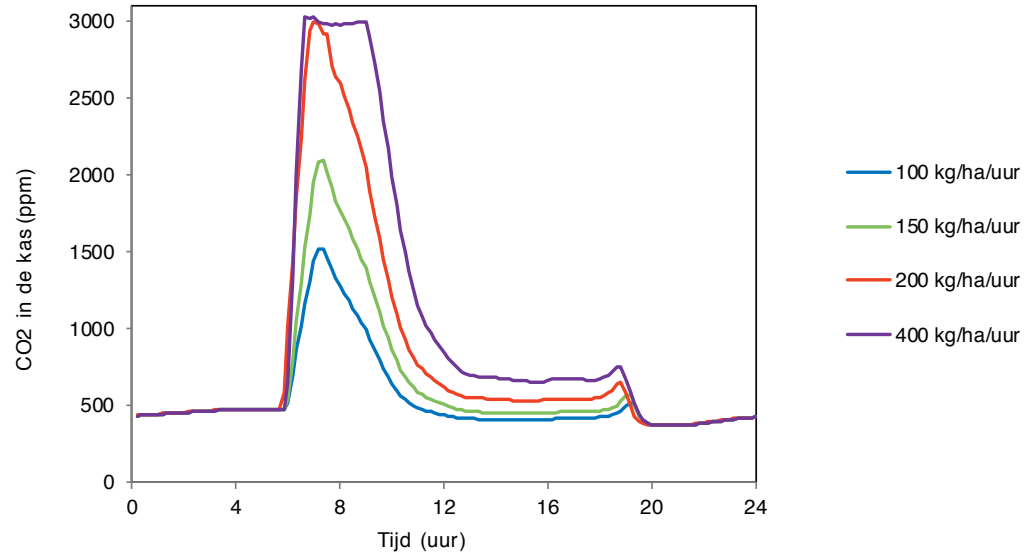
Het normale CO_2 verloop, uitgaande van 100 kg CO_2 ha^{-1} uur^{-1}, begint met een snelle stijging van 500 ppm tot 1500 ppm aan het begin van de dag wanneer er wordt gedoseerd met de ramen dicht, om na 8 uur 's ochtends vrij snel weer te dalen naar 500 ppm als de ramen worden opengezet (Figuur 25) en een deel van de CO_2 wordt weg geventileerd. Als deze informatie, samen met de andere klimaateigenschappen aan het Intkam model worden gevoed, kunnen de bruto fotosynthese, de onderhoudsademhaling, en de netto groeisnelheid op ieder moment van de dag worden berekend.

De netto groei piekt op het midden van de dag tot 1 mg CH_2O m^{-2} s^{-1} bij een CO_2 dosering van 100 kg ha^{-1} uur^{-1} tot 1,3 mg CH_2O m^{-2} s^{-1} bij een CO_2 dosering van 400 kg ha^{-1} uur^{-1} (Figuur 26). De grootste winst, als de straling van de zon maximaal is, is ongeveer 0,25 mg CH_2O m^{-2} s^{-1} (Figuur 27). Direct blijkt al dat op andere momenten van de dag, en zeker aan de randen van de dag, de winst kleiner is.

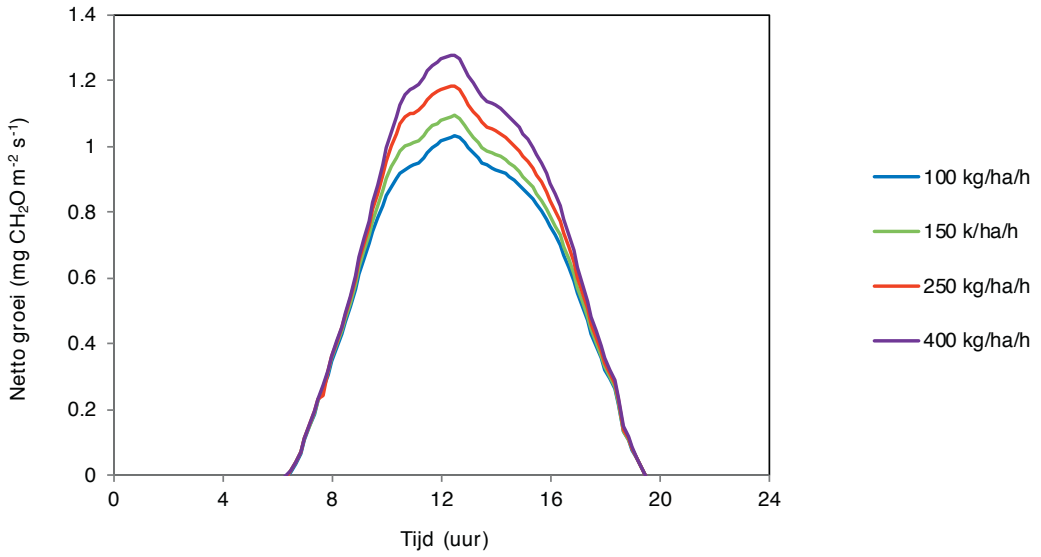
Dit is gelijk de meest belangrijke bevinding: extra CO_2 kan het beste worden gedoseerd bij hoge stralingsniveaus. Het feit dat de fotosynthese door hoge straling toch al hoog is, doet niets af aan het feit dat er op dat moment nog veel winst te behalen is. De maximale snelheden zijn nog lang niet bereikt.



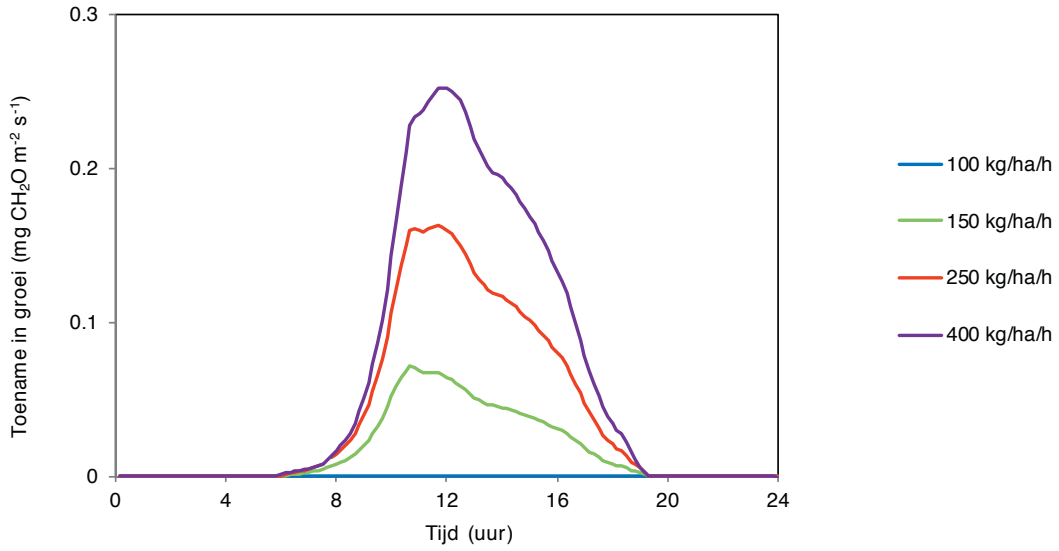
Figuur 24. Raamopening en globale straling op 22 april.



Figuur 25. CO_2 verloop in de kas bij verschillende doseercapaciteiten tussen zonsopkomst en zonsondergang. Er is een begrenzing op het doseren ingesteld van 3000 ppm CO_2 in de kas.



Figuur 26. Netto groei (mg CH_2O m^{-2} s^{-1}) bij 5 verschillende doseercapaciteiten van CO_2.



Figuur 27. Toename in groei (mg CH_2O m^{-2} s^{-1}) bij 5 verschillende doseercapaciteiten van CO_2.

6 Discussie

Geconditioneerd telen heeft een aantal belangrijke gevolgen voor het kasklimaat, afhankelijk van het toegepaste koelvermogen, noodzakelijke ventilatie, en positionering van de koeling. De eerste twee hebben een sterk effect op de CO_2 concentratie van de kaslucht, terwijl de laatste factor bijdraagt aan een verticale temperatuurgradiënt in het gewas.

In het kader van het project 'Gewasmanagement bij geconditioneerd telen" zijn een serie experimenten gedaan waarvan er drie met het Intkam simulatiemodel voor kasgewassen zijn doorgerekend. Eerst werd gekeken of het model de teelten goed kon narekenen, om vervolgens te analyseren welke rol de klimaatfactoren speelden in de productie, en wat de gevolgen van een verticale temperatuurgradiënt waren voor een aantal fysiologische processen.

De drie experimenten verschillen met betrekking tot de volgende klimaateigenschappen:

- een bewust aangelegde verticale temperatuurgradiënt langs de gewasdiepte, als gevolg van verschillen in plaats en aansturing van de koeling (hoofdstuk 2);
- verschillende temperaturen van de kaslucht aan de randen van de dag, als gevolg van verschillend temperatuursturing op deze momenten (hoofdstuk 3);
- beperkte verschillen in kasluchttemperatuur, als gevolg van verschillende koelcapaciteit (hoofdstuk 4).

Steeds was er sprake van verschillen in CO_2 concentratie als gevolg van de kaslucht door verschillen in ventilatie en daardoor verschillen in de hoeveelheid CO_2 die naar de buitenlucht ontsnapt.

Eerst moest steeds worden vastgesteld of het Intkam gewasgroeimodel in staat was om de waarnemingen goed te simuleren. Er waren steeds periodieke oogsten gedaan, die informatie hadden opgeleverd met betrekking tot de bladbedekkingsgraad, het specifieke bladgewicht, de totale biomassa, de drogestofverdeling en de vruchtproductie. Dit ging in het algemeen goed. De gevolgen van bijvoorbeeld botrytis op de productie kunnen niet door het Intkam model worden gesimuleerd, zodat hier geaccepteerd moet worden dat de simulaties hoger liggen dan de waarnemingen. De goede simulatie van dat wat waarneembaar was, betekende dat onderliggende processen die niet direct met metingen vergeleken konden worden (bijvoorbeeld gewasfotosynthese en onderhoudsademhaling) ook betrouwbaar werden gesimuleerd. Hierbij is het wel van belang om de teeltmaatregelen goed aan het model bekend te maken, zoals het aantal aangehouden stengels, het moment van toppen, en de wijze van bladplukken tijdens de teelt.

Vervolgens kon het Intkam gewasgroeimodel geschikt om de individuele effecten van aparte klimaatfactoren te analyseren, waarbij de vraag was welke klimaatfactor(en) belangrijk was/waren in het verklaren van de productieverschillen. Het antwoord hierop was helder: de CO_2 concentratie van de kaslucht. Het verlies aan CO_2 door de grote raamopeningen in de open kas leidt tot een duidelijk merkbaar productieverlies. Andere klimaatfactoren speelden geen noemenswaardige rol. Per experiment waren de stralingsniveaus voor alle behandelingen identiek, dus daarvan was ook geen effect te verwachten. Van luchtvochtigheid en kasluchttemperatuur waren ook geen grote effecten te verwachten, omdat bekend is dat in het traject van normale waarden het effect hiervan op fotosynthese beperkt is (Qian et al., 2011). De kanttekening die gemaakt kan worden is dat de door ons uitgevoerde analyse op seizoensbasis heeft plaatsgevonden en dat gedurende een kortere periode bepaalde klimaatfactoren wel een zekere rol kunnen spelen, zonder dat dit op seizoensbasis duidelijk wordt omdat er in een andere periode iets gebeurt met het tegenovergestelde effect.

Gegeven het feit dat de CO_2 concentratie van de kaslucht zo belangrijk is, blijkt dat een zekere hoeveelheid CO_2 het beste kan worden aangewend op momenten dat een hoog stralingsniveau deze extra CO_2 zo efficiënt mogelijk door het gewas laat gebruiken. De maximale fotosynthesesnelheid is namelijk nog niet bereikt. Dus ook al staan de ramen open en gaat een deel van de gedoseerde CO_2 verloren, dan nog kan er het beste op het midden van de dag, en niet aan de randen van de dag worden gedoseerd.

Waarnemingen hadden al uitgewezen dat de onderzochte verschillen in kasklimaat geen grote effecten op de productie hebben. Simulaties maakten helder waarom:

- Een verticale temperatuurgradiënt heeft effecten op verschillende gewasfysiologische processen. Deze effecten zijn niet allen beperkt, maar heffen elkaar op gewasniveau deels op. Het betreft hier een iets hogere assimilatie, een iets lagere onderhoudsademhaling en het aantal vruchten dat aan de plant hangt en waarover de assimilaten moeten worden verdeeld. Het netto resultaat is dat er op seizoensbasis ongeveer 1% extra productie mag mogen verwacht als een verticale temperatuurgradient wordt gerealiseerd.
- Aan de randen van de dag is door het lage stralingsniveau de fotosynthese dusdanig laag dat een klein temperatuurverschil, waarvan bij hoge straling het effect al beperkt is, geen merkbare groeireductie tot gevolg zal hebben.
- Kleine verschillen in kasluchttemperatuur hebben om dezelfde reden weinig effect op de dagelijkse fotosynthese en daarmee de gewasgroei.

Koeling van onder of boven in een semi-gesloten kas heeft gevolgen voor de verticale temperatuurgradiënt in het gewas. Wij hebben de verticale temperatuurgradiënt op een empirische wijze weten te beschrijven, die voor het doel van deze studie afdoende was, en kwamen tot de conclusie dat voor simulatie van de productie door een tomatengewas de introductie van een verticale temperatuurgradiënt niet nodig is. Voor andere gedetailleerde studies zou het wel erg nuttig kunnen zijn om het klimaat in het gewas op dynamische wijze te kunnen simuleren, bijvoorbeeld om de effecten van tussenbelichting op de fotosynthese goed te kunnen analyseren.

7 Literatuur

Dieleman, A., de Gelder, A., Eveleens, B., Elings, A., Janse, J., Lagas, P., Qian, T., Steenhuizen, J. & Meinen, E., 2009.
Tomaten telen in een geconditioneerde kas: groei, productie en onderliggende processen. Wageningen UR Glastuinbouw, nota 633.

Dieleman, A., de Gelder, A., Janse, J., Lagas, P., Eveleens, B., Qian, T., Elings, A., Steenhuizen, J. Stanghellini, C., Nederhoff, E., Savvides, A., Farneti, B., de Visser, R., Woltering, E. & Marcelis, L., 2011a.
Verticale temperatuurgradiënten in geconditioneerde kassen. Effecten op groei, ontwikkeling en onderliggende processen bij tomaat. Wageningen UR Glastuinbouw, rapport GTB-1122.

Dieleman, A., de Gelder, A., Janse, J., Eveleens, B., Lagas, P., Elings, A., Qian, T., Steenhuizen, J., 2011b.
Temperatuurstrategieën in geconditioneerde kassen. Effecten op groei, ontwikkeling en onderliggende processen bij tomaat. Wageningen UR Glastuinbouw, rapport GTB-1123.

Dieleman, J.A., Qian, T., Elings, & L.F.M. Marcelis, 2010.
Crop physiology in (semi-)closed greenhouses. Final report of the TransForum scientific project "SynErgy: Monitoring and control system for conditioning of plants and greenhouse", Wageningen UR Glastuinbouw, rapport GTB-1051.

Eveleens, B., Dieleman, A., de Gelder, A., Elings, A., Janse, J., Qian, T., Lagas, P. & Steenhuizen, 2009.
Effecten van verneveling op groei en ontwikkeling van tomaat. Teelt van eind april tot eind augustus. Wageningen UR Glastuinbouw, nota 633.

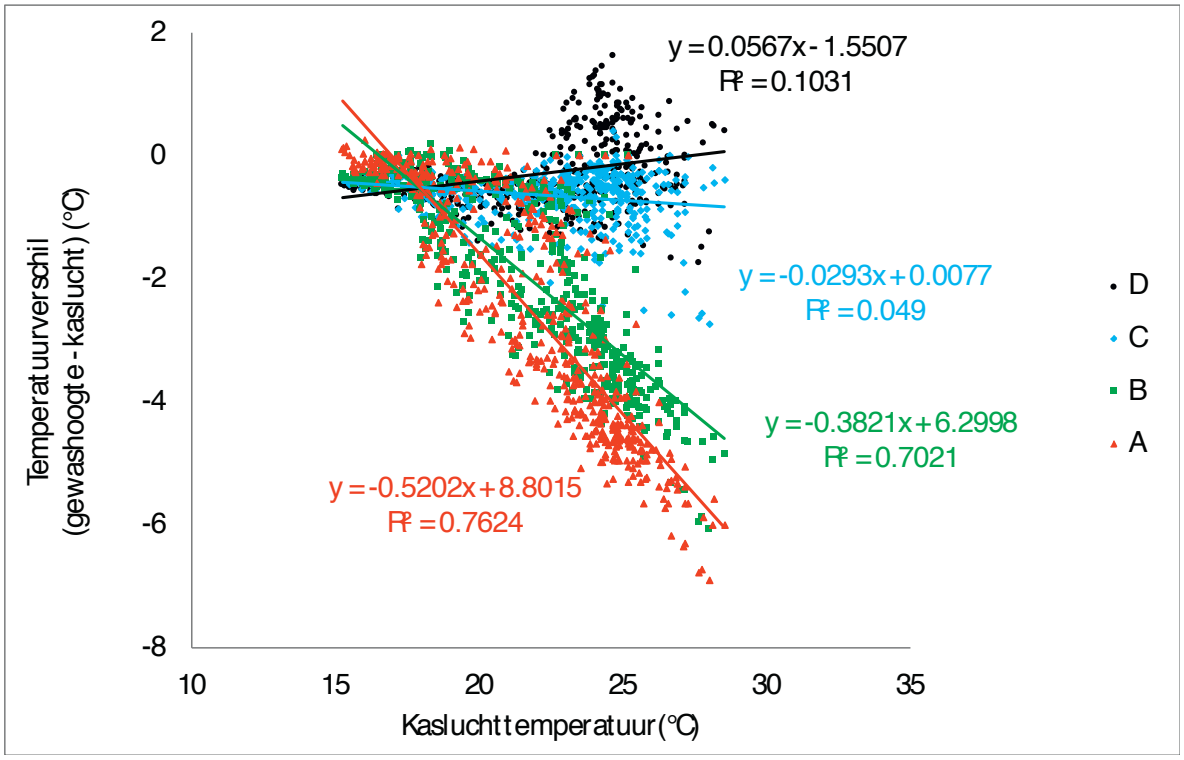
Mortensen, L.M., 1987.
CO_2 enrichment in greenhouses. Crop responses. Scientia Horticulturae 33: 1-25.

Qian, T., J.A. Dieleman, A. Elings, A. de Gelder, L.F.M. Marcelis & O. van Kooten, 2009.
Comparison of climate and production in closed, semi-closed and open greenhouses. Acta Hort. 821: 807-814.

Qian, T., A. Elings, J.A. Dieleman, G. Gort & L.F.M. Marcelis, 2011.
Estimation of photosynthesis parameters for a modified Farquhar-von Caemmerer-Berry model using the simultaneous estimation method and the nonlinear mixed effects model. Annals of Botany (submitted).

Zwart, H.F. de, 2008.
Overall energy analysis of (semi-)closed greenhouses. Acta Horticulturae 801: 811-818.

Bijlage I Relatie tussen de kasluchttemperatuur en de temperatuur in het gewas in het experiment 'Verticale temperatuurgradiënt' – een voorbeeld



Figuur 28. Temperatuurverschil op 4 gewashoogtes tussen de temperatuur op een gewashoogte en de kaslucht temperatuur bij de kop van het gewas. Data van de kas met koeling van onderen voor de maand juni. Elk symbool is een gemiddelde meting per uur tijdens de lichtperiode in de maand juni. Per gewashoogte is een lineaire verband gefit. A = 25-30 cm boven de goot; B = 110-115 cm boven de goot; C = 245-250 cm boven de goot; D = 355-360 cm boven de goot (kop van het gewas).

Bijlage II Relaties tussen de kasluchttemperatuur en de temperatuur in het gewas (experiment 'Verticale temperatuurgradiënt)

Tabel 11. Gefitte relatie tussen de kasluchttemperatuur (x) en het verschil tussen de kasluchttemperatuur en de luchttmeperatuur in het gewas (y), voor een aantal gewashoogten, gedurende de lichtperiode voor de open kas (behandeling 1).

Gewashoogte	Maand	Lineaire fit	R2
A (25-30 cm boven goot)	23 – 31 maart	y = -0.2926x + 7.1132	R^2 = 0.6644
A	april	y = -0.2119x + 4.3868	R^2 = 0.6106
A	mei	y = -0.1251x + 2.278	R^2 = 0.4632
A	juni	y = -0.0933x + 1.6317	R^2 = 0.3483
A	juli	y = -0.0824x + 1.595	R^2 = 0.3134
A	augustus	y = -0.0994x + 1.9165	R^2 = 0.3774
A	september	y = -0.1345x + 2.39	R^2 = 0.4314
A	1 – 18 oktober	y = -0.1057x + 1.6479	R^2 = 0.2785
B (110-115 cm boven goot)	23 – 31 maart	y = -0.1405x + 3.2875	R^2 = 0.3085
B	april	y = -0.1552x + 2.8692	R^2 = 0.5232
B	mei	y = -0.0784x + 1.0754	R^2 = 0.2839
B	juni	y = -0.0561x + 0.5928	R^2 = 0.1833
B	juli	y = -0.0631x + 0.9264	R^2 = 0.2241
B	augustus	y = -0.0581x + 0.8676	R^2 = 0.2098
B	september	y = -0.0936x + 1.3946	R^2 = 0.3009
B	1 – 18 oktober	y = -0.0427x + 0.2447	R^2 = 0.0738
C (245-250 boven goot)	23 – 31 maart	y = -0.0628x + 1.7852	R^2 = 0.0809
C	april	y = -0.0306x + 0.2398	R^2 = 0.0655
C	mei	y = -0.0057x - 0.2628	R^2 = 0.0044
C	juni	y = 0.0097x - 0.4094	R^2 = 0.0239
C	juli	y = 0.008x - 0.3717	R^2 = 0.0149
C	augustus	y = 0.0117x - 0.4741	R^2 = 0.0287
C	september	y = 0.0097x - 0.4782	R^2 = 0.0243
C	1 – 18 oktober	y = 0.0035x - 0.3436	R^2 = 0.0024
D (355-360 boven goot)	23 – 31 maart	y = -0.0668x + 1.9588	R^2 = 0.0735
D	april	y = 0.0136x - 0.3961	R^2 = 0.0231
D	mei	y = 0.0075x - 0.3609	R^2 = 0.01
D	juni	y = 0.0272x - 0.7324	R^2 = 0.1477
D	juli	y = 0.0251x - 0.656	R^2 = 0.1273
D	augustus	y = 0.0342x - 0.8498	R^2 = 0.1516
D	september	y = 0.0461x - 1.1096	R^2 = 0.2176
D	1 – 18 oktober	y = 0.0317x - 0.8517	R^2 = 0.0957

Tabel 12. Gefitte relatie tussen de kasluchttemperatuur (x) en het verschil tussen de kasluchttemperatuur en de luchttmeperatuur in het gewas (y), voor een aantal gewashoogten, gedurende de lichtperiode voor de kas met koeling van onderen (behandeling 2).

Gewashoogte	Maand	Lineaire fit	R2
A (25-30 cm boven goot)	23 – 31 maart	y = -0.6151x + 13.106	0.8055
A	april	y = -0.6482x + 12.8	0.766
A	mei	y = -0.5393x + 9.5254	0.8233
A	juni	y = -0.5202x + 8.8015	0.7624
A	juli	y = -0.5423x + 9.5108	0.7577
A	augustus	y = -0.5642x + 9.8398	0.7933
A	september	y = -0.504x + 8.8072	0.6817
A	1 – 18 oktober	y = -0.3908x + 6.6653	0.5073
B (110-115 cm boven goot)	23 – 31 maart	y = -0.3727x + 7.6014	0.6762
B	april	y = -0.4803x + 9.1918	0.7228
B	mei	y = -0.42x + 7.2293	0.7995
B	juni	y = -0.3821x + 6.2998	0.7021
B	juli	y = -0.4184x + 7.3378	0.7228
B	augustus	y = -0.4734x + 8.3272	0.7384
B	september	y = -0.3911x + 6.789	0.6399
B	1 – 18 oktober	y = -0.2724x + 4.4401	0.4593
C (245-250 boven goot)	23 – 31 maart	y = -0.0572x + 1.3281	0.0424
C	april	y = -0.1475x + 2.3239	0.383
C	mei	y = -0.0896x + 1.053	0.3564
C	juni	y = -0.0293x + 0.0077	0.049
C	juli	y = -0.0134x - 0.1993	0.017
C	augustus	y = -0.0124x - 0.2438	0.012
C	september	y = 0.0001x - 0.4887	3.00E-06
C	1 – 18 oktober	y = 0.0354x - 1.3377	0.1491
D (355-360 boven goot)	23 – 31 maart	y = -0.0667x + 1.4784	0.0548
D	april	y = -0.0137x - 0.2054	0.0161
D	mei	y = 0.008x - 0.7014	0.0067
D	juni	y = 0.0567x - 1.5507	0.1031
D	juli	y = 0.1024x - 2.3291	0.3118
D	augustus	y = 0.1599x - 3.4328	0.3851
D	september	y = 0.1616x - 3.5102	0.3476
D	1 – 18 oktober	y = 0.0958x - 2.5359	0.3167

Tabel 13. Gefitte relatie tussen de kasluchttemperatuur (x) en het verschil tussen de kasluchttemperatuur en de luchttmeperatuur in het gewas (y), voor een aantal gewashoogten, gedurende de lichtperiode voor de kas met koeling van boven (behandeling 3).

Gewashoogte	Maand	Lineaire fit	R2
A (25-30 cm boven goot)	23 – 31 maart	y = -0.29x + 6.3914	R^2 = 0.6672
A	april	y = -0.2179x + 4.041	R^2 = 0.7282
A	mei	y = -0.1581x + 2.5764	R^2 = 0.6603
A	juni	y = -0.1488x + 2.2335	R^2 = 0.5996
A	juli	y = -0.1614x + 2.6702	R^2 = 0.6502
A	augustus	y = -0.1904x + 3.1695	R^2 = 0.6786
A	september	y = -0.184x + 2.9382	R^2 = 0.6229
A	1 – 18 oktober	y = -0.1537x + 2.2208	R^2 = 0.5381
B (110-115 cm boven goot)	23 – 31 maart	y = 0.031x - 1.1239	R^2 = 0.0144
B	april	y = -0.1461x + 2.2545	R^2 = 0.6313
B	mei	y = -0.0871x + 0.965	R^2 = 0.4551
B	juni	y = -0.0825x + 0.7885	R^2 = 0.3292
B	juli	y = -0.0926x + 1.1468	R^2 = 0.431
B	augustus	y = -0.1258x + 1.8261	R^2 = 0.5391
B	september	y = -0.1182x + 1.6023	R^2 = 0.5232
B	1 – 18 oktober	y = -0.0827x + 0.7739	R^2 = 0.4741
C (245-250 boven goot)	23 – 31 maart	y = -0.005x + 0.1984	R^2 = 0.0004
C	april	y = -0.026x - 0.1215	R^2 = 0.0777
C	mei	y = 0.0233x - 1.0473	R^2 = 0.1
C	juni	y = -0.0031x - 0.5486	R^2 = 0.0015
C	juli	y = -0.0091x - 0.3977	R^2 = 0.0161
C	augustus	y = -0.0109x - 0.3538	R^2 = 0.0203
C	september	y = 0.0041x - 0.6439	R^2 = 0.0056
C	1 – 18 oktober	y = -0.0104x - 0.4615	R^2 = 0.0529
D (355-360 boven goot)	23 – 31 maart	y = -0.2014x + 4.3467	R^2 = 0.4958
D	april	y = -0.1716x + 2.9404	R^2 = 0.6485
D	mei	y = -0.1182x + 1.6115	R^2 = 0.5746
D	juni	y = -0.1015x + 1.0734	R^2 = 0.414
D	juli	y = -0.1039x + 1.1368	R^2 = 0.4393
D	augustus	y = -0.1268x + 1.6072	R^2 = 0.5727
D	september	y = -0.0965x + 1.0855	R^2 = 0.5024
D	1 – 18 oktober	y = -0.084x + 0.7814	R^2 = 0.4396

Tabel 14. Gefitte relatie tussen de kasluchttemperatuur (x) en het verschil tussen de kasluchttemperatuur en de luchttmeperatuur in het gewas (y), voor een aantal gewashoogten, gedurende de lichtperiode voor de kas met koeling van onderen met temperatuur sterker gekoppeld aan straling (behandeling 4).

Gewashoogte	Maand	Lineaire fit	R2
A (25-30 cm boven goot)	23 – 31 maart	y = 0.0445x - 0.6854	R^2 = 0.0376
A	april	y = -0.5557x + 10.97	R^2 = 0.7579
A	mei	y = -0.4596x + 8.2121	R^2 = 0.795
A	juni	y = -0.4772x + 8.2993	R^2 = 0.7018
A	juli	y = -0.4544x + 7.6049	R^2 = 0.6416
A	augustus	y = -0.4766x + 7.9747	R^2 = 0.6849
A	september	y = -0.463x + 8.2398	R^2 = 0.6309
A	1 – 18 oktober	y = -0.3007x + 5.1161	R^2 = 0.4347
B (110-115 cm boven goot)	23 – 31 maart	y = -0.0052x - 0.0384	R^2 = 0.0096
B	april	y = -0.4514x + 8.4234	R^2 = 0.7282
B	mei	y = -0.3408x + 5.6856	R^2 = 0.7539
B	juni	y = -0.3262x + 5.2502	R^2 = 0.6354
B	juli	y = -0.3321x + 5.279	R^2 = 0.5995
B	augustus	y = -0.3803x + 6.1084	R^2 = 0.6457
B	september	y = -0.3488x + 5.9102	R^2 = 0.6048
B	1 – 18 oktober	y = -0.1764x + 2.6074	R^2 = 0.3534
C (245-250 boven goot)	23 – 31 maart	y = -0.0003x - 0.0391	R^2 = 2E-05
C	april	y = -0.1641x + 2.5597	R^2 = 0.5189
C	mei	y = -0.045x + 0.1345	R^2 = 0.109
C	juni	y = 0.0056x - 0.724	R^2 = 0.0029
C	juli	y = -0.0251x - 0.1396	R^2 = 0.0673
C	augustus	y = -0.0531x + 0.3309	R^2 = 0.1649
C	september	y = -0.0288x - 0.0886	R^2 = 0.1128
C	1 – 18 oktober	y = 0.0142x - 0.9302	R^2 = 0.0766
D (355-360 boven goot)	23 – 31 maart	y = 0.0445x - 0.6854	R^2 = 0.0376
D	april	y = -0.0054x - 0.5395	R^2 = 0.0023
D	mei	y = 0.0553x - 1.7261	R^2 = 0.1505
D	juni	y = 0.1043x - 2.5827	R^2 = 0.3002
D	juli	y = 0.0875x - 2.134	R^2 = 0.3397
D	augustus	y = 0.0991x - 2.3507	R^2 = 0.3297
D	september	y = 0.088x - 2.2662	R^2 = 0.3195
D	1 – 18 oktober	y = 0.0537x - 1.6949	R^2 = 0.2714

Tabel 15. Gefitte relatie tussen de kasluchttemperatuur (x) en het verschil tussen de kasluchttemperatuur en de luchttmeperatuur in het gewas (y), voor een aantal gewashoogten, gedurende de lichtperiode voor de kas met koeling van boven met temperatuur sterker gekoppeld aan straling (behandeling 5).

Gewashoogte	Maand	Lineaire fit	R2
D (25-30 cm boven goot)	23 – 31 maart	y = -0.3182x + 7.3812	R^2 = 0.6933
D	april	y = -0.2248x + 4.5289	R^2 = 0.6997
D	mei	y = -0.1828x + 3.3209	R^2 = 0.7385
D	juni	y = -0.1564x + 2.6831	R^2 = 0.6203
D	juli	y = -0.1609x + 2.8262	R^2 = 0.5961
D	augustus	y = -0.193x + 3.4165	R^2 = 0.655
D	september	y = -0.2198x + 3.9357	R^2 = 0.6365
D	1 – 18 oktober	y = -0.1269x + 2.0224	R^2 = 0.4918
C (110-115 cm boven goot)	23 – 31 maart	y = -0.1317x + 2.7484	R^2 = 0.2755
C	april	y = -0.1276x + 2.161	R^2 = 0.6206
C	mei	y = -0.0905x + 1.2213	R^2 = 0.5083
C	juni	y = -0.0623x + 0.59	R^2 = 0.3141
C	juli	y = -0.0816x + 1.0205	R^2 = 0.3908
C	augustus	y = -0.102x + 1.4291	R^2 = 0.4679
C	september	y = -0.1103x + 1.5937	R^2 = 0.4895
C	1 – 18 oktober	y = -0.0627x + 0.5905	R^2 = 0.2898
B (245-250 boven goot)	23 – 31 maart	y = -0.0662x + 1.6298	R^2 = 0.0862
B	april	y = -0.018x - 0.1514	R^2 = 0.059
B	mei	y = -0.0624x + 0.8367	R^2 = 0.3857
B	juni	y = -0.0166x - 0.1499	R^2 = 0.0825
B	juli	y = -0.0183x - 0.1172	R^2 = 0.1145
B	augustus	y = -0.0109x - 0.2507	R^2 = 0.0473
B	september	y = -0.0019x - 0.4182	R^2 = 0.0021
B	1 – 18 oktober	y = -0.0051x - 0.4176	R^2 = 0.0136
A (355-360 boven goot)	23 – 31 maart	y = -0.0754x + 1.8649	R^2 = 0.2076
A	april	y = -0.0861x + 1.493	R^2 = 0.5129
A	mei	y = -0.0624x + 0.8367	R^2 = 0.3857
A	juni	y = -0.0511x + 0.5401	R^2 = 0.2516
A	juli	y = -0.0496x + 0.4812	R^2 = 0.227
A	augustus	y = -0.0368x + 0.3531	R^2 = 0.1399
A	september	y = -0.0137x - 0.0971	R^2 = 0.0358
A	1 – 18 oktober	y = -0.0194x - 0.0653	R^2 = 0.0727



Productschap Tuinbouw
Kas als Energiebron
Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie

Projectnummer: 3242034200 | PT nummer: 13105

