



Verticale temperatuurgradiënten in geconditioneerde kassen

Effecten op groei, ontwikkeling en onderliggende processen bij tomaat

Anja Dieleman, Arie de Gelder, Jan Janse, Peter Lagas, Barbara Eveleens, Tian Qian, Anne Elings, Johan Steenhuizen, Cecilia Stanghellini, Elly Nederhoff, Andreas Savvides, Brian Farneti¹, Ries de Visser², Ernst Woltering¹, Leo Marcelis

¹ Wageningen Universiteit ² IsoLife



Referaat

Bij telers met (semi)gesloten kassen bestaan nog veel vragen over de reacties van het gewas op het nieuwe klimaat. Eén van deze vragen was hoe een verticale temperatuurgradiënt de groei, ontwikkeling en productie beïnvloedt. Om die vraag te beantwoorden, werden tomaten geteeld in een open kas, en vier geconditioneerde kassen met een koelcapaciteit van 350 W/m² waarin gekoeld werd via slurven onder het gewas of waarin koude lucht ingeblazen werd boven het gewas. In twee van deze afdelingen werd een extra temperatuurverhoging op licht toegepast. In de afdelingen met koeling onder het gewas liep op zonnige dagen de verticale temperatuurgradiënt op tot ruim 5 °C, terwijl in de afdelingen met bovenkoeling deze beperkt bleef tot ca. 1 °C. De verticale gradiënt had geen effect op de assimilatenaanmaak (fotosynthese) of assimilatenverdeling. Het gemiddeld vruchtgewicht was in de kassen met onderkoeling wel iets hoger dan in de kassen met bovenkoeling, hetgeen leidde tot een iets hogere productie. De verdamping in de afdelingen met bovenkoeling was ca. 71% van de verdamping in de open kas, in de afdelingen met onderkoeling 63%. Wanneer van onderaf gekoeld wordt, is er relatief minder verdamping onder in het gewas, door de lagere gewastemperatuur. De stevigheid en houdbaarheid van tomaten uit de kas met onderkoeling was het hoogst, gevolgd door de kas met bovenkoeling en de open kas. De smaak van de tomaten uit de verschillende afdelingen vertoonde geen verschillen. Concluderend kan gesteld worden dat een verticale temperatuurgradiënt de groei en ontwikkeling van een tomatengewas beïnvloedt, maar dat telers met beide systemen goed uit de voeten kunnen als ze hun klimaatinstellingen er op aanpassen.

Abstract

Growers with (semi)closed greenhouses still have questions on the crop responses to the new climate conditions. One of these questions was how a vertical temperature gradient affects growth, development and the production level. To answer this question, tomatoes were grown in an open greenhouse and four conditioned greenhouses with a cooling capacity of 350 W/m² in which cold air was blown in via ducts below the growing gutters or in the top of the greenhouse. In the compartments with cooling below the gutters, the vertical temperature gradient could rise up to 5 °C on sunny days, whereas this gradient was no more than 1 °C in the compartment with top cooling. The vertical temperature gradient did not affect assimilate production (photosynthesis) or partitioning. The average fruit weight in the treatments with cooling in the bottom was higher than in the treatments with cooling in the top, leading to a slightly higher production. Transpiration rate in the compartment with top cooling was approximately 71% compared to the transpiration rate in the open greenhouse and in the compartment with cooling below the gutter 63%. Cooling in the lower part of the greenhouse resulted in less transpiration in the lower part of the canopy due to a lower crop temperature. Firmness and keeping quality of tomatoes grown in the greenhouse with bottom cooling was highest, followed by the greenhouse with top cooling and the open greenhouse. Taste did not differ between treatments.

© 2012 Wageningen, 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

| | | |
|---|---|----|
| | Voorwoord | 7 |
| | Samenvatting | 9 |
| 1 | Inleiding | 13 |
| | 1.1 Geconditioneerd telen | 13 |
| | 1.2 Opzet en hypothesen | 14 |
| | 1.3 Leeswijzer | 15 |
| 2 | Kasinrichting, teeltverloop, klimaatregeling en metingen | 17 |
| | 2.1 Kas en kasinrichting | 17 |
| | 2.2 Behandelingen | 17 |
| | 2.3 Klimaatregeling | 18 |
| | 2.3.1 Koeling | 18 |
| | 2.3.2 Ontvochtiging | 21 |
| | 2.3.3 Klimaatregeling | 21 |
| | 2.4 Gewas en teeltverloop | 22 |
| | 2.4.1 Gewas | 22 |
| | 2.4.2 Plantbalans | 23 |
| | 2.4.3 Zetting, vruchtgroei en productie | 23 |
| | 2.4.4 Kniktrossen | 24 |
| | 2.4.5 Watergift | 25 |
| | 2.4.6 Gewasbescherming | 25 |
| 3 | Resultaten kasklimaat | 27 |
| | 3.1 Buitenklimaat | 27 |
| | 3.2 Gerealiseerde kasluchttemperatuur | 28 |
| | 3.2.1 Temperatuurverloop over een etmaal | 28 |
| | 3.2.2 Etmaaltemperatuur | 29 |
| | 3.2.3 Verticale gradiënt in kasluchttemperatuur | 29 |
| | 3.3 Gerealiseerde luchtvochtigheid | 32 |
| | 3.3.1 Verloop van luchtvochtigheid over een etmaal | 32 |
| | 3.3.2 Verloop van luchtvochtigheid over het seizoen | 33 |
| | 3.3.3 Verticale gradiënt in relatieve luchtvochtigheid en dampdrukdeficiet | 33 |
| | 3.4 Gewastemperatuur | 36 |
| | 3.4.1 Verloop gewastemperatuur over een etmaal | 36 |
| | 3.5 Gerealiseerde CO ₂ concentraties en CO ₂ verbruik | 37 |
| | 3.5.1 CO ₂ concentraties en raamopening | 37 |
| | 3.5.2 CO ₂ verbruik | 39 |
| | 3.6 Energie | 39 |
| | 3.7 Samenvatting en conclusies kasklimaat | 42 |

| | | |
|---------|--|----|
| 4 | Gewasgroei en -ontwikkeling | 43 |
| 4.1 | Metingen | 43 |
| 4.2 | Resultaten - Vegetatieve groei en ontwikkeling | 43 |
| 4.3 | Resultaten - Generatieve groei en ontwikkeling | 46 |
| 4.4 | Verticale temperatuurgradiënt en vruchtdiameter | 50 |
| 4.5 | Destructieve metingen | 54 |
| 4.6 | Samenvatting en conclusies gewasgroei | 57 |
| 5 | Effect van verticale temperatuurgradiënt op de assimilatenverdeling | 59 |
| 5.1 | Inleiding | 59 |
| 5.2 | Metingen | 59 |
| 5.3 | Resultaten | 61 |
| 5.4 | Samenvatting en conclusies assimilatenverdeling | 65 |
| 6 | Wateropname en verdamping | 67 |
| 6.1 | Metingen | 67 |
| 6.2 | Resultaten - Gewasverdamping | 67 |
| 6.2.1 | Verdamping op enkele voorbeelddagen | 71 |
| 6.2.1.1 | 18 juli | 71 |
| 6.2.1.2 | 4 juli | 72 |
| 6.3 | Conclusies | 74 |
| 7 | Berekeningen van verdamping en temperatuur in verschillende gewaslagen | 75 |
| 7.1 | Inleiding | 75 |
| 7.2 | Metingen en berekeningen | 75 |
| 7.2.1 | Het model | 75 |
| 7.2.1.1 | Netto straling van elke bladlaag | 76 |
| 7.2.1.2 | Uitwisseling van voelbare warmte van elke laag | 78 |
| 7.2.2 | De metingen | 79 |
| 7.2.2.1 | Temperatuur en luchtvochtigheid | 79 |
| 7.2.2.2 | Gewas temperatuur | 80 |
| 7.2.2.3 | Wateropname | 80 |
| 7.3 | Resultaten | 82 |
| 7.4 | Discussie | 86 |
| 7.5 | Samenvatting en conclusies | 87 |
| 8 | Fotosynthese | 89 |
| 8.1 | Metingen | 89 |
| 8.2 | Responscurves | 89 |
| 8.3 | Adaptatie | 96 |
| 8.4 | Conclusies fotosynthesemetingen | 98 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| 9 | Nutriënten | 99 |
| 9.1 | Metingen | 99 |
| 9.2 | In het blad | 100 |
| 9.2.1 | Calcium | 100 |
| 9.2.2 | Kalium | 102 |
| 9.2.3 | Borium | 102 |
| 9.3 | In de vrucht | 104 |
| 9.3.1 | Calcium | 104 |
| 9.3.2 | Borium | 105 |
| 9.3.3 | Kalium | 105 |
| 9.4 | Discussie en conclusie | 106 |
| 10 | Kwaliteit en houdbaarheid | 107 |
| 10.1 | Metingen | 107 |
| 10.2 | Kleur | 108 |
| 10.3 | Gewicht, stevigheid en houdbaarheid | 108 |
| 10.4 | Vruchtsamenstelling en smaak | 111 |
| 10.5 | Conclusie | 114 |
| 11 | Leerpunten en discussie | 115 |
| 11.1 | Leerpunten | 115 |
| 11.2 | Toetsen van de hypothesen | 116 |
| 12 | Geraadpleegde literatuur | 121 |
| Bijlage I | Kasluchttemperatuur en instraling | 125 |
| Bijlage II | CO ₂ en raamopening op een zonnige dag | 127 |
| Bijlage III | CO ₂ en raamopening op een bewolkte dag | 129 |
| Bijlage IV | Klimaat in kassen op 4 juli 2009 | 131 |
| Bijlage V | Klimaat en verdamping op 12 juli 2009 | 133 |
| Bijlage VI | Klimaat en verdamping op 14 juli 2009 | 135 |
| Bijlage VII | Klimaat en verdamping op 15 juli 2009 | 137 |
| Bijlage VIII | Nutriëntgehaltenes | 139 |

Voorwoord

In de jaren 2003 tot 2007 is het aantal bedrijven waarop (semi)gesloten geteeld wordt geleidelijk toegenomen. Echter, op alle bedrijven bleken vragen te bestaan over de reacties van het gewas op het nieuwe klimaat. Daarom is in 2008 door Wageningen UR Glastuinbouw een onderzoek gestart naar de groei van tomaat in geconditioneerde kassen, waarin veel aandacht wordt besteed aan de fysiologische processen in de plant. In 2008 is onderzocht wat het effect is van het (gedeeltelijk) sluiten van de kas op kasklimaat en gewasgroei en – ontwikkeling in vijf kasafdelingen met koelcapaciteiten van 0 (open kas), 150, 350 en 700 W/m². Verder is in 2008 het effect van luchtvochtigheid onderzocht.

In het onderzoek in 2009, dat in dit rapport beschreven wordt, was de centrale vraag hoe een verticale temperatuurgradiënt de processen in de plant beïnvloedt. Daarvoor zijn kasafdelingen ingericht met slurven onder de goot en met inblaas van koude lucht boven het gewas. Er zijn uitgebreide metingen gedaan aan kasklimaat, gewasontwikkeling, fotosynthese, assimilatenverdeling, nutriëntenopname, verdamping en vruchtkwaliteit. Er is door veel mensen aan dit project gewerkt, zoals ook te zien is aan de uitgebreide lijst van auteurs van dit rapport. Daarnaast willen wij Richard Saarloos en Piet Steenberg bedanken voor de metingen aan smaak en houdbaarheid van de tomaten, Bram van Haaster en Kees Scheffers voor de uitstekende gewasverzorging en Piet Koorneef voor het installeren en onderhouden van de sensoren.

De proef werd tweewekelijks bezocht door een BCO, waarmee de stand van het gewas, het klimaat en de resultaten werden besproken. Wij willen graag Marc Groenewegen, Geert Koot, Martien Duindam, Ted Duijvesteijn en John Verbruggen bedanken voor hun adviezen. Het project werd gefinancierd door Productschap Tuinbouw en het Ministerie van EL&I in het kader van het programma Kas als Energiebron. Graag bedanken wij de onderzoekcoördinatoren van het programma Kas als Energiebron, Leo Oprel en Aat Dijkshoorn voor hun positieve inbreng en begeleiding van dit project.

Januari 2012,

Anja Dieleman

Samenvatting

In de jaren 2003 tot 2007 is het aantal bedrijven waarop (semi)gesloten geteeld wordt geleidelijk toegenomen. Op alle bedrijven bleken echter vragen te bestaan over de reacties van het gewas op het nieuwe klimaat. Daarom is in 2008 door Wageningen UR Glastuinbouw een onderzoek gestart naar de groei van tomaat in geconditioneerde kassen, waarin veel aandacht wordt besteed aan de fysiologische processen in de plant. Het onderzoek wordt gefinancierd vanuit het programma Kas als Energiebron door Productschap Tuinbouw en het ministerie van EL&I en wordt begeleid door een aantal tomatentelers en een adviseur. Het onderzoek dat in dit rapport wordt beschreven had als centrale vraag hoe een verticale temperatuurgradiënt de processen in de plant beïnvloedt.

Verticale temperatuurgradiënten

Op 23 december 2008 zijn bij Wageningen UR Glastuinbouw in Bleiswijk tomaten geplant (Cappricia op Emperador) in 5 afdelingen van 144 m². In de eerste maanden werd in alle afdelingen op dezelfde manier geteeld om een goed gewas neer te zetten. Op 13 maart 2009 (week 10) zijn de behandelingen gestart. In één afdeling werd niet gekoeld (open kas), in de andere vier afdelingen was de koelcapaciteit 350 W/m². De behandelingen bestonden uit wel of geen verticale temperatuurgradiënt. Dit werd gerealiseerd door in twee van de geconditioneerde afdelingen te koelen via slurven onder de goot en in de andere twee afdelingen door koude lucht in te blazen boven het gewas. Eén van de afdelingen met onderkoeling en één van de afdelingen met bovenkoeling had een extra temperatuurverhoging op instraling, zodat de temperatuur daar in de loop van de dag gemiddeld 1 °C hoger op mocht lopen.

Klimaat en energie

In alle afdelingen werd CO₂ gedoseerd met een capaciteit van maximaal 230 kg/ha/uur. In de semi-gesloten afdelingen werd 35 - 40 kg CO₂ per m² per jaar gedoseerd, waarmee in de periode mei – augustus overdag concentraties van 780 - 830 ppm werden gerealiseerd. In de open kas werd 53 kg/m² gedoseerd, waarmee in de periode mei – augustus overdag een concentratie van 635 ppm werd gerealiseerd. Op zonnige dagen met hoge buitentemperaturen liep de temperatuur in de open kas hoog op, maar over het algemeen waren de verschillen in etmaaltemperaturen tussen open en geconditioneerde kassen beperkt. In de behandelingen met een extra temperatuurverhoging op instraling was de etmaaltemperatuur gemiddeld 0.5 °C hoger dan in de andere geconditioneerde afdelingen. In de afdelingen met onderkoeling was er een sterke verticale temperatuurgradiënt, die opliep tot ca. 5 °C (tussen 15:00 en 16:00 uur) gemiddeld over de periode 1 mei – 31 augustus. Het vochtdeficiet was het hoogst in de open kas, omdat via de luchtramen veel vocht werd afgevoerd. In de afdelingen met bovenkoeling was het vochtdeficiet hoger dan in de afdelingen met onderkoeling. In de geconditioneerde afdelingen werd netto circa 10 m³ aardgasequivalenten/m² warmte geoogst.

Gewasgroei en productie

Een verticale temperatuurgradiënt leidde tot iets kortere bladeren. De producties in de geconditioneerde afdelingen waren 10-13 procent hoger dan in de open kas, waarbij de afdelingen met onderkoeling de hoogste productie hadden. Dit productieverval werd volledig verklaard door een hoger gemiddeld vruchtgewicht in de afdeling met onderkoeling.

| Behandeling | Productie (kg/m ²) | Productiestijging t.o.v. open kas (%) |
|--|--------------------------------|---------------------------------------|
| Open kas | 57.5 | - |
| Koeling van onderaf | 65.1 | 13 |
| Koeling van bovenaf | 63.5 | 10 |
| Koeling van onderaf met lichtverhoging op de temperatuur | 63.9 | 11 |
| Koeling van bovenaf met lichtverhoging op de temperatuur | 63.2 | 10 |

Een sterkere lichtverhoging op de temperatuur leidde op zonnige dagen tot een hogere etmaaltemperatuur en daarmee tot een iets hogere trosafplitsingssnelheid, maar ook tot een iets lager gemiddeld vruchtgewicht. Netto had dit geen effect op de productie.

Assimilaten naar de vruchten

Elke twee maanden werden planten uit de proef gehaald om de gewichten van bladeren, stengels en vruchten te wegen. Om de verdeling van de assimilaten te bepalen, werden daarbij ook de gewichten geteld van de reeds geoogste vruchten en geplukte bladeren. Uit de resultaten blijkt dat het aandeel van de geproduceerde droge stof dat in de vruchten terug te vinden is niet verschilt tussen de behandelingen met of zonder een verticale temperatuurgradiënt. Verder werd aan een van de bovenste bladeren van de planten uit de kas met onderkoeling en de kas met bovenkoeling 13CO_2 gegeven, dat door de planten werd opgenomen en omgezet in met $13\text{ }^\circ\text{C}$ gelabelde suikers. De verdeling van deze $13\text{ }^\circ\text{C}$ in de plant kan na 24 uur gemeten worden. Uit deze metingen bleek dat de $13\text{ }^\circ\text{C}$ met name naar de snelgroeïende plantendelen gaat die in de buurt van het gelabelde blad zitten, zoals de trossen boven en direct onder het gelabelde blad en de stengel en jonge bladeren boven het gelabelde blad. Er gaat maar weinig $13\text{ }^\circ\text{C}$ naar de trossen die onder in het gewas hangen, omdat die nauwelijks meer groeien (in gewicht toenemen) en dus nauwelijks meer assimilaten importeren. Dat is de reden dat de assimilatenverdeling niet verschilt tussen de behandelingen.

Fotosynthese

Met behulp van draagbare fotosyntheseapparatuur is in de proef de bladfotosynthese gemeten. Bij hoge lichtintensiteiten is het positieve effect van hogere CO_2 concentraties op de fotosynthese groter dan bij weinig licht. Dit effect is nog sterker bij hogere temperaturen (tot $34\text{ }^\circ\text{C}$). Dat houdt in dat als er veel licht is en de CO_2 concentratie hoog is, een omstandigheid die typisch is voor geconditioneerde kassen, een hogere temperatuur positief is voor de aanmaak van assimilaten. Dit geldt met name voor de bovenste bladeren die het meeste licht onderscheppen. In een geconditioneerde kas is de CO_2 concentratie langdurig hoog. Het blijkt echter dat de bladeren in staat blijven gedurende de teelt de CO_2 efficiënt te gebruiken voor de fotosynthese.

Wateropname en verdamping

In dit experiment zijn met weeggoten en gewasbalken wateropname en verdamping in alle behandelingen bepaald. De verdamping was het hoogste in de open kas, hetgeen sterk bepaald wordt door het hoge vochtdeficiet. De verdamping in de afdelingen met bovenkoeling was ca. 71% van de verdamping in de open kas, terwijl de verdamping in de afdelingen met onderkoeling ca. 63% van de verdamping in de open kas was.

De verdamping in de ochtend liep op met de instraling, maar in de middag was bij gelijke instraling meer verdamping. De reden hiervoor is dat in de middag het vochtdeficiet vaak hoger was bij gelijke of zelfs lager instraling.

Verdamping in verschillende gewaslagen

Eén van de vragen bij aanvang van dit onderzoek was hoe een verticale temperatuurgradiënt de verdeling van de verdamping in het gewas zou beïnvloeden. Het is niet mogelijk verdamping van afzonderlijke bladeren te meten, daarom zijn op verschillende hoogtes in het gewas bladtemperaturen gemeten, en is met een model de verdamping in deze bladlagen bepaald. Tenslotte werden deze getallen per bladlaag opgeteld en vergeleken met de gewasverdamping. Hieruit bleek dat de berekende verdamping goed overeenstemde met de verdamping gemeten met de weeggoten. Het verticale patroon van de verdamping verschilde tussen de open kas en de kassen met onderkoeling. In de kassen met onderkoeling, dus een verticale temperatuurgradiënt, was het aandeel van de onderste bladlagen in de verdamping lager, en van de bovenste bladlaag hoger. Een lagere temperatuur onder in het gewas zorgt daar voor minder verdamping, zowel absoluut als relatief. Het verticale patroon van de verdamping in de kassen met bovenkoeling kwam overeen met het patroon in de open kas.

Nutriënten

Gedurende de teelt zijn nutriëntengehaltes in bladeren en vruchten bepaald. Het calciumgehalte in de bladeren was in de zomer hoger dan in het voorjaar als gevolg van meer verdamping. Aan het uiteinde van de vruchten was het calciumgehalte lager dan in de rest van de vrucht. Er waren echter geen duidelijke verschillen in calciumgehaltes tussen de open kas en kassen met onder- en bovenkoeling. Hetzelfde gold voor kalium en borium. Dit wijst er op dat de water- en nutriëntengift in alle afdelingen voldoende is geweest, en dat de verschillen in verdamping niet tot aantoonbare verschillen in nutriëntengehaltes geleid hebben.

Kwaliteit en houdbaarheid

In dit onderzoek is de kwaliteit van de tomaten geoogst uit de open kas vergeleken met die van tomaten uit de geconditioneerde kassen met onder- en bovenkoeling. Het gemiddeld vruchtgewicht, de stevigheid en de houdbaarheid van tomaten uit geconditioneerde kassen was beter dan die uit de open kas. Verder is de kwaliteit, uitgedrukt in gemiddeld vruchtgewicht en stevigheid hoger voor de tomaten uit de kas met onderkoeling dan uit de kas met bovenkoeling. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de lagere temperaturen in het onderste deel van het gewas waar de afrijping plaatsvindt. De gehalten aan suikers (zoetheid) en anionen (zuurgethalte) waren ca. 5% lager in tomaten afkomstig uit de geconditioneerde afdelingen dan uit de open kas. Echter, uit analyses met het smaakmodel bleek dit geen aantoonbaar effect te hebben op de smaak van de tomaten.

Conclusies

De belangrijkste klimaatfactor in de realisatie van de productiestijging in geconditioneerde kassen is CO₂. Met semi-gesloten kassen met een koelcapaciteit van ca. 350 W/m² bleek een productiestijging te realiseren van 10-13% (vergelijkbaar met 2008). Wanneer de kassen worden gekoeld met slurven onder de goot, leidt dit op zonnige dagen tot een verticale temperatuurgradiënt die op kan lopen tot ca. 5 °C. Deze verticale temperatuurgradiënt leidt tot een vertraagde afrijping, een hoger gemiddeld vruchtgewicht en daarmee een iets hogere productie en minder verdamping in het onderste deel van het gewas dan wanneer gekoeld wordt via het inblazen van koele lucht boven het gewas. Concluderend kan gesteld worden dat een verticale temperatuurgradiënt de groei en ontwikkeling van een tomatengewas beïnvloedt, maar dat telers met beide systemen goed uit de voeten kunnen als ze hun klimaatinstellingen er op aanpassen.

1 Inleiding

1.1 Geconditioneerd telen

In de jaren negentig is een teeltconcept ontwikkeld voor de glastuinbouw waarin de kas volledig gesloten werd. Kenmerk van een gesloten kas is dat er een klimaat gerealiseerd kan worden dat onafhankelijk is van het buitenklimaat, met uitzondering van de factor licht. Met behulp van verwarming, koeling, ontvochtiging en CO₂ dosering kunnen temperatuur, luchtvochtigheid en CO₂ concentratie in de kas naar wens gerealiseerd worden. Door in de zomer een deel van de warmte van de zon te oogsten, dit op te slaan en in de winter te gebruiken, biedt dit concept grote mogelijkheden tot reductie van het gebruik van fossiele energie (De Zwart, 2008). In 2002 is dit concept voor het eerst beproefd, in een kasafdeling van het toenmalige PPO in Naaldwijk. De resultaten toonden aan dat telen van een goed gewas met een hoge productie in de gesloten kas mogelijk was tegen een lager energiegebruik dan in een open kas (Schoonderbeek *et al.* 2003; De Gelder *et al.* 2005; Opdam *et al.* 2005).

In de jaren die volgden is op een aantal praktijkbedrijven gestart met gesloten of semi-gesloten telen. Deze termen worden nu onder de verzamelnaam “geconditioneerd telen” geschaard. De ervaringen op de praktijkbedrijven waren wisselend. Het werd duidelijk dat er op het gebied van geconditioneerd telen nog veel te leren viel. De nieuwe technische ontwikkelingen leidden vaak tot onverwachte zaken in het klimaat, zoals grote verticale temperatuurverschillen, lage luchtvochtigheid door het binnenhalen van droge buitenlucht en een andere relatie tussen plant- en luchttemperatuur (Raaphorst, 2005; Raaphorst *et al.* 2006, 2007; Bakker *et al.* 2006; De Gelder *et al.* 2007; De Zwart *et al.* 2008). Daardoor werd het beeld van het gewas in de kas anders dan in een open kas, waardoor telers opnieuw moesten zoeken naar de juiste manier van telen. In veel gevallen werd in de eerste jaren van geconditioneerd telen daarmee niet de productiestijging gerealiseerd waar op gerekend was.

Om de potentie van zowel meerproductie als reductie in energiegebruik en CO₂ emissie te realiseren is het van groot belang de vragen die er in de praktijk leven over de reacties van het gewas op het nieuwe klimaat in geconditioneerde kassen te beantwoorden. Met dit doel is het project “Gewasmanagement bij geconditioneerd telen” opgezet. In het eerste jaar van het project, 2008, zijn twee experimenten uitgevoerd. In het eerste experiment zijn de groei, ontwikkeling en onderliggende processen van tomaten geteeld bij verschillende klimaten geanalyseerd (Dieleman *et al.* 2009). Deze klimaten werden gerealiseerd door een reeks koelcapaciteiten aan te leggen: open kas, kassen met koelcapaciteiten van 150 en 350 W/m² en een gesloten kas (koelcapaciteit van 700 W/m²). De belangrijkste bevindingen waren dat de hogere CO₂ concentraties in de meer gesloten afdelingen de belangrijkste oorzaak waren van de meerproductie, dat de verschillende klimaten geen effect hadden op de verhouding vegetatieve/generatieve groei (uitgedrukt in het deel van de geproduceerde assimilaten dat in vruchtgroei werd geïnvesteerd) en dat bij optimale omstandigheden (hoog licht, hoge CO₂ concentratie) het temperatuuroptimum voor de fotosynthese naar hogere temperaturen verschuift. In het tweede experiment werd een reeks luchtvochtigheden aangelegd (Eveleens *et al.* 2009). Dit beïnvloedde wel de morfologie, wateropname en verdamping van het gewas, maar had geen effect op de ontwikkelingsnelheid en productie.

In 2008 kwam in de praktijk de discussie op gang of er gekoeld moest worden via slurven onder het gewas of via het inblazen van koele lucht boven het gewas. Beide systemen hebben hun voor- en nadelen, op het gebied van verticale temperatuurgradiënt en lichtverlies. De belangrijkste vraag die openstond was wat de effecten van beide systemen op de gewasgroei, -ontwikkeling en productie zijn. Om deze vragen te beantwoorden is het experiment voor 2009 opgezet.

1.2 Opzet en hypothesen

Naar aanleiding van de resultaten van het onderzoek in 2008 en een aantal vragen vanuit de praktijk van geconditioneerd telen van tomaten is in 2009 zijn een aantal onderzoekshypothesen geformuleerd, die in het onderzoek in 2009 getoetst zullen worden. Deze hypothesen hebben betrekking op de volgende processen:

1. Fotosynthese
2. Assimilatenverdeling onder invloed van orgaantemperaturen (verticale temperatuurgradiënt)
3. Watergift, verdamping en nutriëntenopname
4. Kwaliteit

Ad. 1. Fotosynthese

De basis van groei en productie is de aanmaak van assimilaten via de fotosynthese. De onderzoeksvraag hier is onder welke omstandigheden een maximale toename van de fotosynthese en daarmee van de productie bereikt kan worden. Een maximale fotosynthese komt tot uiting in een CO₂ opname die volledig gerelateerd is aan de lichtintensiteit, CO₂ concentratie en temperatuur. Om de assimilaten die hierbij gevormd worden goed te verwerken moeten temperatuur, verdamping en nutriëntenopname afgestemd zijn op het aanbod van assimilaten. Hierbij gaan we er van uit dat er geen aanpassing is van de fotosynthese aan de hoge CO₂ concentraties in de kas, die gedurende het hele jaar hoog zijn (in tegenstelling tot de CO₂ concentratie in de open kas).

Hypothese: De fotosynthese in verschillende klimaten wordt alleen bepaald door lichtintensiteit, CO₂ concentratie en temperatuur. Er vindt geen aanpassing plaats aan de langdurig hoge CO₂ concentratie in de geconditioneerde kassen.

Ad. 2. Assimilatenverdeling onder invloed van orgaantemperaturen (verticale temperatuurgradiënt)

De assimilatenverdeling tussen vegetatieve delen (bladeren, stengels, wortels) en generatieve delen (vruchten) is van groot belang voor de productie. De verdeling van assimilaten wordt gestuurd door de 'sink'sterkte van de verschillende organen. In hoeverre temperatuur hierbij een rol speelt bij tomaat is (nog) niet bekend.

Hypothese: De assimilatenverdeling binnen een plant wordt beïnvloed door de verticale temperatuurgradiënt.

Ad. 3. Watergift, verdamping en nutriëntenopname

De verdampingssnelheid wordt voornamelijk bepaald door de energiebalans van een blad, daarin spelen instraling, kasluchttemperatuur, bladtemperatuur en de vochtigheid van de kaslucht een belangrijke rol. In geconditioneerde kassen speelt daarnaast luchtbeweging en de temperatuur en luchtvochtigheid van de ingeblazen kaslucht een rol. Hoe de wijze van inbrengen van koele en (relatief) droge lucht de verdampingssnelheid in verschillende bladlagen beïnvloed is tot op heden niet vastgesteld. Het is echter wel van belang voor de watergift en nutriëntenopname en -verdeling. Dit kan weer consequenties hebben voor afwijkingen als neusrot en kniktrossen.

Hypothese: In een geconditioneerde kas is het verticale patroon van de verdamping en de hoeveelheid verdamping anders dan in een open kas.

Ad. 4. Kwaliteit

In geconditioneerde kassen is over het algemeen de luchtvochtigheid hoger dan in een niet geconditioneerde kas, hetgeen negatieve gevolgen kan hebben voor de houdbaarheid van tomaten. Daarentegen is de CO₂ concentratie gemiddeld ook hoger, en daarmee in veel gevallen ook de etmaaltemperatuur. Onder invloed van een verticale temperatuurgradiënt is de afrijpingssnelheid iets lager en zijn tomaten op het moment van oogsten gemiddeld iets zwaarder. Hoe dit samenspel van klimaatfactoren de kwaliteit van tomaten uit geconditioneerde kassen beïnvloedt is niet bekend, en wordt in dit onderzoek nader bekeken.

Hypothese: De kwaliteit en houdbaarheid van tomaten uit geconditioneerde kassen met een verticale temperatuurgradiënt is anders dan in een open kas zonder temperatuurgradiënt.

Om bovenstaande hypothesen te toetsen, is in 2009 een experiment uitgevoerd waarin het effect van verschillende verticale temperatuurgradiënten op groei, ontwikkeling en onderliggende processen bij tomaat zijn bepaald. De verticale temperatuurgradiënten zijn aangelegd door het toepassen van de volgende behandelingen:

1. Koelcapaciteit van 350 W/m^2 met koeling onder in de kas
2. Koelcapaciteit van 350 W/m^2 met koeling boven in de kas
3. Koelcapaciteit van 350 W/m^2 met koeling onder in de kas waarbij de temperatuur sterk wordt gestuurd door de instraling
4. Koelcapaciteit van 350 W/m^2 met koeling boven in de kas waarbij de temperatuur sterk wordt gestuurd door de instraling
5. Open kas (referentie)

1.3 Leeswijzer

In dit rapport worden de resultaten van het experiment beschreven, waarin de effecten van koeling onder het gewas worden vergeleken met de effecten van koeling bovenin de kas op kasklimaat, groei, ontwikkeling en productie. In hoofdstuk 2 worden de inrichting van de kas, het verloop van de teelt, de regeling van het kasklimaat en de metingen beschreven. In hoofdstuk 3 wordt het gerealiseerde kasklimaat uitgebreid beschreven. De effecten hiervan op de ontwikkeling van het gewas, zowel vegetatief als generatief worden in hoofdstuk 4 beschreven. In hoofdstuk 5 worden de resultaten van metingen met $^{13}\text{CO}_2$ beschreven, waarmee de assimilatenverdeling bepaald kon worden. De wateropname en verdamping in de verschillende behandelingen worden beschreven in hoofdstuk 6. De verdeling van de verdamping over de verschillende bladlagen wordt beschreven in hoofdstuk 7, en de resultaten van fotosynthesemetingen in hoofdstuk 8. In hoofdstuk 9 staat een beschrijving van de metingen van de gehalten aan nutriënten gedurende de teelt in bladeren en vruchten, in hoofdstuk 10 staan metingen aan kwaliteit van de tomaten beschreven. Het rapport eindigt in hoofdstuk 10 met leerpunten. In dit hoofdstuk wordt ook weer ingegaan op de hypothesen die hierboven opgesteld zijn. Daar wordt per hypothese besproken of de resultaten aangeven of de hypothese juist of onjuist is en worden de resultaten bediscussieerd.

2 Kasinrichting, teeltverloop, klimaatregeling en metingen

2.1 Kas en kasinrichting

Het onderzoek is uitgevoerd in het kassencomplex van Wageningen UR Glastuinbouw in Bleiswijk in kasafdelingen 8.04 tot en met 8.08. De kas heeft een Venlo-dek van 4.8 meter kapbreedte op een tralieligger van 9.6 meter breed met doorlopende nokluchting. De afdelingen zijn 15 meter lang en 9.6 m breed (bruto grondoppervlak van 144 m²). De kolomlengte is 5.50 meter. Op een hoogte van 4.25 m bevinden zich de bogen voor de gewasdraden. Aan de voorkant van de kas is een betonpad van 1.30 m breedte om buisrailkarren te kunnen verplaatsen tussen de paden.

De afdelingen waren ingericht met een teeltsysteem bestaande uit 12 goten met een lengte van 12.5 meter. De gootbreedte was 20 cm. De goten lagen 50 cm boven de grond. Er werd geteeld op steenwolmatten (Grodan Growtop Expert) van 7.5 cm dik en 15 cm breed. Voor de verwarming was er een buisrailnet (51 mm) en een in hoogte verstelbare groeibuis (forcas 35 mm). Kasafdeling 8.03 (die niet bij de proef hoorde maar grensde aan proefafdeling 8.04) lag leeg. In de winter werd in 8.03 gestookt om te zorgen dat in 8.04 geen afwijkende temperaturen zouden ontstaan. Er was een dubbele scherminstallatie aanwezig bestaande uit een energiescherm (LS 10 Ultra) en een verduisteringsscherm. Het verduisteringsscherm is in de proef niet gebruikt. De klimaatregeling gebeurde met een standaard tuinbouwcomputer (Hoogendoorn-Economic).

De CO₂ voor dosering in de kas was afkomstig van OCAP. De doseercapaciteit was in overleg met de BCO ingesteld op 230 kg/ha/uur.

Een vernevelinstallatie was in de kasafdelingen aanwezig, maar is in deze proef niet gebruikt.

Voor de koeling was in de geconditioneerde afdelingen een koelinstallatie aanwezig. Deze kon waterzijdig zo worden afgesteld dat bij een temperatuurverschil tussen aanvoer- en retourtemperatuur van het koelwater van 8 °C het gewenste koelvermogen van 350 W/m² kon worden gerealiseerd.

De lichtdoorlatendheid van de kas is gemeten op een dag zonder directe instraling in januari 2010. De transmissie van de kas ter hoogte van de kop van het gewas was 60%.

2.2 Behandelingen

Dit onderzoek heeft als doel het effect van een verticale temperatuurgradiënt op groei en ontwikkeling van het gewas te bepalen. Om verschillen in gradiënten te realiseren, wordt de koude lucht onder in de kas ingeblazen of boven het gewas. In de proef zijn 5 behandelingen aangelegd:

Tabel 2.1. De behandelingen.

| Kas | Behandeling | aanduiding |
|------|---|------------|
| 8.04 | Koeling met 350 W/m ² waarbij koele lucht wordt ingeblazen boven het gewas | boven |
| 8.05 | Koeling met 350 W/m ² waarbij koele lucht wordt ingeblazen onder het gewas | onder |
| 8.06 | Open kas | open |
| 8.07 | Koeling met 350 W/m ² , waarbij koele lucht wordt ingeblazen boven het gewas; temperatuur mag sterker oplopen met straling | boven + T |
| 8.08 | Koeling met 350 W/m ² , waarbij koele lucht wordt ingeblazen onder het gewas; temperatuur mag sterker oplopen met straling | onder + T |

Deze behandelingen zijn gestart op 13 maart 2009.

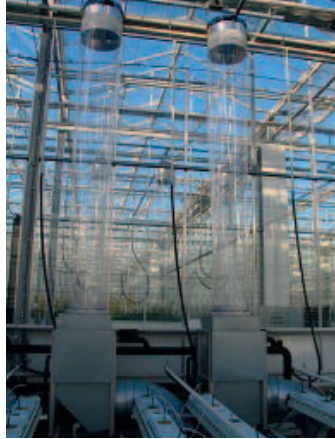
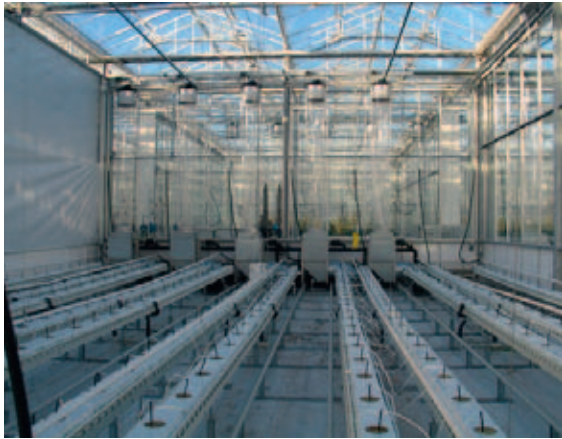
In de open kas werd gekoeld door bij te hoog oplopende temperatuur de luchtramen te openen. De andere vier kasafdelingen waren semi-gesloten, waarbij de basis koellast werd verzorgd door luchtbehandelingskasten (LBK's). Wanneer de instraling hoger werd dan de koelcapaciteit van de LBK's (350 W/m²), en het setpoint voor ventilatie werd overschreden, werd additioneel gekoeld door de luchtramen te openen.

In uren dat alleen met LBK's werd gekoeld, was er geen uitwisseling met buitenlucht (afgezien van een beetje lekventilatie via kieren). Hierdoor was er geen afvoer van CO₂ en vocht. Wel verdween er vocht uit de lucht door condensatie op het koellichaam.

2.3 Klimaatregeling

2.3.1 Koeling

In de open kasafdeling werd alleen gekoeld door het openen van de luchtramen. Voor de koeling van de semi-gesloten kassen werd de lucht boven in de kas aangezogen en door een doorzichtige buis naar een warmtewisselaar gebracht (Figuur 2.1.). In de lucht/water warmtewisselaar werd de lucht afgekoeld. In de afdeling met koeling onder het gewas, werd de lucht via een slang onder de teeltgoten de kas ingeblazen. De slang was geperforeerd met 4 rijen van 6 gaten per meter met een diameter van 16 mm. Aan het einde van de slang zijn grotere gaten aangebracht om het gedeelte boven het betonpad goed te kunnen koelen. Voor de koeling boven het gewas werd de lucht vanuit de warmtewisselaar via een slang onder de goten door via doorzichtige slangen naar boven het gewas gebracht. Daar werd de lucht ingeblazen via twee uitblaasopeningen voorin de kas, en drie uitblaasopeningen achterin de kas.



Figuur 2.1. Luchtbehandelingskasten (LBK's) met aanzuigslangen (linksboven en rechtsboven); inwendige van LBK koperen pijpen waar warmte uit de lucht wordt overgedragen aan koelwater (linksonder); slang voor luchtverdeling onder het gewas (rechtsonder).



Figuur 2.2. Slurven boven het gewas voor de inblaas van koele lucht.

De ventilator was toerengeregeld. De gehele aansturing van de koeling werd gedaan via de klimaatcomputer.

De regeling van de koeling in de geconditioneerde kas is gebaseerd op combinatie van luchtsnelheid en watertemperatuur om een gewenste kastemperatuur te handhaven. In de Economic kan naast de verwarmings- en ventilatielijnen (gewenste verloop van de temperatuur) voor de koeling een extra lijn worden ingesteld. De klimaatcomputer zal de koeling dan zodanig sturen dat de gewenste koeltemperatuur wordt bereikt. Bij de verwarming- en de ventilatie moet, naast het gewenste temperatuurniveau vervolgens nog worden aangegeven hoe de buistemperaturen moet worden geregeld, respectievelijk de ventilatie wordt geregeld. Bij de koeling moet worden aangegeven hoe de koelapparatuur wordt geregeld. De keuze daarbij is de snelheid van de luchtcirculatie en de aanvoertemperatuur van het koelwater. In de koelregeling is gekozen om vooral de luchtcirculatie als eerste te verhogen en de aanvoertemperatuur van het koelwater geleidelijk te verlagen. De luchtcirculatie is frequentie geregeld en levert een snel reagerende regeling op. Door bij het starten van de koeling de aanvoertemperatuur een paar graden onder de gewenste kastemperatuur te laten beginnen is bij weinig koeling de ingeblazen lucht slechts een paar graden onder de gewenste ruimte temperatuur. Zolang de ruimte temperatuur boven de koeltemperatuur blijft zal door een integrerende regeling de aanvoertemperatuur van het koude water verlaagd worden tot een ingesteld minimum niveau is bereikt. Komt de ruimtetemperatuur onder de koeltemperatuur dan zal de aanvoertemperatuur geleidelijk weer stijgen.

Op 25 mei (week 22) is de minimale watertemperatuur voor de koeling verlaagd van 14 °C naar 12 °C om de verticale temperatuurgradiënt te verhogen en het effect van de koude lucht onderin op het gewas nog iets te vergroten.

2.3.2 Ontvochtiging

Verdamping van het gewas brengt vocht in de kasruimte. In de open kas werd vocht afgevoerd via de luchtramen. In de semi-gesloten kassen kan vocht aan de kaslucht worden onttrokken met behulp van de luchtbehandelingskasten (LBK's). Hiertoe moet de temperatuur van de warmtewisselaar ingesteld worden beneden de dauwpunttemperatuur van de kaslucht. In de luchtbehandelingskasten in dit experiment was geen verwarming aanwezig. In dit experiment is daarom de LBK niet gebruikt voor de ontvochtiging. Bij ontvochtiging wordt namelijk koude lucht met een lage hoeveelheid absoluut vocht de kas ingeblazen. Om te voorkomen dat de kasluchttemperatuur te veel daalt, moet daarnaast verwarmd worden met de buizen, hetgeen energetisch ongunstig is.

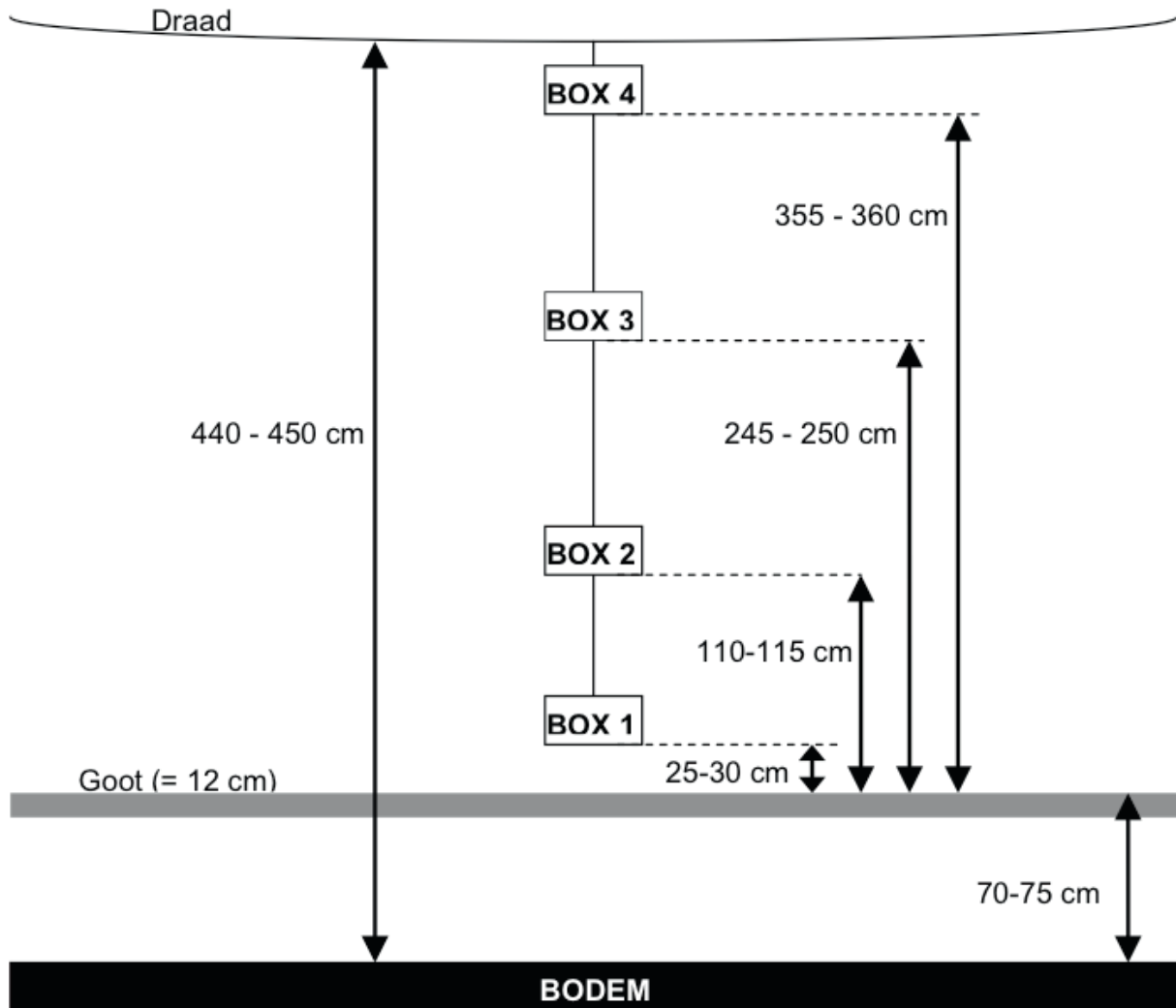
2.3.3 Klimaatregeling

Het klimaat werd geregeld met een Hoogendoorn Economic computer. Hierop waren ook alle sensoren aangesloten. Gemeten data werden opgeslagen en beschikbaar gemaakt via Letsgrow.

Voor regeling van temperatuur en luchtvochtigheid waren vier systemen aanwezig: buisverwarming, gewasverwarming (forcas groeibuis), luchtramen en koeling. In de klimaatcomputer werd voor iedere kas een lijn voor gewenste temperatuur ingesteld (setpoint). Ook werd ingesteld per kas hoe dit setpoint moest worden bereikt, dat wil zeggen met welk verwarmings- of koelsysteem, en volgens welke lijnen.

Op vier hoogtes in het gewas werd de temperatuur en luchtvochtigheid gemeten (Figuur 2.3.) met draadloze sensoren. Iedere sensor bestond uit een droge- & natte bol opnemer in een Hoogendoorn meetbox. De meetdata zijn opgeslagen als 5-minuut waarnemingen en beschikbaar gemaakt via Letsgrow.

De meetbox waar het klimaat op werd geregeld hing ter hoogte van het gewas, en ging met de kop van de plant mee omhoog. Op het moment dat de planten de draad hadden bereikt, was de hoogte van deze meetbox vergelijkbaar met meetbox 4 (Figuur 2.3.).



Figuur 2.3. Schematische weergave van de posities van de meetboxen in de kas.

2.4 Gewas en teeltverloop

2.4.1 Gewas

Tomatenplanten, cultivar Cappricia geënt op Emperador, werden in de kas gezet op 23 december 2008. Per mat stonden er 3 duoblokken met in totaal 6 planten. Plantdichtheid was 2.5 plant/m². Door aanhouden van een extra stengels (1 op 3) werd de stengeldichtheid later 3.33 stengels/m². De belangrijkste teelthandelingen zijn samengevat in Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Overzicht teelthandelingen

| datum | week | teelthandeling |
|-------------|------|---|
| 23 dec 2008 | 52 | Plantdatum |
| 28 jan 2009 | 22 | Planten op plantgat gezet |
| 29 jan | 5 | Trossnoei eerste tros: op vijf gezet |
| 9 feb | 7 | Trossen gesnoeid op 6 (vanaf deze datum) |
| 17 feb | 8 | Extra stengels aangehouden (1 op 3) à stengeldichtheid wordt 3,33 stengels/m ² . Extra stengels aan de middelste planten op iedere mat. |
| 13 maart | 11 | Start klimaatbehandelingen |
| 9 april | 15 | Eerste oogst |
| 5 aug | 32 | Trossen gedund op 5 (vanaf deze datum) |
| 16 sept | 38 | Planten gekopt |
| 24 sept | 39 | Laatste keer bladplukken en wegen |
| 4 nov | 45 | Laatste oogst |

Destructieve plantwaarnemingen werden uitgevoerd op 23 december, 19 februari, 1 mei, 3 juli, 29 september en 10 november. De 'gaten' in het gewas die hierdoor ontstonden werden opgevuld door vroegtijdig extra stengels op naburige planten aan te houden.

2.4.2 Plantbalans

Het gewas heeft het hele seizoen de neiging gehad om vegetatief te staan (dit is een bekende eigenschap van ras Cappricia) en is daarom steeds generatief gestuurd. Vanaf het begin van de teelt tot eind juni werd steeds een blaadje tegenover de tros weggenomen om bij te sturen en om meer licht in het gewas te krijgen. Ook onderin werd regelmatig een extra blad weggenomen.

Ook de klimaatregeling bleef voortdurend gericht op generatief sturen. Behalve met het temperatuurniveau werd bovendien in april ingesteld om eerder te luchten naar de voornacht toe, en werd koeler geteeld in de morgen. In mei werd (voorzichtig) luchten aan de windzijde toegevoegd.

In augustus was de open kas duidelijk te vegetatief, en in september was dit gewas nog wat verder uit balans geraakt. Dit kwam omdat de keuze is gemaakt in alle afdelingen dezelfde klimaatstrategie aan te houden, om behandelingen goed te kunnen vergelijken. Een positieve uitzondering was het gewas in de kas met onderkoeling (onder) dat in juli tamelijk generatief stond. Dit kwam doordat het onderin het gewas relatief koel was, waardoor de vruchten extra lang aan de plant hingen en relatief zwaar werden. Dit leidde tot een hogere plantbelasting, een generatievere stand en minder kniktrossen.

2.4.3 Zetting, vruchtgroei en productie

De eerste tomaten werden geoogst op 9 april. Dit was vrij laat, onder andere vanwege de lagere lichtdoorlatendheid van de kas dan in de praktijk en daardoor lager aangehouden etmaaltemperaturen, het 1 op 1 enten en het ras. De eerste vruchten bleven wat aan de fijne kant, na twee weken oogsten was het gemiddeld vruchtgewicht rond 100 g.

Half mei was de bloeisnelheid ongeveer 1 tros per week. De vruchten aan de plant werden grover, gemiddeld boven de 100 g per vrucht, en duidelijk grover dan in de proef van 2008. Er waren soms grote verschillen tussen planten. Het productieniveau was vergelijkbaar met de praktijk. In alle kassen kwamen relatief veel kniktrossen voor.

Eind juni lag de productie iets voor in de twee afdelingen waar de temperatuur sterker op mocht lopen met instraling (onder+T en boven+T) vanwege de hogere middagtemperaturen en CO₂-gehalten. Bij de afdeling met koeling onder in de kas waren de vruchten aan de onderste trossen van de plant grover en er hingen veelal ook 1 à 2 trossen meer aan per plant dan bij bovenkoeling. Aan het gewas was te zien dat productie in de open kas zou gaan achterlopen.

Half juli waren de vruchten duidelijk grover dan het jaar ervoor, en het gewas stond beter in balans. De productie was op dat moment vergelijkbaar met die van de proef in 2008. In de kassen met koeling onder in het gewas waren de vruchten het grofst, ook halverwege de plant. Eind juli lag de productie achter op het jaar ervoor: in de open kas was circa 0.5 kg minder geoogst dan in de open kas het jaar ervoor, terwijl in de andere kassen circa 2 kg minder geoogst was dan bij behandeling 350 W/m² koeling in 2008.

In augustus was het gewas iets sterker geworden. Er werd toen op 5 vruchten gesnoeid in plaats van op 6.

Eind augustus waren er veel kniktrossen, vooral in de open kas. Het vruchtgewicht was daar gemiddeld lager dan in de andere afdelingen. Dit gewas stond niet goed in balans en was nog steeds te vegetatief. In de twee afdelingen met bovenkoeling leek de zetting wat minder en wat onregelmatiger te zijn. In de afdeling met onderkoeling stond het gewas er volgens de BCO het beste bij.

2.4.4 Kniktrossen

Kniktrossen zijn in de hele teelt een probleem geweest. Bij een kniktros wordt de assimilatieaanvoer naar de tros beperkt omdat het floëem gedeeltelijk afgeknepen wordt. Dit leidt tot een lager gemiddeld vruchtgewicht, en een balans vegetatief/generatief die verschuift in de richting van meer vegetatieve groei. Vanaf februari tot circa half april werden trossen gebeugeld, en tegelijk werd getracht om kniktrossen te voorkomen met teeltmaatregelen. In april werden trossen geknepen, maar dit werd op 20 april gestopt omdat het niet meer conform de praktijk was. In die tijd waren de bovenste trossen stekiger. Half mei waren er nog steeds te veel kniktrossen en de trosstelen waren te lang.

In juni werd het aantal kniktrossen minder en de trossteel werd steviger in de semi-gesloten afdelingen met onder- en bovenkoeling. Dit was het gevolg van maatregelen zoals geleidelijker naar de voornacht gaan met handhaving van de etmaal temperatuur. In de semi-gesloten afdelingen met een sterkere temperatuurinvloed, waar iets meer warmte werd toegelaten in de middag, was er minder effect op de kniktrossen. Eind juni werd het knikken minder, maar kniktrossen bleven voorkomen, vooral in de open kas.

Bij telling van het aantal kniktrossen in week 29 bleek dat per carrousel er circa 140 kniktrossen waren in de open kas, circa 120 in de beide afdelingen met bovenkoeling en circa 100 in de afdelingen met onderkoeling.

Begin september zijn de kniktrossen voor de tweede keer geteld. Bij de telling aan circa 350 trossen per afdeling, bleek dat er in de open kas ruim 55% kniktrossen voorkwamen, tegen circa 30% in de semi-gesloten afdelingen. Besloten werd om de laatste drie trossen weer te beugelen evenals in 2008, en vanaf september werd weer in alle afdelingen gebeugeld.

Achteraf werd in de BCO besproken of in alle afdelingen het kniktrosprobleem minder zou zijn geweest als meer warmte was gegeven vroeg in de middag, om een generatiever gewas te krijgen. Er werd geconcludeerd dat in het voorjaar koeling boven het gewas beter was, en dat na de langste dag juist onderkoeling betere resultaten gaf.

2.4.5 Watergift

De strategie van watergeven was een gelijk drainpercentage (30%) in alle behandelingen te realiseren, waarbij de watergift in liters verschillend mocht zijn.

2.4.6 Gewasbescherming

Gedurende de hele teelt zijn ziekten en plagen geen noemenswaardig probleem geweest. In augustus werd een plant ontdekt met een zeer sterke groei. In laboratorium onderzoek werd vastgesteld dat de plant was aangetast door *Agrobacterium rhizogenes*, welke overmatige wortelgroei veroorzaakt.

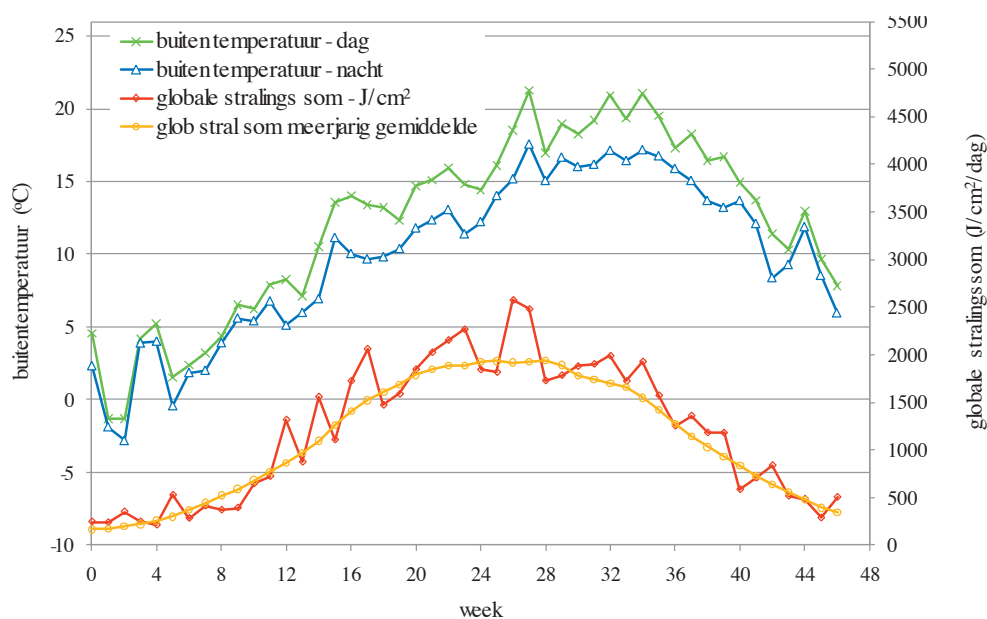
3 Resultaten kasklimaat

In dit hoofdstuk wordt een algemeen beeld gegeven van het gerealiseerde kasklimaat in de vijf afdelingen en worden bijzondere situaties apart besproken. De grote hoeveelheid data van vijf afdelingen is alleen in een beknopte weergave te presenteren door een selectie uit de gegevens te maken die de belangrijkste verschillen tussen de afdelingen illustreren waar voor de praktijk toepassingen uit volgen.

3.1 Buitenklimaat

Het kasklimaat in de afdelingen is een resultante van het buitenklimaat en de inzet van instrumenten om het klimaat te sturen. Het jaar 2009 was zonnig; over de gehele proefperiode was de globale straling bijna 9% hoger dan het meerjarig gemiddelde (Figuur 3.1.). In het najaar was de temperatuur bij gelijke instraling veel hoger dan in het voorjaar. In juni en augustus waren er enkele heel warme dagen, en ook een aantal nachten van gemiddeld boven de 20 °C. Rond de jaarwisseling was er een periode met buitentemperatuur onder nul.

In Bijlage I zijn aanvullende gegevens over buitenklimaat te vinden (daggemiddelden van straling en temperatuur, weekgemiddelden van windsnelheid en neerslag).



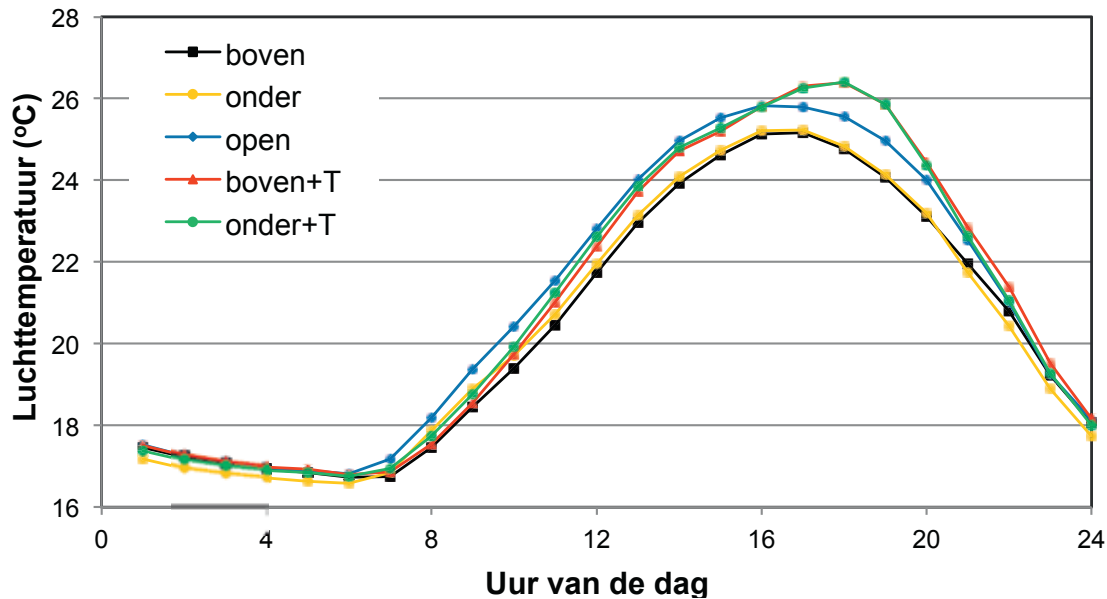
Figuur 3.1. Weekgemiddelden van het buitenklimaat temperatuur overdag, temperatuur 's nachts en globale stralingsommen.

3.2 Gerealiseerde kasluchttemperatuur

3.2.1 Temperatuurverloop over een etmaal

In het begin van de teelt is in alle vijf afdelingen de temperatuurstrategie gelijk geweest. Vanaf 13 maart zijn er verschillen tussen de behandelingen aangelegd. Dit is het gevolg van de inzet van koeling in plaats van ventileren, en de keuze om in twee afdelingen de temperatuur sterker met de instraling op te laten lopen.

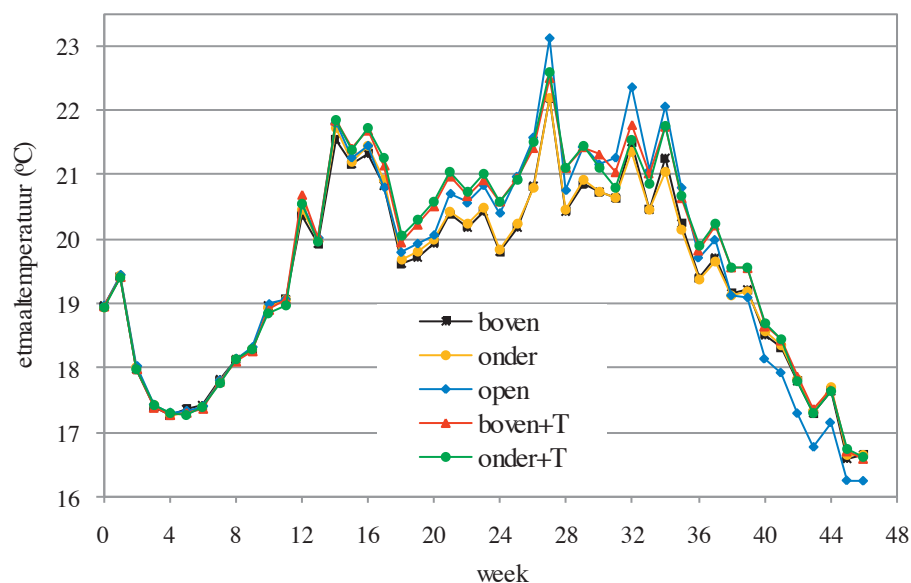
Het verschil in kasluchttemperaturen (gemiddeld over de periode 1 mei tot en met 31 augustus 2009) in de verschillende behandelingen is te zien in Figuur 3.2.).



Figuur 3.2. Gerealiseerde kasluchttemperatuur in de vijf behandelingen cyclisch etmaalverloop in de periode 1 mei tot 31 augustus 2009 (week 18-36).

Overdag was de temperatuur het hoogst in de twee semi-gesloten kassen waar de temperatuur sterker toe mocht nemen met de instraling (onder+T en boven+T), en het laagst in de andere twee semi-gesloten afdelingen (boven en onder). Deze behandelingen verschillen vooral in de namiddag (vanaf ca. 15:00 uur). Gemiddeld over de warme zomermaanden hield de temperatuur in de open kas het midden tussen de koelste en de warmste kassen.

3.2.2 Etmaaltemperatuur



Figuur 3.3. Gerealiseerde etmaaltemperatuur (weekgemiddelden) in de vijf behandelingen.

Figuur 3.3. brengt het verloop van de etmaaltemperatuur over het seizoen in beeld. Totdat de behandelingen op 13 maart werden ingezet, was de temperatuur in alle vijf kasafdelingen gelijk. Na eind april werden de temperatuurverschillen echt duidelijk.

De afdelingen met boven- en onderkoeling hadden tussen eind april en begin september de laagste temperatuur, omdat in de zomer gekoeld werd en additioneel gelucht werd wanneer nodig. Daarentegen mocht in de semi-gesloten afdelingen +T de temperatuur bij toenemende instraling hoger oplopen. De temperatuur gemiddeld over een week was ca. 0.5 °C hoger in deze afdelingen dan in de twee andere semi-gesloten afdelingen.

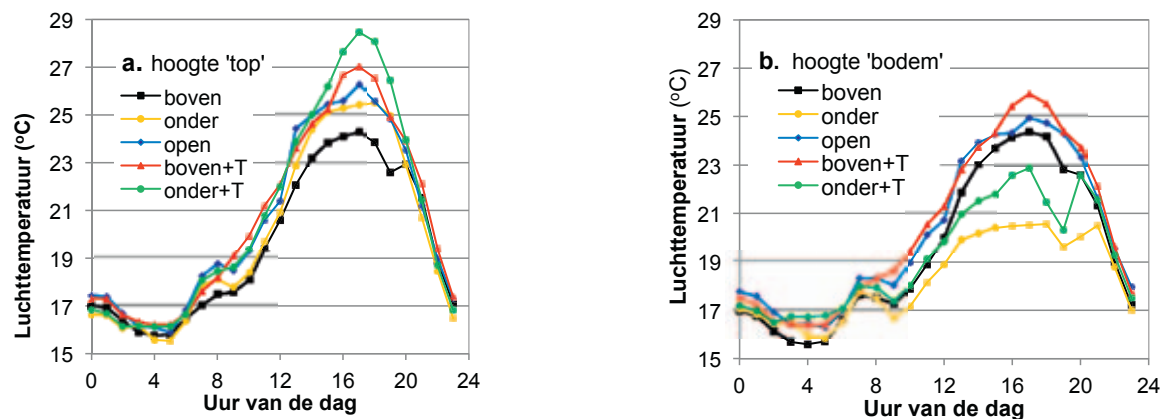
Vanaf half september waren de vier semi-gesloten kassen gelijk in temperatuur, terwijl de open kas een lagere temperatuur had. Dit laatste is vooral te verklaren door een lager setpoint voor ventilatie en de lagere buitentemperaturen.

3.2.3 Verticale gradiënt in kasluchttemperatuur

De verticale temperatuurgradiënt wordt sterk beïnvloed door de plaats van de koeling. De grootste verticale temperatuurgradiënt (grootste verschil tussen top en bodem van ca. 4 - 5 °C) komt voor in de afdelingen met onderkoeling (Figuur 3.4.). Deze temperatuurgradiënt is het hoogst op het moment dat er veel instraling is en de buitentemperatuur hoog is.

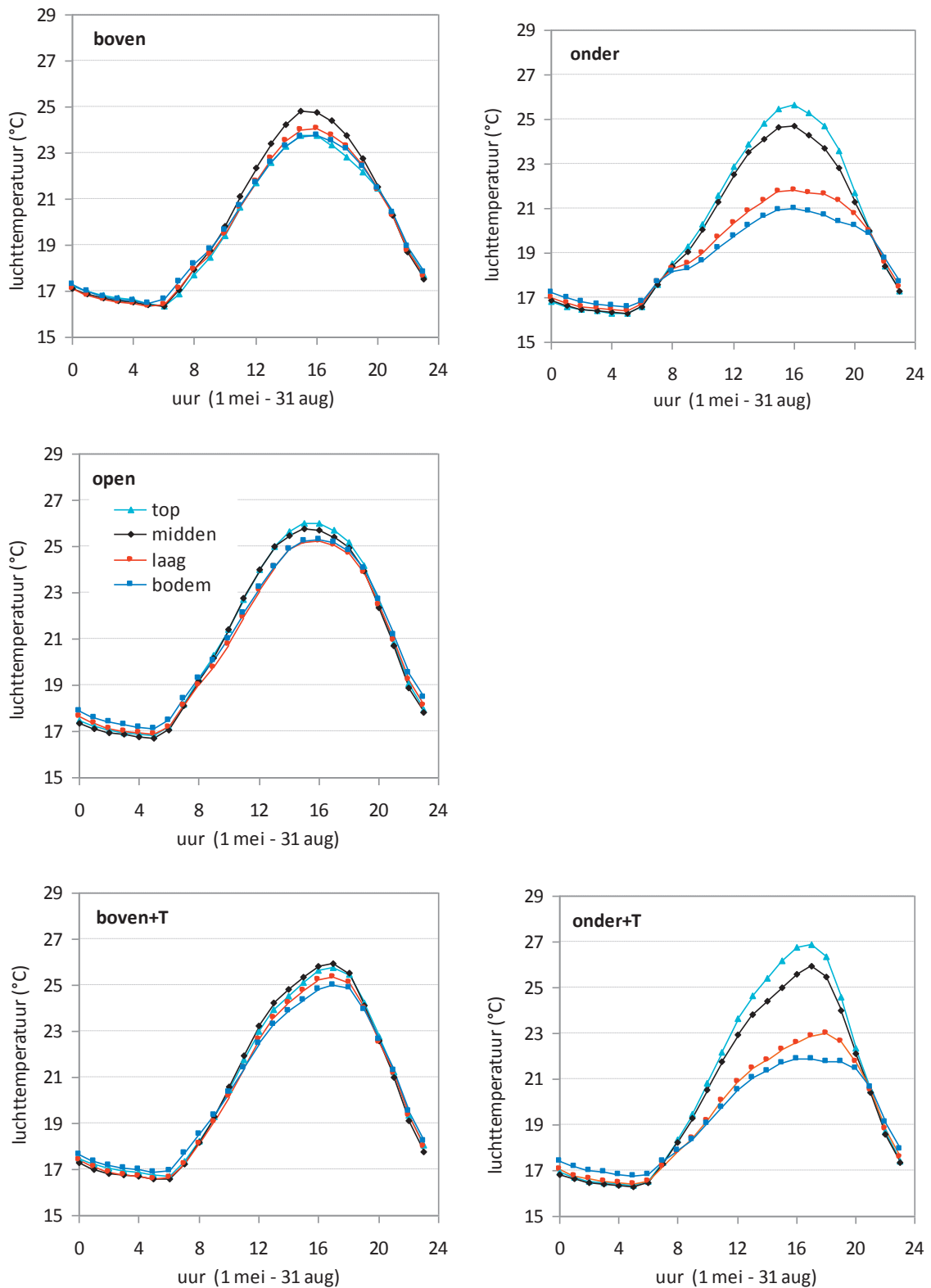
In Figuur 3.4a worden de temperaturen in de verschillende behandelingen op een zonnige dag (29 mei) met elkaar vergeleken op twee hoogtes. Op hoogte 'top' (3.50 m boven het substraat; ter hoogte van de kop van het gewas) is de kasluchttemperatuur het hoogst bij de behandeling met onderkoeling met temperatuurverhoging (onder+T). Dit komt doordat de koeling onderin zit en doordat de algehele temperatuur daar hoger is door het knijpen van de luchtramen. De laagste middagtemperaturen werden gemeten in de afdelingen met onder- en bovenkoeling omdat in deze semi-gesloten kassen hard werd gekoeld en de ventilatie niet werd beperkt. Van deze twee was de top het koelst in de afdeling met bovenkoeling. De open kas zat er tussenin. Het grootste verschil in kasluchttemperatuur was ca. 4 °C om 17:00 op 29 mei.

Bij temperatuur metingen op hoogte 'bodem' (ca. 25 cm boven het substraat) op een zonnige dag was de temperatuur bij bovenkoeling met temperatuurverhoging (boven+T) het hoogst (Figuur 3.4b). Het koelst was het in behandeling met onderkoeling, omdat hier gekoeld werd onder het gewas (waar deze meting was), en de luchtramen ver geopend waren. Behandeling onderkoeling met temperatuurverhoging had de een-na-laagste temperatuur, omdat het koelsysteem hard draaide, en omdat deze meting gedaan werd ter hoogte van de koeling (onderin). Maar omdat de luchtramen geknepen waren was de algehele kastemperatuur iets hoger dan bij de afdeling met onderkoeling. Uiteraard waren de gradiënten kleiner op koelere dagen.



Figuur 3.4. Kasluchttemperatuur in de vijf behandelingen op 29 mei 2009 (week 22). (a) Gemeten bij de kop van het gewas ('top') en (b) gemeten ter hoogte van de teeltgoot ('bodem').

Wanneer de temperaturen ter hoogte van de verschillende meetboxen (ca. 25, 115, 245 en 350 cm boven de goot) in de verschillende behandelingen gemiddeld worden over de zomermaanden, blijkt dat in de open kas er nauwelijks een temperatuurgradient is. De gradient is beperkt tot ca. 1 °C waarbij het bovenin de kas iets warmer is dan onderin (Figuur 3.5.). In de behandelingen met bovenkoeling blijft de temperatuurgradient beperkt tot 1-1.5 °C, waarbij de laagste temperatuur ca. 1 meter onder de kop van de plant gemeten wordt (bij de meetbox "midden", op ca. 2.5 meter boven de goot). In de behandelingen met onderkoeling blijkt er gemiddeld over 4 maanden een maximale temperatuurgradient van 4-5 °C gerealiseerd wordt. De temperaturen ter hoogte van de kop van de plant in de verschillende behandelingen lopen uiteen van 25-27 °C rond 16 uur, terwijl de temperaturen net boven het substraat variëren van 21-25 °C (Figuur 3.5.).

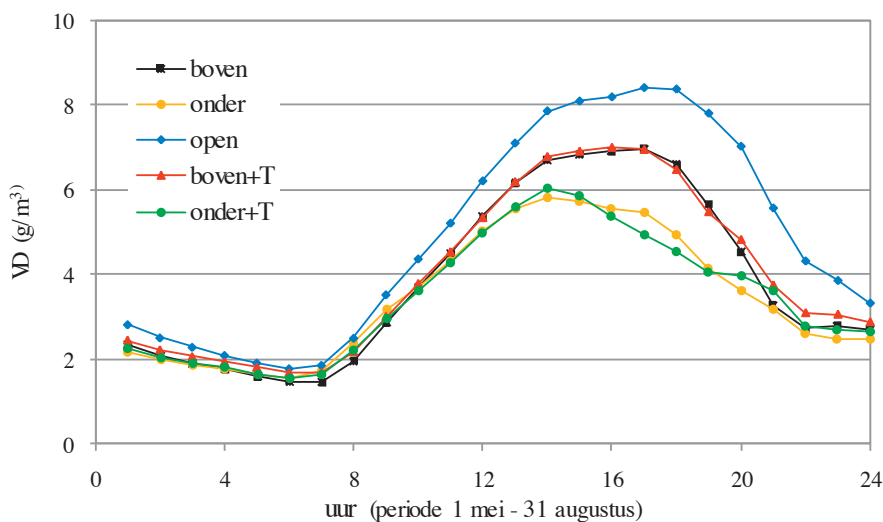


Figuur 3.5. Kasluchttemperaturen gemeten op vier hoogtes in het gewas (top, midden, laag en bodem) gemiddeld over de periode 1 mei – 31 augustus.

3.3 Gerealiseerde luchtvochtigheid

3.3.1 Verloop van luchtvochtigheid over een etmaal

Figuur 3.6. toont het verloop van het vochtdeficiet over een etmaal, gemiddeld over de periode 1 mei tot 31 augustus (week 18-36), de zomermaanden.



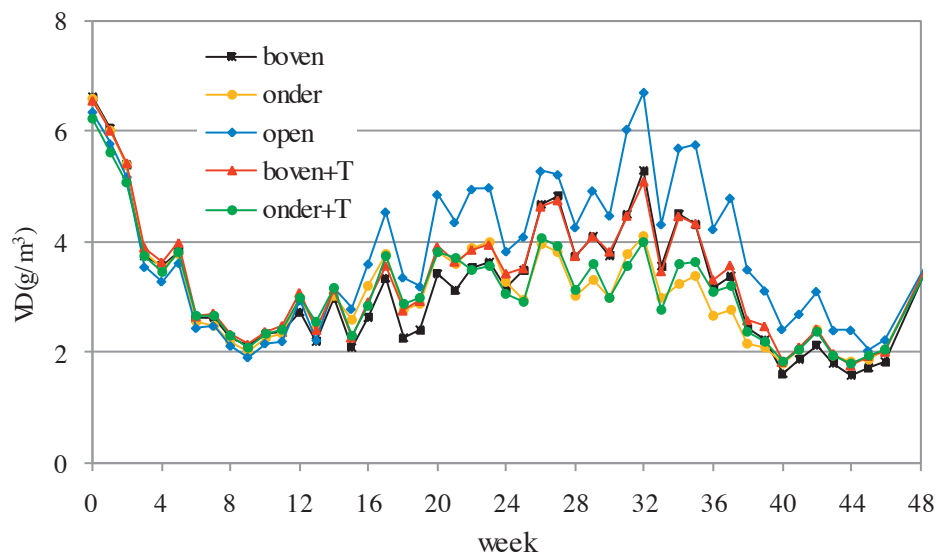
Figuur 3.6. Gerealiseerd vochtdeficiet (VD) in de vijf behandelingen: cyclisch etmaalverloop in de periode 1 mei tot 31 augustus 2009 (week 18-36).

Het vochtdeficiet was overdag verreweg het hoogst in de open kas, vanwege de vochtafvoer via de ramen. Het vochtdeficiet is in de twee afdelingen met onderkoeling vergelijkbaar, en lager dan in de twee afdelingen met bovenkoeling. Dit heeft voornamelijk effect op de verdamping (zie hoofdstuk 6).

Dit is duidelijk anders dan bij temperatuur (zie eerder), waar de temperatuur in de afdelingen met onder- en bovenkoeling aan elkaar gelijk waren, en tevens de afdelingen met onder- en bovenkoeling met temperatuurverhoging aan elkaar gelijk waren. Het vochtdeficiet in de kas werd blijkbaar sterk bepaald door de plaats van de koeling (boven of onder het gewas). Dit is ook te zien in de figuren die de verticale gradiënten in luchtvochtigheid in de verschillende behandelingen weergeven (Figuur 3.8.).

3.3.2 Verloop van luchtvochtigheid over het seizoen

Het vochtdeficiet over het hele jaar wordt weergegeven in Figuur 3.7. als etmaalgemiddelden per week. In week 26 - 34 tekent zich duidelijk af dat het vochtdeficiet het laagste is in de twee afdelingen met onderkoeling, en het hoogste in de open kas.

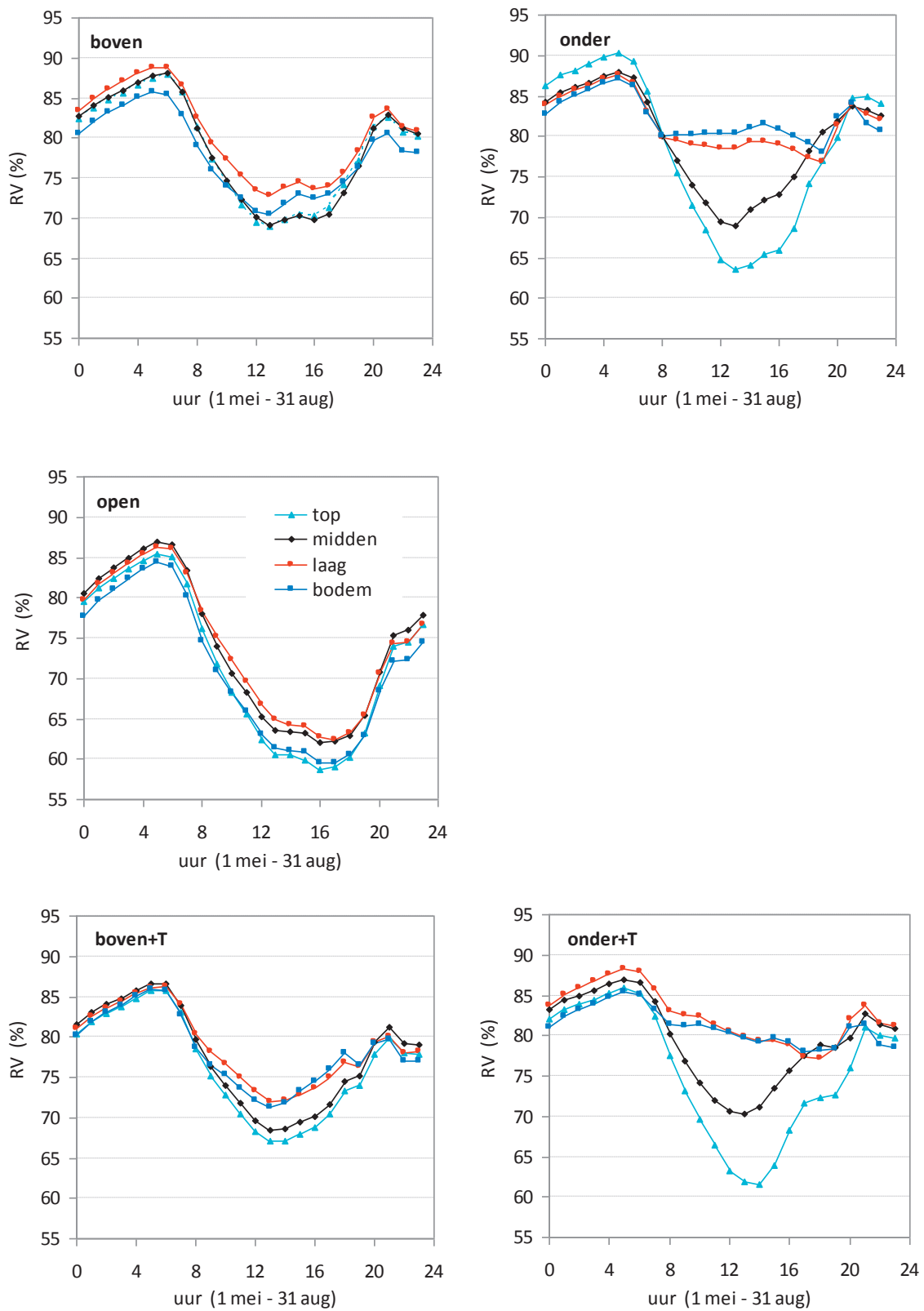


Figuur 3.7. Gerealiseerd vochtdeficiet (gemiddelden over het etmaal en per week) in de vijf behandelingen uitgezet tegen weeknummer.

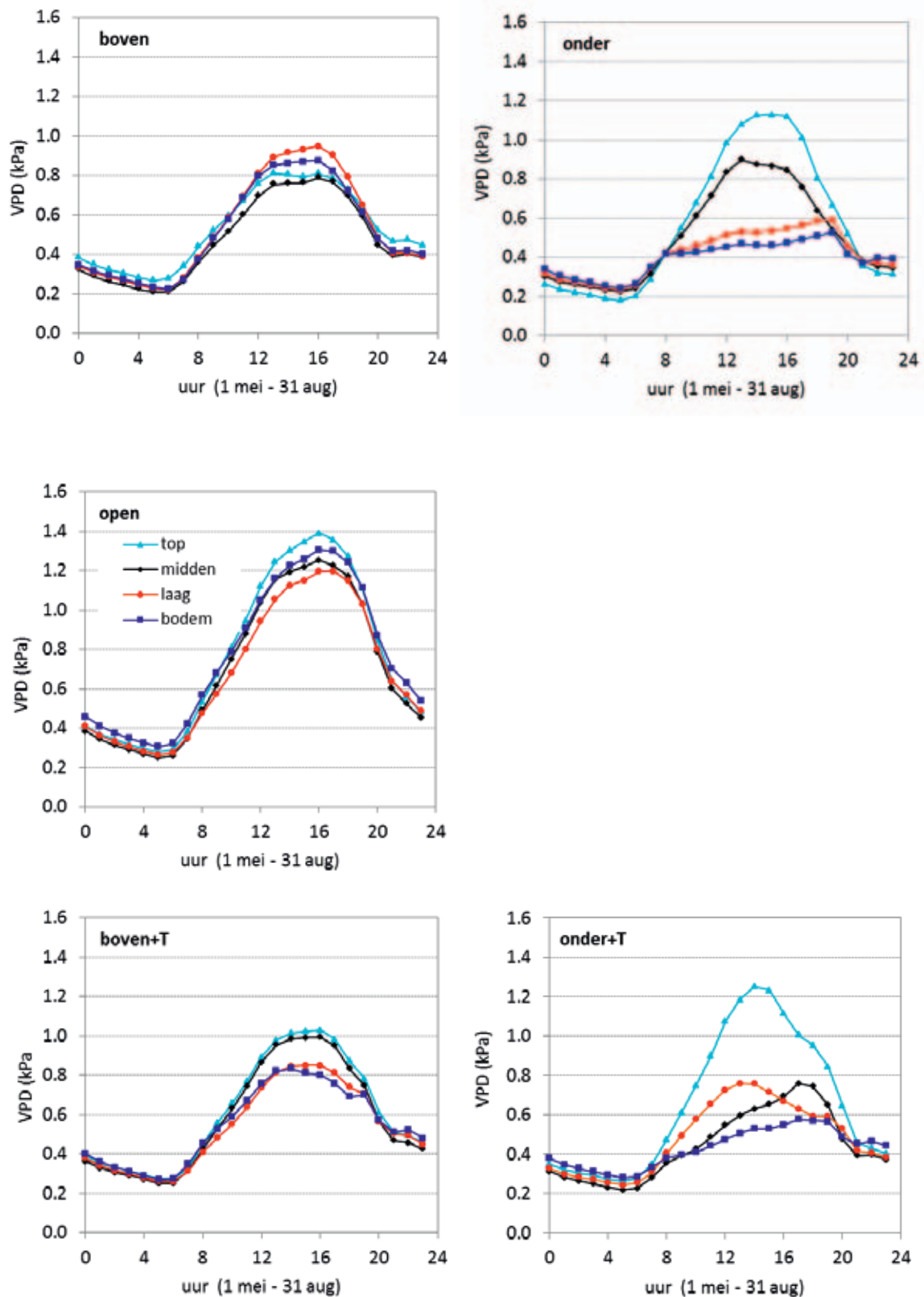
3.3.3 Verticale gradiënt in relatieve luchtvochtigheid en dampdrukdeficiet

In de open kas en in de beide kassen met koeling boven het gewas zijn de gradiënten in relatieve luchtvochtigheid beperkt (Figuur 3.8.). In de afdelingen met onderkoeling daarentegen is er wel een grote gradiënt in relatieve luchtvochtigheid, waarbij de RV onder in het gewas veel lager is dan bovenin de kas.

Het dampdrukdeficiet loopt het hoogst op in de open kas (Figuur 3.9.). Het patroon van het dampdrukdeficiet is vergelijkbaar met de relatieve luchtvochtigheid. In de kassen met onderkoeling is een grote gradiënt in VPD, waarbij de VPD onder in de kas midden op de dag vergelijkbaar is met de VPD in de open kas.



Figuur 3.8. Relatieve luchtvochtigheid gemeten op vier hoogtes in het gewas (top, midden, laag en bodem) gemiddeld over de periode 1 mei – 31 augustus, met een aparte grafiek voor iedere behandeling.

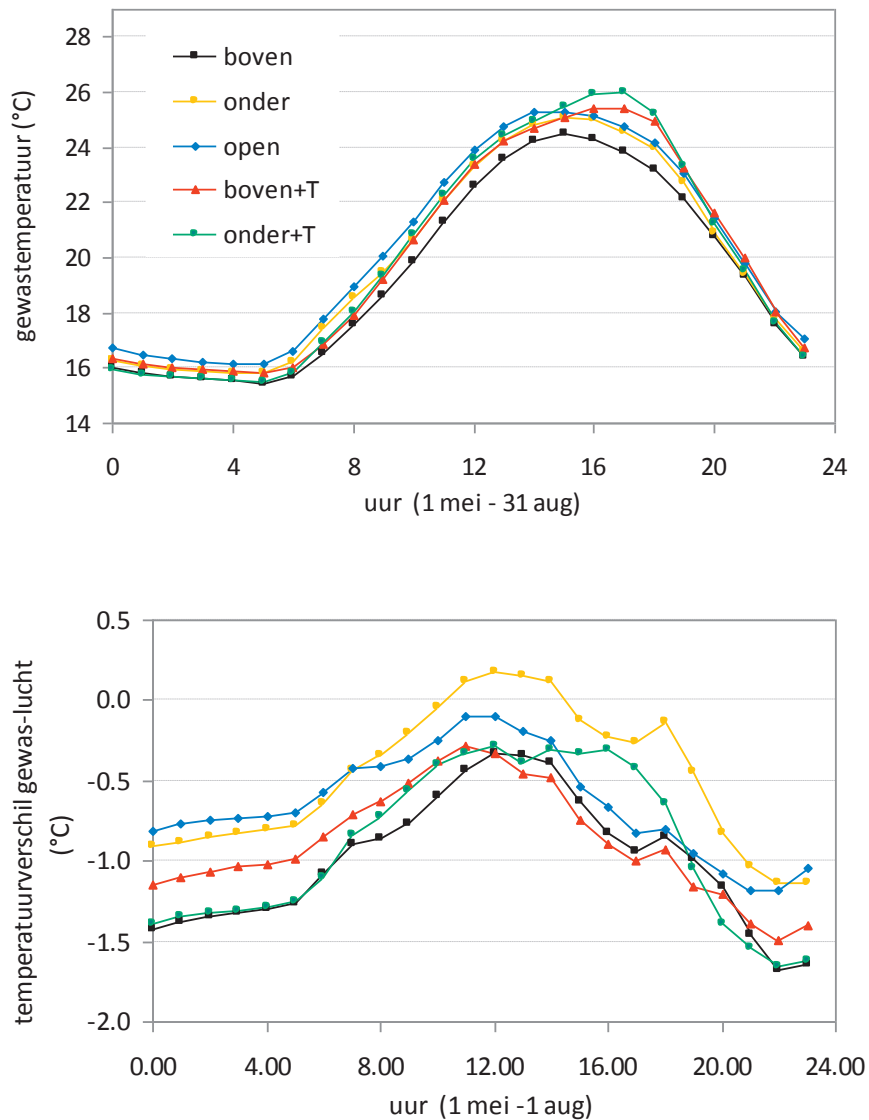


Figuur 3.9. Dampdrukdeficiet (VPD) gemeten op vier hoogtes in het gewas (top, midden, laag en bodem) gemiddeld over de periode 1 mei – 31 augustus, met een aparte grafiek voor iedere behandeling.

3.4 Gewastemperatuur

3.4.1 Verloop gewastemperatuur over een etmaal

De gewastemperatuur werd in iedere kasafdeling gemeten met een Infra-Rood opnemer die boven het gewas was geplaatst. Figuur 3.10. geeft de uurgemiddelden over de periode 1 mei tot 31 augustus, zowel de gemeten gewastemperatuur als het verschil tussen gewas- en luchttemperatuur.



Figuur 3.10. Metingen van gewastemperatuur (°C) gemiddeld over de periode 1 mei tot 1 augustus voor alle vijf behandelingen uitgezet tegen de tijd. (boven) Gewastemperatuur, (onder) verschil tussen gewas- en luchttemperatuur gemeten met meetbox.

De metingen van de gewastemperatuur vertonen min of meer hetzelfde beeld als de kasluchttemperaturen. Aan het einde van de dag zijn de gewastemperaturen van de planten in de kassen waar de temperatuur verder op mocht lopen het hoogst. Daar was de kasluchttemperatuur op dat moment ook hoog, waren de ramen minder ver open en was de luchtvochtigheid hoger. Gedurende de nacht was de gewastemperatuur het laagst, en het verschil met de kasluchttemperatuur het grootst. In de loop van de dag, bij toenemende instraling, namen zowel de kasluchttemperatuur als de gewastemperatuur toe, waarbij het verschil tussen beiden kleiner werd.

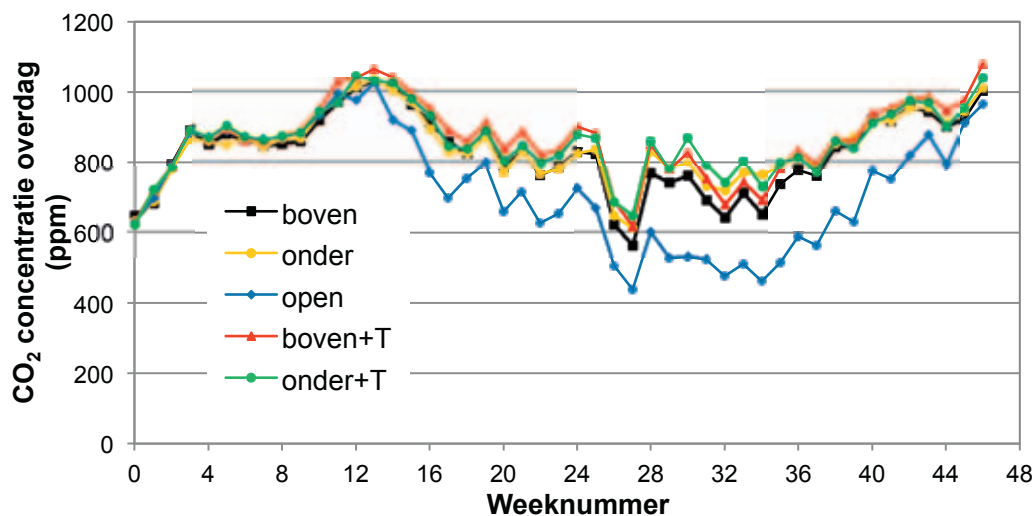
3.5 Gerealiseerde CO₂ concentraties en CO₂ verbruik

In alle kasafdelingen werd zuivere CO₂ gedoseerd afkomstig van een OCAP aansluiting. De doseersnelheid was ingesteld op 230 kg/ha/uur, en het gewenste niveau was 1000 ppm. Als het CO₂ niveau hieronder kwam werd de klep van de CO₂ dosering opengestuurd, en als de CO₂ concentratie hierboven lag werd de klep dichtgestuurd. Indien de CO₂ dosering geactiveerd werd, bleef de dosering 8 minuten aan staan, omdat de cyclustijd van de CO₂ meter 8 minuten was. Hierdoor kon de CO₂ concentratie tot ongeveer 150 ppm boven de ingestelde waarde uitkomen.

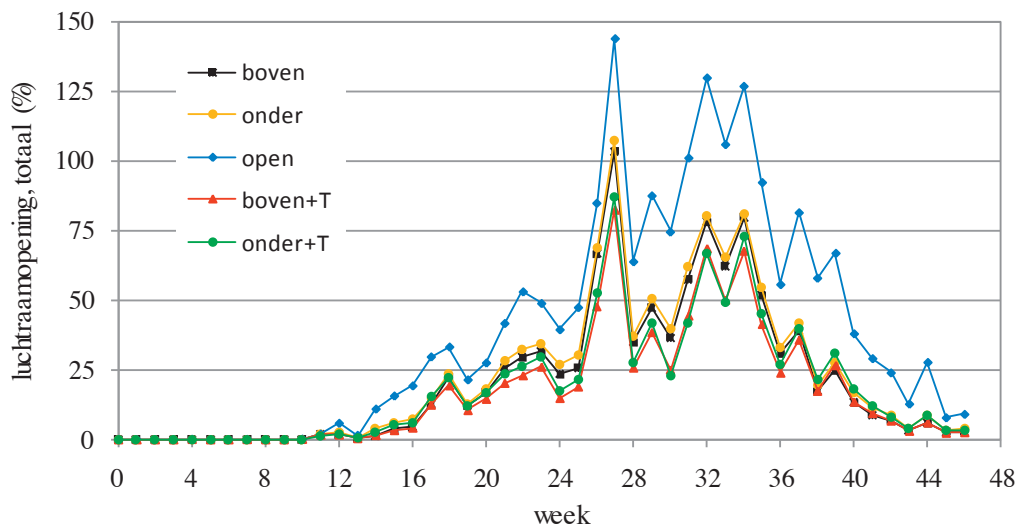
3.5.1 CO₂ concentraties en raamopening

In Figuur 3.11. zijn de weekgemiddelden van de CO₂ concentratie overdag te zien. Vanaf week 10, toen de behandelingen ingesteld zijn, zijn de CO₂ concentraties overdag in de open kas lager dan in de geconditioneerde kassen. In week 14 daalde het CO₂ gehalte in alle kassen, veroorzaakt door forse toename in luchting (Figuur 3.12.). Dit kwam doordat de straling snel steeg van 800 naar meer dan 1400 J/cm²/dag en de buitentemperatuur van 7 naar 14 °C (Figuur 3.1.). In de open kas daalde het CO₂ gehalte veel meer dan in de andere kassen, omdat hier meer werd gelucht dan in de geconditioneerde kassen.

Tussen week 14 en 25 was het CO₂ gehalte gemiddeld het hoogst in de afdelingen met temperatuurverhoging (boven+T en onder+T), omdat hierin minder werd geventileerd dan in beide andere geconditioneerde kassen. In de weken 26 en 27 vielen de meest zonnige dagen van 2009 en er werd dus veel gelucht. Hierdoor zakte het CO₂ weekgemiddelde met 150 - 200 ppm. Na week 27 herstelden de CO₂ gehalten zich weer en vertoonden consistente verschillen tussen de afdelingen. Gemiddeld over de periode 1 mei – 31 augustus was de CO₂ concentratie overdag in de open kas 635 ppm, in de afdeling met bovenkoeling 780 ppm, bij onderkoeling 800 ppm, bij boven+T 825 ppm en in de afdeling met onderkoeling+T 830 ppm.

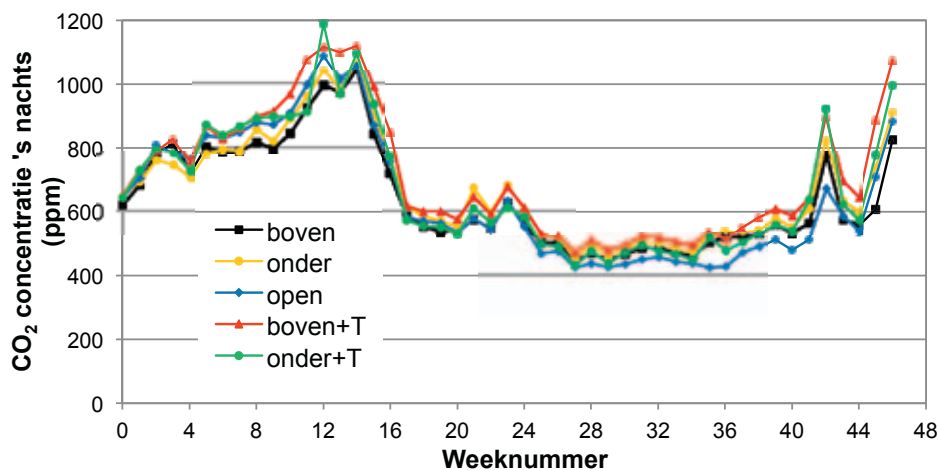


Figuur 3.11. CO₂ concentratie overdag (in ppm); weekgemiddelden over de hele teeltperiode.

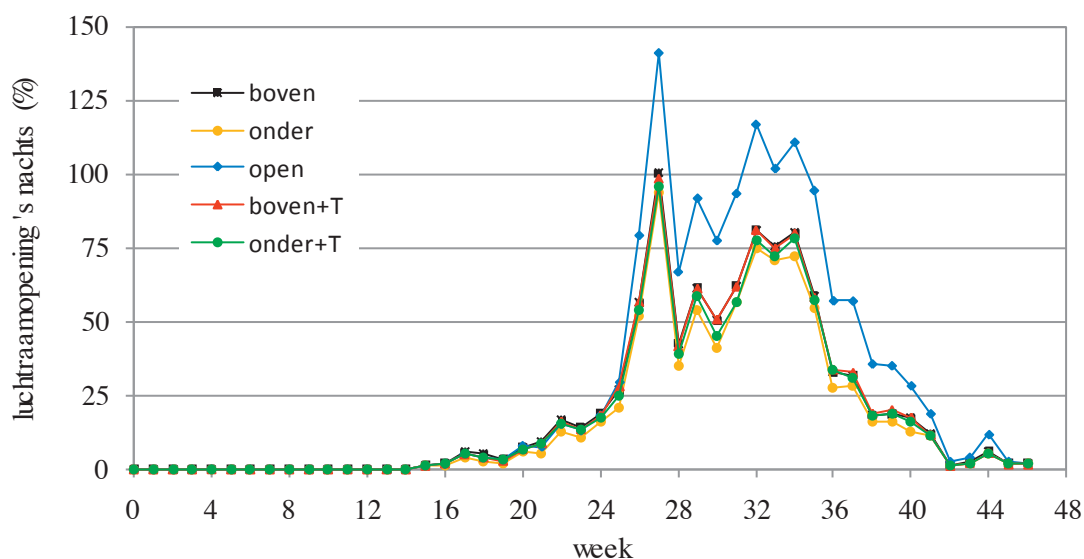


Figuur 3.12. Raamopening overdag in % (luwe + windzijde); weekgemiddelden over de hele teeltperiode

Het CO₂ niveau in de nacht wordt bepaald door het CO₂ gehalte van de voorgaande dag, de mate van luchting, lekverlies en de respiratie. Voor de gewasgroei is de CO₂ concentratie 's nachts niet van belang. In Figuur 3.13. is te zien dat de CO₂ concentratie in de open kas in de zomer het laagst is, en de concentratie in de kas met bovenkoeling met temperatuurverhoging gedurende een groot deel van het jaar het hoogst. In Figuur 3.14. is de raamopening 's nachts weergegeven.



Figuur 3.13. CO₂ concentratie 's nachts (in ppm) als weekgemiddelden over de hele teeltperiode.



Figuur 3.14. Raamopening 's nachts (luwe + windzijde) in % als weekgemiddelden over de hele teeltperiode

3.5.2 CO₂ verbruik

In alle kasafdelingen werd zuivere CO₂ gedoseerd afkomstig van een OCAP aansluiting. De hoeveelheid gedoseerde CO₂ is berekend door vermenigvuldiging van het aantal uren dosering 'aan' en de doseersnelheid (230 kg/ha/uur).

Tabel 3.1. Hoeveelheden gedoseerd CO₂ gedurende het hele teeltseizoen.

| | boven | onder | open | boven+T | onder+T |
|--|-------|-------|------|---------|---------|
| CO ₂ concentratie overdag (gem.) | 828 | 841 | 730 | 864 | 858 |
| CO ₂ dosering aan (uren) | 1708 | 1735 | 2317 | 1511 | 1619 |
| CO ₂ gedoseerd (kg/m ²) | 39.3 | 39.9 | 53.3 | 34.7 | 37.2 |

Uit deze tabel blijkt duidelijk dat de CO₂ concentratie in de open kas het laagst was, maar dat er om deze concentratie te realiseren veel CO₂ gedoseerd moest worden omdat in deze behandeling veel geventileerd werd. In de behandelingen met onder- en bovenkoeling met temperatuurverhoging (onder+T en boven+T) werd minder gedoseerd dan in de andere twee geconditioneerde afdelingen, maar door het verschil in ventilatie werden daarmee wel iets hogere gemiddelde CO₂ concentraties gerealiseerd.

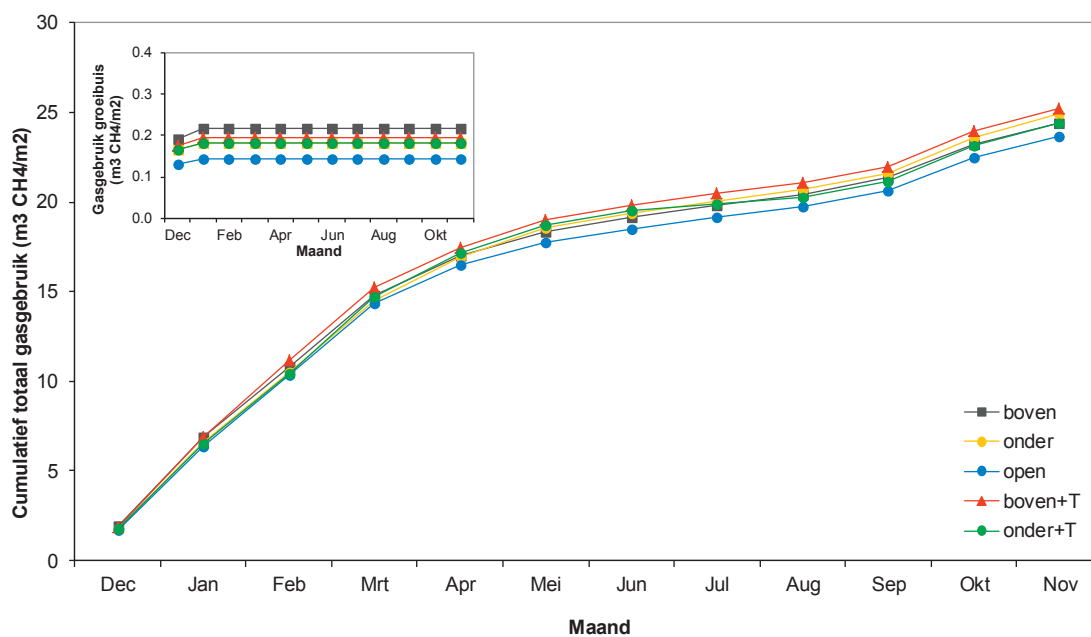
3.6 Energie

Om de kas op temperatuur te houden is uiteraard gas gebruikt. De hoeveelheid warmte die in de kas is gebracht is berekend met de methode van Nawrocki (1985) op basis van de gemeten buistemperatuur per 5 minuten. De groeibuis is vrijwel alleen gebruikt in de periode planten tot februari. De groeibuis is verder niet gebruikt omdat de buisrail een meer egale temperatuur invloed onder in het gewas heeft. Hierdoor zijn de relatieve verschillen groot, maar op het totaal gasgebruik is het effect gering.

Voor de beheersing van het vocht is gewerkt met ventilatie via de luchtramen en niet met de koelinstallatie. In het eerste jaar van het project gewasmanagement is de koelinstallatie gebruikt om de lucht actief te ontvochtigen. Dat heeft toen tot gevolg gehad dat er meer koude nodig was, maar ook meer warmte om de te sterk afgekoelde lucht weer op te warmen. Daardoor is de warmte en koude vraag dit jaar duidelijk kleiner, maar is er ook minder warmte geogst omdat de latente warmte die in vocht zit via de luchtramen de kas uitging.

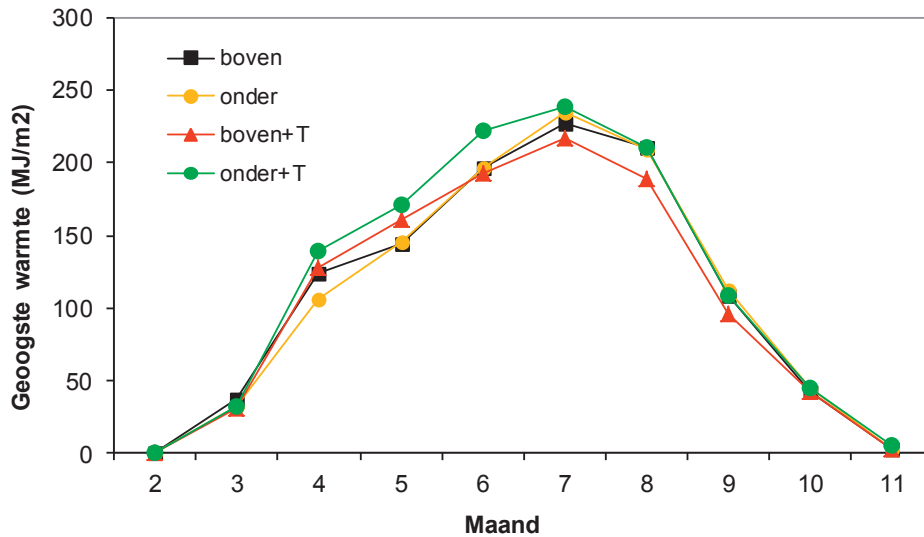
Tabel 3.2. Relatieve inzet van energie in de vijf afdelingen. De input van energie in de open kas is op 100% gesteld.

| | Boven | Onder | Open kas | Boven+T | Onder+T |
|-----------|-------|-------|----------|---------|---------|
| Groeibuis | 153% | 128% | 100% | 136% | 127% |
| Buisrail | 103% | 105% | 100% | 106% | 103% |
| Totaal | 103% | 105% | 100% | 107% | 103% |



Figuur 3.15. Cumulatief totaal gasgebruik en cumulatief gasgebruik van de groeibuis (inzet) in de 5 behandelingen.

Bij koelen van de kas wordt warmte geogst. Uit het verschil tussen aanvoer en retourtemperatuur in combinatie met de stroomsnelheid van het water door de warmtewisselaar kan berekend worden hoeveel energie er is geogst. Dit is berekend voor de vier geconditioneerde afdelingen. De hoeveelheid geogste warmte is omgerekend naar aardgas equivalenten. In de afdelingen met koeling boven, onder, boven+T en onder+T is respectievelijk 1094, 1086, 1061 en 1174 MJ/m² warmte geogst, hetgeen overeenkomt met 35.3, 35.0, 34.2 en 37.9 m³ CH₄ per m². In de afdeling met onderkoeling met temperatuurverhoging (onder+T) werd met name in het begin van de teelt meer koeling gebruikt. Dat heeft te maken met het feit dat dit de meest zuidelijke afdeling is, die iets meer instraling ontving via de gevels, en dus meer koeling nodig had om de temperatuur op het gewenste niveau te houden.



Figuur 3.16. Geogoste warmte in MJ per m² in de vier geconditioneerde afdelingen.

Om de warmte te oogsten moesten de ventilatoren draaien. Uit de draaitijd en het vermogen van de ventilatoren is berekend dat voor de ventilatoren in de afdelingen met bovenkoeling, onderkoeling, boven+T en onder+T respectievelijk 21, 25, 20 en 23 kWh/m² of wel 76, 91, 70 en 84 MJ/m² elektra is gebruikt. Dit is tussen de 5 en 10% van de geogoste warmte.

De netto warmte oogst is met ruim 10 m³/m² kleiner dan in 2008. Dit komt waarschijnlijk vooral door het niet terugwinnen van de latente warmte die met vocht de kas uit is gegaan.

3.7 Samenvatting en conclusies kasklimaat

1. De kasluchttemperatuur wordt sterk bepaald door de instraling en de luchtraamopening. De locatie van de koeling (onder of boven het gewas) heeft nauwelijks effect op de gerealiseerde kasluchttemperatuur ter hoogte van de meetbox waarop het klimaat werd gerealiseerd.
2. In geconditioneerde kassen kan met minder CO₂ dosering een gemiddeld hogere CO₂ concentratie gerealiseerd worden. In de open kas werd 53 kg/m² gedoseerd, waarmee overdag een concentratie van 730 ppm werd gerealiseerd. In de geconditioneerde afdelingen werd 35-40 kg/m² gedoseerd, waarmee overdag concentraties van 830-860 ppm werden gerealiseerd.
3. In afdelingen waar de temperatuur aan het einde van de dag verder op mocht lopen met instraling, bleven de ramen meer gesloten en waren de temperatuur en CO₂ concentratie op die momenten hoger.
4. In de behandelingen met onderkoeling was er een sterke verticale temperatuurgradiënt, tot 5 °C gemiddeld over de periode 1 mei – 31 augustus. In de open kas bleef de temperatuurgradiënt beperkt tot ca. 1 °C.
5. In de behandelingen met onderkoeling was er een sterke gradiënt in relatieve luchtvochtigheid en dampdrukdeficiet. Onder in de kas was de relatieve luchtvochtigheid overdag, wanneer er gekoeld werd, lager dan in het midden of bovenin, en was de VPD hoger onderin dan bovenin. In de afdelingen met bovenkoeling was de gradiënt in RV of VPD kleiner en vergelijkbaar met de gradiënt in de open kas.
6. In de behandeling met bovenkoeling was de temperatuur bovenin, vlak onder de uitblaasopeningen, lager dan 1 meter onder de kop van de plant.
7. Het vochtdeficiet was in de open kas hoger dan in de geconditioneerde afdelingen, omdat via de luchtramen meer vocht werd afgevoerd. Het vochtdeficiet was hoger in de afdelingen met bovenkoeling dan in de behandelingen met onderkoeling.
8. In de geconditioneerde afdelingen kon netto circa 10 m³/m² warmte geoogst worden.

4 Gewasgroei en -ontwikkeling

4.1 Metingen

Wekelijks werden van 6 planten per behandeling de volgende kenmerken gemeten:

- Kopdikte: stengeldiameter ter hoogte van de lengte van de plant in de voorgaande week (cm) Dit is ca. 25 cm onder de top van de plant.
- Bladlengte: lengte van het blad onder de bovenste bloeiende tros (cm)
- Drooggewicht van de geplukte bladeren onderin (g)
- Lengtegroei: verschil in plantlengte tussen de vorige en deze week
- Bloei: registratie van de hoogst gelegen bloeiende bloem, uitgedrukt in trosnummer en bloemnummer
- Zetting: registratie van de hoogst gelegen gezette vrucht, uitgedrukt in trosnummer en vruchtnummer
- Oogst: registratie van het trosnummer dat geoogst werd, versgewicht van de tros en aantal vruchten per geoogste tros.
- Plantbelasting: aantal vruchten per m². Deze waarde wordt berekend uit de gegevens van zetting en oogst

Deze metingen werden gedaan aan twee telvakken van 3 planten, waarvan één met een zijstengel. Het ene telvak lag aan de noordzijde van de rij, het andere telvak aan de zuidzijde.

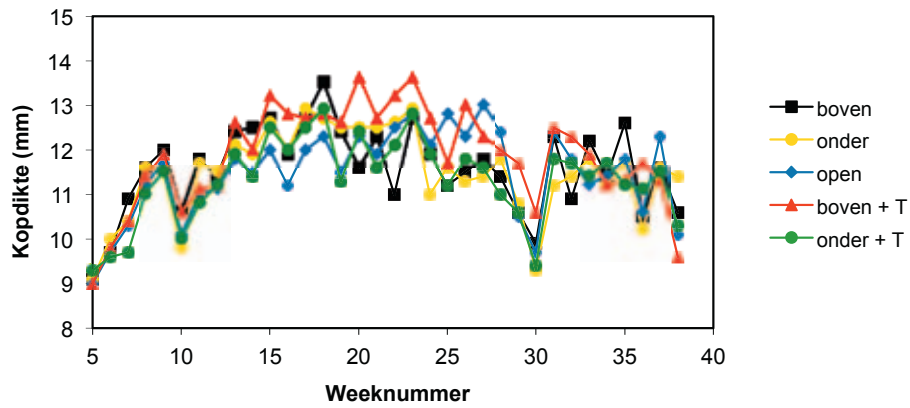
- Productie: aantal trossen, aantal vruchten en (vers)gewicht van de geoogste trossen, uitgedrukt per m². Hierbij is altijd gerekend met totale productie per afdeling gedeeld door het netto beteembare oppervlak van 120 m². Er werd niet gecorrigeerd voor planten die vanwege destructieve oogsten waren verwijderd.

Periodiek werd daarnaast het droge stof percentage van de vruchten bepaald door ze bij 80 °C te drogen gedurende enkele dagen.

Gedurende de proef zijn elke 2 maanden planten uit de kas gehaald en destructief geoogst. Van zowel bladeren, stengels als vruchten (aan de plant) werden vers- en drooggewichten bepaald. Van de bladeren werd het bladoppervlak bepaald.

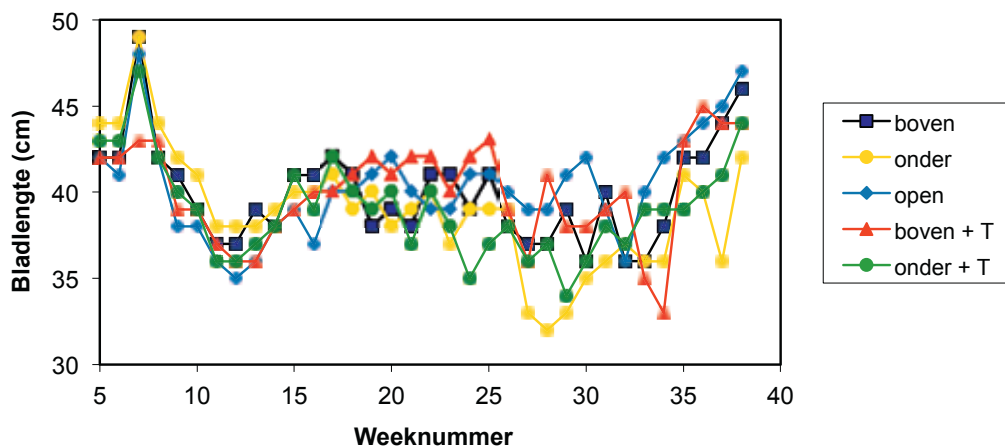
4.2 Resultaten - Vegetatieve groei en ontwikkeling

In de teelt is gestreefd naar een min of meer constante kopdikte. Als de kopdikte groter wordt, is de verhouding assimilatenaanbod/assimilatenvraag groter geweest. Dat betekent dat de temperatuur in verhouding tot de hoeveelheid licht laag was, waardoor de stengel dikker wordt. Als de kopdikte kleiner wordt is de temperatuur in verhouding tot de hoeveelheid licht hoog geweest. Op deze wijze wordt de kopdikte gebruikt als indicatie voor de klimaatregeling, met name de regeling van de temperatuur. In Figuur 4.1. is te zien dat er geen consistente verschillen geweest zijn tijdens de teelt in kopdikte van de planten in de verschillende behandelingen.



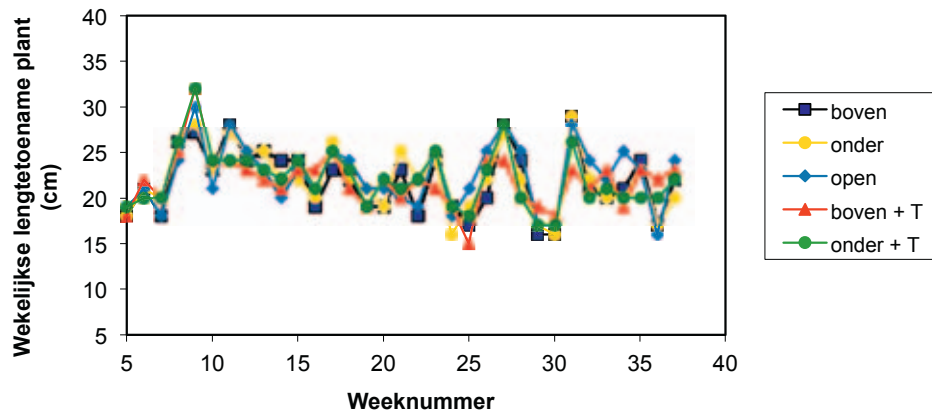
Figuur 4.1. Verloop van de diameter van de stengel (kopdikte) bij de verschillende behandelingen (zie legenda) in de tijd. In week 52 (2008) zijn de tomaten geplant, in week 10 zijn de behandelingen begonnen.

Gedurende de teelt werd wekelijks van 6 meetplanten de lengte van het blad onder de bovenste bloeiende tros gemeten. Aan het begin van de teelt waren er nauwelijks verschillen in bladlengte tussen de verschillende behandelingen. Aan het einde van de teelt was de bladlengte in de behandelingen met koeling van onder af op een aantal momenten kleiner dan bij de andere behandelingen (Figuur 4.2.). Dit stemt overeen met de bevindingen uit 2008, waaruit bleek dat bij een hogere koelcapaciteit, dus een grotere verticale temperatuurgradiënt de bladlengte gedurende de teelt korter werd.

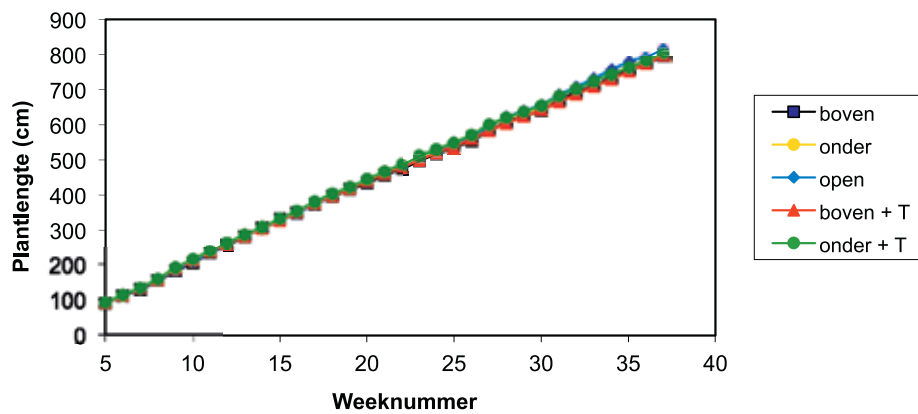


Figuur 4.2. Verloop van de lengte van het blad onder de bovenste bloeiende tros bij de verschillende behandelingen (zie legenda) in de tijd. In week 52 (2008) zijn de tomaten geplant, in week 10 zijn de behandelingen begonnen.

De wekelijkse lengtegroei van de plant is tamelijk constant in de tijd (Figuur 4.3.). Er zijn nauwelijks verschillen tussen de verschillende behandelingen, hetgeen resulteert in een nagenoeg hetzelfde verloop van plantlengte in de tijd (Figuur 4.4.).



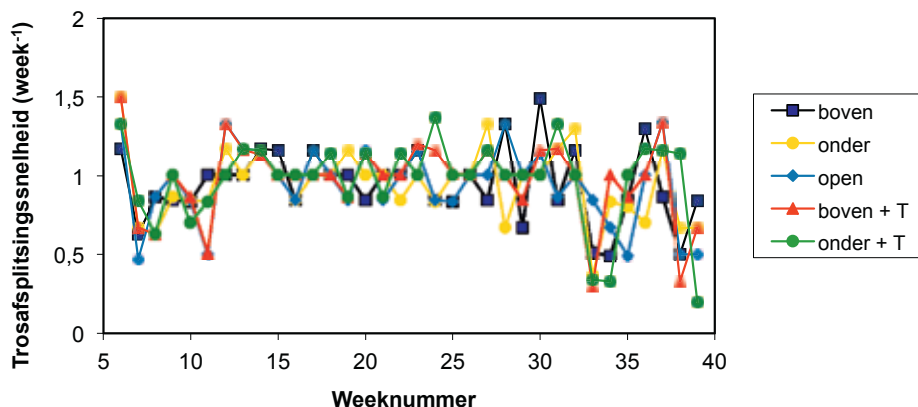
Figuur 4.3. Verloop van de wekelijkse lengtegroei bij de verschillende behandelingen (zie legenda) in de tijd. In week 52 (2008) zijn de tomaten geplant, in week 10 zijn de behandelingen begonnen.



Figuur 4.4. Verloop van de totale plantlengte bij de verschillende behandelingen (zie legenda) in de tijd. In week 52 (2008) zijn de tomaten geplant, in week 10 zijn de behandelingen begonnen.

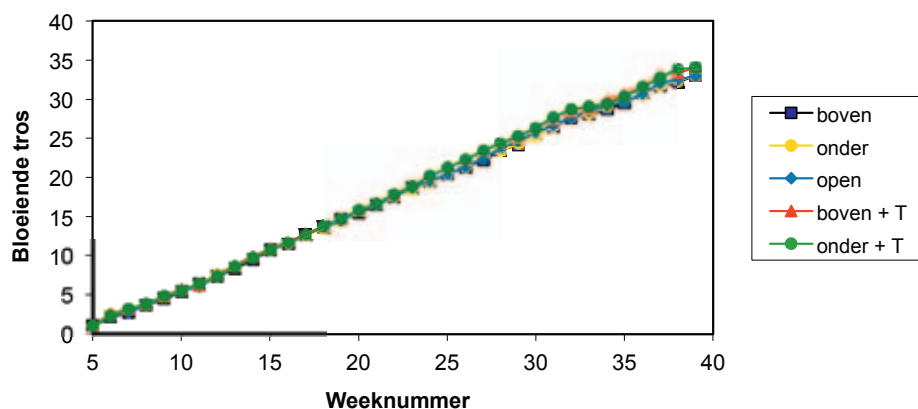
4.3 Resultaten - Generatieve groei en ontwikkeling

In de zomermaanden werd gemiddeld ca. 1 tros per week aangelegd in alle behandelingen (Figuur 4.5.). In het voor- en najaar was de trosafsplitsingssnelheid meer variabel, afhankelijk van hoeveelheid instraling en daarmee de temperatuur die in die week gerealiseerd werd.



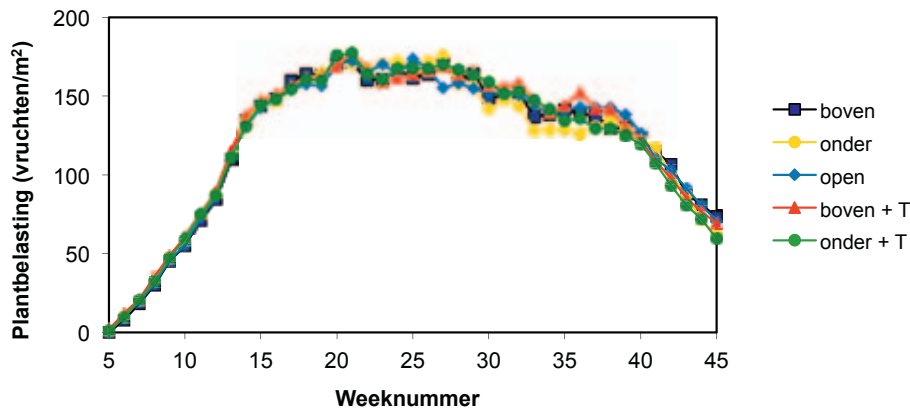
Figuur 4.5. Verloop van de trosafsplitsingssnelheid (aantal trossen per week) bij de verschillende behandelingen (zie legenda) in de tijd. In week 52 (2008) zijn de tomaten geplant, in week 10 zijn de behandelingen begonnen.

Aan het einde van week 10 zijn de behandelingen gestart. In de behandelingen met koeling onder, boven en de open kas waren de temperatuurstrategieën gelijk. In de afdelingen met koeling onder en boven met een lichtverhoging op de temperatuur (boven + T en onder + T) mocht de temperatuur overdag verder oplopen met hogere instraling, hetgeen op die dagen leidde tot een hogere etmaaltemperatuur. Dit heeft er uiteindelijk toe geleid dat in de twee afdelingen met lichtverhoging het aantal afgesplitste trossen 34 was, tegen 33 trossen in de drie andere behandelingen (Figuur 4.6.).



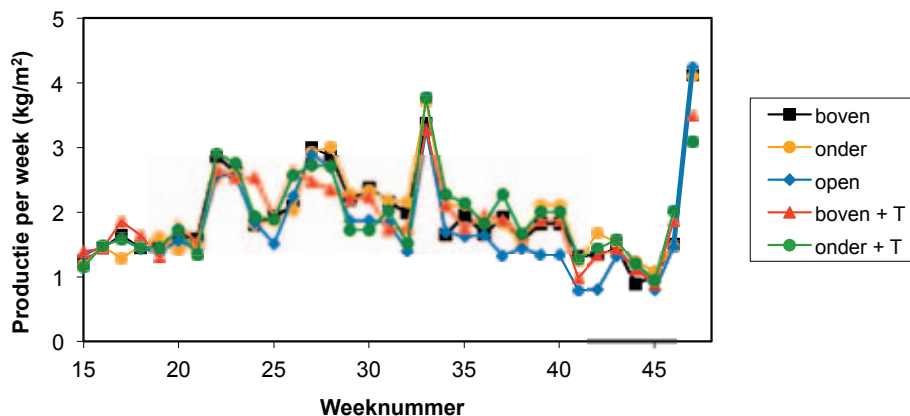
Figuur 4.6. Verloop van het aantal trossen (geregistreerd op het moment van bloei) bij de verschillende behandelingen (zie legenda) in de tijd. In week 52 (2008) zijn de tomaten geplant, in week 10 zijn de behandelingen begonnen.

Op moment dat de bloeiende trossen vrucht gaan zetten, neemt de plantbelasting (aantal vruchten per m²) toe (Figuur 4.7.). In eerste instantie komt de toename van de plantbelasting van de trossen aan de hoofdstengel, vanaf week 12 zetten ook de zijstengels vrucht. Vanaf week 15 begonnen de vruchtoogsten. De verschillen in plantbelasting tussen de verschillende behandelingen waren gering. Naar het einde van de teelt was de plantbelasting in de behandelingen met koeling onder in de kas iets lager dan in de andere behandelingen, maar deze verschillen zijn erg klein.

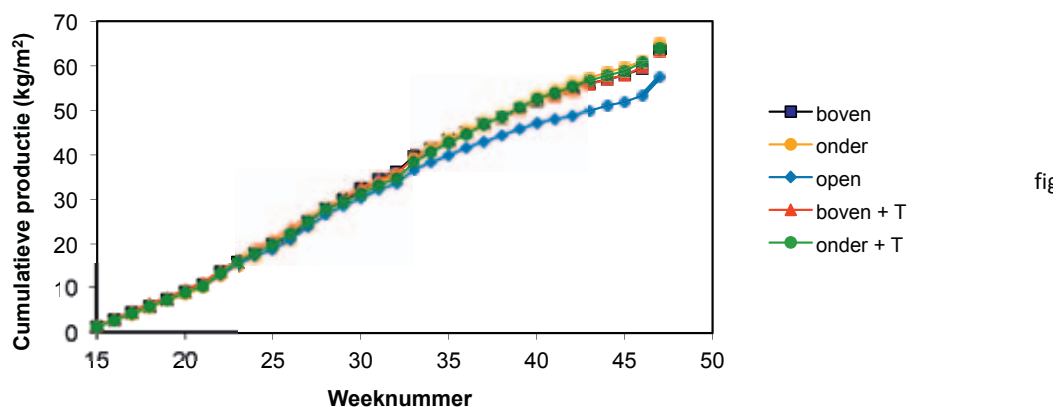


Figuur 4.7. Verloop van de plantbelasting (aantal vruchten per m²) bij de verschillende behandelingen (zie legenda) in de tijd. In week 52 (2008) zijn de tomaten geplant, in week 10 zijn de behandelingen begonnen.

In Figuur 4.8. staat de productie per week uitgezet. De productie verschilde sterk van week tot week, afhankelijk van de hoeveelheid instraling in de voorgaande periode. In de laatste week van de teelt werden de planten leeggeogst, hetgeen de sprong in productie verklaart. De cumulatieve producties in de verschillende behandelingen zijn weergegeven in Tabel 4.1.



Figuur 4.8. Verloop van de productie per week (kg per m²) bij de verschillende behandelingen (zie legenda) in de tijd. In week 52 (2008) zijn de tomaten geplant, in week 10 zijn de behandelingen begonnen.



Figuur 4.9. Verloop van de totale productie (kg per m²) bij de verschillende behandelingen (zie legenda) in de tijd. In week 52 (2008) zijn de tomaten gepland, in week 10 zijn de behandelingen begonnen.

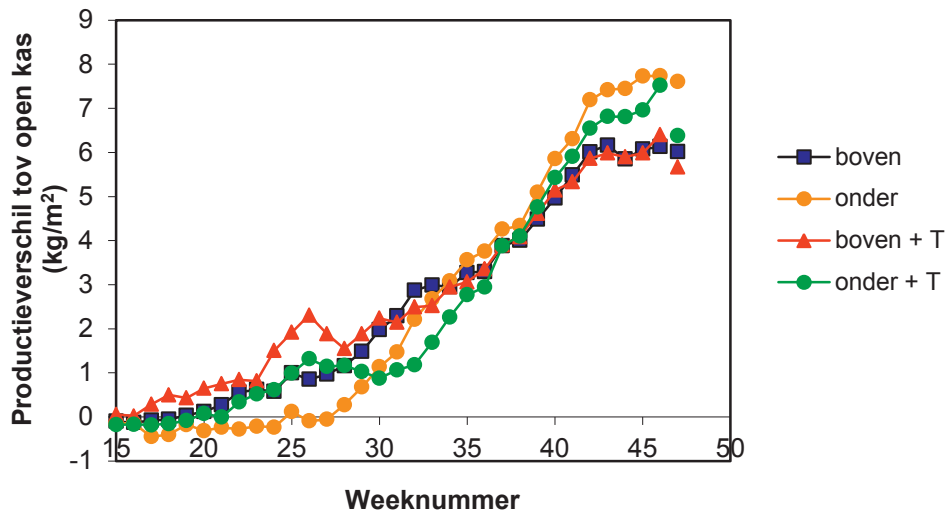
In de open kas werd een productie gehaald van 57.5 kg/m². Dit productieniveau is lager dan in de praktijk, omdat de onderzoekskassen waarin deze planten geteeld werden een veel lagere lichttransmissie hebben dan praktijkbedrijven (ca. 60% t.o.v. ca. 70%) en omdat er gedurende de teelt periodiek planten uit de kas verwijderd zijn vanwege destructieve oogsten. Beide zorgen er voor dat de productie in onze kassen lager was dan op een praktijkbedrijf.

De producties in de afdelingen met koeling van onderaf liggen ca. 12% hoger dan de productie in de open kas. Deze waarden komen overeen met de productiestijging die in de proef in 2008 gerealiseerd werd in de afdeling met 350 W/m² koeling van onderaf ten opzichte van de open kas. De producties in de afdelingen met koeling van bovenaf zijn 10% hoger dan in de open kas.

Tabel 4.1. Totale producties (in kg/m²) en de procentuele productiestijgingen ten opzichte van de open kas

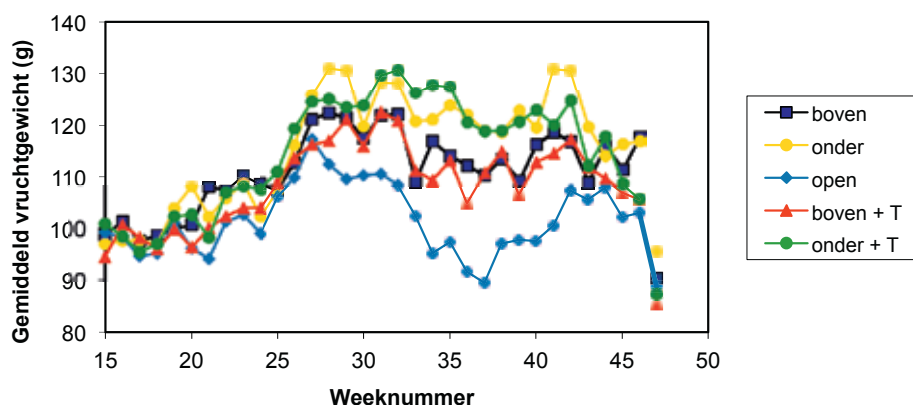
| Behandeling | Productie (kg/m ²) | Productiestijging t.o.v. open kas (%) |
|--|--------------------------------|---------------------------------------|
| Open kas | 57.5 | - |
| Koeling van onderaf | 65.1 | 13 |
| Koeling van bovenaf | 63.5 | 10 |
| Koeling van onderaf met lichtverhoging op de temperatuur | 63.9 | 11 |
| Koeling van bovenaf met lichtverhoging op de temperatuur | 63.2 | 10 |

Om goed te kunnen zien wat er gebeurt met de productie is in Figuur 4.10. het verschil in productie van de verschillende behandelingen ten opzichte van de open kas weergegeven. In de eerste weken dat de behandelingen zijn aangelegd zijn de verschillen in CO₂ concentraties nog beperkt. Vanaf week 14 zijn de verschillen in CO₂ concentratie zichtbaar, en bedragen ca. 100 ppm tussen de open kas en de geconditioneerde afdelingen (Figuur 3.10.). Vanaf week 20 worden de verschillen in CO₂ concentraties tussen de open kas en de geconditioneerde afdelingen groter, en in de weken 29 tot 40 zijn de verschillen in CO₂ concentraties groter dan 200 ppm. Deze verschillen in CO₂ concentraties zijn ook terug te zien in de verschillen in productie. Vooral in de weken 29 tot en met 39, wanneer de verschillen in CO₂ concentraties het hoogst zijn, zijn de productieverschillen van de geconditioneerde afdelingen met de open kas het grootst (Figuur 4.10.).



Figuur 4.10. Verloop van het productieverschil (kg per m²) van de verschillende behandelingen met de open kas (zie legenda) in de tijd. In week 52 (2008) zijn de tomaten geplant, in week 10 zijn de behandelingen begonnen.

De reden voor het productieverschil tussen de afdelingen met koeling van onderaf of bovenaf ligt in de verschillen in gemiddeld vruchtgewicht (Figuur 4.11.). Het gemiddeld vruchtgewicht van de vruchten geoogst uit de open kas was het laagst. De vruchten geoogst uit de twee afdelingen met koeling van bovenaf waren zwaarder, en de zwaarste vruchten werden geoogst uit de afdelingen met de koeling onder in de kas.



Figuur 4.11. Verloop van het gemiddeld vruchtgewicht van de verschillende behandelingen (zie legenda) in de tijd. In week 52 (2008) zijn de tomaten gepland, in week 10 zijn de behandelingen begonnen.

Gemiddeld over de hele proef blijkt ook dat het gemiddeld vruchtgewicht in de open kas het laagst was, en in de behandelingen met koeling van onderaf het hoogst (Tabel 4.2.).

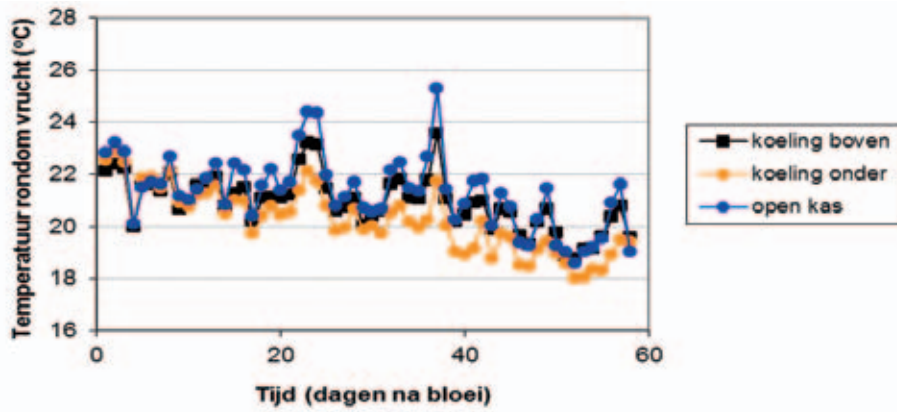
Tabel 4.2. Gemiddeld vruchtgewicht (g/vrucht) in de verschillende behandelingen

| Behandeling | Gemiddeld vruchtgewicht (g/vrucht) |
|--|------------------------------------|
| Open kas | 102 |
| Koeling van onderaf | 116 |
| Koeling van bovenaf | 113 |
| Koeling van onderaf met lichtverhoging op de temperatuur | 115 |
| Koeling van bovenaf met lichtverhoging op de temperatuur | 108 |

4.4 Verticale temperatuurgradiënt en vruchtdiameter

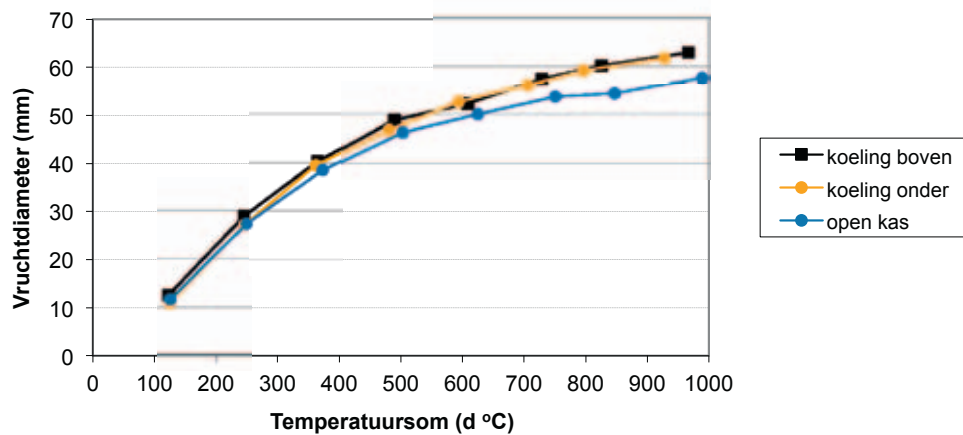
Om een nauwkeurig beeld te krijgen van de vruchtgroei onder invloed van de temperatuurgradiënt werd in de behandelingen “koeling onder”, “koeling boven” en de open kas de diameterontwikkeling van vruchten van zetting tot oogst gevolgd. Tegelijkertijd werd met ‘smart dust’ sensoren de luchttemperatuur rondom de vruchten gemeten. Deze metingen zijn 3 x gedaan tijdens de teelt (start op 18 mei, 14 juli en 3 augustus).

In Figuur 4.12. is de luchttemperatuur rondom de vruchten te zien gedurende de ontwikkeling van de vruchten in de tweede serie metingen. In het begin zitten de vruchten bovenin het gewas en is er nog geen verschil in temperatuur. Naarmate de vruchten langer ofwel lager aan de plant zitten (grotere temperatuursom gehad hebben), zijn de verschillen in temperatuur bij de verschillende behandelingen goed te zien. De vruchten in de behandeling met koeling onderin krijgen aan het einde van de groeiduur de laagste temperatuur.



Figuur 4.12. Verloop van de temperatuur rondom de vrucht in de behandelingen “koeling onder”, “koeling boven” en open kas in de tijd van bloei tot vruchttoogst (data van meetserie 2, 14 juli tot 9 september).

Wanneer de vruchtdiameter van serie 2 uitgezet wordt tegen de temperatuursom (basistemperatuur 4 °C), is te zien dat deze relatie voor de behandelingen met koeling onder en koeling boven dezelfde is (Figuur 4.13.). Omdat de temperatuur rondom de vruchten lager is naarmate de vruchten in de behandeling met koeling onderin lager aan de plant zitten, is de temperatuursom op die momenten ook lager, en daarmee ook de diameter. De relatie tussen temperatuursom en vruchtdiameter ligt anders voor de open kas. Dit heeft waarschijnlijk te maken met een lagere beschikbaarheid van assimilaten in de open kas, door de lagere CO₂ concentraties.



Figuur 4.13. Relatie tussen temperatuursom en vruchtdiameter voor de behandelingen “koeling onder”, “koeling boven” en open kas in de tijd van bloei tot vruchttoogst (data van meetserie 2, 14 juli tot 9 september).

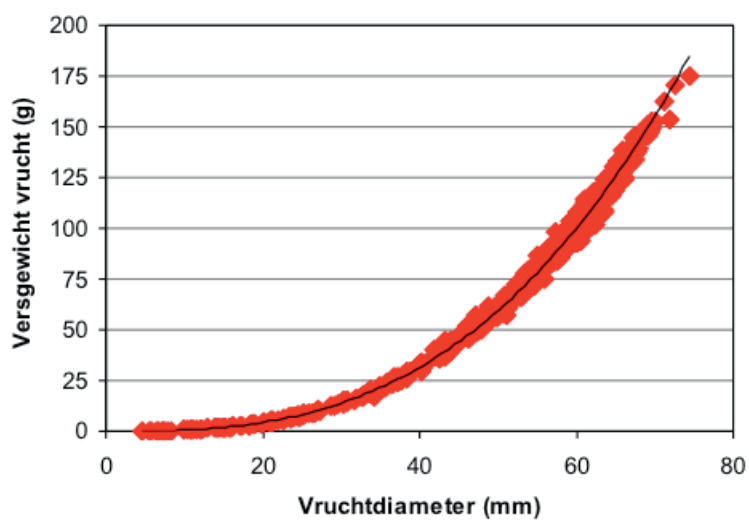
Wanneer de data gemiddeld worden over de drie meetseries, blijkt ook dat de relatie tussen temperatuursom en vruchtdiameter voor de tomaten afkomstig uit beide geconditioneerde kassen (koeling boven, koeling onder) nagenoeg gelijk is, en verschilt van deze relatie voor tomaten uit de open kas.

In de drie meetseries is de uitgroei duur van de vruchten gemeten als de tijdsduur tussen vruchtzetting en kleurstadium 4. Zoals in Tabel 4.3. te zien is, is de uitgroei duur in de open kas het kortst, wat te maken heeft met de gemiddeld iets hogere etmaaltemperatuur in de open kas in deze periode (zie Figuur 4.12.). De uitgroei duur van de vruchten is in de kas met onderkoeling gemiddeld 1.3 dagen langer dan in de kas met bovenkoeling (Tabel 4.3.).

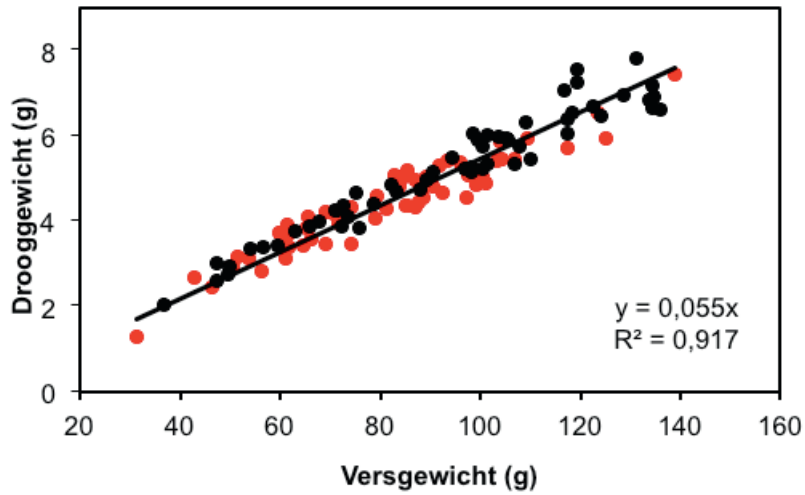
Tabel 4.3. Uitgroei duur van de vruchten, in dagen tussen vruchtzetting en kleurstadium 4.

| | Koeling onder | Koeling boven | Open kas |
|-----------|---------------|---------------|----------|
| Serie 1 | 50 | 49 | 47 |
| Serie 2 | 57 | 55 | 54 |
| Serie 3 | 59 | 58 | 56 |
| gemiddeld | 55.3 | 54.0 | 52.3 |

Om de vruchtdiameter te kunnen relateren aan het vers- en drooggewicht, zijn deze relaties aan een groot aantal vruchten bepaald (Figuren 4.14 en 4.15). Het percentage droge stof van de vruchten is de hellingshoek van de lijn in Figuur 4.15, namelijk 5.5%

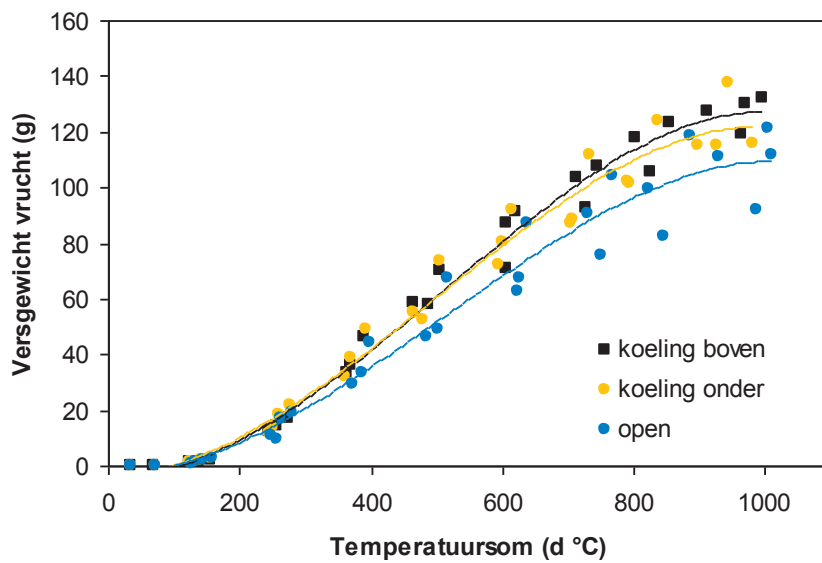


Figuur 4.14. Relatie tussen de vruchtdiameter en het versgewicht van Cappricia tomaten.



Figuur 4.15. Relatie tussen versgewicht en drooggewicht van Cappricia tomaten uit de behandelingen “koeling onder” (rood) en open kas (zwart).

Uit Figuur 4.16. blijkt dat de gemiddelde vruchtgewichten in de behandelingen met onder- en bovenkoeling nauwelijks van elkaar verschillen. Het vruchtgewicht van tomaten uit de open kas blijft bij eenzelfde temperatuursom achter bij de beide geconditioneerde afdelingen.

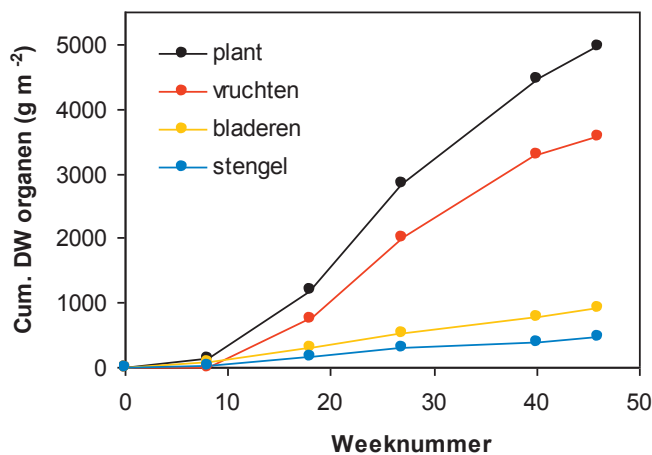


Figuur 4.16. Relatie tussen temperatuursom en versgewicht van de vruchten voor de behandelingen “koeling onder”, “koeling boven” en open kas in de tijd van bloei tot vruchtoogst gemiddeld over drie meetseries.

4.5 Destructieve metingen

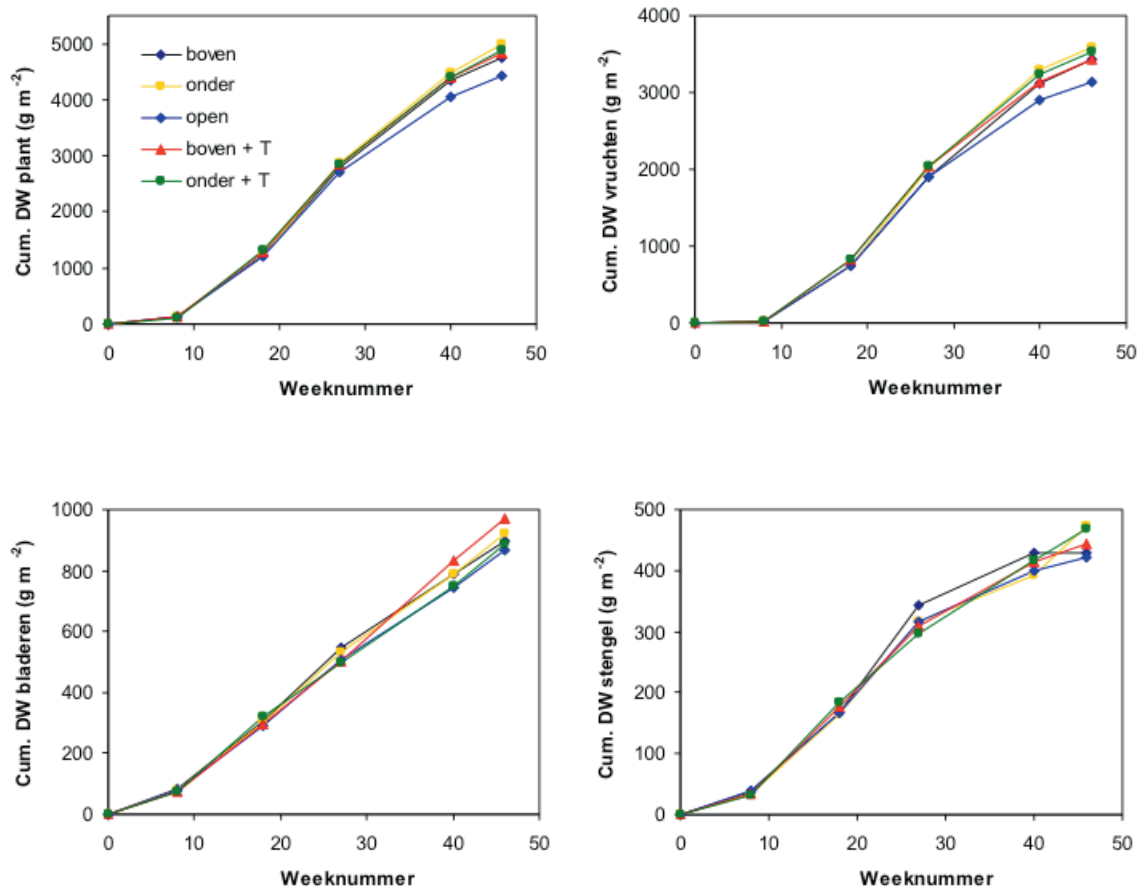
Op de plantdatum, bij de eind oogst, en op 4 tussenliggende momenten gedurende de teelt werd een aantal willekeurige planten uit de kas verwijderd en destructief geoogst. De planten werden ontleed in organen (bladeren, stengels, en vruchten), waarvan de vers- en drooggewichten werden bepaald. Van de bladeren werd het bladoppervlak bepaald, en uit het bladoppervlak en het droog bladgewicht werd het specifieke bladgewicht afgeleid. Dit laatste is een maat voor de dikte van de bladschijf. Uit de gewichtsverdeling over de organen werd afgeleid hoe de drogestofverdeling naar de organen was, waarbij de verdeling naar de vruchten erg belangrijk is. Door gewichten bij elkaar op te tellen (waarbij de gewichten van geoogste vruchten en geplukte bladeren werden meegeteld), werden de cumulatieve orgaangewichten, en het cumulatieve plantgewicht over de tijd berekend.

De cumulatieve orgaangewichten van de behandeling met onderkoeling is gegeven in Figuur 4.17, en voor alle behandelingen, uitgesplitst naar organen, in Figuur 4.18. Uit Figuur 4.17. blijkt dat voor de behandeling met onderkoeling (en de andere behandelingen laten in grote lijnen hetzelfde zien) de vruchten het grootste deel van het plantgewicht vormen (zie ook Figuur 4.19.). Bij een cumulatief drooggewicht van ongeveer 5000 g m^{-2} (of $50,000 \text{ kg drooggewicht ha}^{-1}$), dragen de vruchten ongeveer 3500 g m^{-2} bij, de bladeren ongeveer 1000 g m^{-2} , en de stengels ongeveer 500 g m^{-2} .



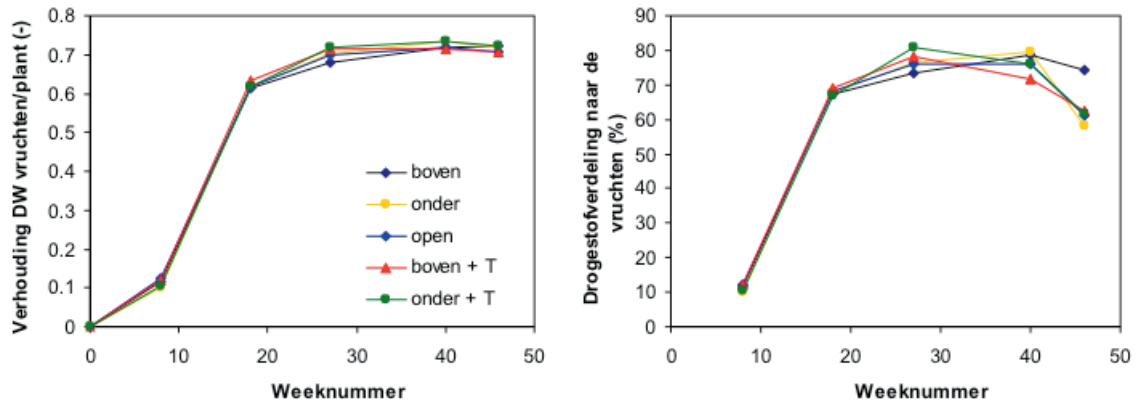
Figuur 4.17. Cumulatieve orgaangewichten voor de behandeling met onderkoeling.

De open behandeling blijft duidelijk achter bij de andere behandelingen voor wat betreft totale groei (Figuur 4.18.). Het betekent dat de groeiomstandigheden in de geconditioneerde afdelingen beter waren dan in de open behandeling, en dat er meer assimilaten zijn gevormd in de geconditioneerde afdelingen.



Figuur 4.18. Cumulatieve orgaangewichten voor de totale plant, vruchten, bladeren en stengels voor alle behandelingen.

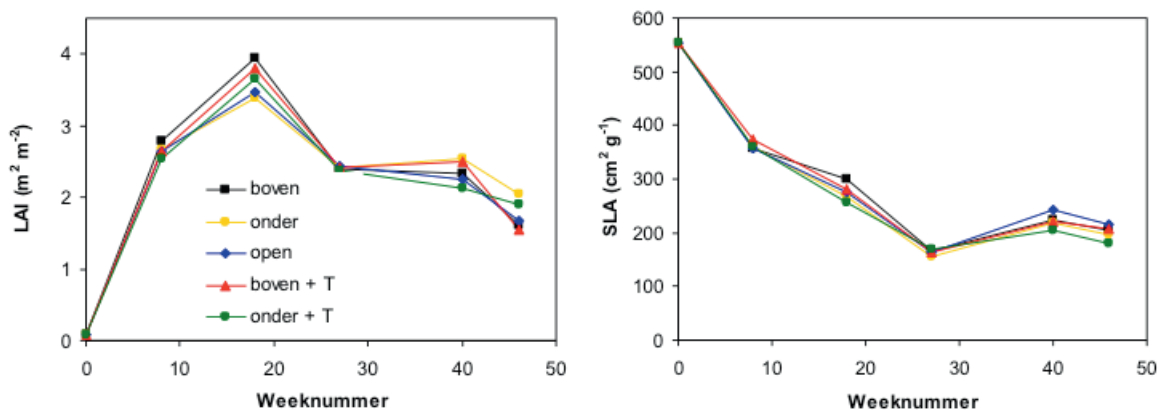
Uit Figuur 4.19. (linker figuur) is te zien dat het aandeel vruchtgewicht op het totaal plantgewicht snel toeneemt. Op 20 weken na planten is het aandeel al 60%, om enkele weken later ongeveer 70% te worden en dit ongeveer te blijven. Er kan daarnaast ook gekeken worden op welke wijze de assimilaten zich in het tijdstraject voorafgaand aan de bepaalde oogst hebben verdeeld. Dan worden kleine verschillen zichtbaar. De verdeling piekt ook snel naar 70%-80%, maar neemt aan het einde van de teelt toch weer af tot 60-75%. De behandeling met bovenkoeling houdt de drogestofverdeling naar de vruchten het beste op peil – al laat deze behandeling aan het begin relatief lage waarden zien. De open behandeling had de laagste totale drogestoftoename en totale vruchttoename, maar heeft wel eenzelfde drogestofverdeling naar de vruchten als de geconditioneerde afdelingen. Het verschil in vruchtproductie is dus het gevolg van assimilatenaanmaak, niet het gevolg van de assimilatenverdeling.



Figuur 4.19. Verhouding tussen drogestofgewichten van de vruchten en de totale plant (links), en de verdeling van de drogestof naar de vruchten gedurende het voorafgaande tijdstraject (rechts).

De bladbedekkingsgraad (leaf area index, LAI) geeft aan hoeveel m^2 blad zich er bevindt boven een m^2 bodem. De LAI is van directe invloed op de hoeveelheid onderschept licht en daarmee de fotosynthesesnelheid van het gewas, en op de verdamping van het gewas. Bij een LAI van $3 m^2 m^{-2}$, wordt ca. 95% van het licht door het gewas onderschept. Te veel LAI is ook niet goed, omdat dan onderin het gewas er zeer weinig licht kan zijn en het blad niet bijdraagt aan de fotosynthese. Het specifieke bladoppervlak (specific leaf area, SLA) is de inverse van de bladdikte en kan worden afgeleid uit het bladoppervlak en het bladgewicht.

Het algemene verloop van de LAI en de SLA waren voor alle behandelingen hetzelfde (Figuur 4.20.). De LAI van de twee behandelingen met bovenkoeling lieten de hoogste piek zien, maar hadden aan het einde van het seizoen de laagste LAI. Er moet goed worden bedacht dat dit niet alleen het gevolg hoeft te zijn van verschillen in gewasgroei; ook het bladplukregime kan voor wat variatie zorgen. De SLA vertoonde geen noemenswaardige variatie tussen de behandelingen. Met andere woorden, de bladstrekking tussen de behandelingen verschilde niet.



Figuur 4.20. De bladbedekkingsgraad (leaf area index, LAI) en het specifieke bladoppervlak (specific leaf area, SLA) in het verloop van de tijd.

4.6 Samenvatting en conclusies gewasgroei

Concluderend kan over de groei en ontwikkeling van tomaten onder invloed van verschillende verticale temperatuurgradiënten en temperatuurstrategieën gesteld worden dat een grotere verticale temperatuurgradiënt zorgt voor een hoger gemiddeld vruchtgewicht omdat vruchten net iets langer aan de plant blijven, met als gevolg een iets hogere productie (ca. 1 kg/m² in vergelijking tot bovenkoeling). Een sterkere lichtverhoging op de temperatuur leidt op zonnige dagen tot een hogere etmaaltemperatuur, en daarmee een iets hogere trosafplitsingsnelheid. Het heeft echter geen effect op de productie. Dit biedt wel de mogelijkheid te volstaan met een lagere koelcapaciteit, en daarmee investeringskosten van het systeem te verminderen.

De hogere productie in een geconditioneerde kas in vergelijking tot een open kas wordt veroorzaakt door een grotere assimilatenaanmaak (door gemiddeld hogere CO₂ concentraties), niet door de relatieve verdeling van de assimilaten. In hoofdstuk 5 wordt hier verder op in gegaan.

5 Effect van verticale temperatuurgradiënt op de assimilatenverdeling

5.1 Inleiding

Doel van deze studie was het vaststellen van mogelijke effecten van de plaats van de koeling in de kas, bovenin of onderin, op de assimilatenstroom en -verdeling in een vruchtproducerend tomatengewas. De routes van de fotosynthese producten van een specifiek 'source' (gelabeld) blad naar de diverse 'sinks' aan de plant kunnen in kaart gebracht worden met behulp van ingebouwde merkers, in dit geval het stabiele isotoop ^{13}C (Svejcar *et al.* 1990; De Visser *et al.* 1997).

5.2 Metingen

De export en assimilatenverdeling vanuit een actief fotosynthetiserend blad, een zogenaamd 'source' blad bovenin een tomatengewas, is onderzocht door middel van 'On-site' ^{13}C -labeling op 1 en 2 juli 2009 in twee behandelingen, namelijk onderkoeling en bovenkoeling (onder+T en boven+T). In totaal zijn hierbij 8 source bladeren (aan 8 planten) gelabeld in twee kassen met onderkoeling (onder+T) en bovenkoeling (boven+T), volgens het schema in Tabel 5.1.

Tabel 5.1. Locaties en tijdstippen van On-site ^{13}C -labeling van tomatenblad in juli 2009.

| Datum | Afdeling | Locatie koeling | Plantnr. | Start ^{13}C toediening | Einde labeling | Opmerkingen |
|-------------|----------|-----------------|----------|----------------------------------|----------------|---|
| 1 juli 2009 | 8.07 | Boven+T | C9 | 11:35 | 14:00 | In eerste instantie beschaduwning door slurven, volle zon |
| 1 juli 2009 | 8.07 | Boven+T | K5 | 12:15 | 13:30 | Volle zon |
| 1 juli 2009 | 8.08 | Onder+T | C10 | 14:25 | 15:25 | Volle zon |
| 1 juli 2009 | 8.08 | Onder+T | K6 | 14:30 | 15:30 | Volle zon |
| 2 juli 2009 | 8.08 | Onder+T | K21 | 11:20 | 12:25 | Volle zon, af en toe een beschaduwd blad |
| 2 juli 2009 | 8.08 | Onder+T | E4 | 11:35 | 12:35 | Volle zon, één gebroken blaadje |
| 2 juli 2009 | 8.07 | Boven+T | E4 | 13:25 | 14:30 | Af en toe bewolkt |
| 2 juli 2009 | 8.07 | Boven+T | K20 | 13:30 | 14:35 | Af en toe bewolkt |

Rond het midden van de dag, tussen 11 en 15 uur (zomertijd) zijn vrijstaande bladeren bovenin het gewas gedurende 2 uur geïncubeerd ('Pulse-labeling', Figuren 5.1 en 5.2), waarvan één tot anderhalf uur met $^{13}\text{CO}_2$ (99 atoom %; Isotec, Miamisburg, OH, USA) in een hoeveelheid die voldoende was voor - eerder berekende - onbeperkte fotosynthese gedurende 2.5 - 3 uur, aan 2 planten per kas op 2 opeenvolgende dagen. In het totaal werd zo aan 4 planten per behandeling gemeten. De volgorde van labellen werd op de dagen gewisseld om de invloed van de tijd van de dag op eventuele verschillen tussen de behandelingen te minimaliseren. De volgende dag (na een 'Chase' periode van ca. 24 uur zonder incubatie van source blad) zijn de planten destructief geoogst en opgedeeld in verschillende organen (zie legenda's bij figuren in hoofdstuk 5).



Figuur 5.1. Labelling van tomatenblad met $^{13}\text{CO}_2$.



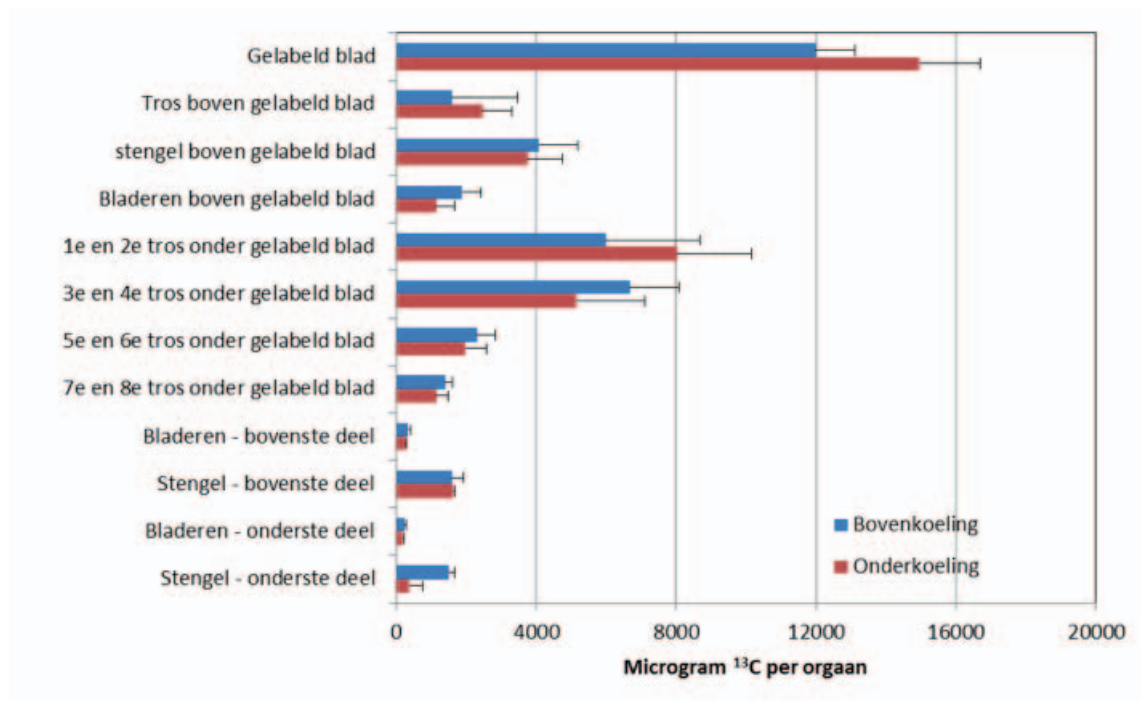
Figuur 5.3. 'On-site' labelling van tomatenblad met de stabiele isotoop ^{13}C in de vorm van $^{13}\text{CO}_2$.

Na het drogen en wegen van de verschillende organen, werden ze tot fijn poeder gemalen. Hiervan werden monsters van ca. 2 mg geanalyseerd op $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio (c.q. delta ^{13}C) door middel van een IRMS (Isotope ratio mass spectrometry) bij Wageningen UR. Vervolgens zijn uit deze metingen afgeleide parameters, zoals de ^{13}C hoeveelheid per plantendeel, de fractie ^{13}C geëxporteerd en het % van de export (per orgaan) door het source blad berekend volgens methoden in de literatuur (bijvoorbeeld Svejcar *et al.* 1990; Deleens *et al.* 1994; Schapendonk *et al.* 1997; De Visser *et al.* 1997ab).

5.3 Resultaten

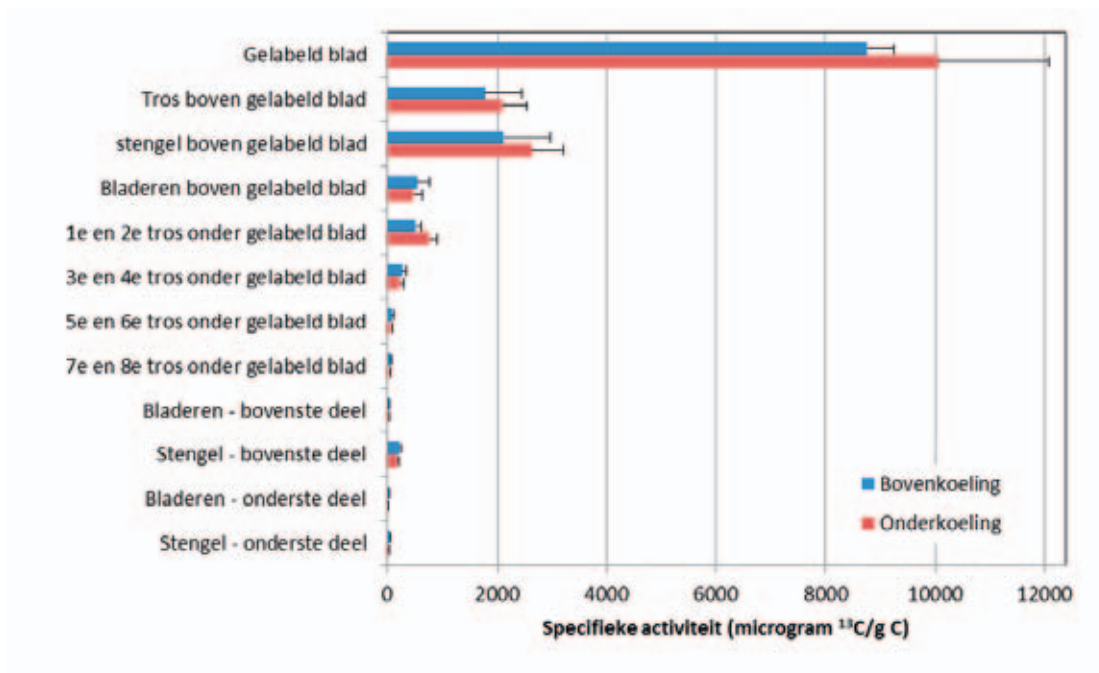
Rond de middag werden bladeren bovenin het gewas gelabeld met $^{13}\text{CO}_2$ gedurende ongeveer anderhalf uur. In de periode daarna werden de assimilaten die uit de ^{13}C gevormd werden, uit het blad geëxporteerd naar de verschillende plantendelen. Door 24 uur na het labelen de ^{13}C gehalten in de verschillende plantendelen te meten, is na te gaan welke organen de sterkste 'sinks' voor assimilaten zijn, en of dit beïnvloed wordt door de locatie van de koeling (onderkoeling versus bovenkoeling).

Uit de metingen blijkt dat de hoeveelheid ^{13}C 24 uur na het labelen het hoogst is in het gelabelde blad (Figuur 5.4.). Verder is er veel ^{13}C te vinden in de trossen direct onder het gelabelde blad, en de stengel en (jonge) tros boven het gelabelde blad. Naarmate de afstand tot het gelabelde blad groter is, is de hoeveelheid ^{13}C in de organen kleiner.

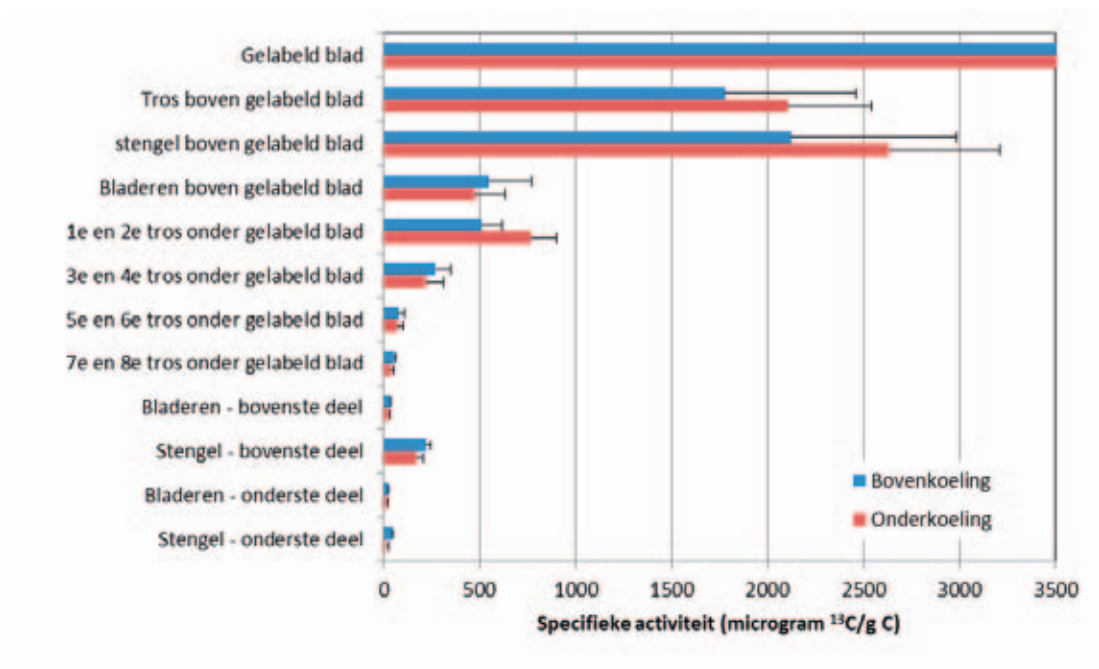


Figuur 5.4. Totale hoeveelheid ^{13}C per planteorgaan in de twee behandelingen met onderkoeling en bovenkoeling, 24 uur na een 'pulse' labeling van 1 tot 1½ uur met $^{13}\text{CO}_2$.

De specifieke activiteit van een orgaan is te berekenen door het gehalte aan ^{13}C per gram drooggewicht te bepalen. Dit is een maat voor de hoeveelheid ^{13}C die de afgelopen 24 uur per g drooggewicht is geïmporteerd vanuit het gelabelde blad. Uit deze berekeningen blijkt dat de jonge tros boven het gelabelde blad en het groeiende deel van de stengel boven het gelabelde blad in absolute zin de meeste assimilaten hebben geïmporteerd vanuit het gelabelde blad (Figuur 5.5A, B).



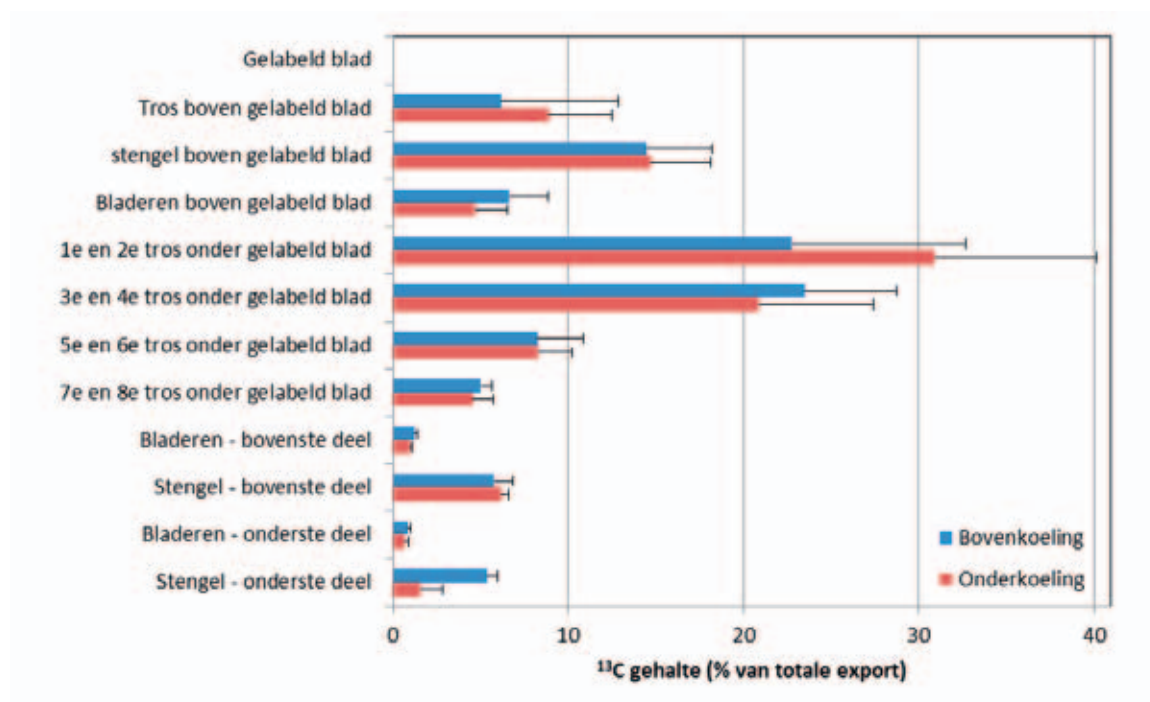
Figuur 5.5A. Specifieke activiteit van ^{13}C (concentratie) in plantendelen in de behandelingen met onderkoeling en bovenkoeling, 24 uur na een 1-uurs labeling met $^{13}\text{CO}_2$. Voor geëxpandeerde x-as, zie Fig. 5.5B.



Figuur 5.5B. Specifieke activiteit van ^{13}C (concentratie) in plantendelen in de behandelingen met onderkoeling en bovenkoeling, 24 uur na een 1-uurs labeling met $^{13}\text{CO}_2$.

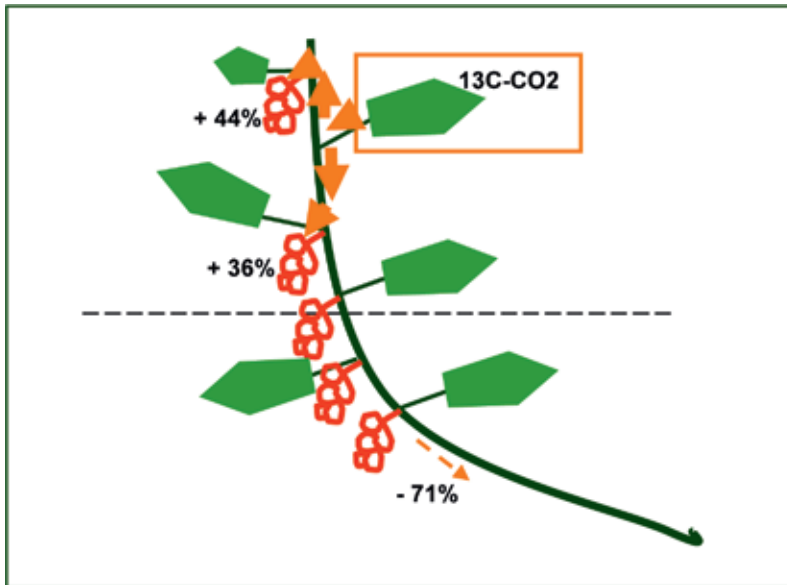
In de loop van 24 uur worden de assimilaten die in het blad gevormd zijn uit de ^{13}C door de plant getransporteerd. Daarvan wordt ca. 40 – 50% in de dissimilatie terug omgezet in $^{13}\text{CO}_2$ dat via de huidmondjes de plant verlaat. Van de assimilaten die na 24 uur nog in de plant zitten, zit nog ca. 30-36% in het gelabelde blad (Figuur 5.4; 12-14 mg ^{13}C in het gelabelde blad op een totaal van ca. 40 mg ^{13}C per plant). De rest van de assimilaten in de plant zijn door het gelabelde blad geëxporteerd naar de andere plantdelen. De export is waarschijnlijk nog hoger, omdat export naar wortels mogelijk een rol speelt, maar niet is gemeten.

Veruit de meeste assimilaten van het source blad worden teruggevonden in de grootste trossen, dicht bij het gelabelde blad (1^{e} – 4^{e} tros; Figuur 5.6.). Kleine (<10%) fracties gaan naar vruchten lager aan de hoofdstengel en naar de overige plantdelen.

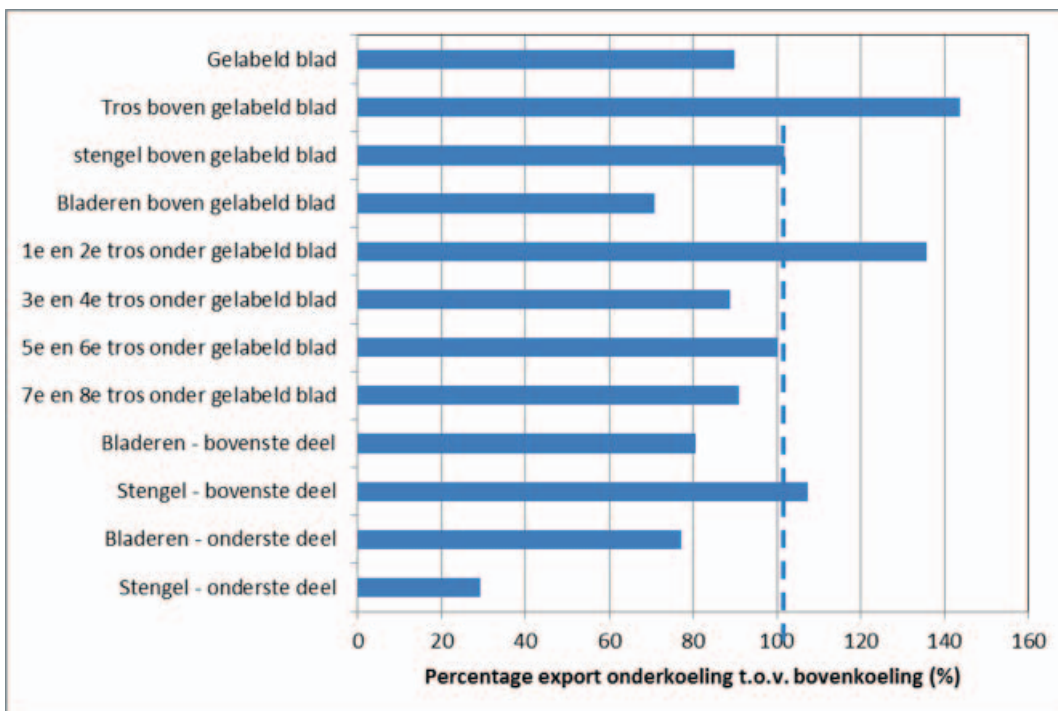


Figuur 5.6. Relatieve ^{13}C gehalte per plantendeel (als % van de export vanuit het gelabelde blad) in de twee behandelingen onderkoeling en bovenkoeling, 24 uur na een 1-uurs labeling met $^{13}\text{CO}_2$.

In Figuur 5.7. staat weergegeven welke sinks (vruchten, jonge groeiend blad en stengel) relatief het sterkst profiteren van de onderkoeling (vette pijlen). Deze jonge bladeren en de stengeltop bevatten ook de meeste ^{13}C als percentage van alle C in hun biomassa, ofwel vertonen een hoge relatieve groei en relatieve C-import. Het grootste effect is te zien in export naar het onderste deel van de stengel, die sterk geremd is (-71%) door de onderkoeling in vergelijking met bovenkoeling. Daarnaast is de export naar trossen direct bij het source blad (erboven en 1^{e} onder) toegenomen met respectievelijk +44 en +36% bij onderkoeling ten opzichte van bovenkoeling (Figuur 5.8.).



Figuur 5.7. Schematische weergave van effecten van locatie van koeling op assimilaten- export en -verdeling bij tomaat.



Figuur 5.8. Effect van plaats van koeling op de verdeling van assimilaten vanuit het gelabelde blad bij tomaat gemeten 24 uur na een 2-uurs verrijking (labeling) met $^{13}\text{CO}_2$, en voor zover verschillend tussen onder- en bovenkoeling.

5.4 Samenvatting en conclusies assimilatenverdeling

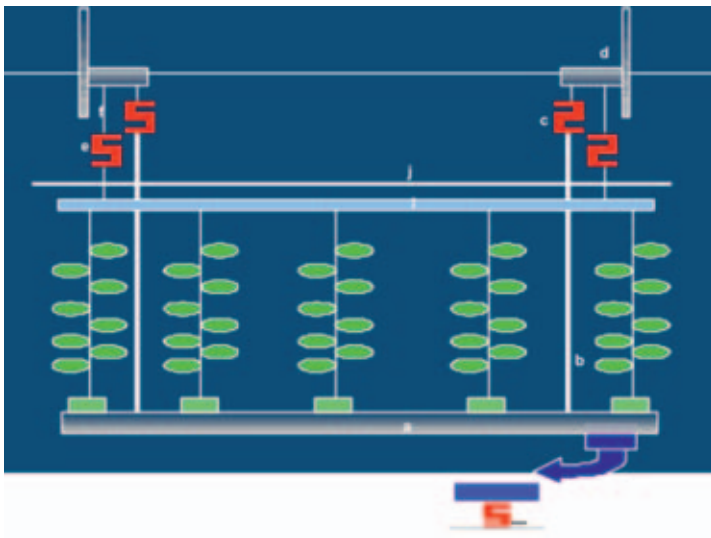
In deze proef werd aan een van de bovenste bladeren van planten uit de kas met onderkoeling en de kas met bovenkoeling $^{13}\text{CO}_2$ gegeven, dat door de planten werd opgenomen en omgezet in met ^{13}C gelabelde suikers. De verdeling van deze ^{13}C in de plant kan na 24 uur gemeten worden. Uit de metingen blijkt dat de ^{13}C met name naar de snelgroeïende plantendelen gaat die in de buurt van het gelabelde blad zitten, zoals de trossen boven en direct onder het gelabelde blad en de stengel en jonge bladeren boven het gelabelde blad. Er gaat maar weinig ^{13}C naar de trossen die onder in het gewas hangen, omdat die maar weinig meer groeien (in diameter en gewicht toenemen) en dus maar weinig assimilaten importeren. Uit deze resultaten is niet op te maken welk deel van de assimilaten de verschillende organen importeren afkomstig is van het gelabelde blad. Mogelijk importeren 'sinks' onderin het gewas meer assimilaten vanuit lager gelegen bladeren, en 'sinks' bovenin het gewas vanuit hoger gelegen bladeren, zoals ook gesteld wordt in de "nearest sink" hypothese. In verschillende onderzoeken (Tanaka & Fujita, 1974; Slack & Calvert, 1977) wordt er van uit gegaan dat assimilaten voor een sink (bijvoorbeeld een vrucht) voornamelijk afkomstig zijn van de meest nabijgelegen fotosynthetisch actieve bladeren ("source").

Deze studie is gedaan om te laten zien of er verschil was in assimilatenverdeling in planten bij onderkoeling (dus met een verticale temperatuurgradiënt) en planten bij bovenkoeling (nauwelijks gradiënt). Uit de destructieve oogsten bleek er geen aantoonbaar verschil te zijn (zie hoofdstuk 4). Door te labelen met ^{13}C is de verdeling van de assimilaten vanuit het gelabelde blad naar de andere plantendelen goed te volgen. Bij de planten in de kas met onderkoeling worden relatief meer assimilaten teruggevonden in de bovenste jonge trossen. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door het feit dat het onderste deel van de plant bij lagere temperaturen staat dan in de behandeling met bovenkoeling. In Figuur 5.5. is te zien dat er minder assimilaten in de trossen 3-8 en in de bladeren en stengel in het onderste deel van het gewas terecht komen. Er zijn dan dus relatief meer assimilaten beschikbaar voor de top van de plant in de afdelingen met onderkoeling, ondanks het feit dat de top van de plant in beide behandelingen bij een vergelijkbare temperatuur staat.

6 Wateropname en verdamping

6.1 Metingen

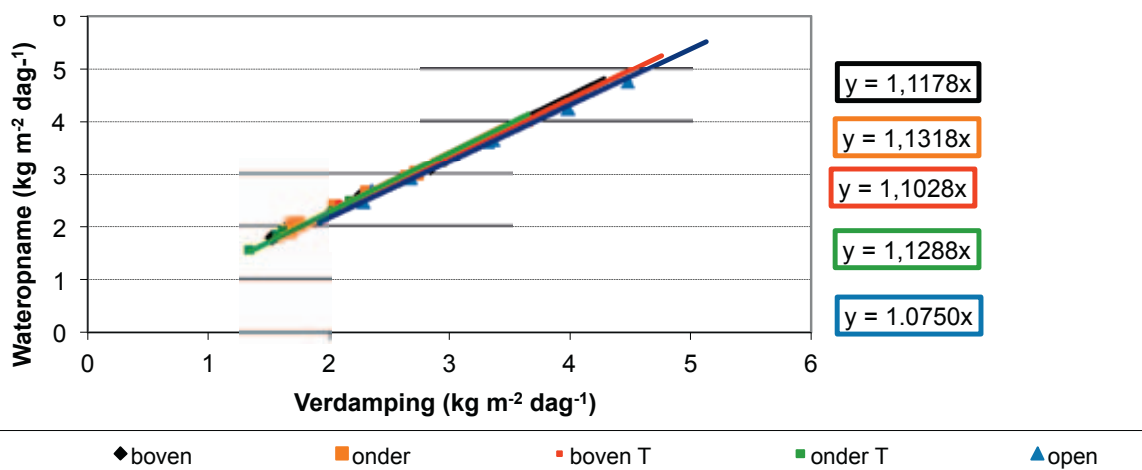
Een eenvoudige weeggoot voor tomaat bestaat in deze proef uit een goot van 2.4 meter, een drainageopvangbak en twee gewasbalken van 5.0 meter. Voor het meten van het gewicht worden krachtopnemers gebruikt (Figuur 6.1. c en e) en deze weeggegevens worden per halve minuut weggeschreven in een databestand. De goot onderin het systeem meet het matgewicht. Met deze gegevens en de gegevens van de opvangbak van de drain (Figuur 6.1. g) kan de wateropname bepaald worden. De gewasbalk boven in het systeem meet het gewicht van de planten omdat ze los hangen. Door van de wateropname (gemeten met de goot en drainopvangbak) het versgewicht van de planten (gemeten met de weegbalk) af te trekken, wordt de verdamping berekend. Verdamping is berekend per uur en per dag.



Figuur 6.1. Langsdoorsnede van een weeggoot met een fictief aantal planten. a = weeggoot, b = kabel waaraan de goot hangt, c = krachtopnemer waaraan de goot hangt, d = dragende kasdelen, e = krachtopnemer waaraan de gewasbalk hangt, f = kabel waaraan e hangt, g = drainopvangbak, h = krachtopnemer waarop de drainopvangbak staat, i = gewasbalk, j = doorlopende gewasdraad van de planten buiten het systeem (De Graaf et al., 2004).

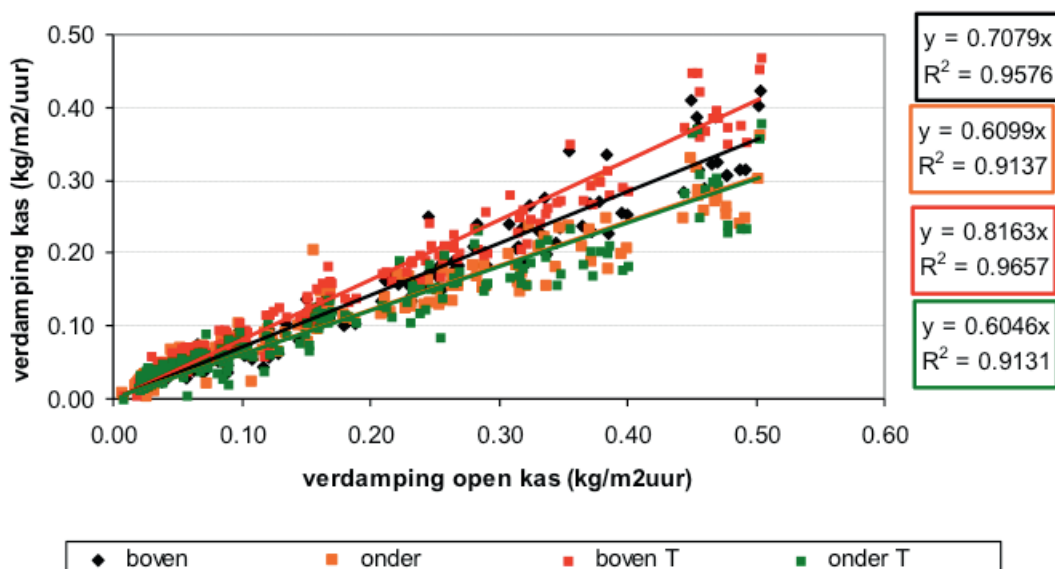
6.2 Resultaten - Gewasverdamping

In Figuur 6.2. is de verdamping van de dagen 4, 12, 14-18, 20 juli en 9 augustus 2009 in de 5 kassen uitgezet tegen het watergebruik. Voor deze dagen is tussen de 7.5 en 13% van het watergebruik niet verdampt door de plant, maar gebruikt voor de groei. Dit was in de open kas 7.5%, in de kassen met bovenkoeling 10 – 11% en in de kassen met onderkoeling 12 – 13% (Figuur 6.2.). De open kas heeft in deze periode dus het meeste water verdampt en de twee kassen met koeling van onderen het minst.

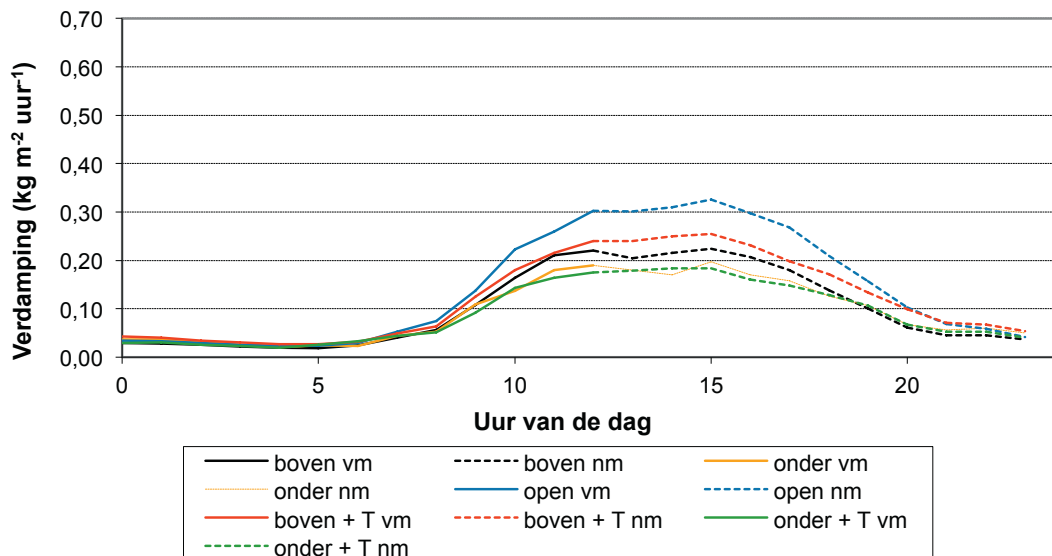


Figuur 6.2. De verdamping in de 5 kassen uitgezet tegen de wateropname gemeten door de weeggoten.

Om de gemiddelde verdamping per uur in de vijf kassen te bepalen zijn data van de weeggoten gebruikt van de data 4, 12, 14-18, 20 juli en 9 augustus 2009 en uitgezet tegen de verdamping per uur in de open kas (Figuur 6.3.). Ook hier zijn het de twee kassen met bovenkoeling die meer verdampen dan de kassen met onderkoeling. De afdeling met bovenkoeling met temperatuurverhoging (boven+T) verdampt meer dan de afdeling met bovenkoeling. De verdamping in de afdelingen met onderkoeling verschilde nauwelijks van elkaar.



Figuur 6.3. Urwaardes van de verdamping van de kassen uitgezet tegen de verdamping in de open kas.



Figuur 6.4. Gemiddelde verdamping van 9 dagen in de zomer.

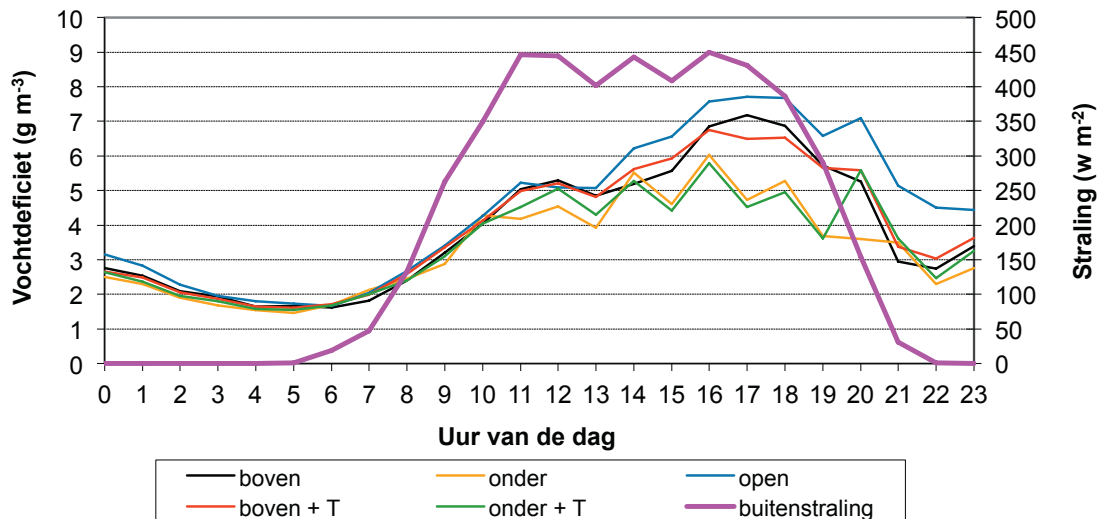
Om erachter te komen wat de belangrijkste oorzaken zijn van de verschillende verdampingspatronen in de kassen is de verdamping op 9 dagen in de zomer (4, 12, 14-18, 20 juli en 9 augustus 2009) (Figuur 6.4.) door middel van een regressie analyse vergeleken met de instraling buiten de kas, de temperatuur in de kas en het vochtdeficiet. In alle gevallen is het significantieniveau zeer hoog (zeer lage P-waardes) maar de beste verklaring wordt gegeven door een combinatie van de straling buiten de kas en het vochtdeficiet in de kas (Tabel 6.1.). De gefitte lijnen hebben R² waardes tussen de 0.95 en 0.99.

Tabel 6.1. Regressie coëfficiënten van straling en VD op verdamping voor de functie: $\text{verdamping} = a \times \text{instraling} + b \times \text{VD}$

| Behandeling | Coëfficiënt a verdamping met instraling | Coëfficiënt b verdamping met VD van de kas |
|---------------|---|--|
| Boven | 0.00033 | 0.0096 |
| Onder | 0.00022 | 0.0132 |
| Open | 0.00043 | 0.0101 |
| Boven + temp. | 0.00031 | 0.0138 |
| Onder + temp. | 0.00026 | 0.0110 |

De straling heeft het meeste effect op de verdamping in de open kas. De regressiecoëfficiënt voor de relatie tussen verdamping en vochtdeficiet is het hoogst voor de kassen met bovenkoeling met temperatuurverhoging (boven+T) en met onderkoeling. De reden hiervoor is niet direct duidelijk. Om dit beter te begrijpen is extra informatie uitgewerkt: i) Het vochtdeficiet op de dagen die gebruikt zijn voor deze analyse (Figuur 6.5.) en ii) de regressiecoëfficiënten van de effecten van straling en VD op verdamping in de kas in de ochtend (tot 13 uur) en de middag (Tabellen 6.2 en 6.3).

In de late middag tot 23 uur is het vochtdeficiet hoger in de open kas, de lucht is dus droger. In de geconditioneerde kassen is de lucht 's middags vochtiger dan in de open kas. Onderkoeling geeft een grillig verloop van het vochtdeficiet in de middag (Figuur 6.5.), maar de verdamping in deze kassen lijkt om 12 uur een maximum bereikt te hebben (Figuur 6.4.). Hetzelfde geldt voor kassen met bovenkoeling. Om 12 uur is ook in die behandelingen de maximale verdamping bereikt. Na de middag neemt in de open kas de verdamping nog toe (Figuur 6.4.), terwijl de overige kassen op zonnige dagen nauwelijks een toename in verdamping vertonen na 12 uur. De verdamping lijkt niet te reageren op het lage vochniveau in de kas aan het eind van de middag maar voornamelijk op de instraling.



Figuur 6.5. Gemiddeld vochtdeficiet (VD) en straling voor 9 dagen in de zomer.

De regressiecoëfficiënten voor de straling op de verdamping blijven redelijk gelijk voor de ochtend en de middag (Tabellen 6.2 en 6.3). In de ochtend is het effect van het vochtdeficiet groter dan in de middag maar dat komt omdat in de ochtend het vochtdeficiet gelijk oploopt met de straling. In de middag varieert het vochtdeficiet veel ten opzicht van de instraling. De regressiecoëfficiënten van de effecten van vochtdeficiet op straling zijn in de middag lager.

Tabel 6.2. Regressie coëfficiënten van straling en VD op verdamping in de ochtend voor de functie: $\text{verdamping} = a \times \text{instraling} + b \times \text{VD}$

| Behandeling | Coëfficiënt a verdamping met instraling | Coëfficiënt b verdamping met VD van de kas |
|---------------|---|--|
| Boven | 0.000304 | 0.0150 |
| Onder | 0.000238 | 0.0141 |
| Open | 0.000430 | 0.0117 |
| Boven + temp. | 0.000348 | 0.0151 |
| Onder + temp. | 0.000288 | 0.0118 |

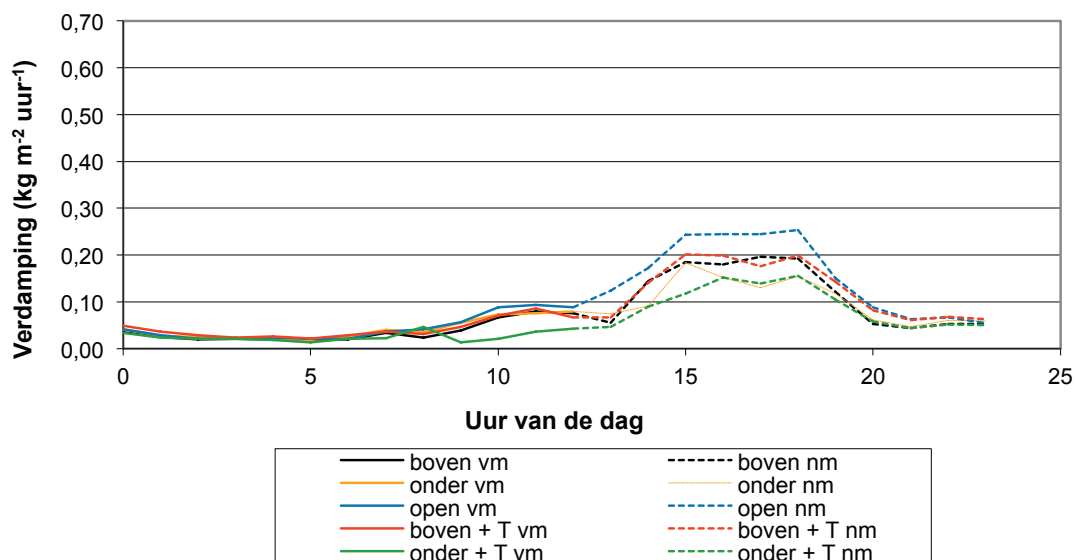
Tabel 6.3. Regressie coëfficiënten van straling en VD op verdamping in de middag voor de functie: $\text{verdamping} = a \times \text{instraling} + b \times \text{VD}$

| Behandeling | Coëfficiënt a verdamping met instraling | Coëfficiënt b verdamping met VD van de kas |
|---------------|---|--|
| Boven | 0.000358 | 0.007135 |
| Onder | 0.000243 | 0.011386 |
| Open | 0.000468 | 0.008805 |
| Boven + temp. | 0.000337 | 0.012074 |
| Onder + temp. | 0.000280 | 0.008739 |

6.2.1 Verdamping op enkele voorbeelddagen

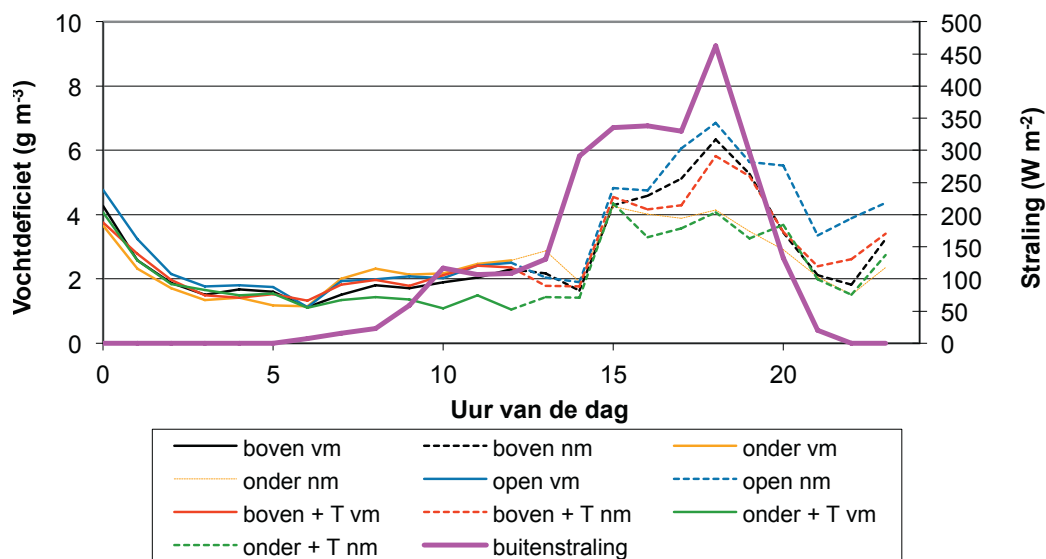
Voor een aantal dagen in juli waarin de stralingssom van dag tot dag sterk schommelde is de verdamping uitgerekend op uurbasis. De verdamping loopt in de pas met de instraling op een dag met een lage stralingssom van 625 J cm^{-2} op 18 juli (Figuur 6.6.) alsook op een dag met een hoge stralingssom van 2393 J cm^{-2} op 4 juli (Figuur 6.8.). De verschillen in verdamping tussen de behandelingen bij dezelfde instraling worden deels bepaald door het vochtdeficiet in de kas. In Bijlagen V tot en met VII zijn in figuren het verloop van de temperatuur en het vochtdeficiet gedurende de dag weergegeven voor 12 juli ($637 \text{ J cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$), 14 juli ($1274 \text{ J cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$) en 15 juli ($1785 \text{ J cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

6.2.1.1 18 juli



Figuur 6.6. Verdamping op 18 juli (stralingssom $625 \text{ J cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Vm is voormiddag, nm is namiddag.

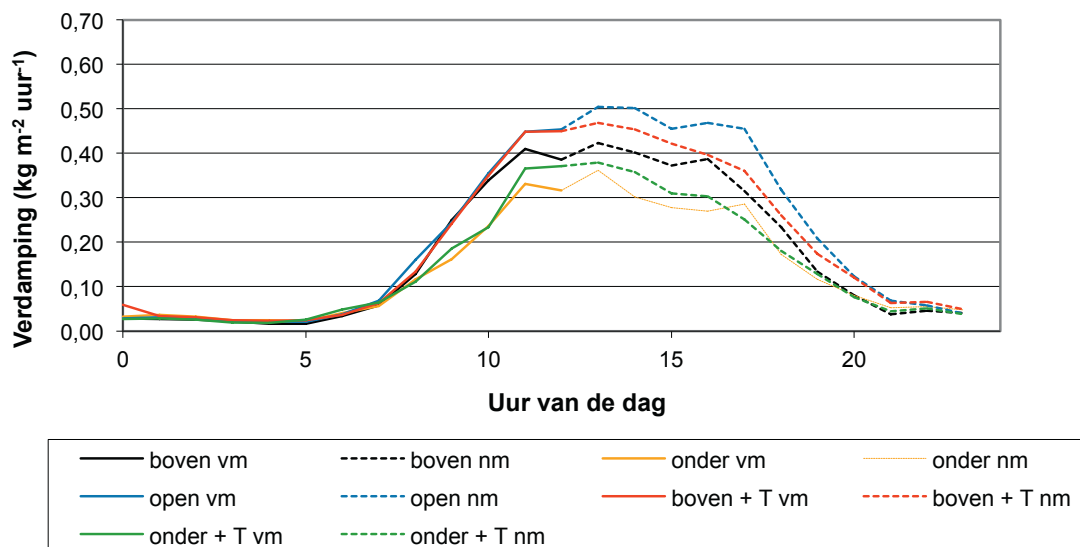
Op 18 juli ligt de verdamping op een laag niveau (Figuur 6.6.). In de middag is er een behoorlijk piek in de straling (Figuur 6.7.) en de verdamping reageert hierop. Echter de verdamping blijft op het niveau van 15 uur ondanks veel instraling aan het eind van de middag. Het vochtdeficiet is in de kassen met onderkoeling behoorlijk lager dan in de kassen met bovenkoeling (Figuur 6.7.), hetgeen zich ook vertaalt in een lagere verdamping (Figuur 6.6.).



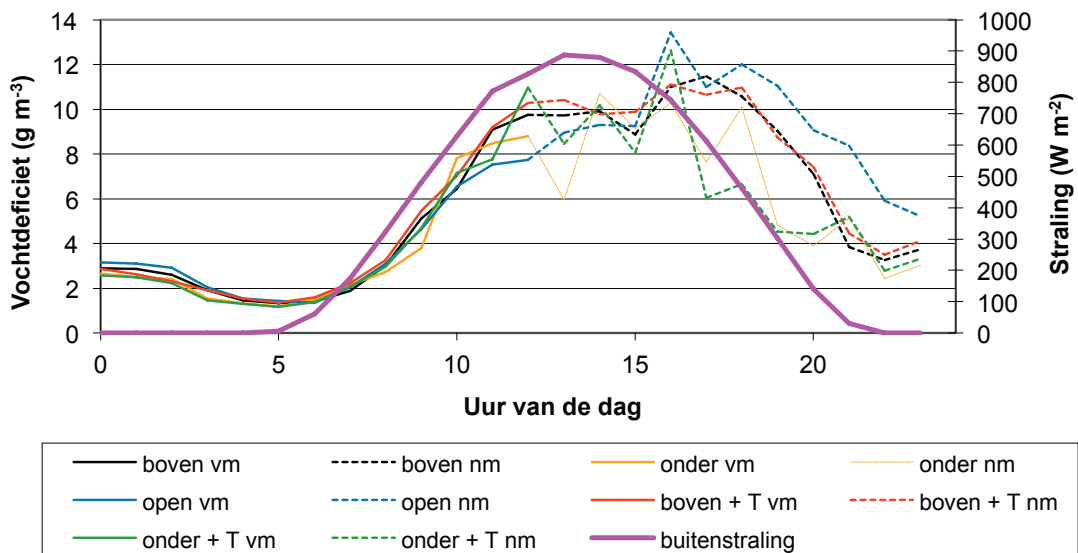
Figuur 6.7. Vochtdeficiet in de kas en straling buiten de kas op 18 juli (stralingssom $625 \text{ J cm}^2 \text{ d}^{-1}$). Vm is voormiddag, nm is namiddag.

6.2.1.2 4 juli

Op 4 juli is de stralingssom 2393 J cm^2 , tegen 625 J cm^2 op 18 juli. De maximale verdamping is op 4 juli twee keer zo hoog als op 18 juli (Figuur 6.8.). Op 4 juli is de buitenstraling mooi verdeeld over de dag (Figuur 6.9.) en werd er in de geconditioneerde afdelingen veel gekoeld. In de periode 10 tot 15 uur is er in de kassen met bovenkoeling en de open kas weinig verschil in vochtdeficiet (Figuur 6.9.). Echter de verdamping in de open kas ligt hoger (Figuur 6.8.) dan in de geconditioneerde afdelingen. In de namiddag zijn de open kas en de twee kassen met bovenkoeling droger dan de kassen met onderkoeling. De verdamping vertoont om 12 uur een maximum in de geconditioneerde kassen en daarna neemt het af hoewel de instraling nog hoog blijft.

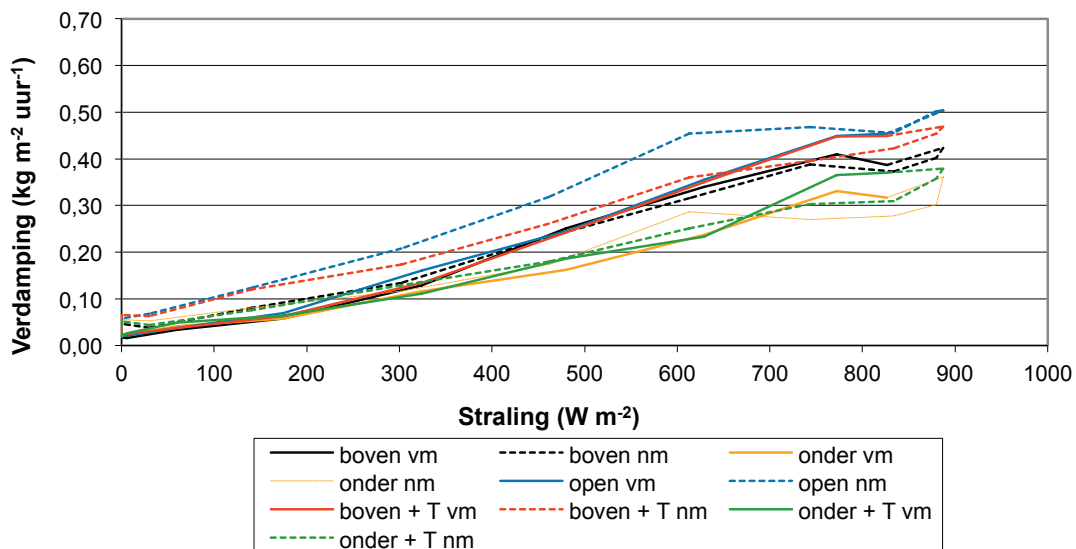


Figuur 6.8. Verdamping op 4 juli (stralingssom $2393 \text{ J cm}^2 \text{ d}^{-1}$). Vm is voormiddag, nm is namiddag.



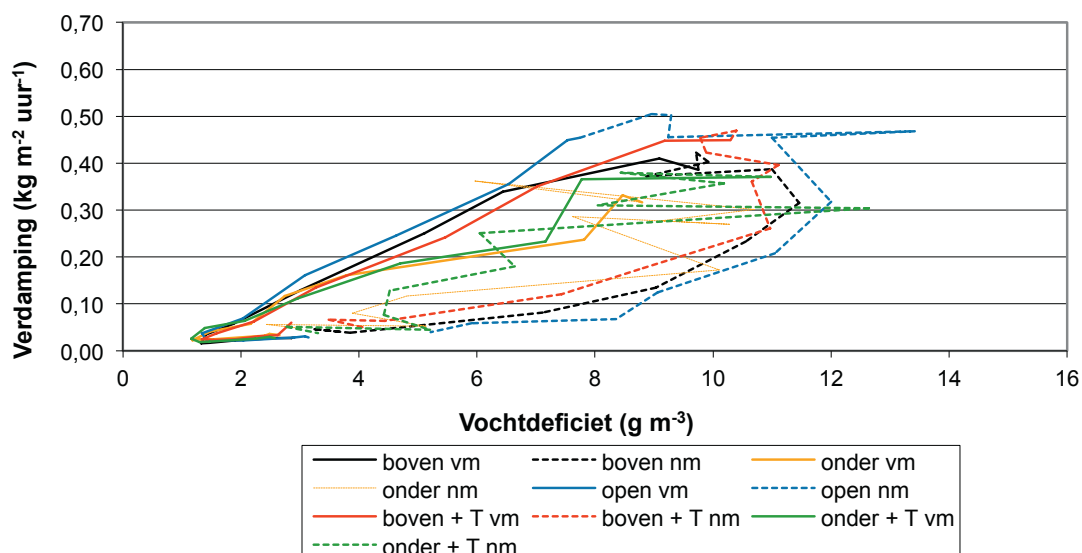
Figuur 6.9. Vochtdeficiet in de kas en straling buiten de kas op 4 juli (stralingssom $2393 \text{ J cm}^2 \text{ d}^{-1}$). Vm is voormiddag, nm is namiddag.

Voor 4 juli is de verdamping per uur uitgezet tegen de instraling in W m^2 (Figuur 6.10.). De verdamping in de middag ligt over het algemeen hoger bij gelijke instraling, omdat er dan bij gelijke instraling een hoger vochtdeficiet is (Figuur 6.9.). Met name in de open kas, waar het vochtdeficiet in de middag en avond het hoogst is, is het verschil tussen verdamping 's ochtends en 's middags bij dezelfde instraling hoog. Dit is ook het geval op 12. 14 en 15 juli (zie bijlage).



Figuur 6.10. Verdamping op 4 juli (stralingssom $2393 \text{ J cm}^2 \text{ d}^{-1}$) uitgezet tegen straling in W m^2 . Vm is voormiddag, nm is namiddag.

In Figuur 6.11. is de verdamping uitgezet tegen het vochtdeficiet. In deze figuur is duidelijk te zien dat in de ochtend (getrokken lijnen) de verdamping bijna lineair toeneemt met het vochtdeficiet (en met de instraling). In de middag is het beeld minder helder, omdat de relatie tussen straling en vochtdeficiet dan niet meer lineair is (zie Figuur 6.9.). Bij een afnemende straling na ca. 14:00 uur blijft het vochtdeficiet nog lange tijd redelijk constant. Omdat de verdamping voornamelijk beïnvloed wordt door de instraling, is er in de middag en avond geen duidelijk verband tussen het vochtdeficiet en de verdamping. In Bijlage IV is de RV en temperatuur in de loop van de dag uitgezet in grafieken.



Figuur 6.11. Verdamping op 4 juli (stralingssom $2393 \text{ J cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$) uitgezet tegen vochtdeficiet (g/m^3). Vm is voormiddag, nm is namiddag.

6.3 Conclusies

De verdamping in de ochtend loopt op met de instraling, maar in de middag is de verdamping bij gelijke instraling hoger dan in de ochtend. De reden hiervoor is dat in de middag het vochtdeficiet vaak hoger is bij gelijke of zelfs lager instraling. De verdamping wordt het sterkst bepaald door de instraling, maar omdat deze gelijk is voor de verschillende behandelingen (open kas, geconditioneerde kassen met onder- en bovenkoeling) worden de verschillen in verdamping tussen de behandelingen voornamelijk bepaald door het vochtdeficiet.

In de open kas wordt veel meer gelucht dan in de geconditioneerde afdelingen, waarmee deze kas het hoogste vochtdeficiet heeft (Figuur 3.10.) en daarmee ook de hoogste verdamping (Figuur 6.4.). De kassen met onderkoeling hebben gemiddeld het laagste vochtdeficiet (hoogste luchtvochtigheid) en daarmee de laagste verdamping. In de kassen met bovenkoeling is het vochtdeficiet hoger dan in de kassen met onderkoeling. De verdamping in de kassen met bovenkoeling is dan ook hoger dan in de kassen met onderkoeling.

7 Berekeningen van verdamping en temperatuur in verschillende gewaslagen

7.1 Inleiding

In deze proef zijn behandelingen aangelegd met verschillende verticale temperatuurgradiënten door onder het gewas of boven het gewas te koelen. Een vraag van de geconditioneerde tomatentelers was wat het effect is van een verticale temperatuurgradiënt op de verhouding van de verdamping in de verschillende gewaslagen? Om dit te kunnen beantwoorden moeten we de waterrelaties van de verschillende lagen van het gewas bepalen. Hiervoor gebruiken we de volgende aanpak:

1. De energiebalans van elke gewaslaag gebruiken om een model te ontwikkelen voor de temperatuur en verdamping van die gewaslaag (*metingen en berekeningen*)
2. Het model valideren met metingen van temperatuur op verschillende hoogtes van het gewas en met de verdamping van het hele gewas (*resultaten*)
3. Het model gebruiken om de effecten van verschillende temperatuurgradiënten (posities van de koeling) op het gewas te berekenen (*discussie*)

7.2 Metingen en berekeningen

7.2.1 Het model

Helaas is het niet mogelijk om verdamping van een bladlaag in een gewas direct te meten. Omdat verdamping de resultante is van de energiebalans van een gewas, hebben we in deze aanpak de energiebalans van de verschillende bladlagen bepaald. Voor elke bladlaag geldt:

$$\mathbf{R}_n = LE + \mathbf{H} \quad \text{W m}^2 \text{ (1)}$$

Waarin:

| | | |
|----------------|------------------|---|
| \mathbf{R}_n | $[W m^2]$ | is de netto straling van de bladlaag, dat is de balans van onderschepde en gereflecteerde zonnestraling plus de balans van inkomende en uitgaande langgolvlige straling |
| L | $[J g^{-1}]$ | is de latente warmte van de verdamping van water, bijna constant en ongeveer 2450 voor luchttemperatuur $T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| E | $[g m^2 s^{-1}]$ | is totale verdampingssnelheid in de bladlaag, per m^2 grondoppervlak |
| \mathbf{H} | $[W m^2]$ | is de dichtheid van voelbare warmte flux naar of van de oppervlakte van de bladeren in die laag |

Als deze balans gebruikt wordt om de verdamping te bepalen, moeten de andere twee termen: 1. de netto straling van elke laag en 2. de uitwisseling van voelbare warmte van elke laag ook bekend zijn.

7.2.1.1 Netto straling van elke bladlaag

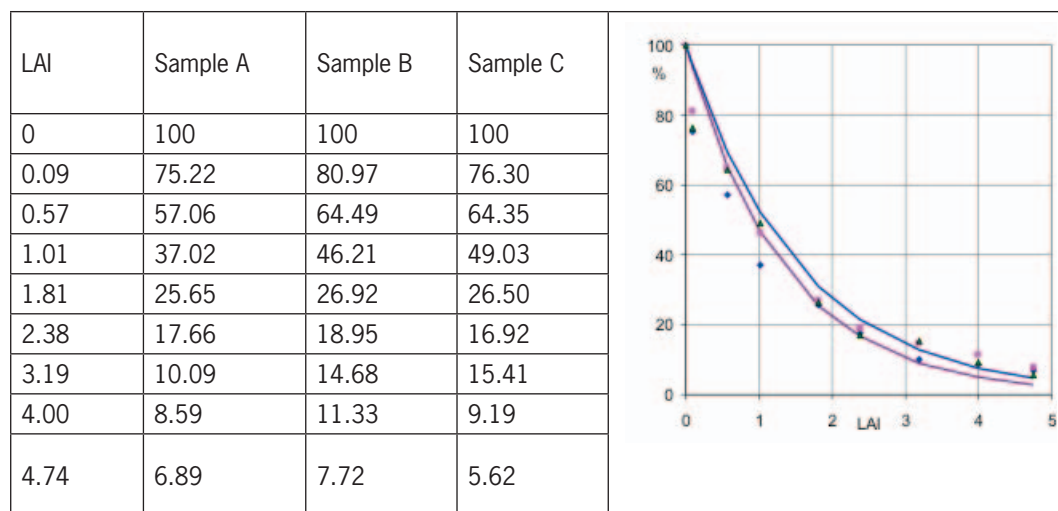
Het geaccepteerde model voor stralingsdoorlatenheid onder het gewas is de “turbid medium” (Ross, 1975):

$$\frac{R_{below}}{R_{top}} = \exp(-k d) = \exp(-k LAI) \quad - (2)$$

waar k is de “extinctie coëfficiënt” van het medium en d de dikte van de laag, wat in het geval van een gewas wordt weergegeven door de bladoppervlakte-index (leaf area index). De extinctiecoëfficiënt hangt tot op zekere hoogte af van de stand van de bladeren (het zelfde aantal bladeren met een verticale stand zouden minder straling opvangen dan wanneer ze een horizontale stand zouden hebben) en hun optische eigenschappen (onder een gewas van spiegels zou er veel meer straling zijn dan onder een gewas van zwarte vlakken met dezelfde oppervlakte en oriëntatie).

In de praktijk wordt vergelijking (2) als definitie van de extinctiecoëfficiënt gebruikt, omdat zowel de oriëntatie van de bladeren als hun spectrale optische eigenschappen niet makkelijk te meten zijn. Door de straling onder een gewas met een bekende LAI te meten wordt de extinctiecoëfficiënt bepaald.

Tabel 7.1. Transmissie (%) onder een laag met een LAI zoals weergegeven in de eerste kolom. Drie herhalingen werden gemeten op vooraf vastgestelde hoogtes in het gewas. De LAI behorend bij die hoogtes werd later bepaald door destructieve metingen aan drie planten. De paarse lijn in de figuur is de standaard beste fit (extinctiecoëfficiënt -0.755). Echter, door de manier de LAI werd bepaald is het redelijk aan te nemen dat er ook variatie zit op de x-as. De statistisch beste fit bij die veronderstelling is de blauwe lijn. De daarbij behorende extinctiecoëfficiënt is -0.645.



De extinctiecoëfficiënt bepaald uit deze metingen was 0.645, hetgeen erg vergelijkbaar is met de resultaten van Stanghellini (1987). Stanghellini (1987) beschreef een model dat ook rekening houdt met de ongelijkmatige horizontale verdeling van LAI in het gewas omdat het gewas in rijen staat. Later heeft zij ook laten zien (Stanghellini, 2007) dat voor een tomatengewas met de rijenstructuur typisch van een Venlo kas, haar model vereenvoudigd kon worden tot een simpel exponentieel model met daarin een factor die rekening houdt met de verlaagde licht onderschepping en een hogere extinctiecoëfficiënt door de ongelijkmatige verdeling van de LAI.

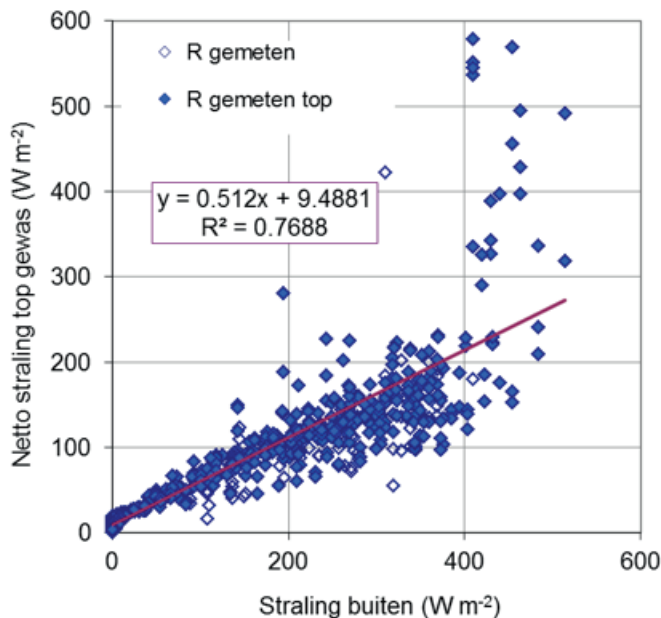
Daarmee rekening houdend hebben we de straling die door laag i geabsorbeerd wordt als volgt berekend:

$$\mathbf{R}_i = 0.86 \mathbf{R}_{top} \left[\exp\left(-0.7 \sum_1^{i-1} LAI\right) - \exp\left(-0.7 \sum_1^i LAI\right) \right] \quad \text{W m}^{-2} \quad (3)$$

waarbij 1 de bovenste laag is.

In werkelijkheid is de straling bij de top van het gewas en in het gewas niet alleen de zonnestraling, omdat elke gewaslaag langgolvlige straling uitwisselt met alle omliggende elementen en andere gewaslagen. Een groot aantal sensoren zouden nodig zijn om de netto straling in elke gewaslaag te meten, gegeven de grote inhomogeniteit van een tomatengewas. Gunstig is dat de verschillen in temperatuur in een kas beperkt zijn en dat de elementen (bijvoorbeeld de verwarmingsbuizen) slechts een klein deel zijn van de "horizon" van elke laag. Het koude kasdek is waarschijnlijk een belangrijk element voor de bovenste lagen, maar we mogen aannemen dat als het echt koud zou zijn, het scherm gesloten zou zijn. Daarom, omdat slechts één netto stralingsmeter beschikbaar was, hebben we besloten die te gebruiken om de netto straling bij de top van het gewas te meten (af en toe werd de stralingsmeter beneden het gewas gehangen). De netto straling geabsorbeerd in elke laag werd daarna berekend op basis van de metingen van die sensor.

De netto straling bij de top van het gewas kan beter bepaald worden als een functie van de zonnestraling buiten de kas dan op basis van een enkele sensor die niet altijd representatief kan zijn (bijvoorbeeld wanneer de schaduw of reflectie van een constructiedeel op de sensor valt). Tussen de zonnestraling buiten de kas en de netto straling bij de top van het gewas bleek een goede correlatie te zijn (Figuur 7.1.). Daarom werd aangenomen dat het intercept van de best fittende vergelijking goed genoeg de langgolvlige uitwisseling weergaf (in ieder geval tussen elementen van bijna dezelfde temperatuur) zodat modellering niet nodig was.



Figuur 7.1. Netto straling bij de top van het gewas versus zonnestraling buiten de kas (1 september 2009 12:00 tot 2 september 2009 20:00, afdeling met onderkoeling). Open symbolen geven de metingen aan waarin de sensor onder het gewas geplaatst was; deze punten werden niet gebruikt voor de beste fit. Het intercept (ongeveer 10 W m^{-2} in afwezigheid van zonlicht) kan voortvloeien uit het feit dat 's nachts het vloeroppervlak warmer is dan een sensor net onder het dak of het feit dat de buizen warm waren. Rekening houdend met alle onnauwkeurigheden werd de eenvoudige vergelijking gebruikt: $\mathbf{R}_{top} = 0.5 \mathbf{I}_{sun} + 10 \text{ W m}^{-2}$ (4)

7.2.1.2 Uitwisseling van voelbare warmte van elke laag

De hoeveelheid energie die uitgewisseld wordt tussen bladeren en lucht hangt af van het temperatuurverschil (de wet van Fick):

$$\mathbf{H} = 2LAI \rho c \frac{T_{\text{gewas}} - T_l}{r_b} \quad \text{W m}^{-2} \quad (5)$$

waar:

- ρc [$J m^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1}$] is de warmtecapaciteit van lucht $\approx 1200 J m^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1}$, waarbij ρ de dichtheid van de lucht is ($\approx 1.2 \text{ kg m}^{-3}$) en c de specifieke warmte ($\approx 1000 J \text{ kg}^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$);
- T [$^\circ C$] is temperatuur, onderschrift l is voor lucht; gewas is voor bladoppervlak
- r_b [$s m^{-1}$] is de weerstand van de grenslaag rondom het blad, ongeveer $200 s m^{-1}$ voor tomaat (Stanghellini, 1987). Dit hebben we als constante aangenomen voor alle behandelingen, aangezien de te verwachten verschillen in windsnelheid waarschijnlijk weinig effect hebben.

Verder werd twee keer de LAI gebruikt, omdat bladeren energie kunnen uitwisselen via zowel de onderkant als de bovenkant. Echter, zelfs dan kennen we T_{gewas} niet, zodat we nog een aantal vergelijkingen nodig hebben. De eerste vergelijking is de afvoer van waterdamp vanuit de bladeren, ook bepaald door de wet van Fick:

$$\mathbf{E} = 2LAI \frac{\chi_{\text{gewas}} - \chi_l}{r_s + r_b} \quad \text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (6)$$

waar:

- χ [$g m^{-3}$] is de concentratie waterdamp, het onderschrift l is voor lucht; gewas is voor bladoppervlak
- r_s [$s m^{-1}$] is de stomataire weerstand van de bladeren, hier gemodelleerd als:
- $$r_s = 656 \left(1 + 0.023(T_a - 24.5)^2 \right) \exp(-0.02R_i) \quad \text{s m}^{-1} \quad (7)$$

Hetgeen een kleine aanpassing is van Stanghellini, 1987

De koppeling tussen waterdampconcentratie van het gewas en de temperatuur van het gewas is de veronderstelling (nu algemeen geaccepteerd, als eerste gedaan door Penman, 1948) dat de plaats van de verdamping in de huidmondjesholtes, is volledig verzadigd (100% luchtvochtigheid). Als laatste, het toepassen van de linearisatie van verzadigde waterdampconcentratie, en het herschrijven van alles in termen van temperatuur leidt tot:

$$\mathbf{E} = 2LAI \varepsilon^* \frac{T_{\text{gewas}} - T_{\text{dauw}}}{r_s + r_b} \quad \text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (8)$$

waar:

ε^* $[g\ m^{-3}\ K^{-1}]$ is de lokale hellingshoek van de verzadigde dampconcentratie versus de temperatuurfunctie

T_{dauw} $[^{\circ}C]$ is het dauwpunt van lucht

Toevoegen en aftrekken van T_{dauw} in vergelijking (5), dan dat en (7) vervangen naar de energiebalans (1) en dat oplossen voor $T_{gewas} - T_{dauw}$ geeft:

$$T_{gewas} - T_{dauw} = \frac{r_b + r_s}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \left(\frac{r_b \mathbf{R}_n}{2LAI\rho c} + T_l - T_{dauw} \right) \quad ^{\circ}C \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{L}{\rho c} \varepsilon^*$$

waar ε is de dimensieloze combinatie: - (10)

dat is de ratio van de latente tegen voelbare warmte inhoudstoename van verzadigde lucht voor een verandering van 1°C in temperatuur. Dit is te vinden in fysische tabellen, en voor luchttemperaturen in het bereik van $T_a = 15$ tot 30 °C kan dit berekend worden als:

$$\varepsilon \cong 0.7584 \exp(0.0518T_a) \quad - (11)$$

Gewasverdamping kan dan berekend worden via vergelijkingen (6) of (8) of door vergelijking (9) direct te vervangen door:

$$\mathbf{E} = \frac{\varepsilon r_b \mathbf{R}_n / L + 2LAI(\chi_a^* - \chi_a)}{(1 + \varepsilon)r_b + r_s} = \frac{\varepsilon r_b \mathbf{R}_n + 2LAI\rho c(T_a - T_{dew})}{L(1 + \varepsilon)r_b + r_s} \quad g\ m^2\ s^{-1} \quad (12)$$

Daarom, voor een schatting van verdamping en temperaturen op verschillende hoogtes in het gewas hebben we de luchttemperaturen en -vochtigheden op deze hoogtes nodig.

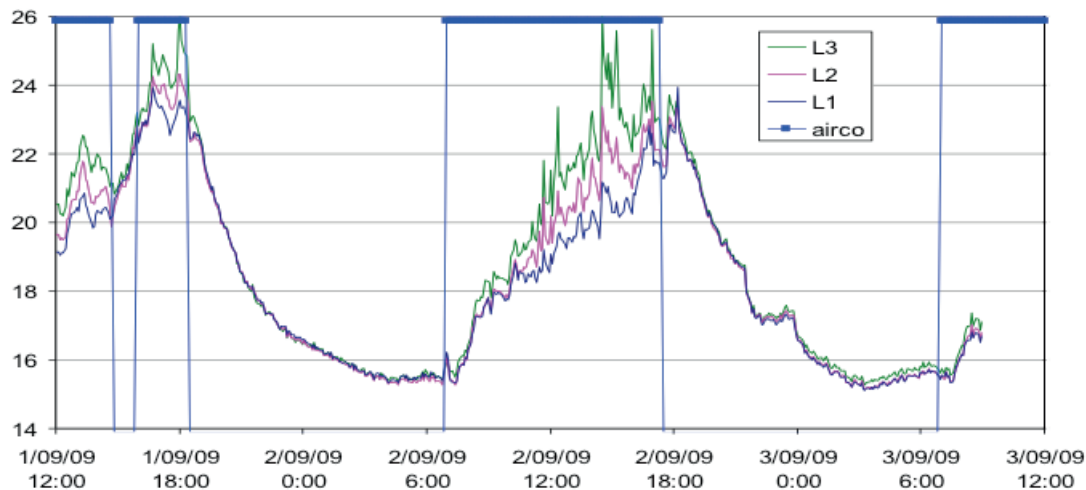
7.2.2 De metingen

7.2.2.1 Temperatuur en luchtvochtigheid

Temperatuur en luchtvochtigheid zijn op meerdere plaatsen gemeten. Naast de ventileerde meetbox die als basis gebruikt wordt voor de sturing van het kasklimaat, hingen er nog 4 vergelijkbare meetboxen tussen het gewas in elke afdeling, gelijkmatig verdeeld over de hoogte tussen de top van het gewas en het substraat, waarvan de data werden gebruikt.

7.2.2.2 Gewastemperatuur

Gewastemperatuur werd op een aantal dagen gemeten met sets van 5 thermokoppels op 3 hoogtes in het gewas: het eerste volledig uitgestrekte blad, de oudste bladeren en halverwege het gewas. Het gemiddelde van de 5 thermokoppels werd geregistreerd voor elke hoogte, een voorbeeld is te vinden in Figuur 7.2. De gegevens lijken erg consistent, en de gelaagdheid in temperatuur veroorzaakt door de onderkoeling is duidelijk.



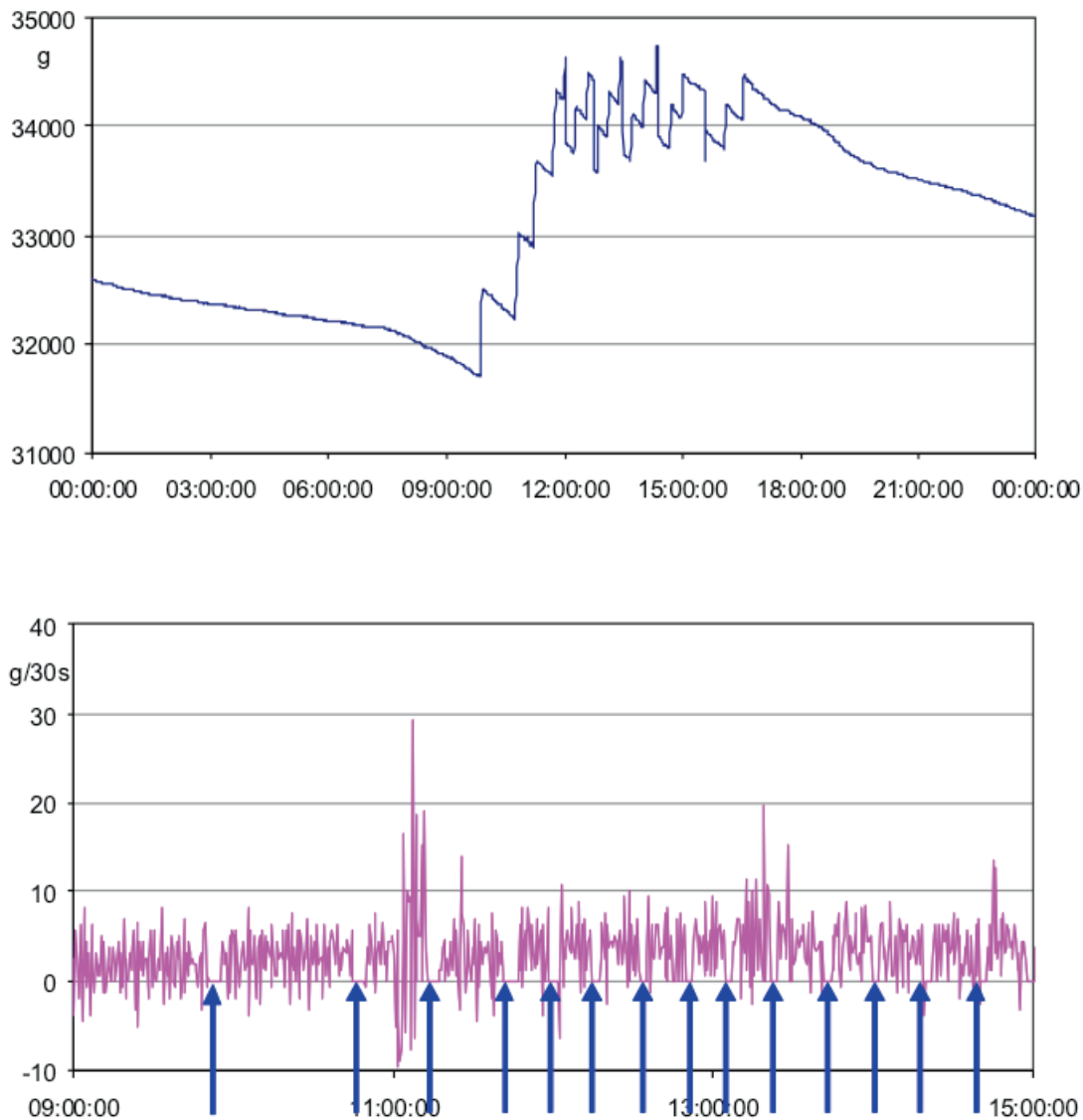
Figuur 7.2. Gewastemperatuur op drie hoogtes in het gewas in de afdeling met onderkoeling, °C, niveau 3 is het hoogst. Elk punt is het gemiddelde van vijf thermokoppels. De periodes dat het koelsysteem heeft gedraaid is aangegeven door de dikke blauwe horizontale lijnen. Periode: 1 tot 3 september 2009.

7.2.2.3 Wateropname

In elke afdeling was een goot met 6 planten opgehangen aan twee load cells die elke 30 s het gewicht registreerden. Bij een plantdichtheid van 2.5 m^{-2} staat dit gelijk aan het wegen van 2.4 m^2 gewas. De drain werd opgevangen op de goot, en steeds als het reservoir vol was, werd het geleegd. De trend van het gewicht op een zekere dag staat weergegeven in Figuur 7.5. boven. Elke plotselinge toename van gewicht is een druppelbeurt. De verdamping is de helling van de aflopende lijnen van de gewichtscurve (behalve als er bladeren of tomaten werden geplukt of als het drainvat werd geleegd). Het is duidelijk dat er een grote statistische fout gemaakt wordt als een verschil van een paar gram bepaald moet worden tussen twee gewichten van 30 kg, elk met hun meetfout. Daarnaast zijn er “echte” drukverschillen die worden veroorzaakt door turbulentie op zo'n groot bladoppervlak. Inderdaad, zoals te zien is in de onderste figuur in Figuur 7.3, is er een heleboel “witte ruis” op het afgeleide van het gewicht, dat er uit gefilterd kan worden door de hoge frequentie van dataverzameling, namelijk eens per 30 s. Daarom werden de data als volgt gefilterd: punten die groter waren dan $100\text{g}/30\text{s}$ en kleiner dan $10\text{g}/30\text{s}$ werden buiten beschouwing gelaten. De verdampingsom werd bepaald per 10 minuten.

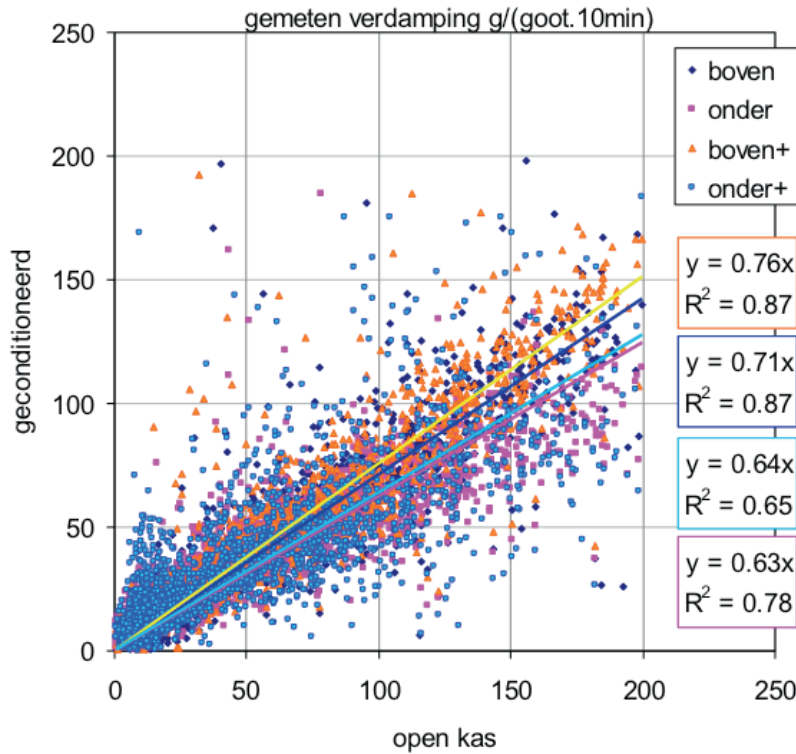
De resultaten werden verder gladgestreken door een “moving window” van een half uur te gebruiken.

In Figuur 7.3. (linksonder) zijn de samengevatte resultaten voor de periode 26 augustus tot 19 september (zonder 30 en 31 augustus, omdat daarvan geen weeggoeddata beschikbaar waren) weergegeven. Uit deze figuur kan worden afgeleid dat de wateropname het hoogst was in de open kas (gemiddeld $2.234 \text{ kg/m}^2 \text{ d}^{-1}$), gevolgd door de twee afdelingen met temperatuurverhoging (boven+T: 74% van verdamping in open kas; onder+T: 69%) en daarna de andere twee semigesloten afdelingen (bovenkoeling: 67% en onderkoeling 62%). Alle hellingshoeken zijn significant verschillend ($p < 0.001$), behalve de onderkoeling met temperatuurverhoging, die niet significant verschilt van de bovenkoeling. Inderdaad, zoals afgeleid kon worden van Figuur 7.3. is de betrouwbaarheid van de regressie laag.



Figuur 7.3.a. Boven: Trend van de weeggoet op een dag (onderkoeling, 26 augustus 2009). Elke plotselinge gewichtstoe-namen is een druppelbeurt, elke afname wordt veroorzaakt door het legen van het drainvat of een oogst, terwijl de geleidelijke afname in gewicht wordt veroorzaakt door de wateropname.

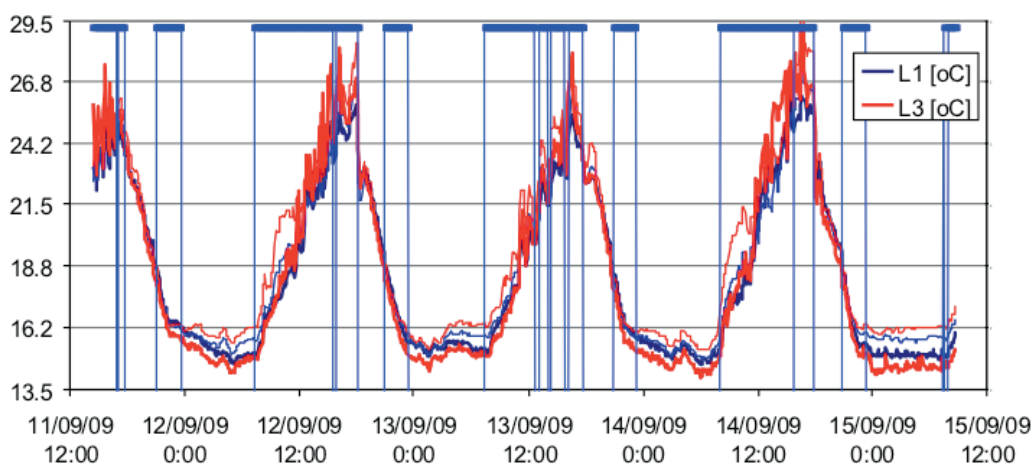
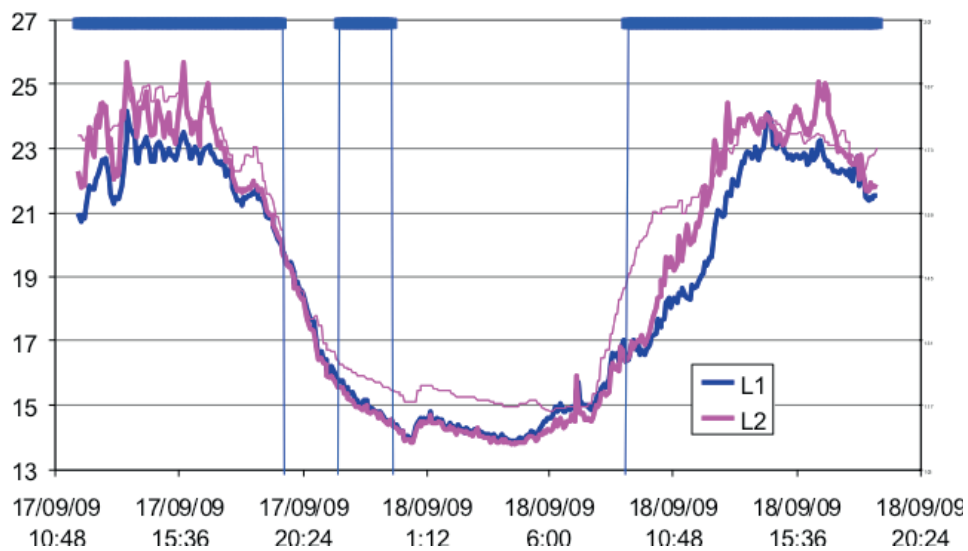
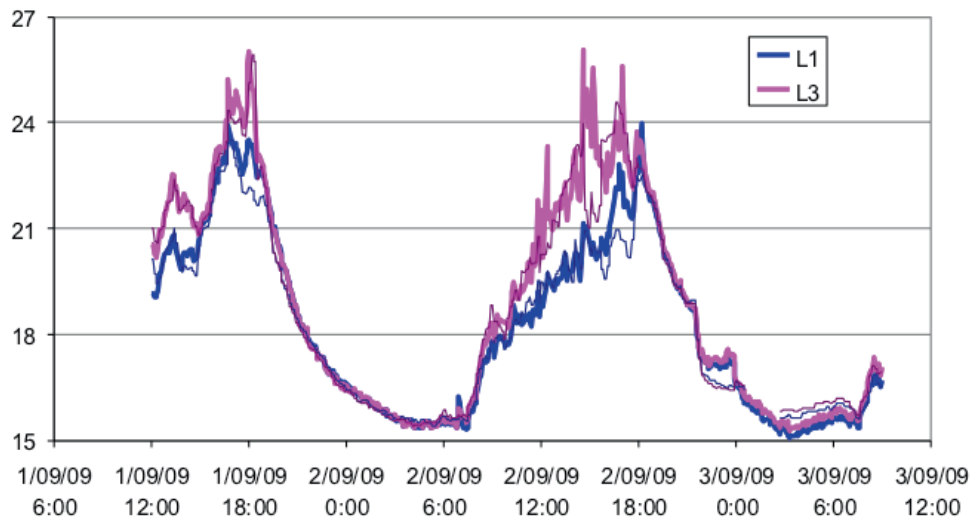
Onder: Gewichtsafname (g/30 s) gedurende enkele uren van dezelfde dag. Blauwe pijlen geven de druppelbeurten aan.



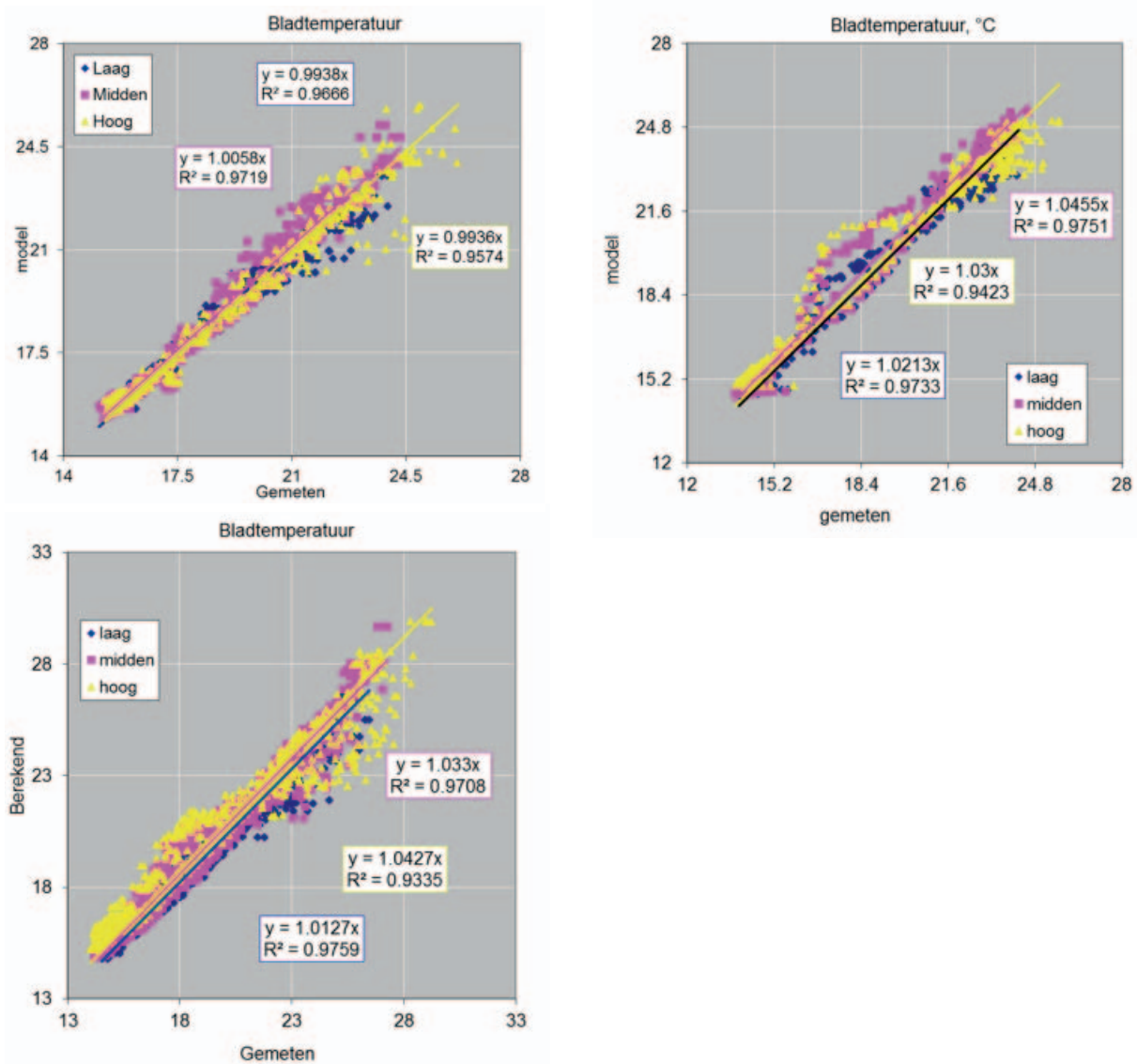
Figuur 7.3.b. Samenvattende resultaten van 26 augustus tot 19 september, behalve 30 en 31 augustus. Elk punt is de verdamping gemiddeld over 10 minuten voor een goot in de geconditioneerde afdeling in vergelijking met de bijbehorende waarde in de open kas. Alle hellingen zijn verschillend van elkaar ($p < 0.01$) met uitzondering van de twee gekoeld van onder.

7.3 Resultaten

Omdat we het profiel hadden van vier waarden van temperatuur en luchtvochtigheid werd het gewas in 4 lagen verdeeld. Daarbij hebben we aangenomen dat elke laag uit een vierde van de LAI bestond. De netto straling in elke laag werd berekend via vergelijking (3), de straling boven het gewas via vergelijking (4). Verdamping (vergelijking 12) en temperatuur (vergelijking 9) werden berekend met de corresponderende waarden voor de kaslucht voor elke hoogte. In figuren 7.4 en 7.5 zijn de berekende versus gemeten planttemperaturen uitgezet voor de behandelingen waarin gemeten is. Rekening houdend met de plaatsing van de sensoren (de bovenste sensoren hingen op dezelfde hoogtes, terwijl de laagste temperatuurmeetbox ruim onder de laagste set thermokoppels hing, zijn de drie gemeten temperaturen in de figuur vergeleken met de berekende waarden van de bovenste 3 meetboxen van de vier.



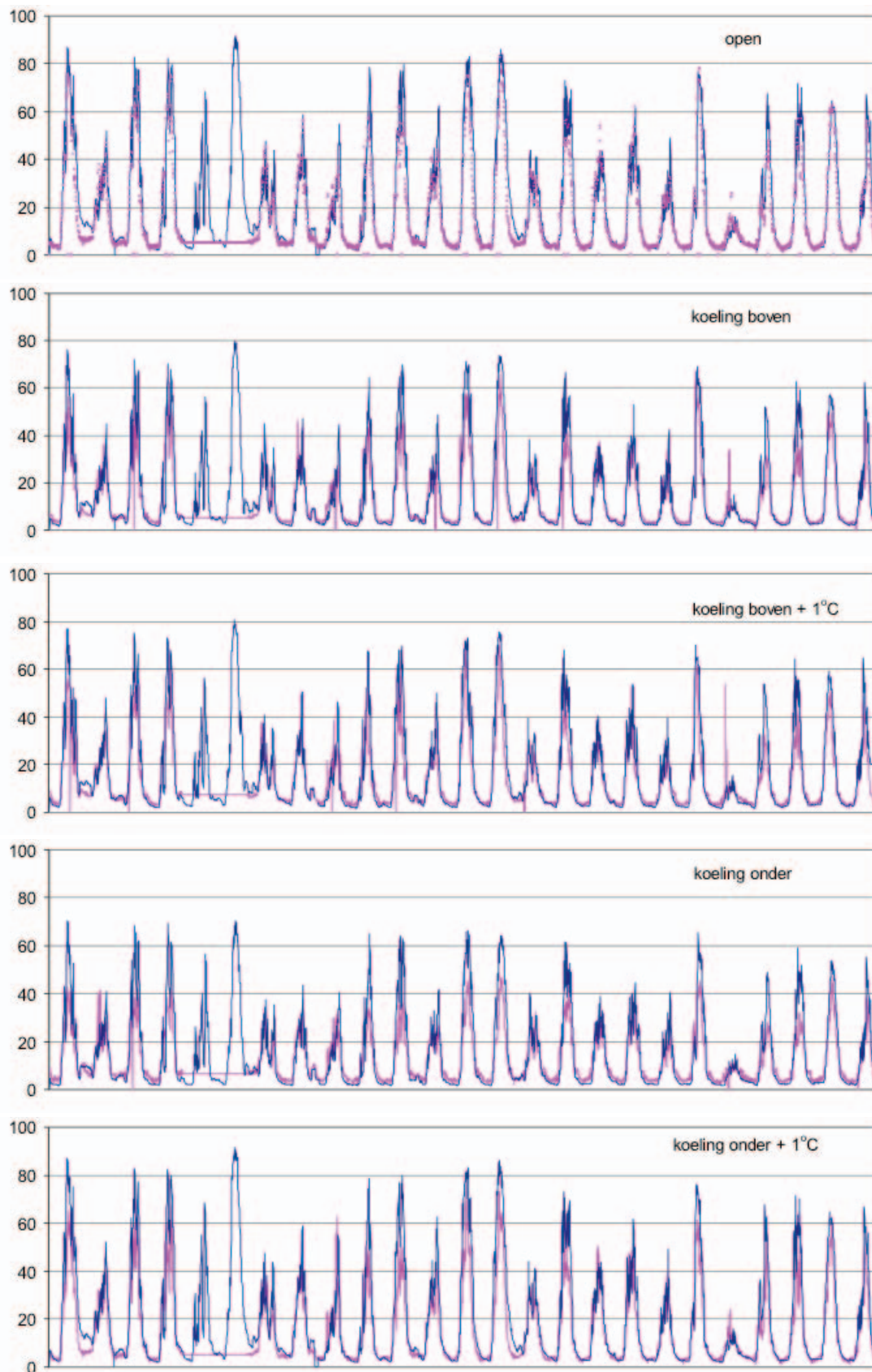
Figuur 7.4. Boven: gemeten en berekende bladtemperaturen op het laagste (L1) en hoogste (L3) niveau, dikke lijnen zijn gemeten, dunne lijnen zijn berekend. Ten behoeve van de duidelijkheid van de figuur is de middelste hoogte niet uitgezet. Boven: onderkoeling. Midden: bovenkoeling. Onder: bovenkoeling met temperatuurverhoging (boven+T).



Figuur 7.5. Berekende versus gemeten bladtemperaturen voor elke hoogte, de laagst gemeten waarde is vergeleken met de een na onderste van de 4 berekende waarden. Linksboven: onderkoeling; rechtsboven: bovenkoeling en linksonder: bovenkoeling met temperatuurverhoging (boven+T). Voor alle figuren zijn dezelfde tijdsperiodes gebruikt als in Figuur 7.4.

Voor de periode van 26 augustus tot 19 september werd de verdamping voor alle afdelingen berekend. Omdat de weeggoten de wateropname van het hele gewas gemeten hebben, zijn de totalen van de wateropname voor alle hoogtes uitgezet in Figuur 7.6. Hoewel het patroon goed met de metingen overeenstemt, lijkt het model de pieken in de verdamping op zonnige dagen te overschatten, met name voor de behandelingen met bovenkoeling. Het zou kunnen zijn dat het gebruikte model voor de netto straling boven in het gewas (vergelijking (4) voor alle afdelingen te eenvoudig is. Al eerder is genoemd dat de beste fit van de netto straling versus zonnestraling voor deze twee afdelingen een kleinere hellingshoek en intercept had. Ook uit Figuur 7.4. blijkt inderdaad enige overschatting van de temperatuur van de bovenste gewaslaag in de twee afdelingen met bovenkoeling. Het zou goed mogelijk zijn een ander model voor de netto straling te gebruiken. Echter een uitgebreide modelcalibratie maakte geen deel uit van deze analyse van de resultaten.

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat het model betrouwbare schattingen kan doen van de temperatuur- en verdampingsprofielen in het gewas, ook al werden mogelijke verschillen in netto straling in het gewas door de verschillende behandelingen niet meegenomen.



Figuur 7.6. Gemeten wateropname en berekende verdamping ($\text{g/m}^2 10\text{min}^{-1}$) van 26 augustus tot 19 september. In alle figuren is paars gemeten en blauw berekend, dat wil zeggen het totaal van de verdamping berekend voor elk van de 4 lagen. Voor 30 en 31 augustus waren er geen weeggoetdata beschikbaar. De data van de weeggoten zijn gemiddeld over 30 minuten.

7.4 Discussie

Tabel 7.2. laat de resultaten zien van de analyse van de gewastemperatuur berekend voor alle behandelingen. De behandelingen die dezelfde luchttemperatuur hadden, hadden ook dezelfde gewastemperatuur. Het effect van de behandelingen met temperatuurverhoging (laatste twee regels van Tabel 7.2, behandelingen onder+T en boven+T) op de gewastemperatuur was kleiner dan op de luchttemperatuur, hetgeen te verwachten was. Als een indicatie van het effect van de behandelingen op de temperatuurgradiënt in het gewas is voor iedere keer de standaardafwijking van de vier waardes berekend (een grote standaardafwijking betekent dat er grote verschillen zijn) en in de tabel is het gemiddelde van alle standaardafwijkingen weergegeven. Inderdaad is het zo dat de open kas de kleinste spreiding had en de afdeling met onderkoeling de hoogste variatie. Dit was volgens verwachting. Echter, ongeveer de helft van de tijd stond de koeling niet aan. Daarom hebben we de analyse herhaald voor alleen de periodes dat de koeling in alle vier geconditioneerde afdelingen tegelijkertijd aan stond. Het effect van de onderkoeling op het temperatuurprofiel wordt dan nog duidelijker. Echter, de verschillen tussen de lagen werden daarbij niet kleiner in vergelijking tot de open kas.

Tabel 7.2. Links: gemiddelde gewastemperatuur (°C) met de standaardafwijking (σ , °C) in de vijf behandelingen van 26 augustus tot 19 september. De standaardafwijking is het gemiddelde van de standaardafwijkingen van de 4 hoogtes berekend op elk tijdsinterval. De twee rechterkolommen zijn berekend voor de periodes dat de koeling aan stond in de vier geconditioneerde afdelingen (1500 punten).

| | | Hele periode | | Alleen koeling (alle 4) | |
|----------|---------|--------------|---|-------------------------|---|
| | | Gemiddelde | Gemiddelde van σ over de hoogtes | Gemiddelde | Gemiddelde van σ over de hoogtes |
| Open kas | | 18.6 | 0.36 | 19.8 | 0.52 |
| KOELING | Boven | 18.7 | 0.39 | 19.9 | 0.52 |
| | Onder | 18.6 | 0.69 | 19.9 | 1.02 |
| | Boven+T | 19.2 | 0.41 | 20.5 | 0.55 |
| | Onder+T | 18.9 | 0.59 | 20.2 | 0.95 |

In Tabel 7.3. is het effect van de behandelingen op de gewasverdamping te zien. Het model geeft de gemeten trend weer, waarbij de open kas de meeste verdamping heeft, gevolgd door de twee afdelingen met temperatuurverhoging (boven+T en onder+T) en dan de twee andere geconditioneerde afdelingen (onder en boven). In beide gevallen leidde bovenkoeling tot meer verdamping dan onderkoeling. Deze twee hadden ook de grootste verticale temperatuurgradiënt. Verdamping was het meest gelijkmatig verdeeld in de open kas, en het minst in de afdelingen met onderkoeling.

Tabel 7.3. Effect van de behandelingen op gewasverdamping ($g\ m^{-2}\ 10\ min^{-1}$) en de verticale verdeling daarvan voor alle periodes waarin in alle vier geconditioneerde afdelingen de koeling gelijktijdig aan stond, van 26 augustus tot 19 september. De gemiddelde standaardafwijking is berekend zoals in Tabel 7.2. De rechtse 4 kolommen geven aan hoeveel van de totale verdamping in elke gewaslaag plaatsvindt. De verdeling van koeling boven is niet significant anders dan bij een open kas. De anderen zijn allemaal significant ($p < 0.01$) verschillend, ook van elkaar.

| | | Gemiddelde | Gemiddelde van σ over de hoogtes | Onder | Midden-onder | Midden-boven | Boven |
|---------|----------|-------------------------|---|-------|--------------|--------------|-------|
| | | $g\ m^{-2}\ 10min^{-1}$ | | % | | | |
| | Open kas | 32.0 | 3.4 | 16 | 19 | 26 | 39 |
| KOELING | Boven | 25.1 | 2.9 | 14 | 18 | 28 | 40 |
| | Onder | 24.2 | 3.9 | 11 | 15 | 28 | 46 |
| | Boven+T | 26.2 | 3.3 | 14 | 18 | 27 | 41 |
| | Onder+T | 25.2 | 3.9 | 11 | 15 | 27 | 46 |

7.5 Samenvatting en conclusies

Eén van de vragen bij aanvang van dit onderzoek was hoe een verticale temperatuurgradiënt de verdeling van de verdamping in het gewas zou beïnvloeden. Het is niet mogelijk verdamping van afzonderlijke bladeren te meten, daarom zijn op verschillende hoogtes in het gewas bladtemperaturen gemeten, en is met een model de verdamping in deze bladlagen bepaald. Tenslotte werden deze getallen per bladlaag opgeteld en vergeleken met de wateropname van het gewas. Hieruit bleek dat de berekende verdamping goed overeenstemde met de wateropname gemeten met de weeggoten. De verdamping in de kassen met bovenkoeling was ca. 71% van de verdamping in de open kas, terwijl de verdamping in de kassen met onderkoeling ca. 63% van de verdamping in de open kas was.

De berekeningen van de verdamping lieten duidelijke verschillen zien in het verticale patroon van de verdamping tussen de open kas en de kassen met onderkoeling. In de kassen met onderkoeling, dus een verticale temperatuurgradiënt, was het aandeel van de onderste bladlagen in de verdamping lager, en van de bovenste bladlaag hoger. Een lagere temperatuur onder in het gewas zorgt daar voor minder verdamping, zowel absoluut als relatief. Het verticale patroon van de verdamping in de kassen met bovenkoeling kwam overeen met het patroon in de open kas.

8 Fotosynthese

8.1 Metingen

Netto bladfotosynthese werd gemeten met twee draagbare fotosynthesemeters (LCPro, ADC, Verenigd Koninkrijk) aan bladeren op verschillende hoogtes in het gewas. In de bovenste bladlaag werd gemeten aan het bovenste bijna volgroeide blad, dat niet beschaduwd werd door hoger gelegen bladeren. In de middelste bladlaag werd gemeten aan een blad dat ongeveer even veel blad boven zich had als beneden zich. De fotosynthesemeter meet de CO₂ concentratie en de dampspanning van de lucht die de bladkamer binnenkomt en van de uitgaande lucht. Op basis van het verschil in CO₂ concentratie wordt de netto fotosynthesesnelheid ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) berekend. Op basis van het verschil in dampspanning worden verdamping en stomataire geleidbaarheid berekend.

De responsen van fotosynthese op licht, CO₂ concentratie, temperatuur en luchtvochtigheid zijn bepaald. Hiervoor werden lichtniveaus aangelegd tussen 0 en 1800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, CO₂ concentraties van 400, 800, 1200 en 1600 ppm, temperaturen tussen 24 en 38 °C en dampdrukdeficieten tussen 0.3 en 2.4 kPa.

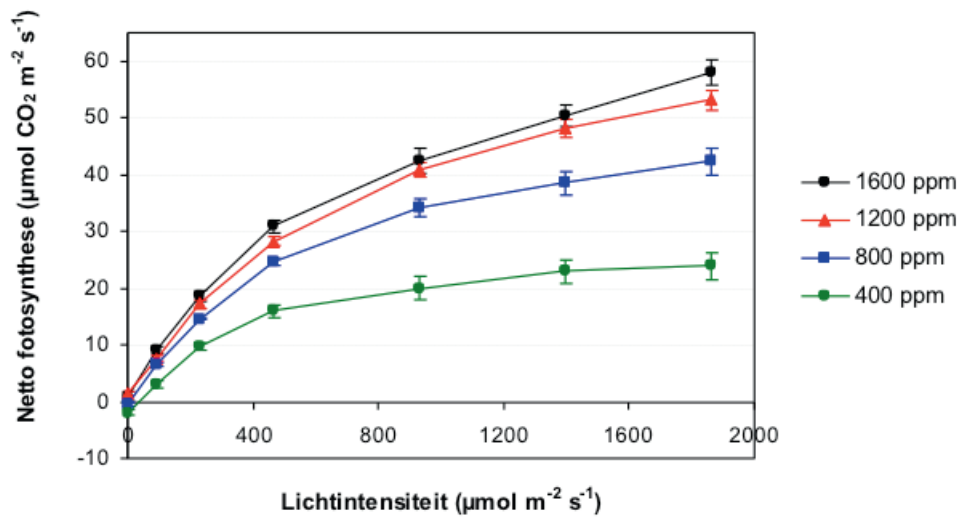
8.2 Responscurves

De basis voor alle plantengroei is de fotosynthese. In de fotosynthese wordt CO₂ in aanwezigheid van water met behulp van lichtenergie omgezet in suikers (C₆H₁₂O₆), waarbij zuurstof (O₂) vrijkomt. De gevormde suikers vormen in de plant de bron van energie om met de opgenomen nutriënten alle stoffen in de plant te bouwen.

Karakteristiek voor een geconditioneerde kas is dat het mogelijk is dat zowel lichtintensiteit als CO₂ concentratie op hetzelfde moment hoog zijn, terwijl in een open kas op moment dat er veel instraling is er over het algemeen veel gelucht wordt om de temperatuur op een aanvaardbaar niveau te houden, waardoor de CO₂ concentratie sterk daalt. In dit project is onderzocht wat de effecten zijn van deze klimaatomstandigheden op de fotosynthese.

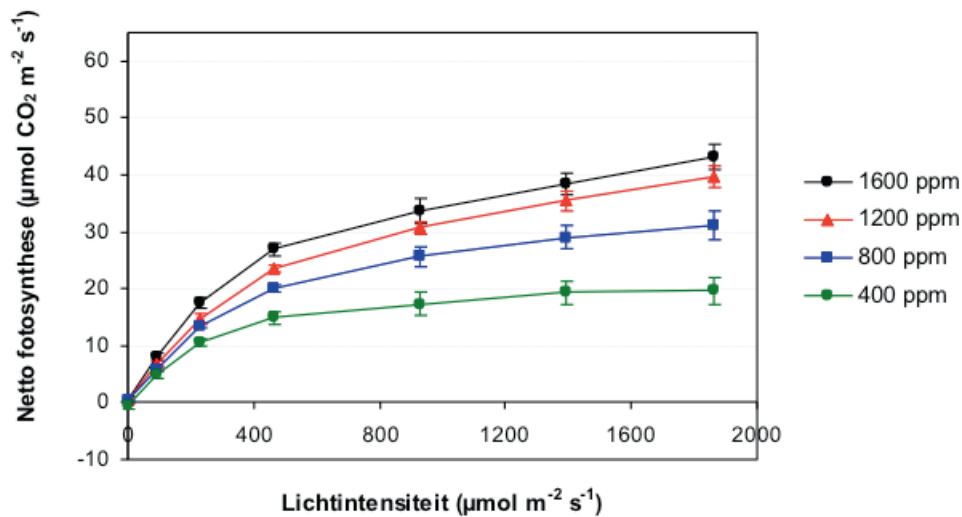
De fotosynthese is gemeten met draagbare fotosyntheseapparatuur aan bladeren op verschillende hoogtes in het gewas. Het blad wordt ingeklemd in een meetcuve. De luchtvochtigheid en CO₂ concentratie in de ingaande lucht wordt geregeld, evenals de temperatuur in de meetcuve en de lichtintensiteit op het blad. Door de luchtvochtigheid en CO₂ concentratie in de uitgaande lucht te meten kan zowel de fotosynthese (CO₂ opname) als verdamping (afgifte van water) gemeten worden. De metingen op bladniveau kunnen met een gewasgroeimodel opgeschaald worden naar gewasfotosynthese.

Om de interactie van licht en CO₂ te bepalen zijn lichtresponscurves bij verschillende CO₂ concentraties in de meetcuve bepaald op twee hoogtes in het gewas. Bovenin het gewas is er bij weinig licht een duidelijk effect van het verhogen van de CO₂ concentratie van 400 naar 800 ppm, maar daarboven is het effect van het verder verhogen van de CO₂ concentratie op de fotosynthese beperkt (Figuur 8.1.). Bij hogere lichtintensiteiten heeft het verhogen van de CO₂ concentratie naar 1200 ppm een positief effect op de fotosynthese. Verder verhogen van de CO₂ concentratie naar 1600 ppm beïnvloedt de fotosynthese slechts beperkt.



Figuur 8.1. Verloop van de lichtresponscurve van de netto fotosynthesesnelheid van de bovenste tomatenbladeren bij CO_2 concentraties van 400 ppm, 800 ppm, 1200 ppm en 1600 ppm in de meetcuvet.

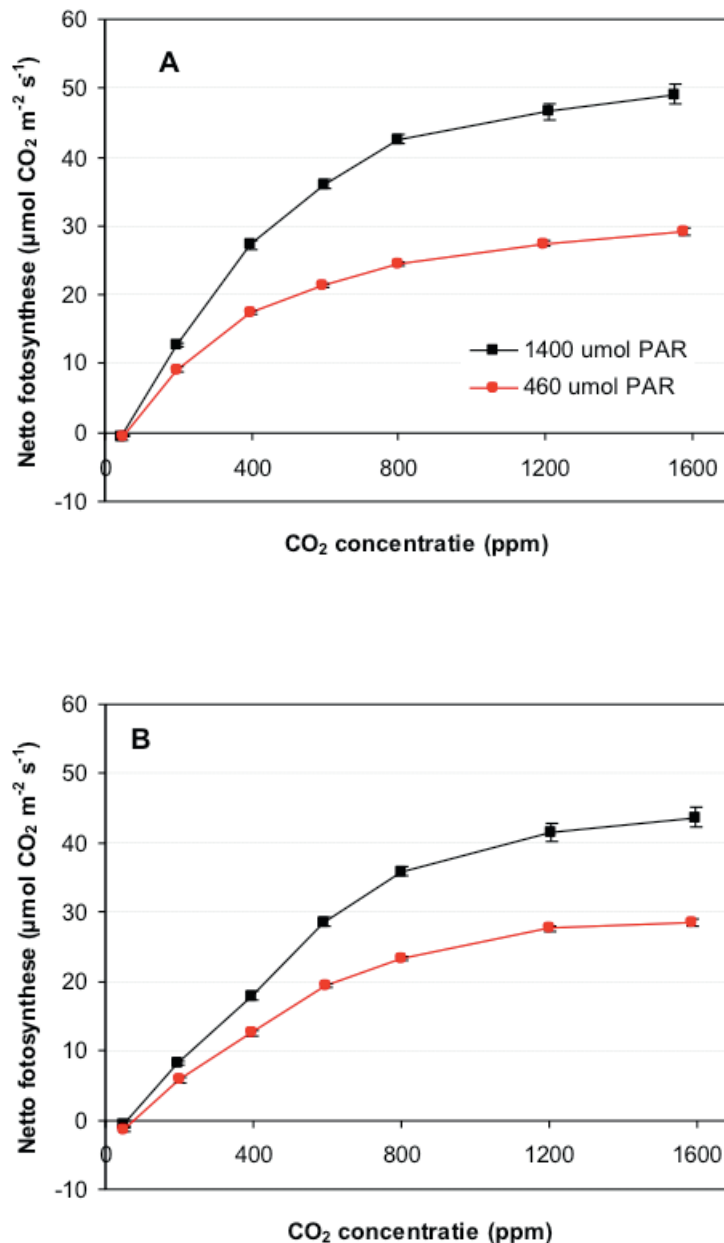
De lichtresponscurves van de fotosynthese bij verschillende CO_2 concentraties van de middelste bladeren vertonen hetzelfde beeld als die van de bovenste bladeren (Figuur 8.2.). Een verschil is dat bij dezelfde lichtintensiteit de middelste bladeren een lagere fotosynthese hebben dan de bovenste bladeren, wat zou kunnen wijzen op een vorm van gewinning aan lagere lichtniveaus. Wat deze gewinning is (lagere efficiëntie van het fotosysteem, afbraak van chlorofyl of eiwitten) is voor deze planten niet bekend.



Figuur 8.2. Verloop van de lichtresponscurve van de netto fotosynthesesnelheid van de middelste tomatenbladeren bij CO_2 concentraties van 400 ppm, 800 ppm, 1200 ppm en 1600 ppm in de meetcuvet.

De metingen van lichtintensiteiten in de kas laten zien dat in de zomermaanden de maximale lichtintensiteit in de kas ongeveer $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ is. Dat betekent dat een groot deel van de dag de lichtintensiteit (ver) beneden de $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ligt. In de periode 1 mei tot en met 31 augustus zijn er ruim 23.000 5-minutenwaardes dat er licht is. Hiervan is er op 4500 5-minutenwaardes een lichtintensiteit van meer dan $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (ca. 20% van de tijd). Dat houdt in dat in de periode dat er licht is, de lichtintensiteit in 80% van de tijd minder is dan $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

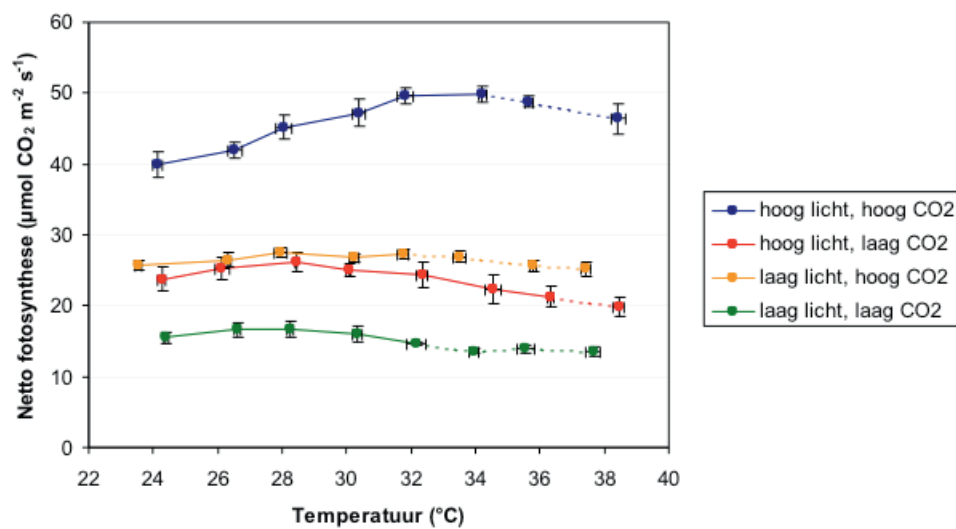
Als deze data anders worden weergegeven, is ook te zien dat bij toenemende CO_2 concentraties de fotosynthese toeneemt volgens een optimumcurve (Figuur 8.3.). Bij lage CO_2 concentraties in de meetcuve is het effect van het lichtniveau boven het blad beperkt, maar naarmate de CO_2 concentratie toeneemt, is het effect van licht op de fotosynthese groter.



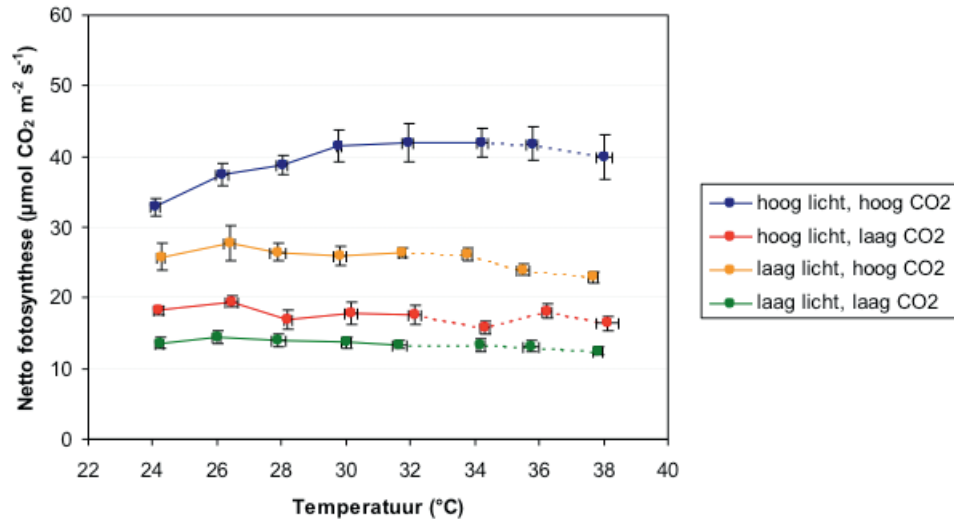
Figuur 8.3. Verloop van de CO_2 responscurve van de netto fotosynthesesnelheid van de bovenste (A) en middelste (B) tomatenbladeren bij lichtintensiteiten van $460 \mu\text{mol PAR/m}^2/\text{s}$ en $1400 \mu\text{mol PAR/m}^2/\text{s}$ in de meetcuve.

De temperatuur is in de fotosynthese van belang, omdat veel van de processen in de binding van CO₂ en de omzetting naar suikers door enzymen gereguleerd worden. Enzymactiviteit wordt sterk bepaald door de temperatuur. Als het lichtniveau of de CO₂ concentratie laag is, heeft een verhoging van de temperatuur geen positief effect op de fotosynthese (Figuur 8.4.). Voor zover er sprake is van een optimum temperatuur voor de fotosynthese ligt dat onder deze omstandigheden tussen de 26 en 28 °C. Daarboven neemt de netto fotosynthese af als gevolg van een sterke toename van de dissimilatie (ademhaling) bij hogere temperaturen.

Als licht of CO₂ niet beperkend zijn voor de fotosynthese, neemt de fotosynthese verder toe met toenemende temperatuur in de meetcuve (Figuur 8.4.). Bij 1400 μmol PAR m⁻² s⁻¹ licht en 1200 ppm CO₂ ligt de optimale temperatuur voor de bladfotosynthese van de bovenste bladeren tussen de 32 en 34 °C. De responscurves van de middelste bladeren vertonen hetzelfde patroon (Figuur 8.5.), maar de optima voor de fotosynthese liggen bij iets lagere temperaturen. Als licht of CO₂ of beiden relatief laag zijn en de fotosynthese beperken, is het temperatuuroptimum niet langer zichtbaar.



Figuur 8.4. Verloop van de temperatuurreponscurve van de netto fotosynthesesnelheid van de bovenste tomatenbladeren bij een hoog lichtniveau (1400 μmol PAR/m²/s) en een laag lichtniveau (465 μmol PAR/m²/s) bij 400 en 1200 ppm CO₂ in de meetcuve. In het doorgetrokken deel van de curves was de VPD van de lucht in de meetcuve kleiner dan 1 kPa, in het gestippelde deel van de curves was de VPD van de lucht in de meetcuve groter dan 1 kPa. De temperaturen geven de waarden weer van de bladtemperaturen in de meetcuve van de fotosynthesemeter.

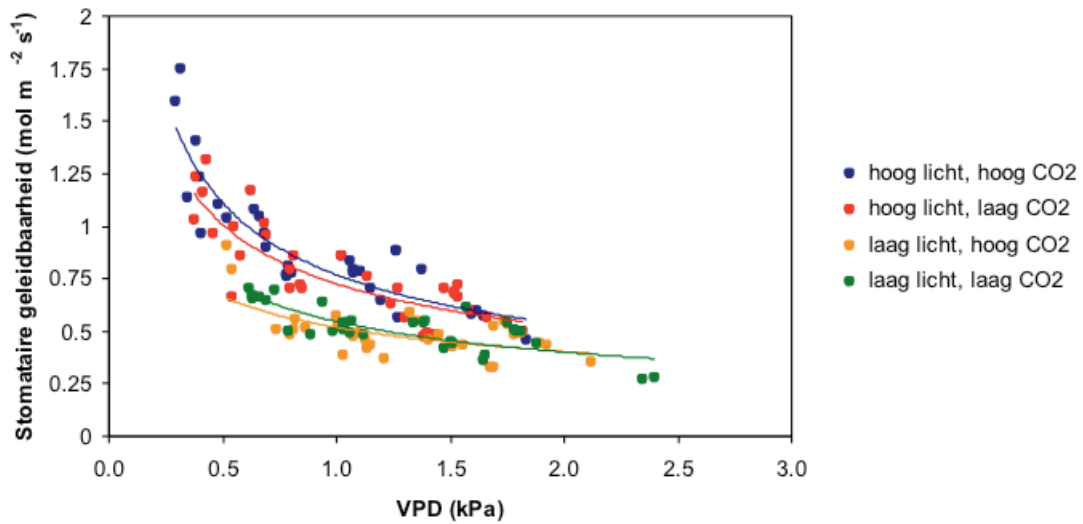


Figuur 8.5. Verloop van de temperatuurreponscurve van de netto fotosynthesesnelheid van de middelste tomatenbladeren bij een hoog lichtniveau ($1400 \mu\text{mol PAR}/\text{m}^2/\text{s}$) en een laag lichtniveau ($465 \mu\text{mol PAR}/\text{m}^2/\text{s}$) bij 400 en 1200 ppm CO_2 in de meetcuve. In het doorgetrokken deel van de curves was de VPD van de lucht in de meetcuve kleiner dan 1 kPa, in het gestippelde deel van de curves was de VPD van de lucht in de meetcuve groter dan 1 kPa. De temperaturen geven de waarden weer van de bladtemperaturen in de meetcuve van de fotosynthesemeter.

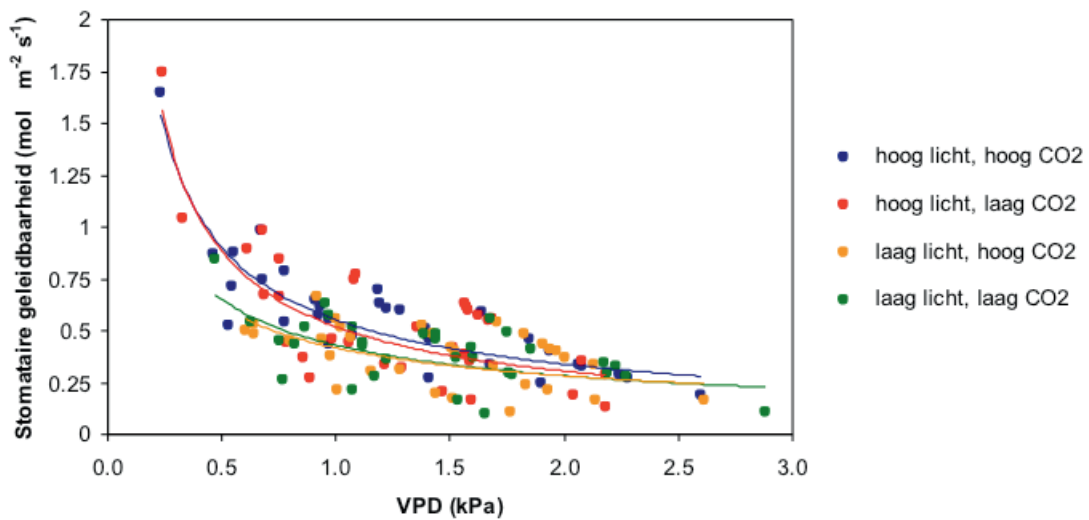
Bovenstaande figuren geven het verloop weer van de fotosynthese van een individueel blad bij bepaalde klimaatomstandigheden (licht, CO_2 en temperatuur). Daarin is te zien dat het temperatuuroptimum voor de bovenste bladeren bij veel licht en hoog CO_2 tussen de 32 en 34 °C is. Voor een heel gewas geldt dit temperatuuroptimum niet, omdat alleen de bovenste bladeren bij veel licht kunnen zijn, maar de bladeren dieper in het gewas altijd bij lagere lichtintensiteiten groeien. Verder geldt dat zelfs in de zomermaanden (gemiddeld over de periode 1 mei tot 31 augustus) de lichtintensiteit maar in 20% van de tijd hoger is dan $500 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$. In 80% van de tijd dat het licht is, geldt dat de fotosynthese nauwelijks reageert op de temperatuur in de kas.

De vochtigheid van de kaslucht heeft voornamelijk effect op de fotosynthese via het effect op de openingstoestand van de huidmondjes. Deze wordt uitgedrukt in stomataire geleidbaarheid, dat het gemak is waarmee CO_2 door de huidmondjes (stomata) kan worden opgenomen. Bij de bovenste (Figuur 8.6.) en middelste bladeren (Figuur 8.7.) gaan de huidmondjes verder open (neemt de stomataire geleidbaarheid toe) bij een lager dampdrukdeficiet¹ (vapour pressure deficit, VPD).

1 Het verschil in dampdruk, of dampdrukdeficiet, tussen de heersende lucht en de verzadigde lucht zorgt voor een zuigkracht die het gewas doet verdampen. Dampdrukdeficiet, temperatuur en relatieve luchtvochtigheid staan met elkaar in verband. Een hogere relatieve luchtvochtigheid geeft een lager dampdrukdeficiet, en dus een lagere verdamping. Een verhoging van de temperatuur leidt tot een hogere relatieve luchtvochtigheid, bij een gelijk dampdrukverschil; er is dan in principe geen effect op de verdamping.



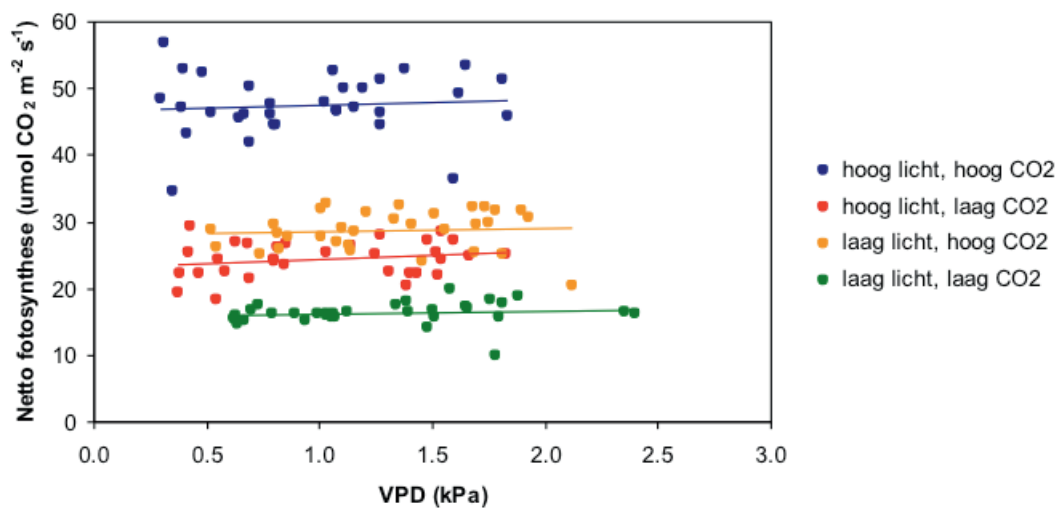
Figuur 8.6. Verloop van de huidmondjesgeleidbaarheid van de bovenste tomatenbladeren bij een hoge (1400 $\mu\text{mol PAR}/\text{m}^2/\text{s}$) en lage lichtintensiteit (465 $\mu\text{mol PAR}/\text{m}^2/\text{s}$) bij verschillende luchtvochtigheden (dampdrukdeficit; VPD) bij 400 en 1200 ppm CO₂ en een temperatuur van 27 °C in de meetcuvet.



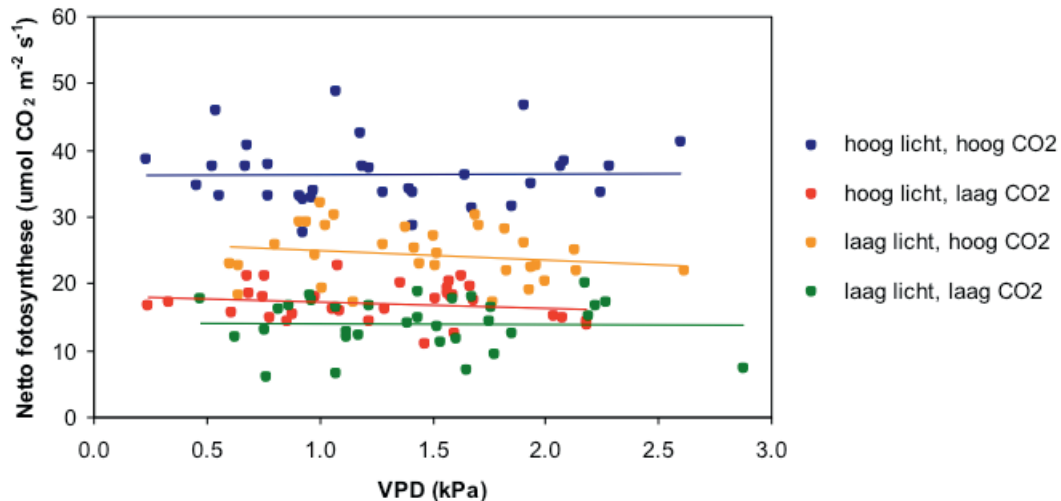
Figuur 8.7. Verloop van de huidmondjesgeleidbaarheid van de middelste tomatenbladeren bij een hoge (1400 $\mu\text{mol PAR}/\text{m}^2/\text{s}$) en lage lichtintensiteit (465 $\mu\text{mol PAR}/\text{m}^2/\text{s}$) bij verschillende luchtvochtigheden (dampdrukdeficit; VPD) bij 400 en 1200 ppm CO₂ en een temperatuur van 27 °C in de meetcuvet.

In de figuren 8.6 – 8.9 staan geen gemiddelden weergegeven (zoals in de figuren 8.1 – 8.5) van de metingen, maar afzonderlijke meetwaardes. De reden hiervoor is dat het lichtniveau en de CO₂ concentratie in de meetcuvet van de fotosynthesemeter goed te regelen zijn. Daarom kunnen hier gemiddelden van de fotosynthesemetingen in de figuren uitgezet worden, omdat deze bij een zekere waarde op de x-as horen. De VPD in de meetcuvet is veel minder goed te regelen, omdat deze grotendeels wordt bepaald door de verdamping van de plant. Daarom is het nagenoeg onmogelijk om een vaste waarde van de VPD in de meetcuvet te realiseren, en zijn in plaats van gemiddelden per VPD afzonderlijke metingen weergegeven in de figuren 8.6 – 8.9.

Ondanks het feit dat de huidmondjesopening sterk beïnvloed werd door de reeks dampdrukdeficieten die in de meetcuvet werd aangelegd, bleek de fotosynthese niet door de aangelegde reeks dampdrukdeficieten (VPD) beïnvloed te worden (Figuren 8.8 en 8.9). Een mogelijke verklaring zou kunnen zijn dat de huidmondjes altijd voldoende ver open staan om niet beperkend te zijn voor de CO₂ opname. Zo lang de stomataire geleidbaarheid die niet lager wordt dan ca. 0.2 mol m⁻² s⁻¹ is dit een redelijke aanname.



Figuur 8.8. Verloop van de netto fotosynthesesnelheid van de bovenste tomatenbladeren bij een hoge (1400 µmol PAR/m²/s) en lage lichtintensiteit (465 µmol PAR/m²/s) bij verschillende vochtigheden (dampdrukdeficit; VPD) bij 400 en 1200 ppm CO₂ en een temperatuur van 27 °C in de meetcuvet.



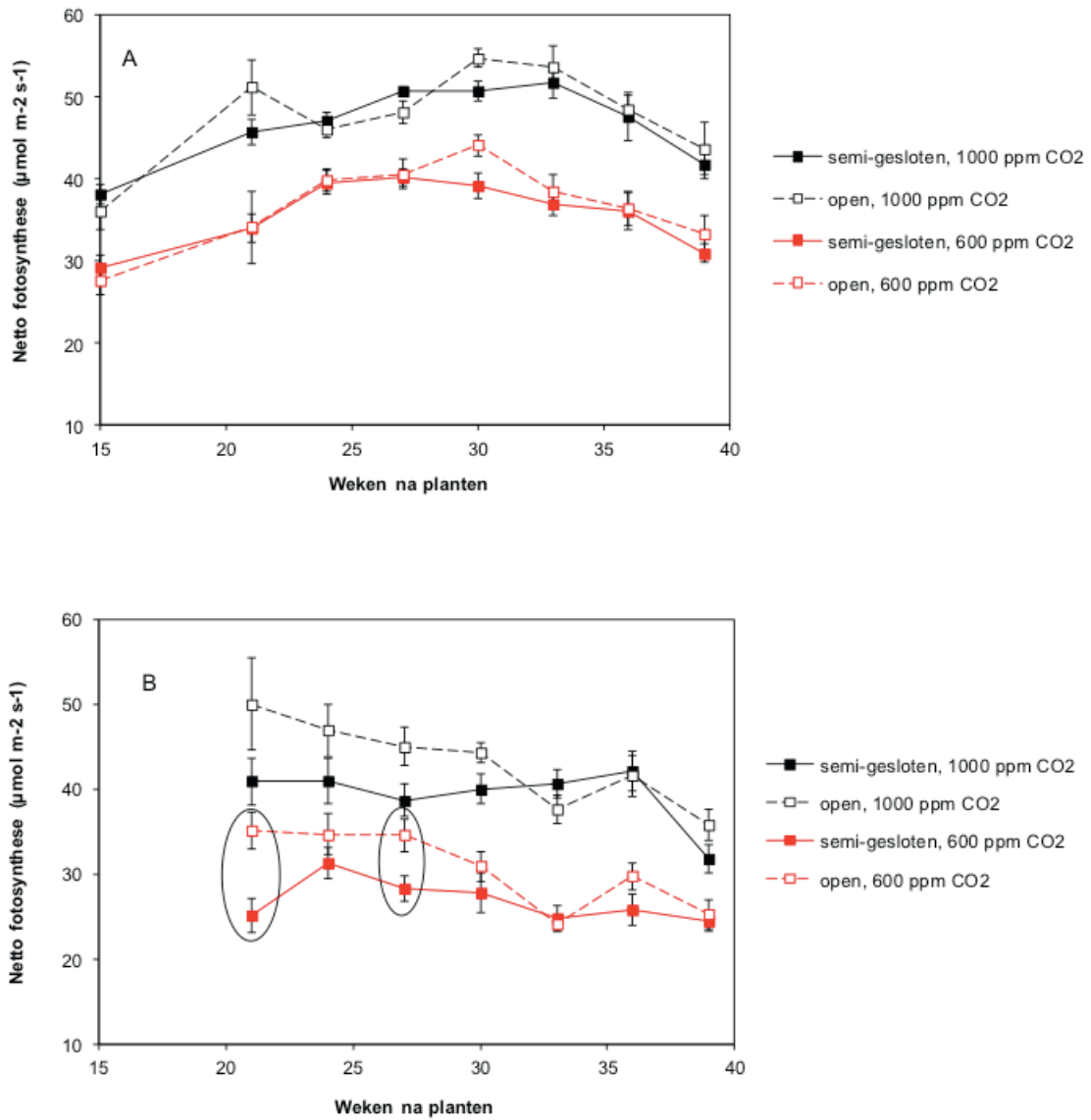
Figuur 8.9. Verloop van de netto fotosynthesesnelheid van de middelste tomatenbladeren bij een hoge ($1400 \mu\text{mol PAR}/\text{m}^2/\text{s}$) en lage lichtintensiteit ($465 \mu\text{mol PAR}/\text{m}^2/\text{s}$) bij verschillende vochtigheden (dampdrukdeficit; VPD) bij 400 en 1200 ppm CO_2 en een temperatuur van 27°C in de meetcuvet.

8.3 Adaptatie

In een (semi-)gesloten kas liggen de CO_2 niveaus gemiddeld hoger dan in een open kas. Daarnaast is de CO_2 concentratie langdurig hoog. Er is daarom onderzocht of er een bepaalde gewenning plaatsvindt aan de hogere CO_2 niveaus. Als dit zo zou zijn, zou de hogere CO_2 concentratie minder zinvol zijn. De maximale fotosynthesesnelheid bij hoge lichtniveaus werd daarom gedurende het groeiseizoen gemeten bij zowel de normale CO_2 concentratie als bij hoge CO_2 concentratie (1000 ppm).

De fotosynthese heeft een seizoensverloop, naar de langste dag toe neemt de lichtintensiteit toe en ook de fotosynthese (Figuur 8.10.). Na de langste dag neemt de fotosynthese af, ondanks het feit dat de omstandigheden in de meetcuvet van de fotosynthesemeter niet veranderen. Blijkbaar passen de planten zich in de loop van het seizoen aan aan de heersende klimaatomstandigheden, waardoor ze in de zomermaanden bij een zekere hoeveelheid licht meer fotosynthese hebben dan in het voorjaar en najaar.

Uit Figuur 8.10. blijkt dat de bovenste bladeren geen aanpassing aan hoge CO_2 concentraties vertonen: er zijn geen significante verschillen in fotosynthesesnelheid. Voor wat betreft het middelste blad lijkt er een verschil te zijn tussen de fotosynthesesnelheid in de open en de semi-gesloten kas. Een statistische test wijst echter uit dat de significante verschillen zich beperken tot twee meetmomenten (in Figuur 8.10. aangegeven met cirkels). Over het geheel genomen lijkt er geen aanpassing aan continu hoge CO_2 concentraties te zijn.



Figuur 8.10. Netto fotosynthesesnelheid bij een lichtintensiteit van $1860 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, temperatuur van 27°C en CO_2 concentraties van 1000 en 600 ppm, in de open en in een semi-gesloten kas, en voor het bovenste blad (A), en voor het middelste blad (B).

De reden voor het feit dat er in de middelste bladeren wel verschillen te zien zijn in fotosynthese tussen de open en semi-gesloten kas op twee tijdstippen, maar niet in de bovenste bladeren is niet duidelijk. Daarom is besloten in het experiment van 2010 een deel van deze metingen te herhalen en uit te breiden naar 5 gewasdieptes.

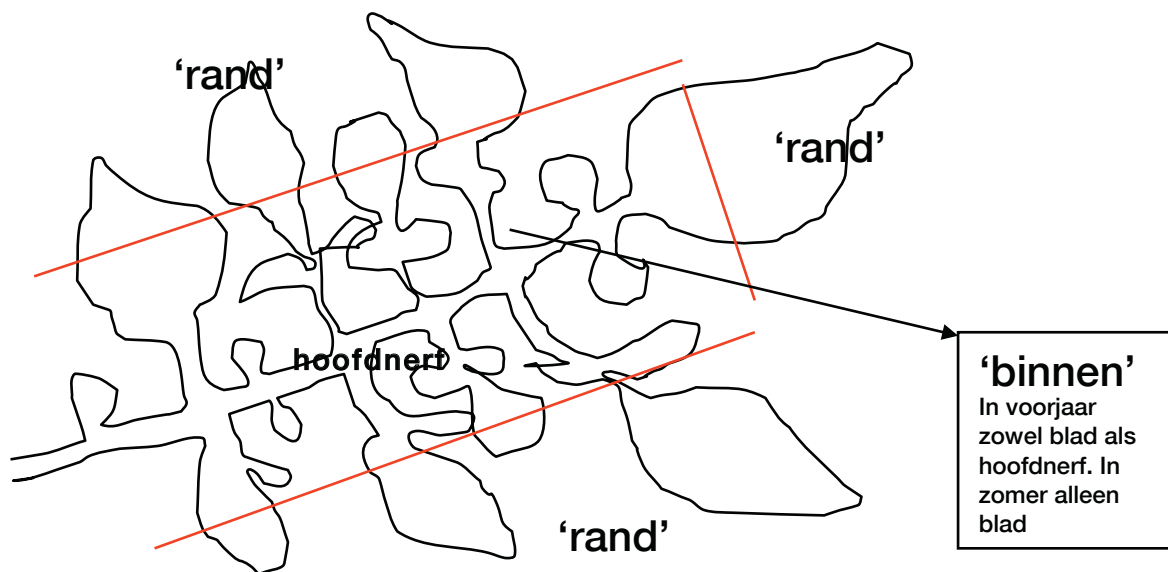
8.4 Conclusies fotosynthesemetingen

Met behulp van draagbare fotosyntheseapparatuur is in de proef de bladfotosynthese gemeten. Bij hogere lichtintensiteiten is het positieve effect van hogere CO₂ concentraties op de fotosynthese groter. Dit effect is nog sterker bij hogere temperaturen (tot 34 °C). Dat houdt in dat als er veel licht is en de CO₂ concentratie hoog is, een omstandigheid die typisch is voor geconditioneerde kassen, een hogere temperatuur positief is voor de aanmaak van assimilaten. Dit geldt met name voor de bovenste bladeren die het meeste licht onderscheppen. In een geconditioneerde kas is de CO₂ concentratie langdurig hoog. Het blijkt echter dat de bladeren in staat blijven gedurende de teelt de CO₂ efficiënt te gebruiken voor de fotosynthese.

9 Nutriënten

9.1 Metingen

Op twee momenten, te weten 28 april en 8 juli zijn nutriëntenanalyses van blad en vrucht gedaan. Jong blad (blad bij hoogste bloeiende tros) en oud blad (laagste blad aan het plant) zijn geanalyseerd nadat bladschijf verdeeld werden in rand (uiterst randje van het blad) en binnen (blad inclusief of naast de hoofdnerf). In het voorjaar zijn bladschijf en hoofdnerf gebruikt voor de analyse en in de zomer alleen de bladschijf (Figuur 9.1.).



Figuur 9.1. Diagram van de gedeeltes van het blad bij monsternamen in voorjaar en zomer.

Dit heeft naar verwachting enige consequenties voor de resultaten. De bladranden bevatten meer Ca dan het weefsel dichterbij de hoofdnerven. Ook heeft de hoofdnerf een lager drogestofgehalte t.o.v. bladmoes. Daarom zal er hoogstwaarschijnlijk enige invloed zijn op calciumgehalte. De vruchten die geanalyseerd zijn, waren de tweede vruchten op een rijpe tros. De vruchten zijn opgedeeld in drie gelijke lagen met laag 1 bij de steel en laag 3 aan het uiteinde van de vrucht. De monsters zijn geanalyseerd bij Relab de Haan.

In deze proef wordt de nutriëntenopname aan de hand van een aantal ionen vergeleken. Sommige elementen zoals calcium, borium en in zekere mate ook mangaan gaan voornamelijk passief mee met de waterstroom naar de verdampende bovengrondse delen. Andere elementen, zoals kalium en stikstof worden actief opgenomen en vooral ook actief geredistribueerd via het floëem, op basis van sinksterkte. Calcium wordt niet herverdeeld, er is namelijk geen of nauwelijks sprake van transport via het floëem. Een grote verdamping betekent ook meer Ca aanvoer naar de verdampende delen: bladeren en daarvan voornamelijk de bladranden. Ca transport naar de vruchten is beperkt aangezien een vrucht slechts in geringe mate verdampt, bovendien is het oppervlak van een vrucht zeer gering ten opzichte van de totale vruchtmassa. Verschillen in verdampingshistorie van een plantorgaan zullen dus vooral tot uiting komen in het Ca gehalte.

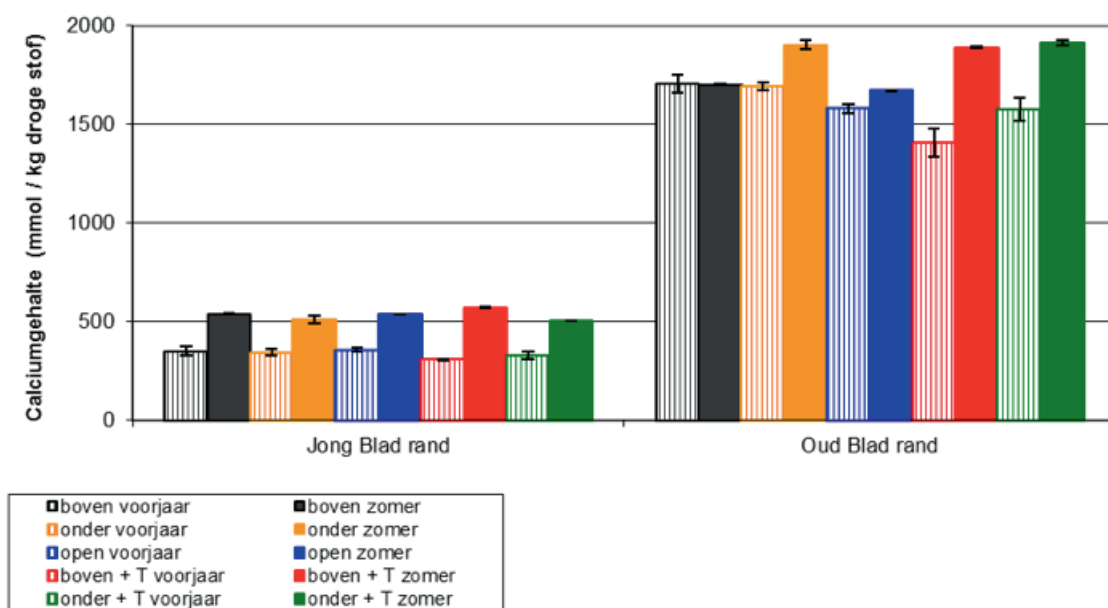
In dit hoofdstuk en in de bijlage zijn de resultaten van de analyses van de elementen calcium, kalium, magnesium en borium uitgezet. De concentraties van de elementen zijn uitgedrukt in mmol per kg drogestof, behalve bij kalium die uitgedrukt is in mmol per liter. Dit omdat kalium uitsluitend opgelost in het celvocht voorkomt en de andere elementen voornamelijk worden vastgelegd in structurele massa zoals celwanden/membraan (calcium) of in het fotosyntheseapparaat (magnesium).

9.2 In het blad

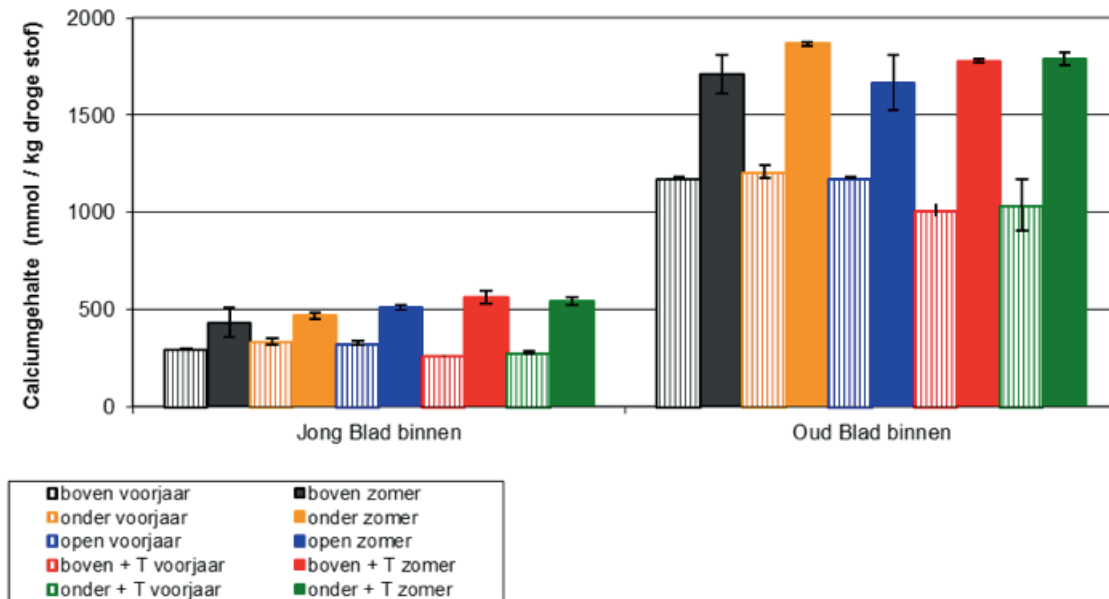
9.2.1 Calcium

Over het algemeen is er meer calcium in het blad in de zomer dan in het voorjaar. De hogere calciumniveaus in de bladeren in de zomer zijn logischerwijs het gevolg van meer verdamping in de zomer dan in het voorjaar. In het voorjaar en zomer is er meer calcium in de randen en in het midden van het oude blad dan in de randen en midden van het jonge blad (Figuren 9.2 en 9.3). Oudere bladeren hebben een langere verdampingshistorie, de bladranden verdampen meer dan de rest van het blad.

In alle behandelingen is het Ca gehalte (mmol per kg droge stof) in de randen van de jonge bladeren lager dan in de oude bladeren. De randen van de jonge bladeren hebben een ongeveer 4-5% hoger drogestof percentage dan de oude bladeren, dus de absolute hoeveelheid van bijvoorbeeld Ca in de randen van de jonge bladeren is hoger dan in de grafieken aangegeven.



Figuur 9.2. Calciumgehalte van het jonge en oude blad in voorjaar en zomer; rand is uiterst randje van het blad.



Figuur 9.3. Calciumgehalte van het jonge en oude blad in voorjaar en zomer; binnen is blad langs de nerf

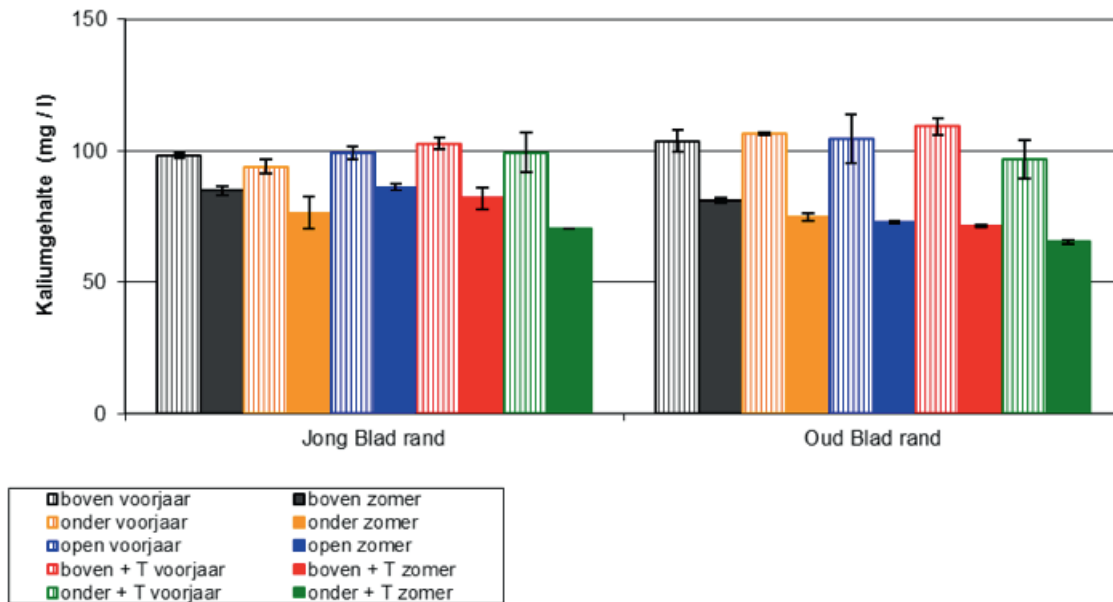
In de randen van het oude blad is er minder verschil in calciumgehaltes tussen voorjaar en zomer dan in de binnenkant van het oude blad. Dit zou verklaard kunnen worden door de verschillende manieren van monsternamen, immers er was in de zomer meer bladachtig materiaal aanwezig in het monster dan in het voorjaar, waardoor er door de verdampingsaanvoer een hoger Ca gehalte is ontstaan. Dat er in het jonge blad weinig verschil is tussen de randen en de binnenkant is mogelijk veroorzaakt door de veel kortere verdampingshistorie van het weefsel. Dit blijkt duidelijk uit het grote verschil in Ca niveau tussen jong en oud blad.

In bijlage VIII zijn grafieken te vinden voor alleen jong blad. Tussen de behandelingen is er weinig verschil. De verdamping in de open kas was hoger dan in de geconditioneerde kassen met onder- of bovenkoeling. Dit leidde echter niet tot significant hogere calciumgehaltes in de randen van deze jonge bladeren.

Mangaan vertoont een gelijk beeld als calcium (zie bijlage VIII).

9.2.2 Kalium

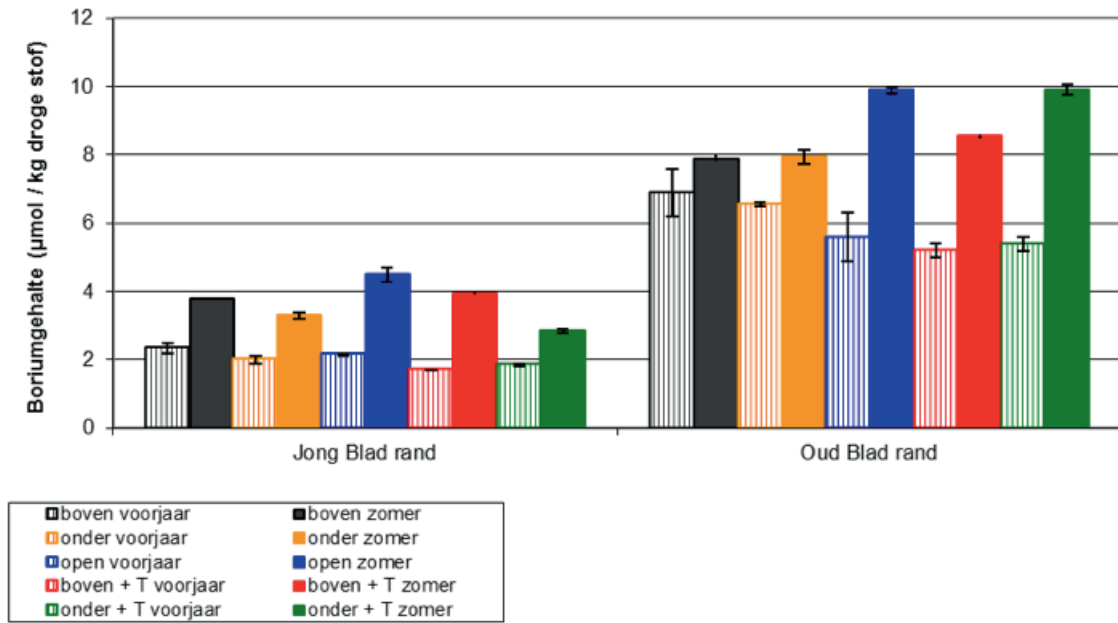
De kaliumgehalten variëren en zijn hoger in de bladranden in het voorjaar dan de zomer (Figuur 9.4.). Dit is ook het geval aan de binnenkant van het blad (zie bijlage VIII). Er zijn geen verschillen in kaliumgehalten tussen het jonge blad en het oude blad, mogelijk omdat kalium zeer mobiel is in de plant. Er zijn geen verschillen in kaliumgehalten tussen de open kas en de geconditioneerde kassen met onder- of bovenkoeling.



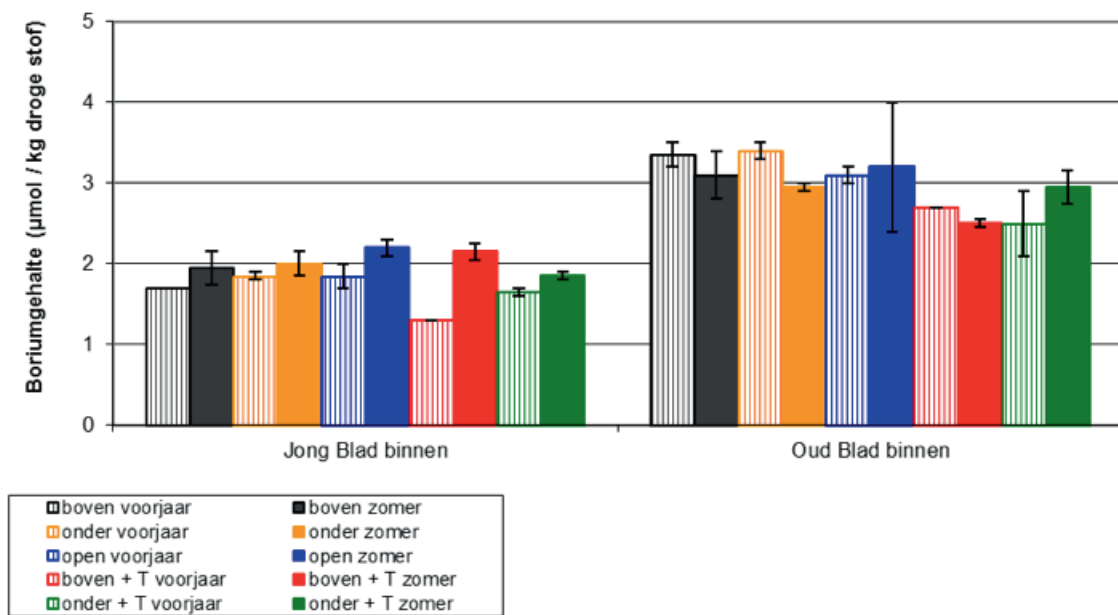
Figuur 9.4. Kaliumgehalte van het jonge en oude blad in voorjaar en zomer; rand is uiterst randje van het blad

9.2.3 Borium

Borium hoopt zich vooral op in de randen van de oude bladeren. Vooral in de open kas en de kas met onderkoeling en temperatuurverhoging (onder+T) is er veel borium in de randen van het oude blad (Figuur 9.5.). Dit is, in tegenstelling tot calcium, wel verklaarbaar uit de verschillen in verdamping. In de binnenkant van het blad zijn de niveaus in zowel de jonge als oude bladeren lager dan in de bladranden (Figuur 9.6.). Hiervoor kan dezelfde verklaring worden gegeven als bij calcium, zij het dat bij borium geen verschillen tussen voorjaar en zomer zichtbaar zijn.



Figuur 9.5. Boriumgehalte van het jonge en oude blad in voorjaar en zomer; rand is uiterst randje van het blad

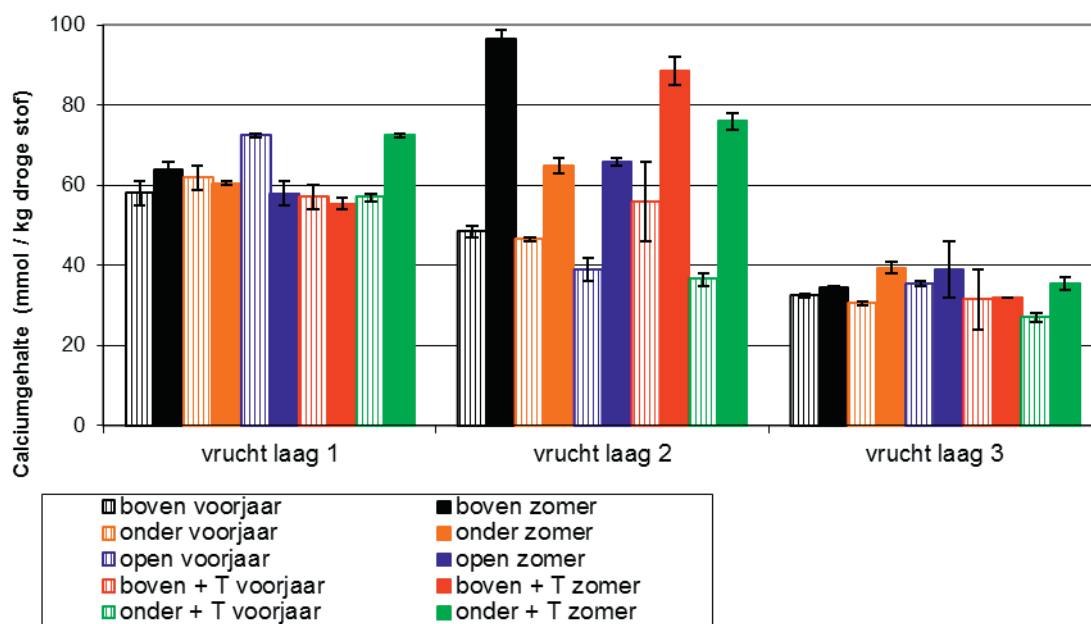


Figuur 9.6. Boriumgehalte van het jonge en oude blad in voorjaar en zomer; blad binnen is blad langs hoofdnerf

9.3 In de vrucht

9.3.1 Calcium

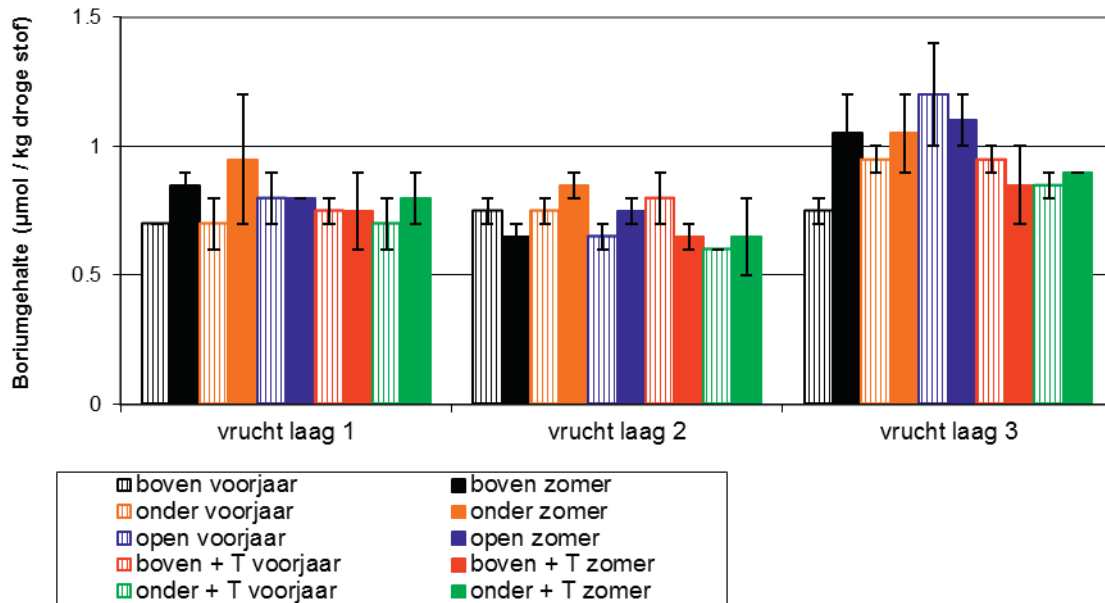
In zowel de lente als in de zomer is er minder calcium per kg droge stof in de uiteinden van de vruchten (blossom end) dan in de rest van de vrucht. Dit effect is in overeenstemming met wat in eerdere onderzoeken is gevonden. Er lijkt soms meer calcium aanwezig in de zomer dan in de lente, met name in de middelste vruchtlaag (Figuur 9.7.). Een verband met de calciumniveaus in de randen van het jonge of oude blad en de niveaus in de vruchtlaag 3 is niet aangetoond (Zie bijlage VIII). In het uiteinde van de vruchten is het calciumgehalte een derde van de gehalte in de laag direct bij het steeltje, maar er zijn geen duidelijke verschillen tussen de behandelingen.



Figuur 9.7. Calciumgehalte in de vrucht, opgedeeld in 3 lagen (laag 1 naast steel, laag 3 aan uiteinde van vrucht).

9.3.2 Borium

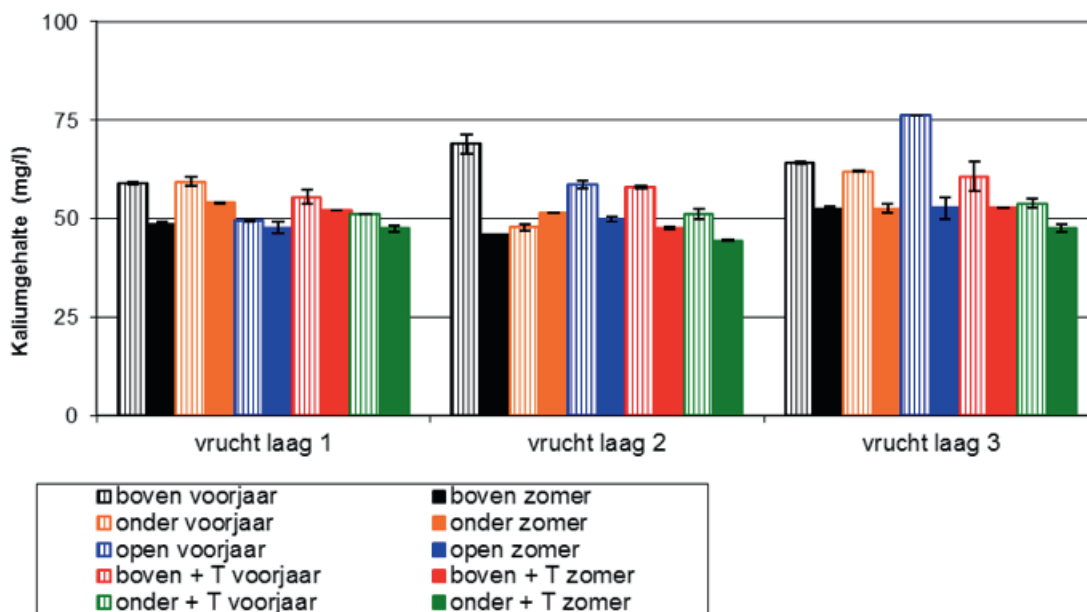
Het gehalte aan borium is in het uiteinde van de vrucht iets hoger dan in de rest van de vrucht (Figuur 9.8.). In het uiteinde van de vrucht is het boriumgehalte in de open kas iets hoger dan in de geconditioneerde afdelingen.



Figuur 9.8. Boriumgehalte in de vrucht, opgedeeld in 3 lagen (laag 1 naast steel, laag 3 aan uiteinde van vrucht).

9.3.3 Kalium

In het voorjaar zijn de kaliumgehaltenes in de vruchten hoger dan in de zomer (Figuur 9.9.). Dit effect is in overeenstemming met eerdere bevindingen dat naarmate het seizoen vordert, de kalium gehaltenes in de vruchten dalen.



Figuur 9.9. Kaliumgehalte in de vruchten opgedeeld in 3 lagen (laag 1 naast steel, laag 3 aan uiteinde van vrucht).

9.4 Discussie en conclusie

De gevonden verschillen in Ca gehalten in plantendelen, leeftijden en seizoenen zijn volledig in overeenstemming met de verwachting op grond van de kennis van het gedrag van Ca. Echter, hoewel er verschillen zijn in verdamping tussen de kassen, komt dit niet tot uiting in de Ca gehalten. Mogelijk zijn de verschillen in verdamping te gering om effect te hebben gehad op de Ca opname. De kritische effecten van verdamping op Ca zouden te verwachten zijn in bladranden van jong blad of in vruchtpunten. Bij te weinig verdamping zal er dan een te laag Ca gehalte ontstaan, waardoor Ca gebrek ontstaat, dit uit zich in de zogenaamde “bladrandjes”. Bij teveel verdamping is er te weinig transport naar de vruchten en kan dáár Ca gebrek ontstaan, dit uit zich in neusrot. Echter noch in de bladranden noch in de vruchtmonsters is enige aanleiding te zien voor genoemde problemen. Het ontstaan van neusrot is echter veel complexer dan alleen de verdamping als factor, aangezien plantbelasting en plantbalans nog veel belangrijker aspecten zijn en daarnaast factoren in het wortelmilieu een belangrijke rol spelen. Voor het effect op “vochtblaadjes” is dit onderzoek wellicht niet gericht genoeg geweest, omdat hoogstwaarschijnlijk de Ca aanvoer in een heel jong stadium hiervoor de meest kritische factor is.

Er zijn nagenoeg geen verschillen geconstateerd in nutriëntengehaltes in de verschillende organen als gevolg van de behandelingen. De watergeefstrategie was zo dat in alle behandelingen een vergelijkbaar drainpercentage (30%) gerealiseerd werd. Eventuele verschillen in nutriëntengehaltes zouden dan veroorzaakt moeten worden door verschillen in selectieve opname, of door verschillen in wortelactiviteit als gevolg van verschillen in mattemperatuur. Blijkbaar waren deze factoren niet zodanig verschillend tussen de behandelingen, dat de nutriëntengehaltes in de organen hierdoor beïnvloed werden.

10 Kwaliteit en houdbaarheid

Om na te gaan wat het effect is van geconditioneerd telen op de kwaliteit en houdbaarheid van tomaten, zijn gedurende de teelt een aantal malen monsters genomen van de geogoste vruchten. Hieraan is de stevigheid bepaald, suikergehalte, zuurgethalte, %Brix, anionen en smaak (met behulp van het smaakmodel). Hierbij werd verondersteld dat een lagere temperatuur bij de vruchten zou leiden tot een betere houdbaarheid en kwaliteit. Deze veronderstelling werd getoetst door zowel tomaten te bemonsteren uit de afdeling met bovenkoeling (geen verticale temperatuurgradiënt) als uit de afdeling met onderkoeling (wel een verticale temperatuurgradiënt). Verder was de veronderstelling dat de hogere CO₂ concentratie in de semi-gesloten afdelingen zou leiden tot zwaardere vruchten.

Het concept “productkwaliteit” omvat zowel sensorische eigenschappen (uiterlijk, stevigheid, smaak, aroma), voedingswaarde, inhoudsstoffen, mechanische eigenschappen, functionele eigenschappen en defecten. Kwaliteit kan gezien worden vanuit het product, of vanuit de consument. In dit geval werden grootte en productie bepaald, van belang voor de teler, en smaak, kleur, stevigheid en bewaarbaarheid, die van belang zijn voor de handelaars.

10.1 Metingen

Kwaliteit

In de periode mei tot en met september zijn er maandelijks door Wageningen Universiteit kwaliteitsmetingen uitgevoerd aan tomaten uit de afdelingen met bovenkoeling, onderkoeling en de open kas. Voor de kwaliteitsbepalingen zijn steeds de middelste tomaten van de trossen genomen. De partijen tomaten werden verdeeld in twee delen voor de “destructieve” en “niet-destructieve” metingen. Om de 5 dagen werden 20 vruchten destructief geanalyseerd op het Brix-gehalte, suikergehalte (fructose, glucose en sucrose) en het gehalte aan anionen (malaat en citraat). De kleur en stevigheid van 30 vruchten werd om de 5 dagen niet-destructief gemeten. De bewaring van de vruchten vond plaats bij 16 °C en de laatste meting werd uitgevoerd na 20 dagen. De stevigheid van de vruchten werd op twee verschillende plekken gemeten met een Zwick meter. Stevigheid werd uitgedrukt als de maximale kracht die nodig was om de tomaat 1 mm in te drukken met een snelheid van 40 mm/min. De kleur werd gemeten met een Minolta chromameter (Lab waardes) en met een Pigment analyzer (NAI en NDVI waardes).

Het %Brix (oplosbare vaste delen) werd gemeten met een digitale refractometer. Totaal suikergehalte (fructose, glucose en sucrose) en anionen (malaat en citraat) werden gemeten met de methode van Hajjaj *et al.* (1998).

Smaak

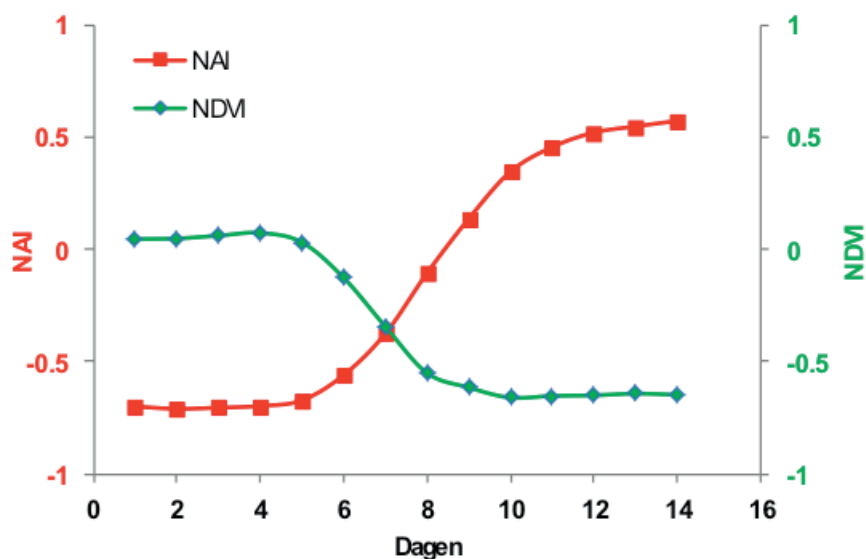
In totaal 3 maal zijn op respectievelijk 17 juni, 17 juli en 12 oktober smaakmetingen aan 30 tomaten afkomstig van alle vijf de afdelingen verricht. Hierbij zijn metingen uitgevoerd met behulp van een digitale refractometer en de Instron druktrembank. Met dit laatste apparaat is onder meer de hoeveelheid uitgeperst sap uit de vruchtwand gemeten. Aan de hand van de gegevens is de smaak berekend met behulp van het smaakmodel ontwikkeld door Wageningen UR Glastuinbouw.

Houdbaarheid

De houdbaarheid in dagen werd bij tomaten afkomstig uit alle afdelingen op 3 inzetdata, namelijk op 11 juni, 9 juli en 9 oktober bepaald bij 8 trossen uit elke kasafdeling. De bewaring vond plaats bij een temperatuur en RV van respectievelijk 20 °C en 80%. De stevigheid werd 3 maal per week met de hand bepaald. Wanneer de tomaat onvoldoende stevig of rot werd bevonden, was het einde van het uitstalleven bereikt.

10.2 Kleur

In de kas werden de trossen geoogst op kleur. Voor de metingen van houdbaarheid en kwaliteit in Wageningen, werden de vruchten uit het midden van de tros geselecteerd met een vergelijkbaar kleurstadium. Kleur van deze vruchten werd gemeten met een Pigment Analyser. Dit instrument meet de geabsorbeerde (en gereflecteerde) lichtspectra, en geeft de parameters NDVI en NAI weer, die overeenstemmen met groene (chlorofyl) en rode (lycopeen) pigment. In Figuur 10.1 wordt het verloop van deze parameters gegeven van groene vruchten tot volledig rijpe vruchten.

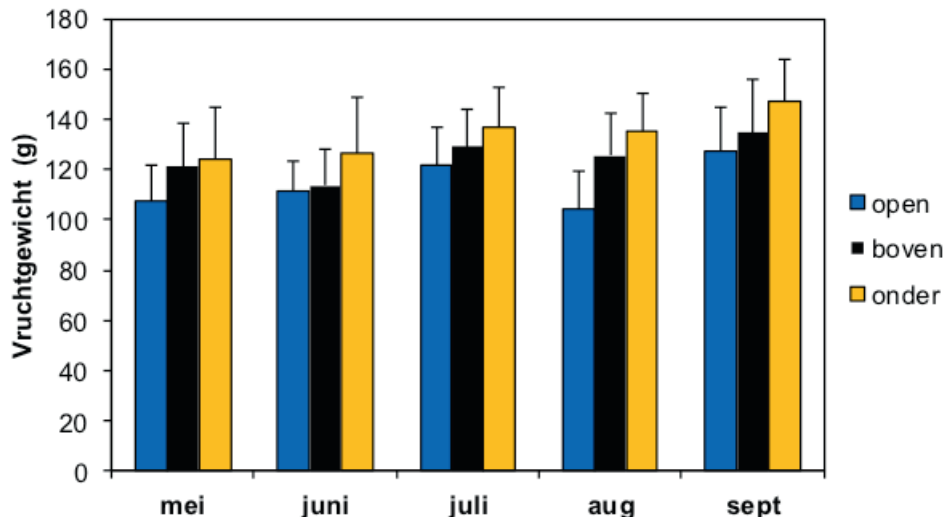


Figuur 10.1. Kleurgegevens van de Pigment analyzer van groene vruchten tot rode vruchten.

Voor de bepalingen van kwaliteit werden tomaten geselecteerd met een NAI van ca. 0.5.

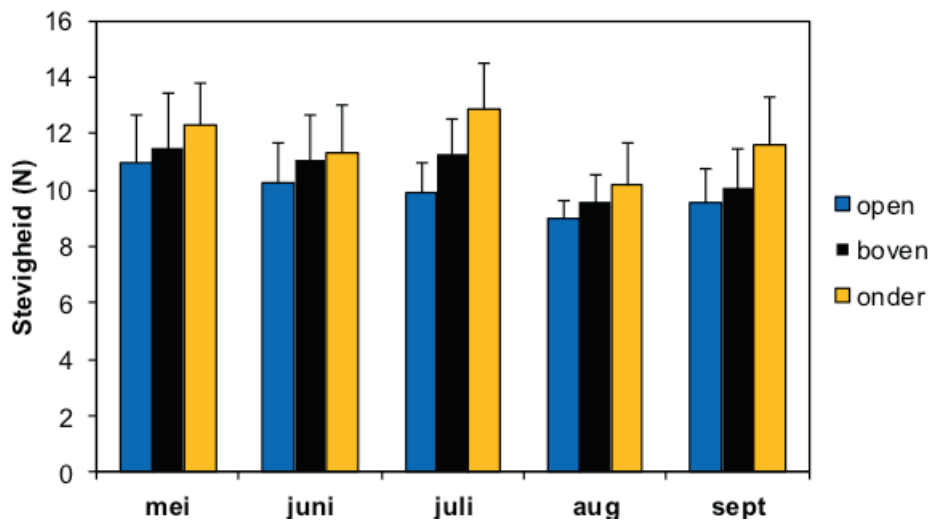
10.3 Gewicht, stevigheid en houdbaarheid

Zoals ook uit de vruchtoogsten van meerdere rijen was vastgesteld, zijn de vruchten uit de geconditioneerde kassen zwaarder dan de vruchten uit de open kas en zijn de vruchten uit de kas met onderkoeling zwaarder dan uit de afdeling met bovenkoeling (Figuur 10.2). Het grootste verschil tussen de open kas en kas met bovenkoeling is het CO₂ gehalte, dat leidt tot een hoger gemiddeld vruchtgewicht. Het verschil tussen de kas met onderkoeling en de kas met bovenkoeling is de temperatuur in het onderste deel van het gewas, ter hoogte van de afrijpende vruchten, die lager is bij onderkoeling. Tussen de behandelingen werden geen verschillen gevonden in de rode kleur van de tomaten.



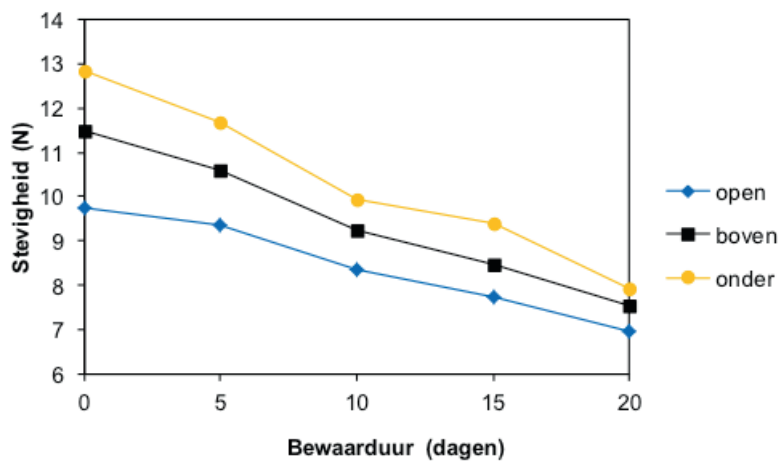
Figuur 10.2. Verloop van het gemiddeld vruchtgewicht (g) gedurende het seizoen in de behandelingen onderkoeling, bovenkoeling en open kas, gemeten aan 60 vruchten per behandeling.

De stevigheid van de vruchten gedurende het seizoen vertoont het zelfde patroon als het gemiddeld vruchtgewicht (Figuur 10.3). Vruchten uit de kas met onderkoeling zijn het stevigst, vruchten uit de open kas zijn het minst stevig. Dit beeld is consistent over alle oogsten.



Figuur 10.3. Verloop van de stevigheid gedurende het seizoen in de behandelingen onderkoeling, bovenkoeling en open kas.

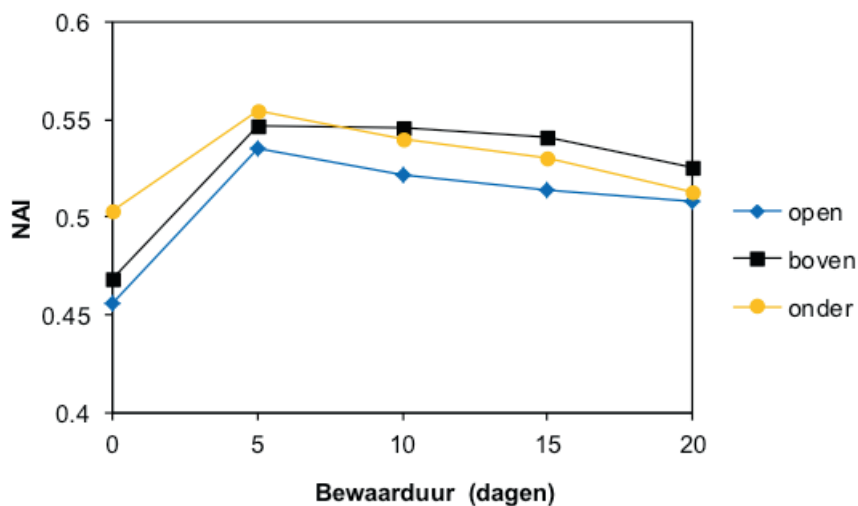
De stevigheid nam af gedurende de bewaring (Figuur 10.4).



Figuur 10.4. Verloop van de stevigheid tijdens de bewaring in juli van tomaten afkomstig uit de open kas en de semi-gesloten kassen met respectievelijk boven- en onderkoeling.

De stevigheid bij inzet is grotendeels bepalend voor de stevigheid na bewaring. Vooral de semi-gesloten kas met onderkoeling scoort daarin beter dan de open kas.

Het verschil in stevigheid wordt niet bepaald door een verschillende fysiologische leeftijd van de vruchten. In Figuur 10.5 is te zien dat de kleur van de vruchten, die sterk gecorreleerd is aan het rijpheidsstadium niet verschilt voor de verschillende behandelingen. In alle behandelingen is het rijpingsproces binnen 5 dagen bewaring voltooid met het bereiken van de maximale kleurwaarde.



Figuur 10.5. Effect van de behandeling op de kleurontwikkeling (NAI) gedurende de bewaring. Tomaten zijn afkomstig uit de open kas en de semi-gesloten kassen met respectievelijk boven- en onderkoeling.

In de volgende tabel zijn de resultaten van de 3 houdbaarheidsproeven van tomaten uit alle vijf behandelingen weergegeven.

Tabel 10.1. De houdbaarheid in dagen bij de vijf behandelingen op 3 inzetdata en gemiddeld.

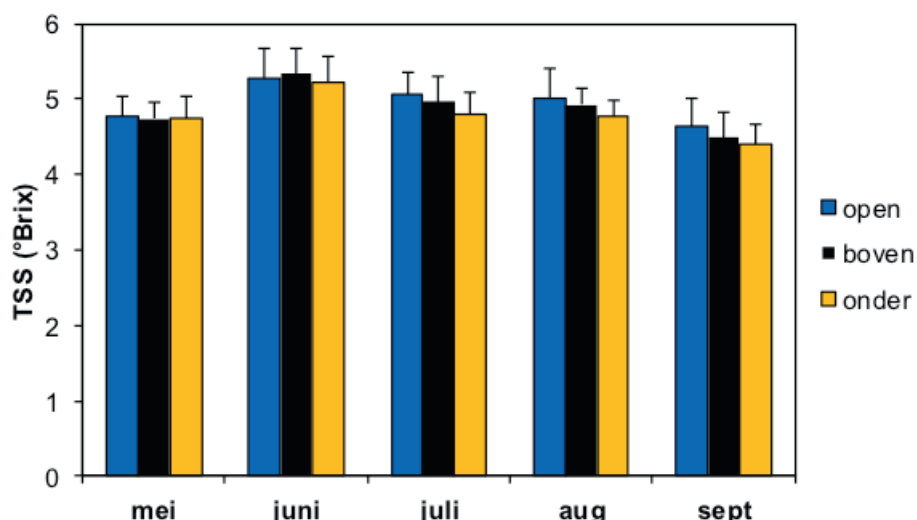
| Behandeling | 11 juni | 9 juli | 9 oktober | Gemiddeld |
|-------------|---------|--------|-----------|-----------|
| Boven | 15.5 | 18.2 | 14.6 | 16.1 |
| Onder | 17.3 | 18.5 | 13.8 | 16.5 |
| Open | 15.0 | 16.0 | 12.8 | 14.6 |
| Boven + T | 14.6 | 15.7 | 12.2 | 14.2 |
| Onder + T | 16.1 | 12.3 | 12.6 | 13.7 |

In het algemeen zijn de tomaten uit de twee kassen met onder- en bovenkoeling wat langer houdbaar dan de tomaten uit de open kas en de gekoelde kassen waar in de middag een wat hogere temperatuur is aangehouden. Uit ander onderzoek is bekend dat de stevigheid en de houdbaarheid inderdaad afnemen als de kastemperatuur hoger is. Tussen de boven- en onderkoeling zijn de verschillen in houdbaarheid gemiddeld gezien niet zo duidelijk. Alleen in juni lijken de tomaten uit de kassen met onderkoeling wat langer houdbaar te zijn dan bij bovenkoeling.

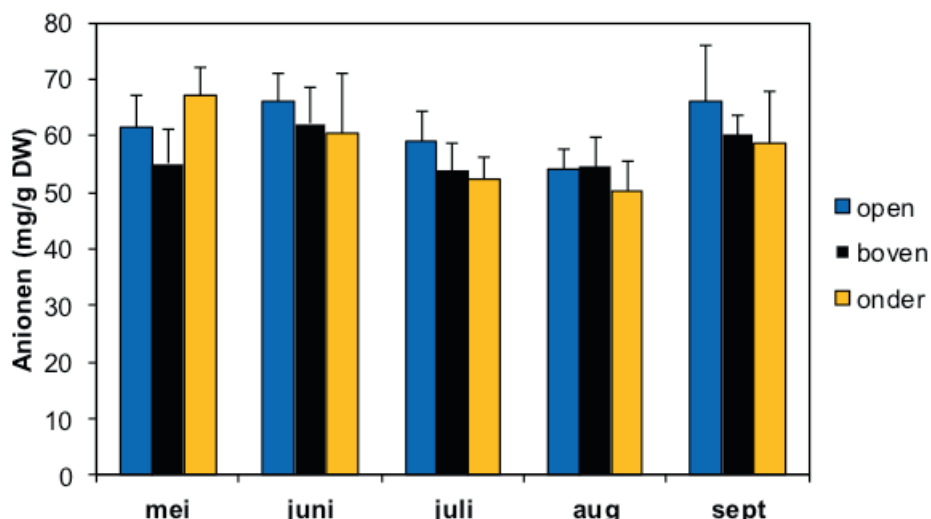
10.4 Vruchtsamenstelling en smaak

De toename in gewicht en stevigheid van tomaten uit de geconditioneerde kas met onderkoeling had geen negatief effect op de gehalten aan stoffen die verbonden zijn met de smaak van de tomaten (suikers en anionen) en met de kleur. Het gehalte aan opgeloste droge stof in een waterige vloeistof (% Brix) wordt vaak gebruikt om de kwaliteit van vruchten aan te geven, omdat dit een maat is voor het suikergehalte.

In de volgende twee figuren worden het Brix-gehalte en de hoeveelheid anionen (malaat en citraat) in de tomaten weergegeven.



Figuur 10.6. Het Brix-gehalte van tomaten uit de open kas en de semi-gesloten kassen met respectievelijk boven- en onderkoeling.



Figuur 10.7. De gewichtshoeveelheid aan malaat en citraat van tomaten uit de open kas en de semi-gesloten kassen met respectievelijk boven- en onderkoeling.

Zowel het Brix-gehalte als de hoeveelheid malaat en citraat zijn in het algemeen iets lager bij tomaten uit de semi-gesloten kas met onderkoeling in vergelijking met de open kas. Waarschijnlijk heeft dit vooral te maken met de wat lagere vruchttemperatuur. Uit eerder onderzoek is bekend dat een hogere (kas)temperatuur een hoger suiker- en zuurgehalte geven.

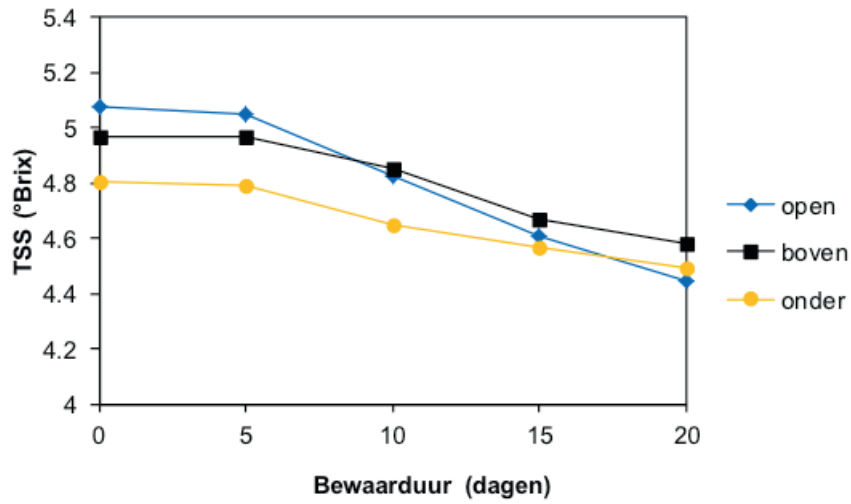
In de volgende tabel zijn de smaakgegevens gemiddeld over 3 data weergegeven van de tomaten bij vijf behandelingen.

Tabel 10.2. Het % sap, Brix-gehalte en de berekende smaak gemiddeld over 3 bepalingen bij de vijf behandelingen.

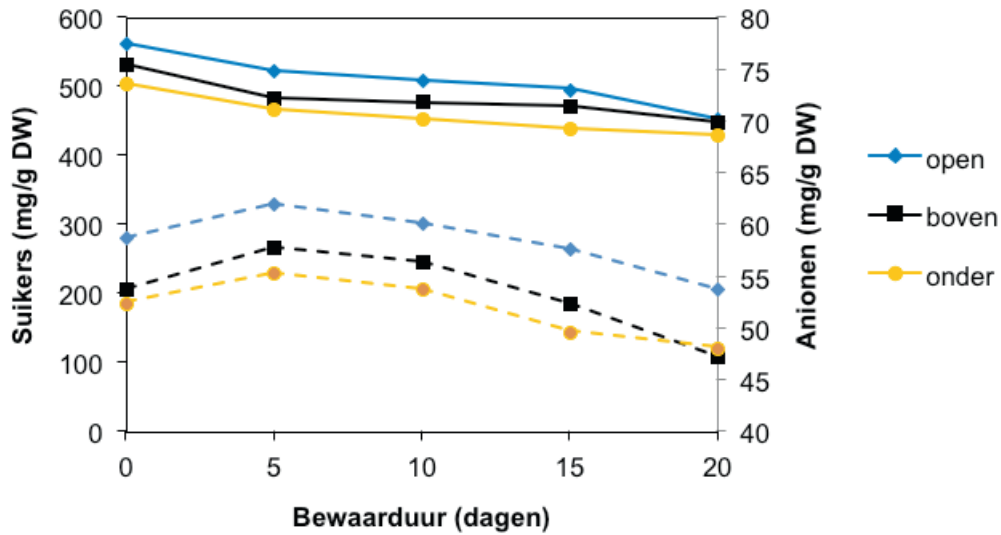
| Behandeling | Sap (%) | Refractie (°Brix) | Berekende smaak |
|-------------|---------|-------------------|-----------------|
| Boven | 21 | 4.3 | 47 |
| Onder | 19 | 4.2 | 46 |
| Open | 23 | 4.4 | 48 |
| Boven + T | 25 | 4.3 | 49 |
| Onder + T | 21 | 4.4 | 46 |

De verschillende klimaatbehandelingen hebben weinig invloed op het percentage sap, de refractie en de berekende smaak.

Net als de stevigheid, worden ook het verloop van het % Brix, maat voor het suikergehalte, en de hoeveelheid anionen gedurende de bewaring, met name beïnvloedt door de waardes op het moment van oogst (Figuren 10.8 en 10.9). Gedurende de bewaring neemt het percentage Brix iets af, terwijl het gehalte aan anionen eerst wat toeneemt en na 5 dagen iets afneemt. De afname in zuurgehalte komt overeen met bevindingen van anderen (Thorne & Efuwewewere, 1988).



Figuur 10.8. Het Brixgehalte van tomaten uit de open kas en de semi-gesloten kassen met respectievelijk boven- en onderkoeling gedurende de bewaring.



Figuur 10.9. De gehalten aan suikers (doorgetrokken lijnen) en anionen (onderbroken lijnen) in tomaten uit de open kas en de semi-gesloten kassen met respectievelijk boven- en onderkoeling gedurende de bewaring.

10.5 Conclusie

In dit hoofdstuk is een vergelijking gemaakt in kwaliteitskenmerken tussen tomaten die geoogst zijn in de open kas en in de geconditioneerde kassen met onderkoeling en bovenkoeling. Wanneer er gekeken wordt naar de eigenschappen gemiddeld vruchtgewicht, stevigheid en houdbaarheid, scoren de geconditioneerde kassen beter dan de open kas. Verder is de kwaliteit, uitgedrukt in gemiddeld vruchtgewicht en stevigheid hoger voor de tomaten uit de kas met onderkoeling dan uit de kas met bovenkoeling. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de lagere temperaturen in het onderste deel van het gewas waar de afrijping plaatsvindt.

De gehalten aan suikers (zoetheid) en anionen (zuurgethalte) waren ca. 5% lager in tomaten afkomstig uit de geconditioneerde afdelingen dan uit de open kas. Echter, uit analyses met het smaakmodel bleek dit geen aantoonbaar effect te hebben op de smaak van de tomaten.

11 Leerpunten en discussie

11.1 Leerpunten

In 2009 is in het kader van het project “Gewasmanagement bij geconditioneerd telen” een experiment uitgevoerd waarin groei en ontwikkeling van tomaat is geanalyseerd in een open kas en geconditioneerde kasafdelingen die verschilden in aan- of afwezigheid van een verticale temperatuurgradiënt en verschilden in de temperatuurverhoging op lichtintensiteit.

Uit deze proef is een aantal (teelttechnische) leerpunten te formuleren:

1. Met een geconditioneerde kas met een koelcapaciteit van 350 W/m^2 is bij tomaat een productiestijging gerealiseerd van 10-13% ten opzichte van een open kas. Deze stijging stemt redelijk overeen met de productiestijging in 2008.
2. De CO_2 concentraties in de geconditioneerde kassen hangt af van de aanwezigheid van de koeling en daarmee het verminderd ventileren. Gemiddeld over de maanden mei tot en met augustus was de CO_2 concentratie overdag in de open kas 630 ppm en in de geconditioneerde afdelingen 780 – 830 ppm.
3. Uit modelberekeningen blijkt dat de verschillen in CO_2 concentraties tussen open en geconditioneerde kassen nagenoeg volledig het verschil in productie verklaren.
4. Naarmate de kassen meer gesloten zijn, zijn er minder kilo's CO_2 nodig om de CO_2 concentratie in de kaslucht op het gewenste peil te houden. In de open kas werd 53.3 kg CO_2 per m^2 gedoseerd, terwijl dit in de kassen met onder- en bovenkoeling 39.6 kg/m^2 was. In de afdelingen met extra temperatuurverhoging op licht werd nog iets minder geventileerd, daar werd $34.7 - 37.2 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$ gedoseerd.
5. In geconditioneerde kassen is de gemiddelde CO_2 concentratie hoger. Door de temperatuur hierop af te stemmen, kunnen hogere etmaaltemperaturen gerealiseerd worden. De snelheid van trosaanleg wordt dan hoger, zodat het aantal trossen dat aangelegd wordt, toeneemt. Om het gewenste gemiddelde vruchtgewicht te behalen, moet de afstemming tussen plantafstand, aantal extra stengels, aantal vruchten per tros, licht, CO_2 concentratie en temperatuur goed zijn.
6. Een sterkere temperatuurverhoging op licht leidde tot gemiddeld hogere etmaaltemperaturen en een iets hogere CO_2 concentratie van de kaslucht. De trosafplitsingsnelheid was daarmee iets hoger (1 tros), maar er was geen effect op productie.
7. In geconditioneerde kassen waar koude onder in de kas wordt gebracht, ontstond een verticale temperatuurgradiënt, die op zonnige dagen opliep tot ca. $5 \text{ }^\circ\text{C}$ gemiddeld over de periode 1 mei – 31 augustus.
8. Het vochtdeficiet in geconditioneerde kassen is lager dan in de open kas. In de open kas wordt veel vocht afgevoerd via ventilatie. Geconditioneerde kassen kunnen vocht afvoeren via condensatie in de luchtbehandelingskasten. Dit is echter maar beperkt toegepast, omdat dit koude lucht oplevert, die naverwarmd moet worden voordat die de kas ingebracht wordt, of waarbij additioneel verwarmd moet worden wanneer deze de kas ingeblazen wordt om een te lage kasluchttemperatuur te voorkomen.
9. In geconditioneerde kassen is de luchtvochtigheid gemiddeld hoger. Dat heeft weinig effect op het gewas, maar brengt risico's met zich mee voor Botrytis en andere schimmelaantastingen. Indien goed gemonitord wordt en tijdig de vochtregeling aangepast wordt indien nodig, kan Botrytis voorkomen worden. In deze proef is dan ook nagenoeg geen uitval van planten door Botrytis geweest.
10. De verdamping is in geconditioneerde afdelingen lager dan in de open kas, voornamelijk veroorzaakt door de verschillen in vochtdeficiet en in mindere mate door de lagere temperaturen onder in de kas in de afdelingen met onderkoeling. De verdamping in de afdeling met bovenkoeling is ca. 71% van de verdamping in de open kas. Door de lagere bladtemperatuur onder in het gewas is de verdamping in de afdeling met onderkoeling nog lager, ca. 63% van de verdamping in de open kas.
11. Wanneer een kas van onderaf wordt gekoeld is de verticale verdeling van de verdamping anders dan wanneer van bovenaf wordt gekoeld. Bij koeling van onderaf, wordt onderin het gewas relatief minder verdampt dan bij koeling van boven (26% ten opzichte van 32% van de totale verdamping).
12. De verlaagde verdamping heeft geen effect op de nutriëntengehaltes in de plant. Dat betekent dat een gewas met 30% minder verdamping toe kan, zonder dat dit problemen oplevert voor de nutriëntenopname.

13. Bij weinig licht en een lage CO₂ concentratie heeft temperatuur nauwelijks effect op de fotosynthese. Bij veel licht en een hoge CO₂ concentratie ligt het temperatuuroptimum van de fotosynthese van de bovenste bladeren tussen de 32 en 34 °C. Bij lager gelegen bladeren die minder licht krijgen is er nauwelijks effect van temperatuur op de netto fotosynthese. In een geconditioneerde kas waar de CO₂ concentratie hoog gehouden kan worden, verdient het aanbeveling een sterkere lichtverhoging op de temperatuur in te stellen.
14. Tomaten uit geconditioneerde afdelingen waren steviger dan tomaten uit de open kas, en daardoor langer houdbaar. Daarbij waren tomaten uit de afdeling met onderkoeling steviger dan tomaten uit de afdeling met bovenkoeling.
15. De gehalten aan suikers en anionen, elementen van de smaak van een tomaat, waren iets lager in tomaten uit de geconditioneerde afdelingen dan in tomaten uit de open kas. Echter, uit analyses met het smaakmodel, waarin ook textuur is verwerkt, blijkt dat de smaak van tomaten uit de verschillende kassen niet verschilt.
16. Voor het personeel in de kas geldt dat de arbeidsomstandigheden in het algemeen in geconditioneerde kassen goed zijn. Op zonnige en warme dagen is het in een open kas warm, terwijl het in een geconditioneerde kas koeler aanvoelt doordat lucht wordt ingeblazen met een temperatuur die lager is dan de kaslucht.

11.2 Toetsen van de hypothesen

In 2008 kwam in de praktijk de discussie op gang of er gekoeld moest worden via slurven onder het gewas of via het inblazen van koele lucht boven het gewas. Beide systemen hebben hun voor- en nadelen, op het gebied van verticale temperatuurgradiënt (koeling onder) en lichtverlies door koelunits boven in de kas. De belangrijkste vraag die openstond was wat de effecten van beide systemen op de gewasgroei, -ontwikkeling en productie zijn. Om deze vragen te beantwoorden is het onderzoek uitgevoerd dat in dit rapport beschreven staat. De resultaten laten zien dat er inderdaad effecten zijn van een verticale temperatuurgradiënt op gemiddeld vruchtgewicht, productie, verdamping en kwaliteit van de vruchten, maar dat deze verschillen niet zodanig groot zijn dat de locatie van de koeling bepaald moet worden door de effecten op het gewas. Met de tuinders van de BCO hebben we geconcludeerd dat het heel goed mogelijk is tomaten te telen met zowel koeling van onderaf als koeling boven in de kas.

Bij het opzetten van dit onderzoek zijn een aantal hypothesen geformuleerd, die de basis waren voor de opzet van het experiment. In deze discussie worden de hypothesen, de meetresultaten en de conclusies kort besproken.

Hypothese 1. Fotosynthese

De basis van groei en productie is de aanmaak van assimilaten via de fotosynthese. De vraag hierbij is onder welke omstandigheden een maximale toename van de fotosynthese en daarmee van de productie bereikt kan worden. Een maximale fotosynthese komt tot uiting in een CO₂ opname die volledig gerelateerd is aan de lichtintensiteit, CO₂ concentratie en temperatuur. Hierbij gaan we er van uit dat er geen aanpassing is van de fotosynthese aan de hoge CO₂ concentraties in de kas, die gedurende het hele jaar hoog zijn (in tegenstelling tot de CO₂ concentratie in de open kas).

Hypothese: De fotosynthese in verschillende klimaten wordt alleen bepaald door lichtintensiteit, CO₂ concentratie en temperatuur. Er vindt geen aanpassing plaats aan de langdurig hoge CO₂ concentratie in de geconditioneerde kassen.

In hoofdstuk 8 van dit rapport worden de resultaten van uitgebreide fotosynthesemetingen beschreven die in dit project zijn gedaan. In het experiment in 2008 zijn al vergelijkingen gedaan tussen planten uit de open kas en de gesloten kas; de fotosynthesekarakteristieken van deze planten bleek niet te verschillen (Dieleman *et al.* 2009; Figuur 4.18.). Bij hogere lichtintensiteiten neemt de bladfotosynthese toe, deze toename is sterker bij hogere CO₂ concentraties in de bladkamer. Een toename van de CO₂ concentratie van 400 naar 800 ppm leidt tot bijna een verdubbeling van de fotosynthese, een toename van 1200 naar 1600 ppm leidt nauwelijks meer tot een toename van de fotosynthese. Een toename van 800 naar 1200 ppm CO₂ leidt nog wel tot een verhoging van de fotosynthese. De bladeren in het midden van het gewas reageren minder sterk op CO₂ en hebben een lagere fotosynthese dan bladeren bovenin het gewas. Bij veel licht en veel CO₂ is de bladfotosynthese optimaal tussen 32 en 34 °C. Bij weinig licht en een lage CO₂ concentratie wordt de bladfotosynthese tot 30 °C nauwelijks beïnvloed door temperatuur; daarna neemt de fotosynthese af bij toenemende temperaturen.

VPD heeft geen effect op de fotosynthese tussen ca. 0.4 en 2.5 kPa. Al deze responsen van fotosynthese op afzonderlijke klimaatfactoren zijn zoals verwacht. Hoe dit doorwerkt op de gewasfotosynthese, staat beschreven in het rapport van Elings *et al.* (2011) dat de modelberekeningen behorend bij dit experiment beschrijft.

In een geconditioneerde kas is de CO₂ concentratie langdurig hoog. In de 1980er en 1990er jaren zijn er onderzoeken gedaan, waaruit bleek dat de fotosynthese afnam als planten lang bij hoge CO₂ concentraties stonden (Peet *et al.* 1986; Yelle *et al.* 1989; Besford *et al.* 1990). Latere onderzoeken lieten zien dat tenminste een deel van dit effect werd veroorzaakt door een te klein wortelvolumen of te weinig vruchten aan de plant waardoor er een terugregulering van de fotosynthese plaatsvond (Arp, 1991; Usuda & Shimogawara, 1998; Makino & Mae, 1999). De metingen die gedaan zijn in de open kas en de kas met onderkoeling laten zien dat de tomatenplanten in ons experiment zich niet aangepast hebben aan de verschillen in CO₂ concentraties. Dat betekent dat de fotosynthese van planten in geconditioneerde afdelingen op niveau blijft gedurende de teelt als er voldoende "sinks" aanwezig zijn. Een test in onze proef liet inderdaad zien dat als het aantal "sinks" kunstmatig verlaagd wordt door het verwijderen van alle tomaten van planten of het terug snoeien van alle trossen op 2 vruchten, de fotosynthese van deze planten afneemt. Er is dus wel een terugregulering van de fotosynthese: als er minder vraag is naar assimilaten neemt ook de productie van assimilaten af.

Samenvattend: de fotosynthese in zowel de open kas als in geconditioneerde kassen wordt alleen bepaald door de instraling, CO₂ concentratie en temperatuur van dat moment. Er vindt geen aanpassing plaats aan langdurig hoge CO₂ concentraties in de geconditioneerde kassen. Echter, als er onvoldoende vraag naar assimilaten is, wat in een praktijkconforme tomatenteelt niet voor zal komen, zal de fotosynthese afnemen.

Hypothese 2. Assimilatenverdeling onder invloed van orgaantemperaturen (verticale temperatuurgradiënt)

De assimilatenverdeling tussen vegetatieve delen (bladeren, stengels, wortels) en generatieve delen (vruchten) is van groot belang voor de productie. De verdeling van assimilaten wordt gestuurd door de 'sink' sterkte van de verschillende organen. In hoeverre temperatuur hierbij een rol speelt bij tomaat is (nog) niet bekend.

Hypothese: De assimilatenverdeling binnen een plant wordt beïnvloed door de verticale temperatuurgradiënt.

De resultaten die betrekking hebben op deze hypothese staan beschreven in hoofdstukken 4 en 5. In hoofdstuk 4 staan de resultaten beschreven van de destructieve oogsten. In deze proef werden periodiek planten destructief geoogst en werden vers- en drooggewichten van bladeren, stengels en vruchten bepaald. Door hier ook de gewichten van de reeds geoogste tomaten en geplukte bladeren bij op te tellen, is een totaalbeeld te geven van de drogestofproductie van het gewas en de verdeling van de assimilaten. Hieruit bleek dat in de geconditioneerde afdelingen de totale drogestofproductie wel hoger was dan in de open kas, maar dat het aandeel droge stof dat in de vruchten terug te vinden was voor alle behandelingen gelijk was. De verticale temperatuurgradiënt, CO₂ concentratie en de etmaaltemperaturen hebben geen effect op de drogestofverdeling tussen de vegetatieve delen (bladeren en stengels) en de generatieve delen (vruchten). Eén van de redenen hiervoor is mogelijk dat de stengeldichtheid in de open kas en de geconditioneerde afdelingen gelijk was, evenals het aantal vruchten dat per tros aangehouden werd. Modelberekeningen laten zien dat de assimilatenverdeling wel te beïnvloeden is door het aantal vruchten per tros te variëren (Elings *et al.* 2011).

Naast de periodieke destructieve oogsten, die gedurende de teelt zijn uitgevoerd en een indicatie geven van de assimilatenverdeling in het gewas, zijn er ook eenmalig metingen gedaan die direct laten zien waar assimilaten die overdag bovenin de plant gevormd worden, de dag daarna teruggevonden worden. Daarvoor is per plant één fotosynthetiserend blad bovenin het gewas ingepakt in een plastic zak met daarin CO₂ met een verzwaard koolstofatoom, ¹³CO₂. Dit ¹³CO₂ wordt gedurende anderhalf uur opgenomen door de plant, waarna de plastic zak verwijderd wordt. De ¹³CO₂ wordt omgezet in suikers. Na 24 uur wordt de plant destructief geoogst en verdeeld in trossen, bladeren en stengeldelen. Per onderdeel wordt gemeten hoeveel ¹³C-suikers er te vinden zijn. Uit deze metingen bleek dat de ¹³C met name terug te vinden is naar de snelst groeiende plantdelen in de buurt van het gelabelde blad, zoals de trossen boven en direct onder dat blad en de stengel en jonge bladeren boven het gelabelde blad. Er gaat maar weinig ¹³C uit het gelabelde blad naar de trossen die onder in het gewas hangen. Hiervoor zijn een aantal redenen op te noemen: deze vruchten groeien veel minder snel dan jongere vruchten, en zullen dus minder assimilaten importeren.

Daarnaast zullen de assimilaten die ze importeren waarschijnlijk meer afkomstig zijn van lager gelegen fotosynthetisch actieve bladeren. Dit is de “nearest sink” hypothese: assimilaten worden bij voorkeur geïmporteerd door een sink die dichtbij een source ligt. De verticale temperatuurgradiënt heeft een heel beperkte invloed op de assimilatenverdeling. In de afdelingen met onderkoeling gaan iets minder assimilaten naar het onderste deel van de plant, waardoor er voor de top van de plant relatief meer assimilaten beschikbaar zijn. Deze kleine verschillen leiden niet tot meetbare verschillen in de groei van de planten.

Hypothese 3. Watergift, verdamping en nutriëntenopname

De verdampingssnelheid wordt voornamelijk bepaald door de energiebalans van een blad, daarin spelen instraling, kasluchttemperatuur, bladtemperatuur en de vochtigheid (dampdrukverschil) van de kaslucht een belangrijke rol. In geconditioneerde kassen speelt daarnaast luchtbeweging en de temperatuur en luchtvochtigheid van de ingeblazen kaslucht een rol. Hoe de wijze van inbrengen van koele en (relatief) droge lucht de verdampingssnelheid in verschillende bladlagen beïnvloed is tot op heden niet vastgesteld. Het is echter wel van belang voor de watergift en nutriëntenopname en -verdeling. Dit kan weer consequenties hebben voor afwijkingen als neusrot en kniktrossen.

Hypothese: In een geconditioneerde kas is het verticale patroon van de verdamping en de hoeveelheid verdamping anders dan in een open kas.

De resultaten van de metingen van wateropname, verdamping, nutriëntengehaltes en de verdeling van de verdamping over verschillende bladlagen staan weergegeven in hoofdstukken 6 en 7. De verdamping in geconditioneerde kassen is lager dan in de open kas. In de afdelingen met bovenkoeling is de verdamping gemiddeld over een aantal dagen in de zomer gemiddeld 71% van de verdamping in de open kas, en in de afdelingen met onderkoeling gemiddeld 63% van de verdamping in de open kas. Deze verschillen worden veroorzaakt door de verschillen in vochtdeficiet (zie Figuur 3.6.). Het vochtdeficiet is het hoogst voor de open kas, lager voor de kassen met bovenkoeling en het laagst in de afdelingen met onderkoeling. Deze grote verschillen in verdamping hebben echter geen effect op de nutriëntenopname. De gehalten aan calcium, kalium en borium in de bladeren en vruchten verschillen nagenoeg niet tussen de afdelingen met onderkoeling of bovenkoeling.

De hypothese richtte zich verder op hoe een verticale temperatuurgradiënt de verdeling van de verdamping in het gewas zou beïnvloeden. Het is niet mogelijk verdamping van afzonderlijke bladeren te meten, daarom zijn op verschillende hoogtes in het gewas bladtemperaturen gemeten, en is met een model de verdamping in deze bladlagen bepaald. Tenslotte werden deze getallen per bladlaag opgeteld en vergeleken met de wateropname. Hieruit bleek dat er nauwelijks verschillen waren in het verticale patroon van de verdamping tussen de open kas en de kassen met bovenkoeling. In de kassen met onderkoeling, dus een verticale temperatuurgradiënt, was het aandeel van de onderste bladlagen in de verdamping lager, en van de bovenste bladlaag hoger. Een lagere temperatuur onder in het gewas zorgt daar voor minder verdamping, zowel absoluut als relatief.

Met deze resultaten is de vraag duidelijk beantwoord: in geconditioneerde kassen is de verdamping lager dan in open kassen door het verschil in vochtdeficiet. Verder is bij een verticale temperatuurgradiënt de temperatuur onder in het gewas lager, waardoor het aandeel van de verdamping onderin ook lager is. Echter, deze verschillen in verdamping hebben geen aantoonbaar effect op de nutriëntenopname door het gewas, en geen aantoonbaar effect op de groei en productie.

Hypothese 4. Kwaliteit

In geconditioneerde kassen is over het algemeen de luchtvochtigheid hoger dan in een niet geconditioneerde kas, hetgeen negatieve gevolgen kan hebben voor de houdbaarheid van tomaten. Daarentegen is de CO₂ concentratie gemiddeld ook hoger, en daarmee in veel gevallen ook de etmaaltemperatuur. Onder invloed van een verticale temperatuurgradiënt is de afrijpingssnelheid iets lager en zijn tomaten op het moment van oogsten gemiddeld iets zwaarder. Hoe dit samenspel van klimaatfactoren de kwaliteit van tomaten uit geconditioneerde kassen beïnvloedt is niet bekend, en wordt in dit onderzoek nader bekeken.

Hypothese: De kwaliteit en houdbaarheid van tomaten uit geconditioneerde kassen met een verticale temperatuurgradiënt is anders dan in een open kas zonder temperatuurgradiënt.

In deze proef zijn gedurende de zomermaanden een aantal malen tomaten uit de verschillende kassen genomen en zijn er metingen gedaan aan kwaliteit, stevigheid, houdbaarheid en inhoudsstoffen. De resultaten zijn te vinden in hoofdstuk 9. Als gekeken wordt naar de eigenschappen gemiddeld vruchtgewicht, stevigheid en bewaarbaarheid, scoren de geconditioneerde kassen beter dan de open kas. De kwaliteit, uitgedrukt in gemiddeld vruchtgewicht en stevigheid is hoger voor de tomaten uit de kas met onderkoeling dan uit de kas met bovenkoeling. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de lagere temperaturen in het onderste deel van het gewas waar de afrijping plaatsvindt (Dorais *et al.* 2001). De gehalten aan suikers (zoetheid) en anionen (zuurgehalte) waren lager in tomaten afkomstig uit de geconditioneerde afdelingen dan uit de open kas. Deze lagere gehalten worden waarschijnlijk ook verklaard door de lagere temperaturen tijdens de afrijping. Echter, uit de analyses met het smaakmodel (Verkerke *et al.* 1998) bleek dit verschil in gehalten aan suikers en anionen geen aantoonbaar effect te hebben op de smaak van de tomaten.

12 Geraadpleegde literatuur

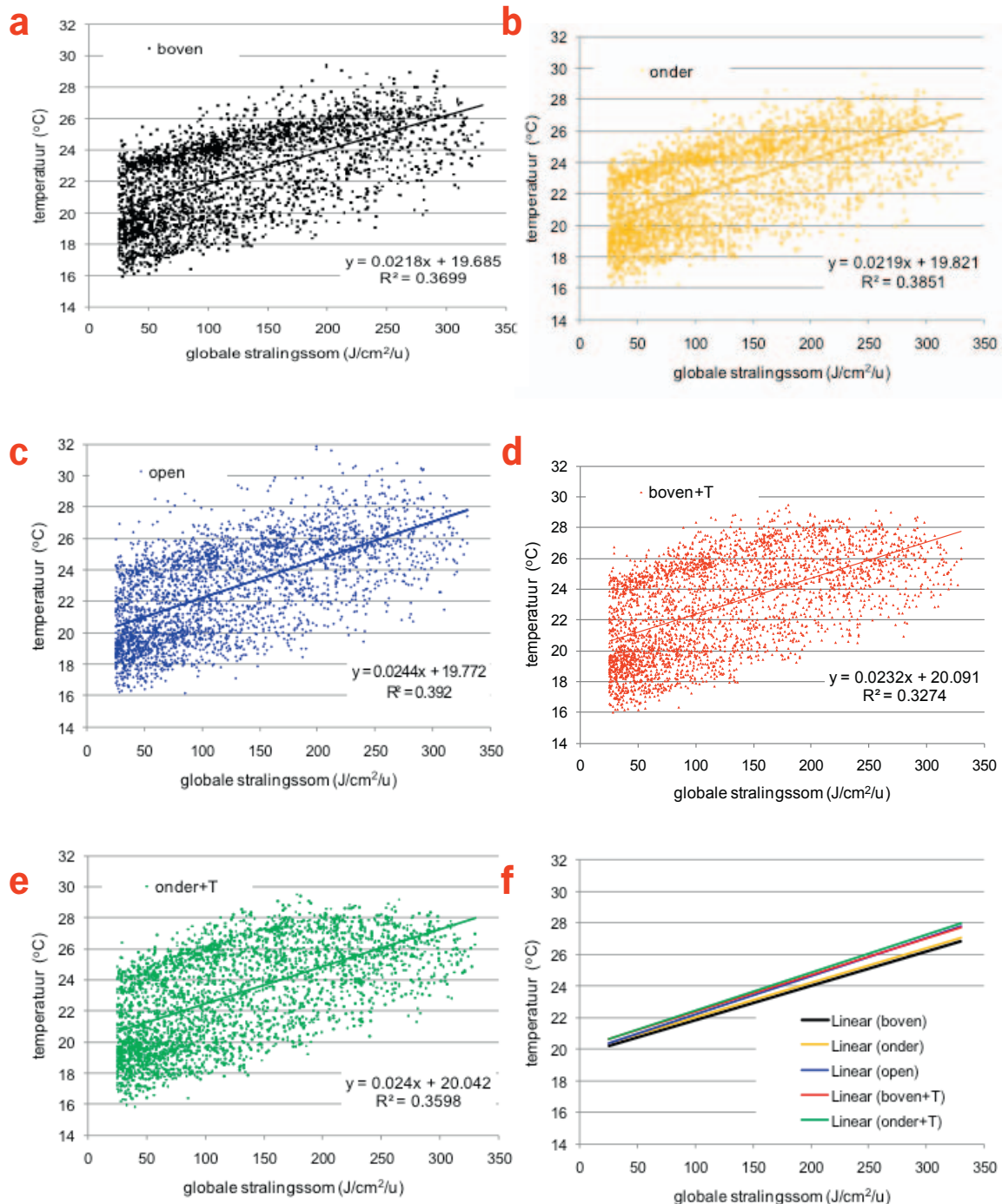
- Arp, W.J., 1991.
Effects of source-sink relations on photosynthetic acclimation to elevated CO₂. *Plant Cell and Environment* 14: 869-875
- Bakker, J.C., De Zwart, H.F. & Campen, J.B., 2006.
Greenhouse cooling and heat recovery using fine wire heat exchangers in a closed pot plant greenhouse: design of an energy producing greenhouse. *Acta Horticulturae* 719: 263-270.
- Besford, R.T., Ludwig, L.J., Withers, A.C., 1990.
The greenhouse effect: acclimation of tomato plants growing in high CO₂, photosynthesis and ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase protein. *Journal of Experimental Botany* 41: 925-931
- Deléens E., Cliquet J.B. & Prioul J.L., 1994.
Use of ¹³C and ¹⁵N plant label near natural abundance for monitoring carbon and nitrogen partitioning. *Australian Journal of Plant Physiology* 21: 133-146.
- De Graaf, R., De Gelder, A. and Blok, C., 2004.
Advanced weighing equipment for water, crop growth and climate control management. *Acta Horticulturae* 664: 163-167.
- De Zwart, H.F., 2008.
Overall energy analysis of (semi) closed greenhouses. *Acta Horticulturae* 801: 811-818.
- De Zwart, H.F., Van Noort, F.R. & Bakker, J.C., 2008.
Energieprestatie en teeltkundige ervaringen in de energieproducerende kas : eindrapport van een 2 jaar durend praktijkexperiment. Rapport Wageningen UR Glastuinbouw, 63 pp.
- Dieleman, A., De Gelder, A., Eveleens, B., Elings, A., Janse, J., Lagas, P., T. Qian, Steenhuizen, J., Meinen, E., 2009.
Tomaten telen in een geconditioneerde kas: groei, productie en onderliggende processen. Nota 633, Wageningen UR Glastuinbouw, 54 pp.
- Elings, A., Meinen, E., Dieleman, A., 2011.
Gewasmanagement in semi-gesloten teeltsystemen. Simulaties van gewasgroei en -ontwikkeling. Rapport Wageningen UR Glastuinbouw, GTB-1124.
- Eveleens, B., De Gelder, A., Dieleman, A., Elings, A., Janse, J., Qian, T., Lagas, P. & Steenhuizen, J., 2009.
Effecten van verneveling op groei en ontwikkeling van tomaat. Teelt van eind april tot eind augustus. Nota 643, Wageningen UR Glastuinbouw, 30 pp.
- Farrar, J.F., 1992.
The whole plant: carbon partitioning during development. In: Carbon Partitioning, C.J. Pollock, J.F. Farrar & A.J. Gordon, eds. Bios Scientific Publications, Oxford, pp 163-179.
- Frommer, W.B. & U. Sonnewald, 1995.
Molecular analysis of carbon partitioning in solanaceous species. *Journal of Experimental Botany* 46: 587-607.
- Galtier, N., Foyer, C.H., Huber, J., Voelker, T.A. & Huber, S.C., 1993.
Effects of elevated sucrose-phosphate synthase activity on photosynthesis, assimilate partitioning, and growth in tomato (*Lycopersicon esculentum* var UC82B). *Plant Physiology* 101: 535-543.
- Geiger, D.R., Koch, K.E. & Shieh, W.J., 1996.
Effect of environmental factors on whole plant assimilate partitioning and associated gene expression. *Journal of Experimental Botany* 47 (Special Issue SI): 1229-1238.
- Gelder, A. de, Heuvelink, E. & Opdam, J.J.G., 2005.
Tomato yield in a closed greenhouse and comparison with simulated yields in closed and conventional greenhouses. *Acta Horticulturae* 691: 549-552.
- Gelder, A. de, Raaphorst, M., Hoon, M. de & Breugem, F., 2007.
Paprikateelt in de gesloten kas: resultaten bij Themato in 2006. Rapport Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.
- Jaeger, C.H., Goeschl, J.D., Magnuson, C.E., Fares, Y. & Strain, B.R., 1988.
Short-term responses of phloem transport to mechanical perturbation. *Physiologia Plantarum* 72: 588-594.

- Koch, K.E., 1996.
Carbohydrate-modulated gene expression in plants. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 47: 509-540.
- Krapp, A. & Stitt, M., 1995.
An evaluation of direct and indirect mechanisms for the sink-regulation of photosynthesis in spinach – changes in gas exchange, carbohydrates, metabolites, enzyme activities and steady-state transcript levels after cold-girdling source leaves. Planta 195: 313-323.
- Makino, A., Mae, T., 1999.
Photosynthesis and plant growth at elevated levels of CO₂. Plant and Cell Physiology 40: 999-1006
- Nawrocki, K.R., 1985.
Meting warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie van verwarmingspijpen in kassen. Rapport 73, IMAG, Wageningen.
- Opdam, J.J.G., Schoonderbeek, G.G., Heller, E.M.B. & De Gelder, A., 2005.
Closed greenhouse: a starting point for sustainable entrepreneurship in horticulture. Acta Horticulturae 691: 517-524.
- Raaphorst, M., 2005.
Optimale teelt in de gesloten kas. Teeltkundig verslag van de gesloten kas bij Themato in 2004. Rapport Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, 38 pp.
- Raaphorst, M.G.M., Kempkes, F.L.K., Heuvelink, E., Kaarsemaker, R.C. & Bakker, M.J., 2006.
Teeltconcept voor de geconditioneerde kas, Rapport Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, 34 pp.
- Raaphorst, M., Van Weel, P., Pijnakker, J. & Dieleman, A., 2007.
Telen in de bio-optimaal kas. Proef met een biologische tomatenteelt onder geconditioneerde omstandigheden. Rapport Wageningen UR Glastuinbouw, 33 pp.
- Riesmeier, J.W., Willmitzer, L. & Frommer, W.B., 1994.
Evidence for an essential role of the sucrose transporter in phloem loading and assimilate partitioning. The EMBO Journal 13: 1-7.
- Schapendonk, A.H.C.M., Van Leeuwen, P.H., Pot, C.S. & De Visser, A.J.C., 1997.
Fotosynthese en koolstofverdeling in genetisch gemodificeerde tabak. Nota 52. AB-DLO, Wageningen.
- Schnyder, H., 1992.
Long-term steady-state labelling of wheat plants by use of natural ¹³CO₂/¹²CO₂ mixtures in an open, rapidly turned-over system. Planta 187: 128-135.
- Schoonderbeek G.G., A. de Gelder, E.M.B. Heller & J.J.G. Opdam, 2003.
Telen in een gesloten tuinbouwkas; praktijkexperiment. Rapport Ecofys en Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, 52 pp.
- Slack, G. & Calvert, A., 1977.
The effect of truss removal on the yield of early sown tomatoes. Journal of Horticultural Science 52: 309-315
- Svejcart, T.J., Boutton, T.W. & Trent, J.D., 1990.
Assessment of carbon allocation with stable carbon isotope labeling. Agronomy Journal 82: 18-21.
- Tanaka, A. & Fujita, K., 1974.
Nutrio-physiologicaal studies on the tomato plant. IV. Source-sink relationship and structure of the source-sink unit. Soil Science and Plant Nutrition 20: 305-315.
- Thorne, S.T., & Efiuwewwere, J.O., 1988.
Changes in organic acids in chilled tomato fruits (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Journal of the Science of Food and Agriculture 44: 309-319
- Usuda, H., Shimogawara, K., 1998.
The effects of increased atmospheric carbon dioxide on growth, carbohydrates, and photosynthesis in radish, *Raphanus sativus*. Plant and Cell Physiology 39: 1-7
- Verkerke W., Janse J., Kersten M., 1998.
Instrumental measurement and modelling of tomato fruit taste. Acta Horticulturae 456: 199-205.

- Visser, R. de, Vianden, H., & Schnyder, H., 1997a. Kinetics and relative significance of remobilized and current C and N incorporation in leaf and root growth zones of *Lolium perenne* after defoliation: assessment by ¹³C and ¹⁵N steady-state labelling. *Plant, Cell and Environment* 20: 37-46.
- Visser, A.J.C. de, Van Leeuwen, P.H., Pot, C.S. & Schapendonk, A.H.C.M., 1997b. Koolstofverdeling en fotosynthese in genetisch gemodificeerde suikerbiet. Nota 59. AB-DLO, Wageningen.
- Yelle, S., Beeson, R.C., Trudel, M.J., Gosselin, A., 1990.
Duration of CO₂ enrichment influences growth, yield, and gas exchange of two tomato species. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 115: 52-57.
- Zamski, E. & Schaffer, A.A., 1996.
Photoassimilate distribution in plants and crops. Source-sink relationships. Marcel Dekker Inc, New York, Basel, 905 pp.

Bijlage I Kasluchttemperatuur en instraling

In Figuur I.1 wordt gekeken naar het verband tussen gerealiseerde kasluchttemperatuur en instraling. Voor iedere kasafdeling zijn de uurdata van temperatuur geplot tegen straling, waarbij alle uren met minder dan 25 J/cm²/uur zijn weggelaten. Op de puntenwolken zijn lineaire regressielijnen getit.



Figuur I.1. Temperatuur (uurgemiddelden) in de vijf behandelingen uitgezet tegen globale stralingssom in dat uur (J/cm²/uur). Uren met minder dan 25 J/cm²/u straling zijn achterwege gelaten. De laatste grafiek geeft de trendlijnen uit de vorige vijf grafieken. Periode 22 december 2008 tot 11 november 2009.

In Tabel zijn de berekende regressielijnen voor de vijf behandelingen verzameld en tevens zijn de regressielijnen uit de proef van 2008 vermeld voor de open en de gesloten kasafdeling (Dieleman et al., 2009). De tabel vermeldt ook de temperaturen berekend met deze regressieformules voor straling 25 en 300 J/cm²/u.

Tabel I.1. Regressieformules voor relatie tussen instraling en kasluchttemperatuur afgeleid uit de grafieken van Figuur I.1. Tevens de temperatuur berekend met deze regressieformules voor 25 en 300 J/cm²/u instraling. Periode 22 december 2008 tot 11 november 2009.

| Kas afdeling | Regressie formule | R ² | Temperatuur berekend voor 25 J/cm ² /u | Temperatuur berekend voor 300 J/cm ² /u |
|---------------------|-------------------------|----------------|---|--|
| 8.04 – boven | $Y = 0.0218x + 19.685$ | 0.37 | 20.2 | 26.2 |
| 8.05 – onder | $Y = 0.0219x + 19.821$ | 0.39 | 20.4 | 26.4 |
| 8.06 – open | $Y = 0.0244x + 19.772$ | 0.39 | 20.4 | 27.1 |
| 8.07 - boven+T | $Y = 0.02332x + 20.091$ | 0.33 | 20.7 | 27.1 |
| 8.08 - onder+T | $Y = 0.024x + 20.042$ | 0.36 | 20.6 | 27.2 |
| Gesloten kas (2008) | $Y = 0.022x + 20.16$ | 0.56 | 20.7 | 26.8 |
| Open kas (2008) | $Y = 0.021x + 19.71$ | 0.44 | 20.2 | 26.0 |

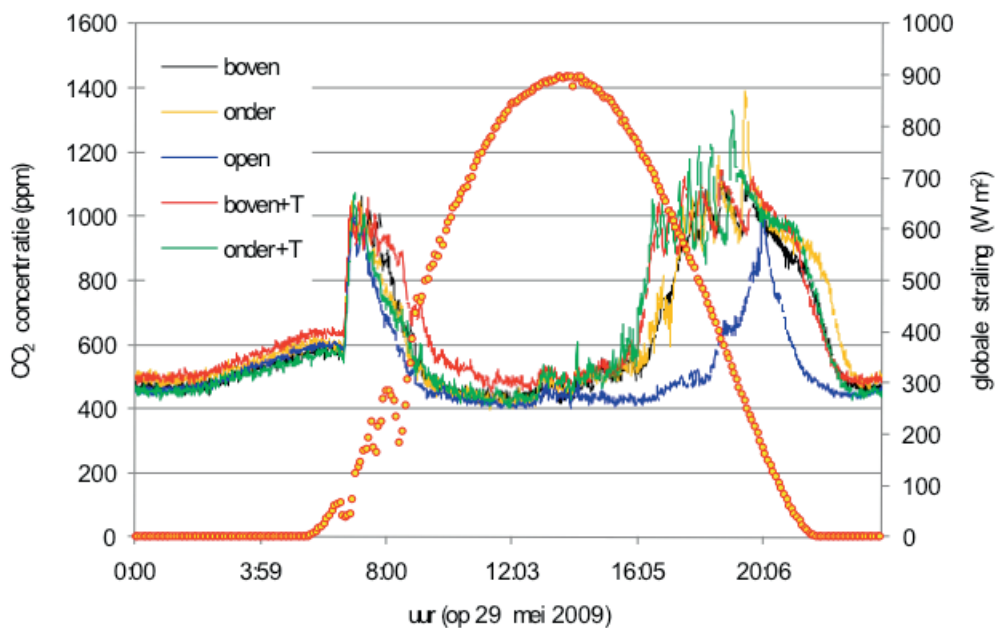
De regressielijnen liggen heel dicht bij elkaar (Figuur I.1f.) en de temperaturen berekend met de regressie formules zijn vrijwel gelijk (Tabel I.1.). Hoewel de verschillen klein zijn, zijn er duidelijk trends, namelijk:

- De helling is het grootst in de open kas. Dat is verklaarbaar omdat daar niet met LBK's wordt gekoeld, waardoor de temperatuur sterk toeneemt met de instraling.
- De helling is daarna het grootst in behandeling boven+T en onder+T omdat de temperatuur daar mag meestijgen met de instraling.
- Er is geen effect van locatie van de koeling (onder of boven het gewas), want behandelingen boven en onder hebben vrijwel gelijke helling van de regressielijn, en hetzelfde geldt voor behandelingen boven+T en onder+T.

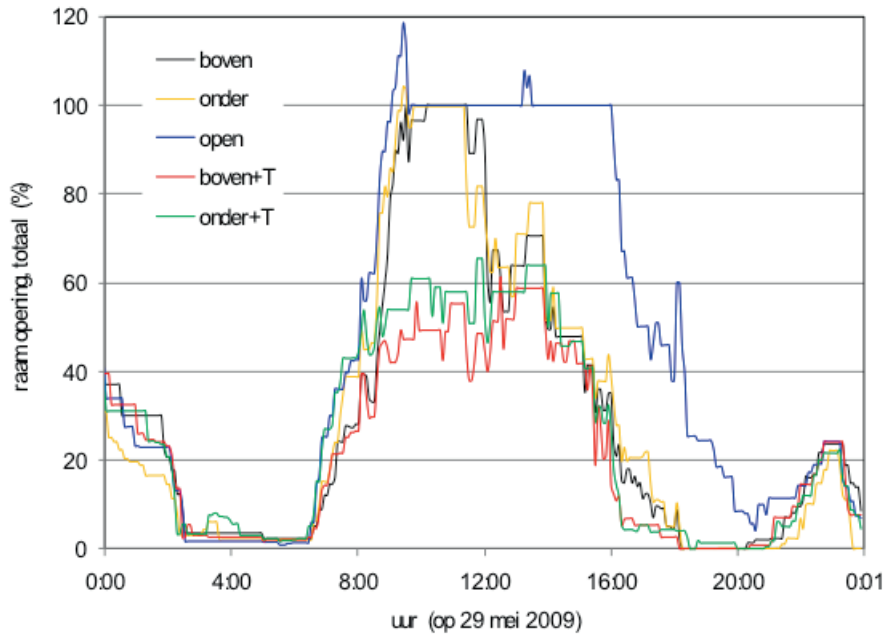
Bijlage II CO₂ en raamopening op een zonnige dag

Figuur II.1. toont het verloop van de CO₂ concentratie en de globale straling voor 29 mei 2009 (in week 22), een zeer zonnige dag met 2941 J/cm²/dag instraling. 's Morgens om 6:30 á 7:00 was het CO₂ gehalte even rond de 1000 ppm. Het begon onmiddellijk te dalen toen de ramen opengingen en tegelijkertijd de fotosynthese toenam, en bleef hangen op 400 á 500 ppm. Vanwege het zonnige weer werd overdag flink gelucht, maar in de middag/avond gingen de luchtramen (bijna) dicht op verschillende tijdstippen variërend van circa 16:00 uur in de behandelingen boven+T en onder+T tot na 20:00 uur in de open kas (zie Figuur II.1.). Het CO₂ niveau herstelde zich weer na het (bijna) sluiten van de luchtramen.

Zoals verwacht was het CO₂ niveau steeds het laagste in de open kas, vooral 's middags, en was het gemiddeld het hoogste in de kassen met stralingsafhankelijke temperatuurregeling. Tussen 15:45 en 17:00 was de CO₂ concentratie in de afdelingen boven+T en onder+T circa 200 - 300 ppm hoger dan de afdelingen met boven- en onderkoeling.



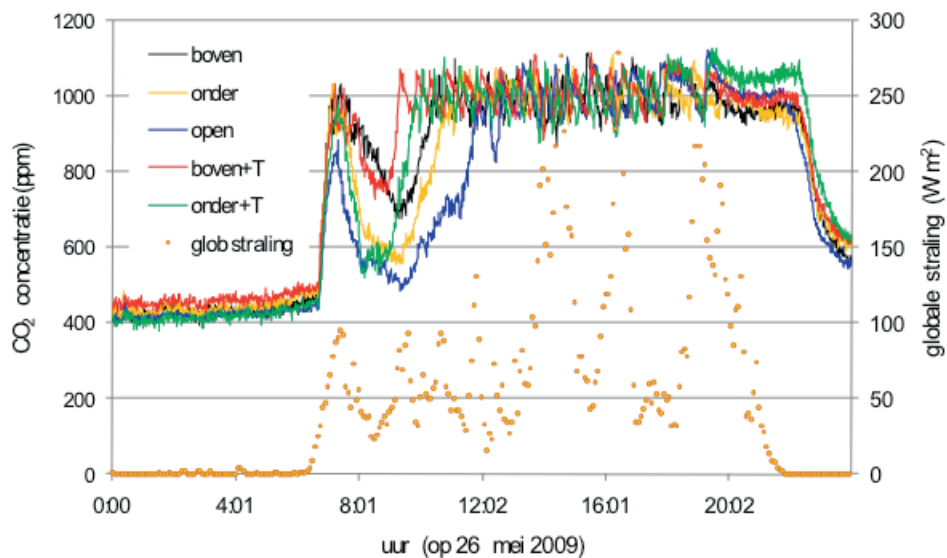
Figuur II.1. Verloop van de CO₂ concentratie en de globale straling op een lichte dag, 29 mei (week 22).



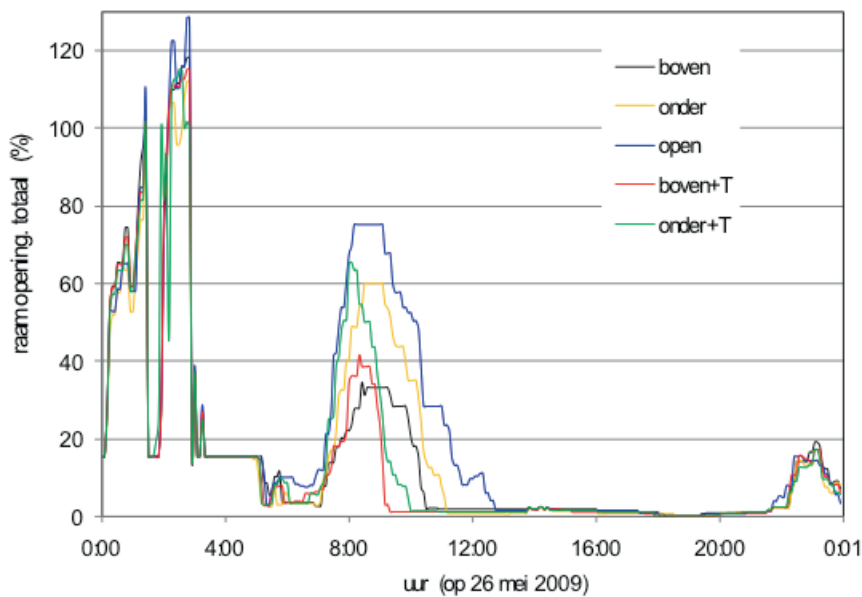
Figuur II.2. Verloop van de raamopening (luwe + windzijde) in % op 29 mei (week 22).

Bijlage III CO₂ en raamopening op een bewolkte dag

Op 26 mei 2009 was de globale stralingssom slechts 466 J/cm²/dag was. De CO₂ gehalten in de afdelingen lagen op het niveau van 1000 ppm (Figuur III.1.), althans vanaf het tijdstip dat de luchtramen dicht zaten (Figuur III.2.). De raamopening verklaart het verloop van de CO₂ concentratie, voor wat betreft de grote dip in het CO₂ gehalte 's morgens, de diepte van de dip, en de volgorde waarin de CO₂ lijnen weer stijgen. In de open kas waren de ramen het verst open en was het CO₂ niveau het laagst. In de beide afdelingen met onderkoeling was er ongeveer evenveel luchting en was het CO₂ gehalte bijna even laag. Na circa 12:30 uur waren alle ramen dicht en bleef het CO₂ niveau stabiel op 1000 ppm. Er was dan geen verschil in CO₂ niveau tussen de behandelingen.

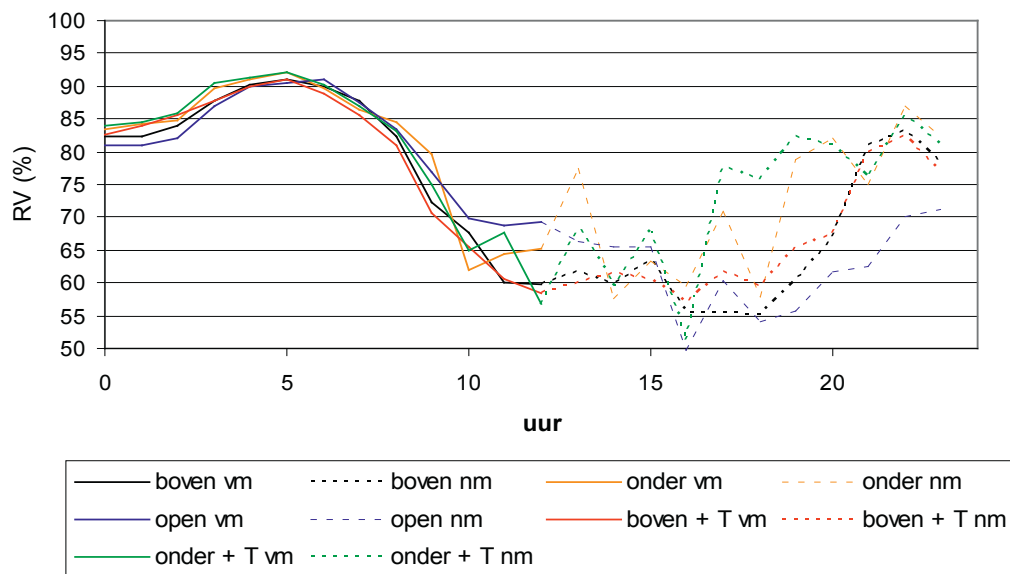


Figuur III.1. Verloop van de CO₂ concentratie en de globale straling op een donkere dag, 26 mei (week 22).

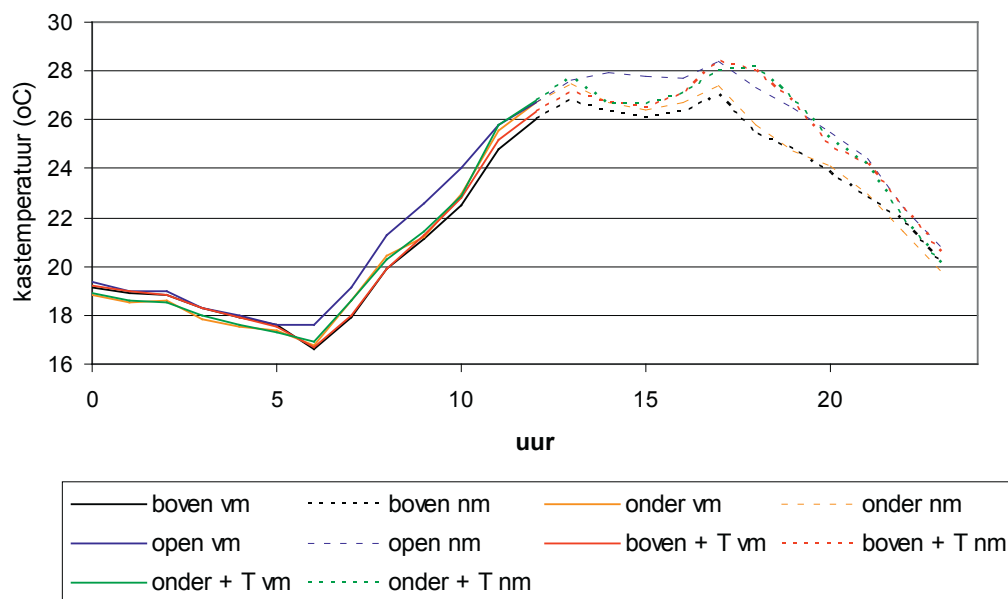


Figuur III.2. Verloop van de raamopening (luwe + windzijde) in % op 26 mei (week 22).

Bijlage IV Klimaat in kassen op 4 juli 2009



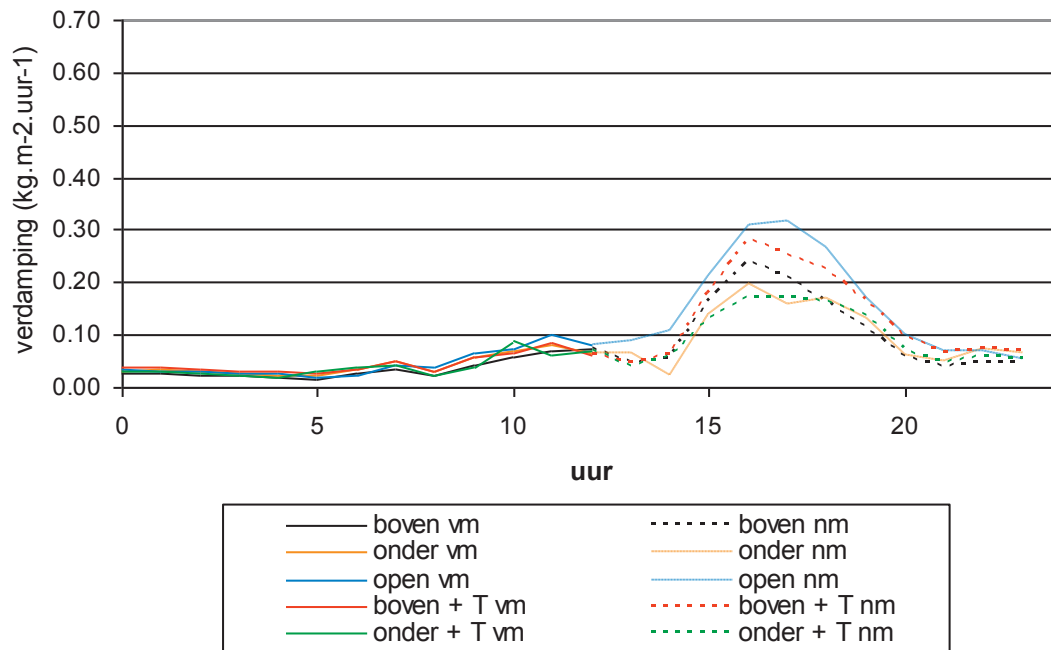
Figuur IV.1. Verloop van de RV gedurende de dag op 4 juli.



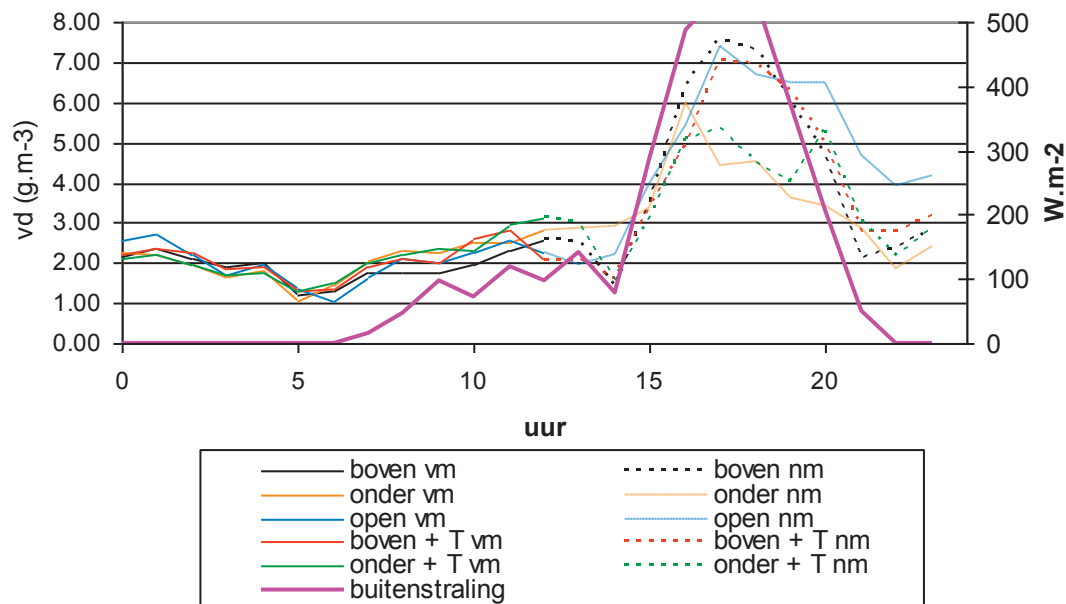
Figuur IV.2. Verloop van de kasttemperatuur over de dag op 4 juli.

Bijlage V Klimaat en verdamping op 12 juli 2009

Totale stralingssom op 12 juli 2009 was 673 J cm²



Figuur V.1. Verloop van de verdamping gedurende de dag op 12 juli.

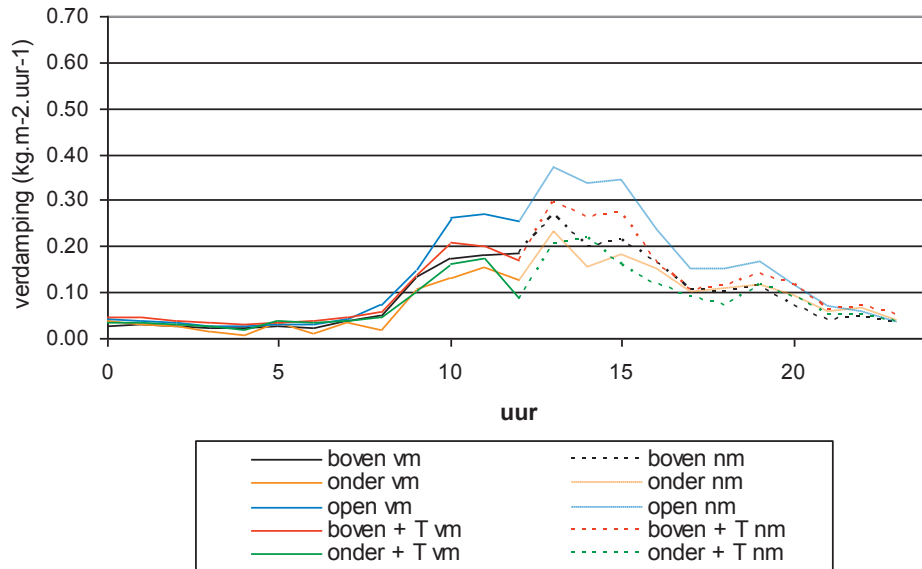


Figuur V.2. Verloop van het vochtdeficiet in de kas en de straling buiten de kas gedurende de dag op 12 juli.

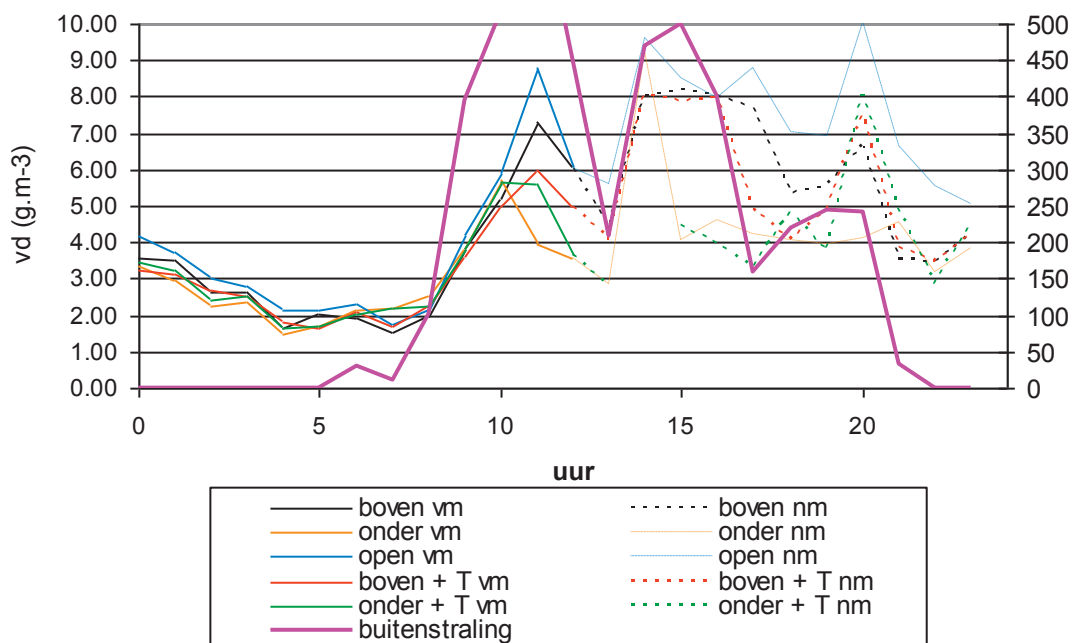
Bijlage VI Klimaat en verdamping op 14 juli 2009

Totale stralingsom op 14 juli 2009 was 1274 J cm²

Totale stralingsom op 14 juli 2009 was 1274 J cm²



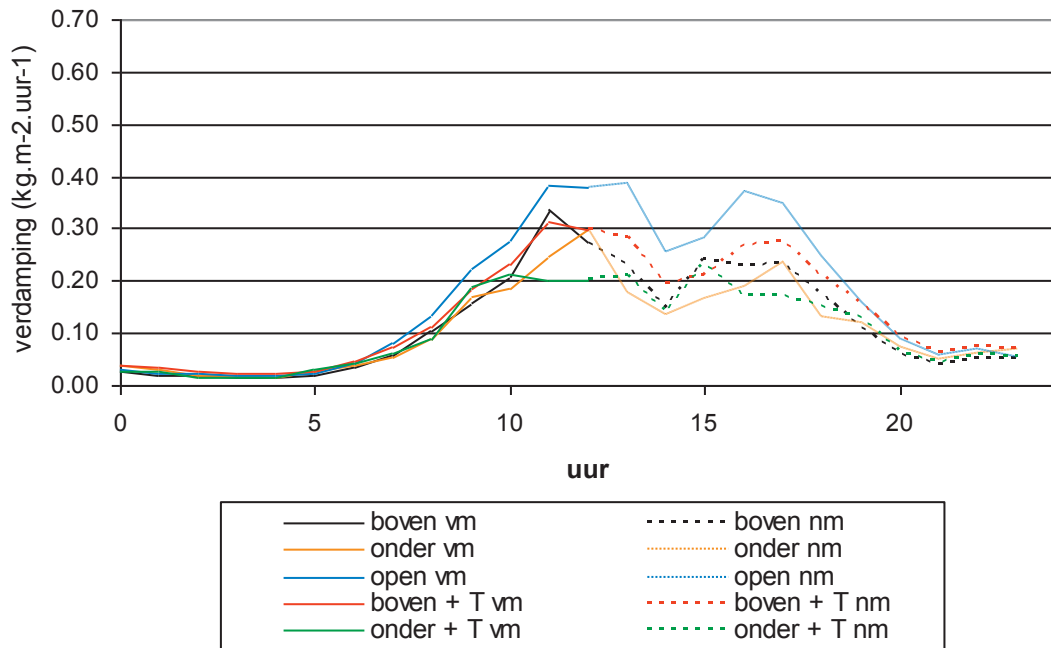
Figuur VI.1. Verloop van de verdamping gedurende de dag op 14 juli.



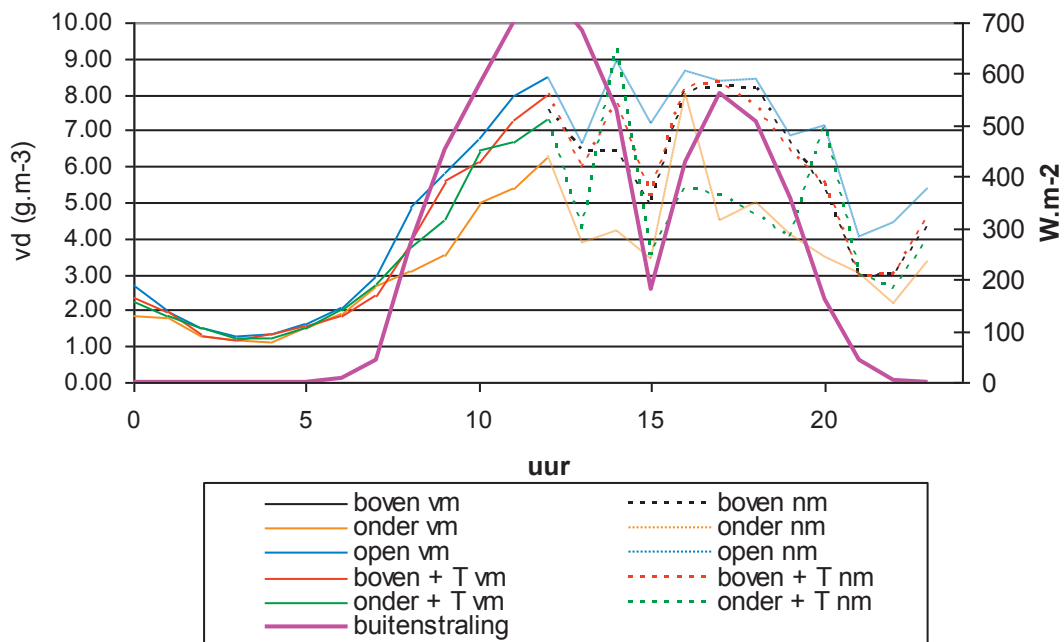
Figuur VI.2. Verloop van het vochtdeficiet in de kas en de straling buiten de kas op 14 juli.

Bijlage VII Klimaat en verdamping op 15 juli 2009

Totale stralingsom op 15 juli 2009 was 1785 J cm²

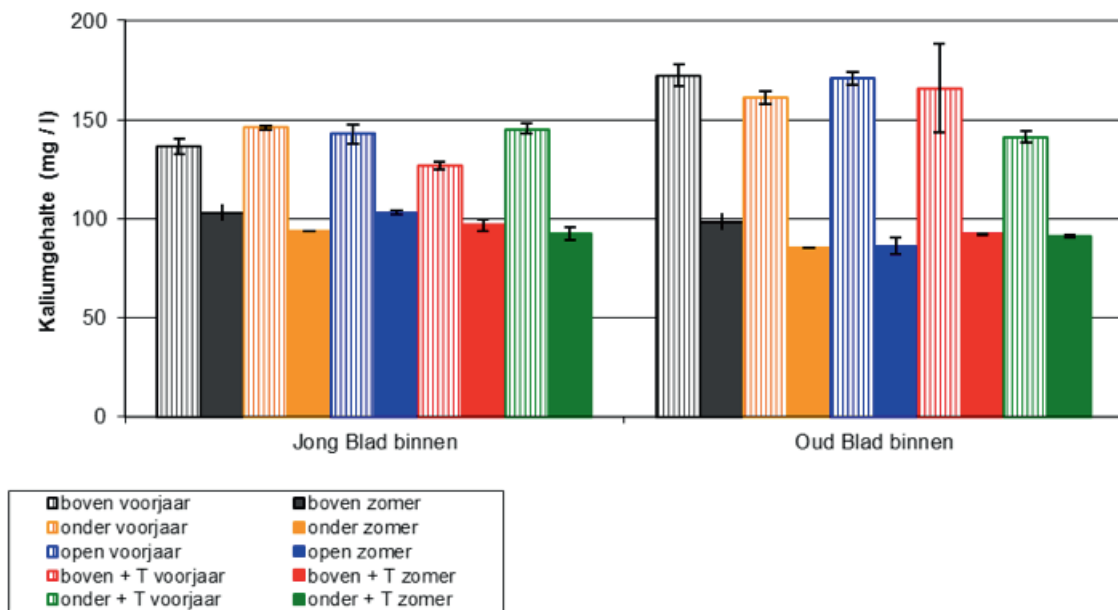


Figuur VII.1. Verloop van de verdamping gedurende de dag op 15 juli.

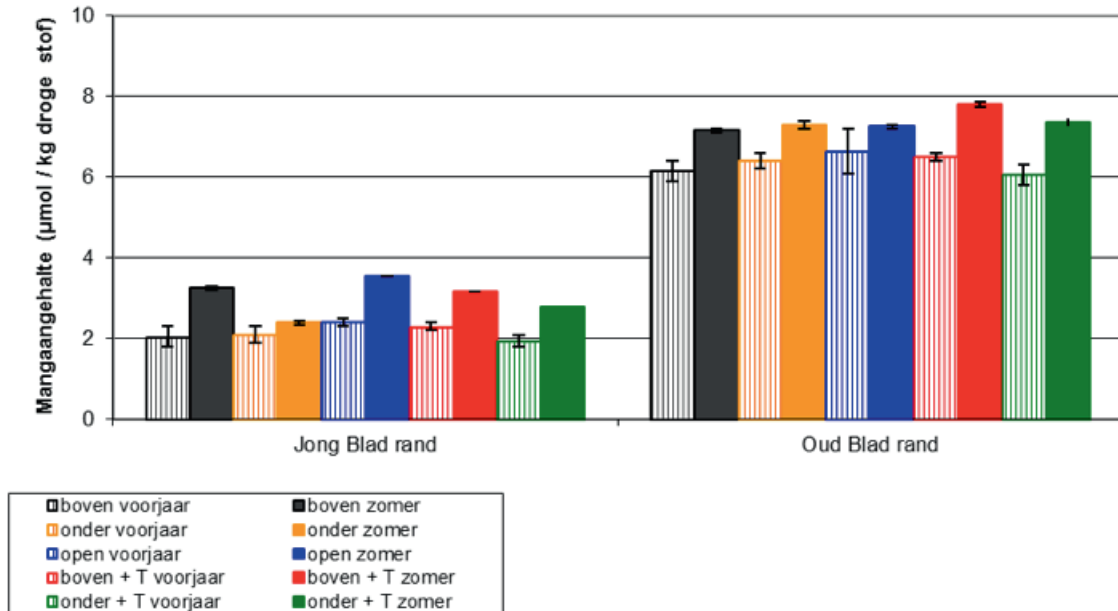


Figuur VII.2. Verloop van het vochtdeficiet in de kas en de straling buiten de kas op 15 juli.

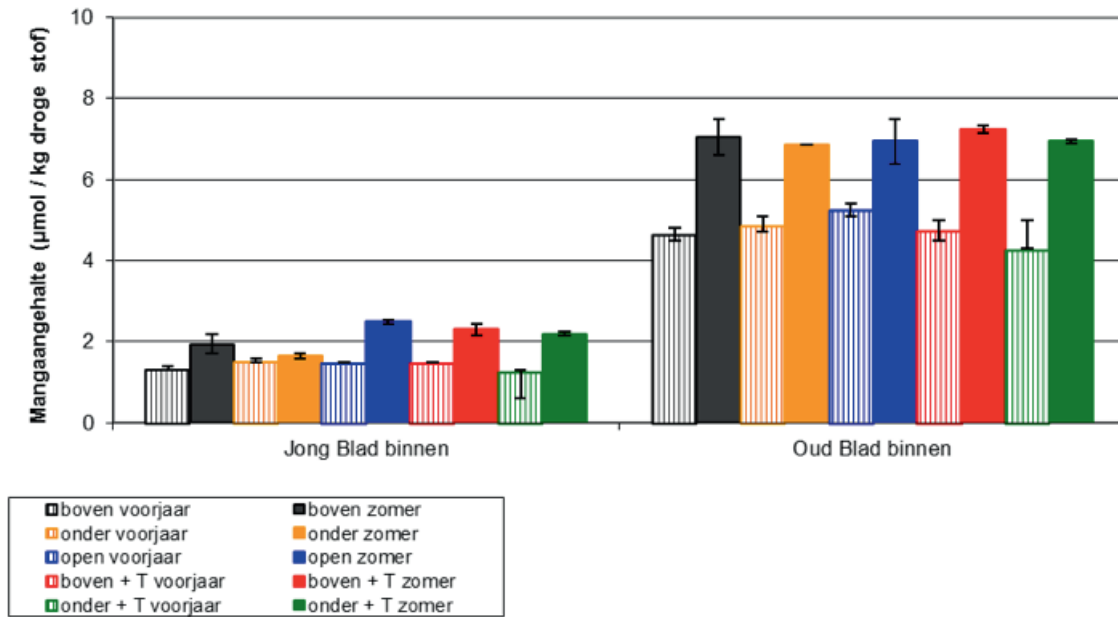
Bijlage VIII Nutriëntgehaltenes



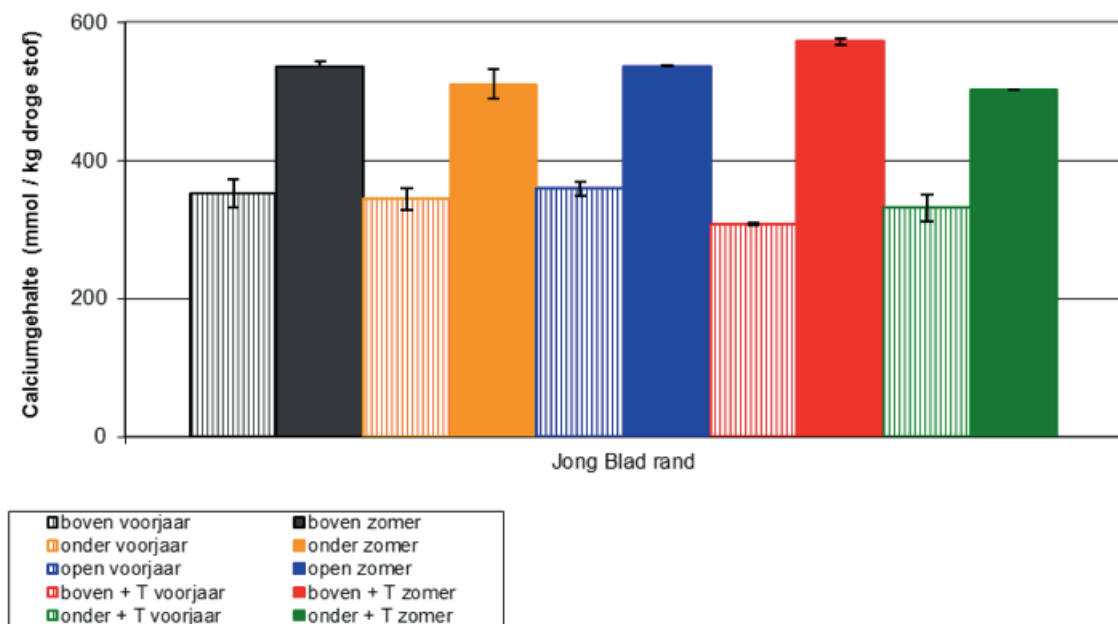
Figuur VIII.1. Kaliumgehalte in jong en oud blad in voorjaar en zomer; blad binnen is blad langs hoofdnerf.



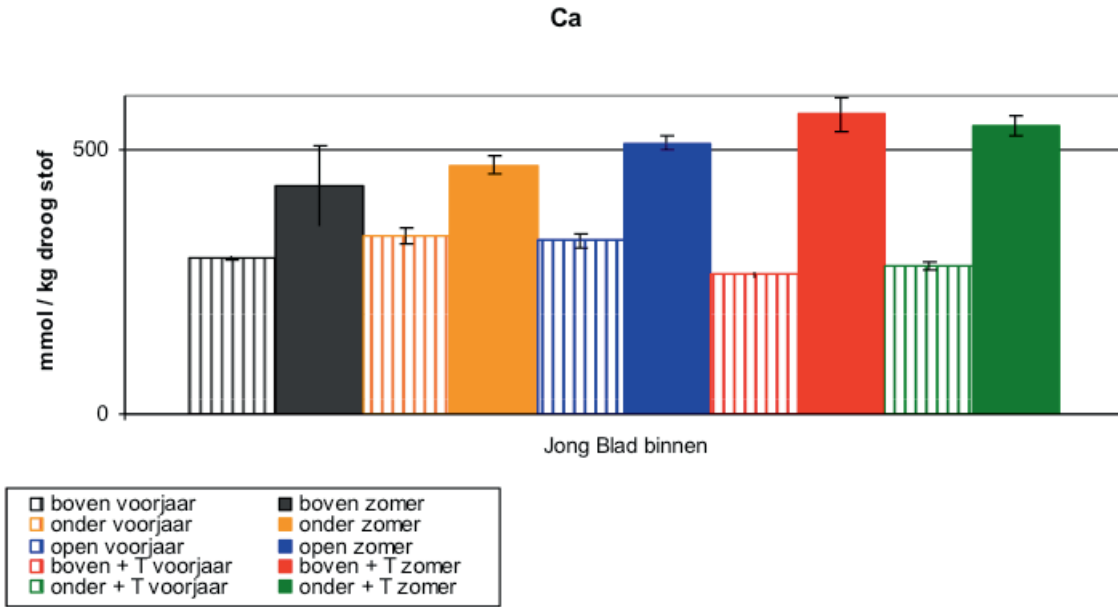
Figuur VIII.2. Mangaangehalte in jong en oud blad in voorjaar en zomer; rand is uiterst randje van het blad.



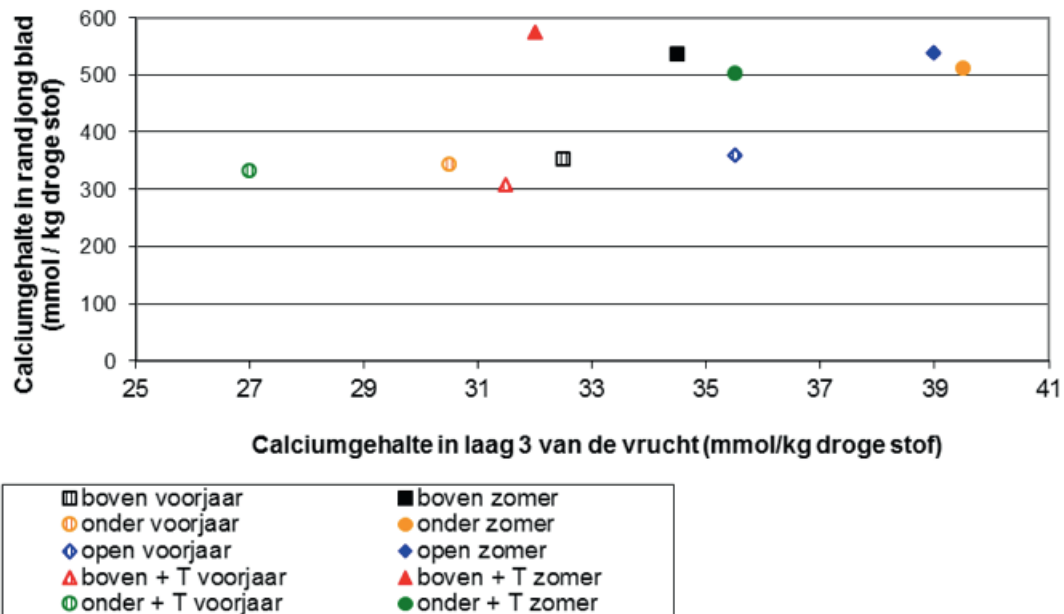
Figuur VIII.3. Mangaangehalte in jong en oud blad in voorjaar en zomer; blad binnen is blad langs hoofdnerf.



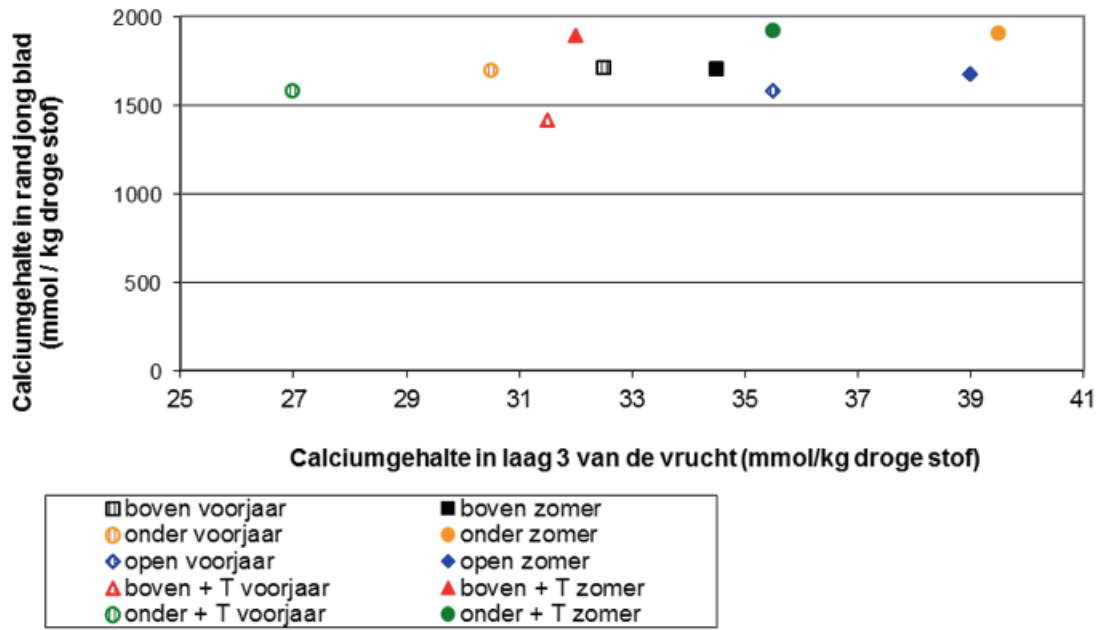
Figuur VIII.4. Calciumgehalte in bladrand (uiterst randje van het blad) van jong blad in voorjaar en zomer.



Figuur VIII.5. Mmol calcium per kilogram drogestof in blad; binnen is blad langs de nerf, van jong blad in voorjaar en zomer.



Figuur VIII.6. Calciumgehalte in de rand van het jonge blad uitgezet tegen het calciumgehalte in laag 3 van de vrucht in voorjaar en zomer.



Figuur VIII. 7. Mmol calcium per kilogram drogestof in oud blad rand uitgezet tegen mmol calcium per kilogram drogestof in laag 3 vrucht voor voorjaar en zomer.

