



Schermen in de tomatenteelt: mogelijkheden en beperkingen

Anja Dieleman & Frank Kempkes





Schermen in de tomatenteelt: mogelijkheden en beperkingen

Anja Dieleman & Frank Kempkes

- ¹ Plant Research International
- ² Agrotechnology & Food Innovations

© 2005 Wageningen, Plant Research International B.V.

Plant Research International B.V.

Adres : Droevendaalsesteeg 1, Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 47 70 00
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : info.plant@wur.nl
Internet : www.plant.wur.nl

Inhoudsopgave

	pagina
Voorwoord	1
Samenvatting	3
1. Inleiding	5
1.1 Toepassing van energieschermen	5
1.2 Verloop van de fotosynthese gedurende de dag	5
1.3 Doelstelling	6
1.4 Aanpak	6
2. Opzet van het experiment	7
2.1 Proefopzet	7
2.2 Periodieke oogsten	8
2.3 Bladfotosynthese, bladverdamping en huidmondjesopening	8
2.4 Foto-inhibitie	9
2.5 Waterverbruik	9
2.6 Statistiek	10
3. Resultaten van het experiment	11
3.1 Klimaat	11
3.2 Gewasgroei	17
3.2.1 Experiment	17
3.2.2 Modelvalidatie van het experiment	20
3.3 Bladfotosynthese	22
3.3.1 Lichtresponscurves	22
3.3.2 Metingen bij vaste lichtintensiteit	25
3.3.3 Huidmondjesopening en bladverdamping	28
3.4 Foto-inhibitie	32
3.5 Waterverbruik	33
3.6 Energiegebruik	34
3.7 Analyse verschillende openingsmethoden	34
4. Modelaanpassingen	41
4.1 Gewasgroeimodel	41
4.2 KASPRO	42
5. Opzet van de scenarioberekeningen	45
5.1 Keuze van de scenario's	45
5.2 Uitgangspunten van de berekeningen	45

	pagina
6. Resultaten van de scenarioberekeningen	49
6.1 Referenties	49
6.2 Scherm openen afhankelijk van globale straling buiten	52
6.3 Scherm openen afhankelijk van globale straling en buitentemperatuur	58
6.4 Scherm openen afhankelijk van het temperatuurverschil boven - onder het scherm	64
6.5 Openingsnelheid afhankelijk van de ΔT -scherm op het moment van openen	69
6.6 Scherm in stappen openen totdat de ΔT -scherm een ingestelde waarde bereikt heeft.	74
7. Terugkoppeling met tuinders	77
8. Conclusies en discussie	79
9. Communicatie	81
10. Literatuur	83
Bijlage I. Bespreking teeltrecept	5 pp.

Voorwoord

In het kader van het convenant Glastuinbouw en Milieu (GLAMI) hebben de overheid (Ministeries van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en Economische Zaken) en de glastuinbouwsector (LTO Nederland) afspraken gemaakt over de maatschappelijke randvoorwaarden, met als horizon 2010. Als energiedoelen zijn afgesproken dat het energiegebruik per eenheid product met 65% gereduceerd moet worden ten opzichte van 1980 en dat het aandeel duurzame energie tot 4% toegenomen moet zijn. De overheid heeft hier aan toegevoegd dat de glastuinbouw haar bijdrage moet leveren aan het terugdringen van de CO₂-uitstoot. Het gebruik van schermen in de glastuinbouw is een goede mogelijkheid om energiebesparing te realiseren.

Tegen deze achtergrond is in de periode van december 2003 tot en met maart 2005 in opdracht van het ministerie van LNV en het Productschap Tuinbouw (PT projectnummer 11704) door Plant Research International en Agrotechnology & Food Innovations te Wageningen onderzoek gedaan naar het gebruik van schermen in de tomatenteelt. De effecten van 's ochtends langer schermen op gewasgroei en productie zijn onderzocht. Het verloop van de plantactiviteit gedurende de dag is gemeten met behulp van fotosynthesemetingen. Veranderingen in het kasklimaat als gevolg van de strategie van scherm openen zijn onder en boven het scherm nauwkeurig gemeten. Op basis van de kennis die in dit project is opgedaan is een aantal schermstrategieën opgesteld, waarvan de effecten op gewasgroei en energieverbruik zijn doorgerekend. Deze resultaten zijn besproken met een aantal telers. Het project eindigt met aanbevelingen voor de praktijk over de wijze waarop het scherm het meest efficiënt ingezet kan worden in de tomatenteelt.

Aan dit onderzoek is meegewerkt door Esther Meinen, Dik Uenk, Leo Marcelis, Guus Broekhuijsen, Jaap Uittien, Ko Groenwold, Adri Kooijman, Ad Hermsen, Geurt Versteeg, Gerrit Stunnenberg, Gerard Brouwer, Jan Snel, Paul Dijkhuis en Anne Elings (PRI), Nico van de Braak en Feije de Zwart (A&F), Arie de Gelder en Bert Houter (PPO), Menno Bakker en Ep Heuvelink (WU).

Wij willen hen allen hartelijk danken voor hun inbreng in dit project.

Frank Kempkes en Anja Dieleman

Samenvatting

Schermen in de tomatenteelt: mogelijkheden en beperkingen

Door het gebruik van een energiescherm in de tomatenteelt is 16% energie te besparen. Door het gebruik van het scherm te optimaliseren is nog 3% energiebesparing mogelijk, maar dit gaat wel snel ten koste van de productie.

Het gebruik van energieschermen is een goed middel om energie te besparen en pieken in het gasverbruik te verlagen. Er wordt dan ook steeds meer gebruik gemaakt van (beweegbare) schermen. In vergelijking tot andere vruchtgroentegewassen wordt er in de tomatenteelt echter nog weinig geschermd, al is het de laatste tijd wel in opkomst. Door de instituten Plant Research International en Agrotechnology & Food Innovations in Wageningen is onderzoek gedaan naar de effecten van schermen op energieverbruik en gewasgroei in de tomatenteelt. Dit onderzoek werd gefinancierd door Productschap Tuinbouw en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit.

Langer schermen

In een onderzoekskas in Wageningen is in de periode januari tot en met april 2004 een proef uitgevoerd in 4 kasafdelingen met Durinta planten. In twee afdelingen werd het scherm geopend bij een globale straling buiten van 5 W/m^2 en in twee andere afdelingen bij een straling van 50 W/m^2 . Het gebruikte schermdoek was SLS 10 Ultra plus. Er was geen statistisch betrouwbaar verschil aan te tonen in het gewicht van de planten tussen de verschillende schermbehandelingen. Ook het bladoppervlak en het gewicht van de (geooogste) vruchten was niet aantoonbaar verschillend voor de beide behandelingen. In deze periode werd echter wel ongeveer 3% energie bespaard door langer te schermen.

Ochtendzon

In de praktijk wordt er vaak van uit gegaan dat voor een plant ochtendzon belangrijker is dan de avondzon. Hierdoor wordt 's ochtends vroeg het scherm al geopend om gebruik te maken van het licht, terwijl dat energetisch niet gunstig is. In het experiment is onderzocht of het inderdaad zo is dat planten 's ochtends actiever zijn dan 's middags (dus meer fotosynthese hebben bij dezelfde hoeveelheid licht). Hiervoor werden gedurende de dag fotosynthesemetingen gedaan onder omstandigheden waarbij licht, temperatuur en CO_2 concentratie gelijk gehouden werden. De fotosynthese bleek na zonsopkomst in circa een uur toe te nemen tot het niveau dat de plant gedurende het grootste gedeelte van de dag handhaaft. In de laatste uren van de dag, voordat de zon onder gaat, neemt de fotosynthese (gemeten onder die vaste omstandigheden) met ongeveer 20% af. Deze metingen tonen aan dat het niet zo is dat het licht na zonsopkomst veel belangrijker is dan het licht in de uren die daarop volgen, en dat het scherm om die reden onmiddellijk na zonsopkomst geopend zou moeten worden. Wel is het zo dat de fotosynthese aan het einde van de dag afneemt.

Berekeningen

In de proef die is uitgevoerd zijn twee schermbehandelingen vergeleken. Daarnaast zijn de effecten van een aantal andere scherminstellingen op energieverbruik en productie berekend. Hiervoor is een kasklimaatmodel en een gewasgroeimodel gebruikt. Uit de berekeningen blijkt dat er zonder scherm 47 m^3 gas per m^2 per jaar wordt verbruikt. Wanneer het scherm direct als het licht is geopend wordt, wordt er ruim 1650 uren geschermd. Dit levert een energiebesparing op van 16% (7.4 m^3 gas per m^2 per jaar). Daarnaast neemt de maximale dagafname met ongeveer 30% af, van 3600 m^3 per ha per dag tot 2400 m^3 per ha per dag. Het aantal uren met een uurverbruik boven de $130 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{uur}$ neemt met ongeveer 400 uur per jaar fors af bij de toepassing van een scherm. Een scherm biedt dus de mogelijkheid een gascontract met een lagere maximale uurafname af te sluiten, wat een flinke kostenbesparing op kan leveren. Om de resultaten van de berekeningen te kunnen vergelijken, is gerekend met scherminstellingen die een heel schermseizoen hetzelfde zijn gehouden. In de praktijk zal een tuinder zijn

scherminstellingen in de loop van het seizoen aanpassen, afhankelijk van het weer en de stand van het gewas. Mits goed gedaan kan een tuinder zo een hogere energiebesparing realiseren met minder productieverlies dan wanneer jaarrond dezelfde instellingen worden gebruikt.

Scherminopenen op licht

Er zijn berekeningen gedaan waarbij het scherm werd geopend op basis van straling buiten van 1 tot 150 W/m². Naarmate het scherm bij meer licht geopend wordt, neemt het aantal uren dat geschermd wordt toe van 1650 naar 2050. Het energieverbruik neemt daarmee met 1.6 m³ per m² per jaar af. Deze energiebesparing wordt vooral gerealiseerd van de teeltstart tot half februari. Langer schermen kost echter licht, en daarmee productie. Het productieverlies loopt op naar 0.3 kg tomaten per m² per jaar wanneer het scherm geopend wordt bij 150 W/m². Wanneer een financiële afweging gemaakt wordt tussen energiebesparing (€ 0.12 per m³ gas) en productieverlies (KWIN prijzen tomaten) blijkt dat de balans al gauw negatief uitvalt. Wanneer te veel licht weggeschermd wordt, wordt de waarde van het productieverlies niet meer goedgemaakt door de energiebesparing. Wanneer gerekend wordt met een gasprijs van € 0.18 per m³ gas en een middenprijs voor tomaat (€ 0.90 per kg) weegt de energiebesparing echter wel op tegen de productiederving en hoeft het scherm pas geopend te worden bij een straling boven de 150 W/m². Naarmate het scherm pas bij hogere stralingsniveaus geopend wordt, daalt het aantal uren met de maximale gasafname. Dat betekent dat verlengd schermen een goede manier is pieken in het gasverbruik af te vlakken en daarmee de energiekosten te beperken.

Scherminopenen op licht en buitentemperatuur

Als het openen van het scherm niet alleen gebaseerd wordt op de globale straling, maar daarbij ook de buitentemperatuur wordt betrokken, kan nog eens 0.4 m³ gas per m² per jaar bespaard worden zonder dat dit productie kost.

Temperatuurverschil onder – boven scherm

Door een aantal tuinders wordt de temperatuur boven het scherm ook gemeten. Wanneer het scherm op het temperatuurverschil tussen onder en boven het scherm geregeld wordt, blijkt dat naarmate het temperatuurverschil op het moment van openen kleiner is, er meer geschermd wordt. Wanneer het temperatuurverschil waarbij het scherm geopend wordt afloopt van 12 naar 4 °C, neemt het aantal schermuren met 300 toe en het energieverbruik met 3% af. De productie neemt dan met 0.5% af. Als het temperatuurverschil tussen de lucht onder en boven het scherm kleiner is op het moment van openen, levert dit een kleinere temperatuurval op dan als dit temperatuurverschil groter is bij opening van het scherm.

Wijze van scherm openen

Bij het openen van het scherm kunnen de stapgrootte, wachttijd tussen de stappen en de schermstand waarbij het scherm ineens geopend wordt gevarieerd worden. Uit berekeningen blijkt dat de manier waarop het scherm geopend wordt nauwelijks effect heeft op het totale energieverbruik op jaarbasis. Wel kan met een verbeterde regeling een aanzienlijke daling van de kouval die optreedt bij het openen van het scherm gerealiseerd worden. Daarmee wordt ook de piek in het gasverbruik afgevlakt.

Concluderend

Uit fotosynthesemetingen is gebleken dat het licht direct na zonsopkomst niet belangrijker is dan het licht in de uren daarop volgend. Met een scherm is volgens berekeningen 16% energie te besparen. Door het gebruik van het scherm te optimaliseren is nog 3% energiebesparing mogelijk. Als er veel schermuren worden gemaakt treedt productieverlies op, maar het hangt af van de gasprijs en de prijs van de tomaten hoe de balans financieel uitvalt. Door een scherm te gebruiken, zijn de pieken in energieverbruik lager, waardoor een voordeliger gascontract afgesloten kan worden.

1. Inleiding

1.1 Toepassing van energieschermen

De toepassing van energieschermen is een effectief middel om energie te besparen en pieken in gasverbruik te verlagen. We zien dan ook dat steeds meer gebruik gemaakt wordt van (beweegbare) schermen in de glastuinbouw. Beslissen over openen en sluiten van het scherm is in feite het balanceren tussen licht, warmte en vocht (en in mindere mate van CO₂). In veel gevallen wordt het scherm 's nachts dicht gehouden en gaat het 's ochtends open zodra er licht is; bij lage buitentemperaturen gaat het scherm vaak pas iets later open. De gehanteerde strategie verschilt sterk per gewas en per tuinder. Als 's ochtends het openen van het scherm iets uitgesteld zou worden en het openen regeltechnisch juist uitgevoerd zou worden, zou het piekverbruik verminderd kunnen worden (vooral belangrijk in verband met de liberalisering/CDS) en kan veel energie bespaard worden. Productieverlies door een reductie van de fotosynthese is op dat moment waarschijnlijk relatief beperkt, omdat de instraling toch nog laag is.

Echter in de praktijk gaat men er al sinds lange tijd van uit dat de plant 's ochtends zo vroeg mogelijk actief gemaakt moet worden en dat de ochtendzon belangrijker is dan avondzon. Hierdoor streeft de tuinder 's ochtends vroeg naar zo veel mogelijk licht bij de plant en een verdere stimulatie van de verdamping door te verwarmen, terwijl het scherm geopend is om vocht af te voeren. Hoewel in de literatuur beschreven is dat de fotosynthetische activiteit af kan nemen gedurende de dag, zijn er nauwelijks kwantitatieve gegevens bekend in welke mate een plant 's ochtends actiever (efficiënter) is dan 's middags en in welke mate het belangrijk is om de plant 's ochtends te activeren. Behalve het tijdstip van openen is ook de wijze van openen van invloed op het optreden van pieken in het gasverbruik.

1.2 Verloop van de fotosynthese gedurende de dag

De fotosynthesesnelheid van een plant wordt voornamelijk bepaald door de heersende lichtintensiteit. In het algemeen is het zo dat het verloop van de fotosynthese gedurende de dag het verloop van de lichtintensiteit volgt. Verder wordt de fotosynthese beïnvloed door de CO₂ concentratie in de lucht en, in mindere mate, door de temperatuur. In een aantal studies is 'hysteresis' beschreven, een fenomeen waarbij de reactie van de fotosynthese op licht in de ochtend een ander verloop heeft dan in de middag. De meest bekende vorm daarvan is de 'midday depression' of meer precies 'sluiting van de huidmondjes midden op de dag'. Wat de reden van de verlaagde fotosynthese door het sluiten van de huidmondjes in de middag is, is niet helemaal duidelijk. Er worden verschillende oorzaken genoemd in de literatuur: hoge temperaturen in de middag (Yu *et al.*, 2001), watertekort dan wel een te groot verschil in waterdampdruk tussen blad en lucht (Ito, 1971; Bodlaender *et al.*, 1985; Raschke & Resemann, 1986), overmaat aan licht (foto-inhibitie; Powles & Thorne, 1981; Yu *et al.*, 2001), assimilatenverzadiging (Ito, 1971; Ayari *et al.*, 2000) of een (onbekend) endogeen mechanisme (Chaumont *et al.*, 1994; Ayari *et al.*, 2001), mogelijk gerelateerd aan het ontwikkelingsstadium van de plant (Singh *et al.*, 1993). Over het algemeen wordt een (plaatselijk) watertekort in de plant gezien als belangrijkste oorzaak. Dit is in de meeste gevallen beschreven voor gewassen die in de open lucht in de grond geteeld worden. Door dit watertekort sluiten huidmondjes en loopt de fotosynthese terug. Het watertekort is niet altijd alleen te wijten aan een onvoldoende watervoorziening, maar ook aan een hete of droge lucht in de middag.

Voor een aantal tuinbouwgewassen is daarentegen beschreven dat de fotosynthese gedurende de dag geen hysteresis of 'middagdip' vertoont, maar uitsluitend een functie is van lichtintensiteit (en CO₂ concentratie en temperatuur). Nederhoff & Vegter (1994) hebben de gewasfotosynthese van tomaat, komkommer en paprika gemeten. Voor tomaat vonden zij geen relatie tussen het niveau van de fotosynthese en het tijdstip van de dag. Ook voor komkommer en paprika vonden zij geen systematische afname van de gewasfotosynthese in de loop van de dag. Nederhoff en Vegter maakten hierbij het voorbehoud dat zij geen fotosynthesemetingen hebben gedaan op zeer zonnige dagen (lichtniveau was maximaal 640 μmol PAR m⁻² s⁻¹) en dat een effect op de fotosynthese onder hoog licht omstandigheden niet uit te sluiten is. Heuvelink *et al.* (1996) echter hebben wel metingen gedaan aan gewasfotosynthese op

zeer zonnige dagen (tot ongeveer $1400 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Ook zij vonden geen hysteresis in de gewasfotosynthese, met andere woorden: er was geen systematisch verschil tussen fotosynthese in de ochtend en in de middag (Heuvelink *et al.*, 1996). Ook voor enkele niet-tuinbouwgewassen is beschreven dat er geen verloop van de fotosynthese over de dag te vinden was, bijvoorbeeld voor tarwe tot het stadium van afrijping (Singh *et al.*, 1993). Volgens Hand *et al.* (1992, 1993), die de gewasfotosynthese van aubergine gemeten hebben, is er voor planten die voldoende water krijgen nauwelijks verschil tussen lichtresponscurven gemaakt in de ochtend of de middag.

Op basis van deze literatuurgegevens verwachten wij in ons onderzoek aan tomatenplanten in de kas die voldoende water krijgen geen verloop van de fotosynthese gedurende de lichtperiode als er wordt gemeten bij standaard omstandigheden van licht, CO_2 en temperatuur.

1.3 Doelstelling

Het in dit rapport beschreven project beoogt energiebesparing te realiseren door 's ochtends het openen van het scherm uit te stellen zonder nadelige effecten op gewasgroei en productie en het openen op een energie-efficiënte wijze te regelen. Er is voor gekozen dit project uit te voeren met tomaat, omdat met dit gewas nog relatief weinig ervaring is met schermen. Als er al een scherm wordt toegepast in de tomatenteelt is de intensiteit van het schermgebruik in vergelijking met andere vruchtgroentegewassen nog relatief beperkt (Ruijs *et al.*, 2005). Wel is het zo dat de interesse voor schermen in de tomatenteelt de laatste tijd sterk toeneemt.

1.4 Aanpak

Aan het begin van het project is een bespreking georganiseerd waarin door een aantal onderzoekers van PPO, A&F en PRI, de onderzoekscoördinatoren van PT en LNV en twee tomatentelers een discussie werd gehouden over het gebruik van schermen in de tomatenteelt (zie Bijlage I).

In de maanden januari tot en met april 2004 is een tomatengewas geteeld bij twee verschillende schermstrategieën, een 'standaard' strategie (scherm openen bij 5 W/m^2 straling) en 'verlengd schermen' (scherm openen bij 50 W/m^2 straling) strategie. Om een indruk te krijgen van het verloop van de plantactiviteit, werden fotosynthese-eigenschappen van de bladeren gedurende de dag gemeten. Om te beoordelen wat de effecten van de schermstrategieën op de groei en productie was, werden periodiek planten destructief geoogst en vers- en drooggewichten van de plantenonderdelen bepaald. Van de rijpe vruchten werden aantallen en gewichten geregistreerd. Met behulp van aanvullend geïnstalleerde apparatuur werd het temperatuurverloop onder en boven het scherm bij toepassing van een aantal verschillende schermopeningsstrategieën gemeten. Op basis hiervan werd een aantal wijzigingen in het kasklimaatmodel KASPRO doorgevoerd. Met het kasklimaatmodel en gewasgroeimodel werden de effecten van een aantal scenario's die verschilden in criteria voor of wijze van schermopening doorgerekend. Effecten op kasklimaat, gewasgroei, productie en financiële opbrengst werden bepaald.

Als afsluiting van dit project werden in maart 2005 de resultaten in de BCO (begeleidingscommissie onderzoek) tomaat van LTO besproken. Bevindingen van het experiment, de berekeningen en de bespreking zijn te vinden in dit rapport.

2. Opzet van het experiment

2.1 Proefopzet

Geënte tomatenplanten (trostomaat, ras Durinta) werden op 12 januari 2004 (week 2) geplant in 4 kascompartimenten van 144 m² elk in een Venlo-kas in het kassencomplex 'De Haaff' in Wageningen. Lichttransmissie van deze kas is 65%. De planten waren opgekweekt door kwekerij Jongerius te Houten bij 18 °C, 600 ppm CO₂ en 70-75% relatieve luchtvochtigheid. De planten werden geplaatst op hangende goten op steenwol (Grodan, type Expert) in een plantdichtheid van 2.5 planten per m² (1 stengel per plant). In eerste instantie werden de planten naast het plantgat geplaatst. Op het moment dat de bloemen van de eerste tros open gingen, werden de planten op het plantgat gezet. Aan de randen van de kascompartimenten werden enkele rijen als randrijen geplaatst, binnen de rij dienden de eerste en laatste twee planten als randplanten. De planten werden handmatig getrild voor een goede vruchtzetting. De trossen werden teruggesnoeid tot op 6 vruchten per tros. Rondom de afrijpende trossen werd het blad geplukt conform de praktijk.

In de afdelingen hingen in eerste instantie QLS 16 zonwering/energieschermen. Deze zijn in week 4 vervangen door het schermtype dat gangbaar is in de tomatenteelt, te weten SLS 10 Ultra plus (lichtdoorlatendheid direct licht 88% en diffuus licht 81%). In het experiment zijn twee behandelingen vergeleken (steeds 2 afdelingen per behandelingen): 'standaard schermen', waarbij het scherm werd geopend bij 5 W/m² globale straling en 'verlengd schermen' waarbij het scherm werd geopend bij 50 W/m² globale straling.

De teelt en kasklimaatinstellingen zijn regelmatig met een teeltbegeleider van LUCEL doorgenomen, om zoveel mogelijk conform de praktijk te telen. In de eerste periode na het planten (vanaf 12 januari) werd de dagtemperatuur ingesteld op 18 °C en de nachttemperatuur op 16.5 °C. Vanwege het donkere weer en het feit dat de planten te iel weggroeiden werden deze instellingen verlaagd naar 17 °C gedurende de dag en 14.5 °C 's nachts. Daarna werd in stapjes de temperatuur weer verhoogd tot 19 °C overdag met een lichtverhoging van 2 °C en 17 °C 's nachts. Vanaf half maart zijn in alle afdelingen exact dezelfde klimaatsetpoints aangehouden.

De CO₂ in dit experiment was afkomstig van zuivere CO₂ uit flessen. De CO₂ concentratie in de kaslucht werd ingesteld op 600 ppm. Als de ramen geopend werden, werd de instelling verlaagd naar 400 ppm. Voor de klimaatinstellingen en -metingen, buistemperaturen en raam- en schermstanden is gebruik gemaakt van het in de kas aanwezige meetsysteem van de Hoogendoorn klimaatcomputer die elke 5 minuten setpoints en gerealiseerde waarden in bestanden opslaat. Omdat er standaard geen temperatuur- en RV-meting boven het scherm plaatsvindt en de schermstand een (aan de hand van de looptijden van de schermmotoren) berekende waarde is, zijn in de periode van 2 maart tot en met 3 mei in twee afdelingen additionele metingen verricht. Hiervoor werd onder en boven het scherm een extra meetbox (Priva – Vogelkooitje) met NTC temperatuursensoren geplaatst en een raamstandmelder als schermstandmelder gemonteerd en geijkt (Priva raamstandmelder 60°).

Deze extra metingen zijn met een meetinterval van 1 minuut gemeten (Datataker 500) en op een additioneel computersysteem opgeslagen om de gevolgen van schermstandverstellingen op het klimaat accuraat te kunnen meten en vast te leggen.

Op 4 mei 2004 is het experiment beëindigd.



Figuur 2.1. Gebruik van een raamstandmelder als schermstand meting, waarbij schermstanden van 96-100% nauwkeurig gemeten werden.

2.2 Periodieke oogsten

Met 4-wekelijks intervallen werden 6 planten per afdeling destructief geoogst. Uit elke gewasrij werd 1 plant geoogst. Om de gewasstructuur intact te houden, werden de ontstane gaten tot begin april gevuld met planten afkomstig van de uiteinden van de rijen. Daarna werden de planten te groot om ze zonder schade te kunnen verplaatsen. Aan de planten die verplaatst zijn, werden verder geen waarnemingen meer gedaan. Van de destructief geoogste planten werd lengte, bladoppervlakte en vers- en drooggewichten (gedroogd bij 80 °C) gemeten. Aan de wortels werden geen waarnemingen gedaan.

Gedurende de laatste weken van het experiment werden wekelijks rijpe tomaten geoogst. Aantallen en versgewichten van de geoogste vruchten werden per gewasrij (16 planten per rij) geregistreerd.

2.3 Bladfotosynthese, bladverdamping en huidmondjesopening

Bladfotosynthese werd gemeten met een draagbare fotosynthesemeter (LCPro, ADC, Verenigd Koninkrijk) aan het 6e blad (van boven geteld) van de plant. Dit is een bijna volgroeid blad, dat niet beschadwd wordt door hoger gelegen bladeren. De fotosynthesemeter meet de CO₂ concentratie en dampspanning van de lucht die de bladkamer binnenkomt en van de uitgaande lucht. Op basis van het verschil wordt de fotosynthesesnelheid ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) berekend, evenals de verdampingssnelheid ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en de geleidbaarheid van de huidmondjes voor CO₂ ($\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Om het verloop van de fotosynthese gedurende de dag te bepalen is bij beide behandelingen op twee manieren de fotosynthese gemeten:

1. Elke 2 uur een lichtresponscurve van de fotosynthese (lichtintensiteiten van 0, 50, 100, 200, 500, 1000 en 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bij een temperatuur van 22 °C en CO₂ concentratie van 700 ppm).
2. Elke 30 minuten een meting van de fotosynthese onder standaard condities in de bladkamer (lichtintensiteit 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, temperatuur 22 °C, 700 ppm CO₂)

Deze fotosynthesemetingen zijn uitgevoerd op donkere en zonnige dagen.

2.4 Foto-inhibitie

Foto-inhibitie werd gemeten aan een tomatengewas dat in Naaldwijk in het kader van het PPO project 'Planttemperatuur als stuurparameter in kasklimaatregelingen' geteeld werd. Er werd gemeten op 3 dagen in juli en augustus, waarvan 2 zeer zonnige dagen en 1 bewolkte dag. Foto-inhibitie werd gemeten met een draagbare chlorofylfluorometer (MINI-PAM, Walz, Effeltrich, Duitsland) aan het jongst volgroeide blad dat niet door bovenliggende bladeren werd beschaduwd. Minimale fluorescentie (F_0) en maximale fluorescentie (F_m) werden gemeten, en de verhouding hiertussen ($F_m - F_0 / F_m$) geeft aan wat het rendement van de ingevangen lichtdeeltjes in het fotosysteem is. Onder normale omstandigheden is deze waarde circa 0.84, wanneer beschadiging van het fotosysteem optreedt, wordt deze waarde lager.

Foto-inhibitie

Het maximaal haalbare rendement van de lichtreacties van de fotosynthese wordt uitgedrukt als de verhouding tussen variabele fluorescentie (F_v , is $F_m - F_0$) en de maximale fluorescentie (F_m), F_v / F_m . Wanneer een plant wordt blootgesteld aan zeer hoge lichtintensiteiten, kan foto-inhibitie optreden. Hierbij treden beschadigingen aan fotosysteem II op. De reactiecentra van fotosysteem II raken beschadigd, waardoor het opgevangen zonlicht niet meer volledig nuttig gebruikt kan worden voor de fotosynthese, maar voor een gedeelte verloren gaat als warmte. Bij foto-inhibitie wordt het rendement van de fotosynthese, de F_v / F_m dus lager. Het effect van foto-inhibitie op de fotosynthese en uiteindelijk op de productie is afhankelijk van de lichtintensiteit. Bij veel licht is het effect op de fotosynthese veel lager dan het effect op de maximale rendement van de lichtreacties. Dit heeft als oorzaak dat de capaciteit van de lichtreacties van de fotosynthese groter is dan die van de donkerreacties. Foto-inhibitie komt dus niet direct tot uiting in de maximale fotosynthesesnelheid bij lichtverzadiging. Pas wanneer zoveel PSII reactiecentra zijn beschadigd dat zelfs bij het op volle snelheid draaien van de onbeschadigde PSII centra het elektrontransport beperkend is voor de fotosynthese, zal foto-inhibitie zichtbaar worden in een afname van de maximale fotosynthesesnelheid. Als de hoeveelheid licht echter de beperkende factor wordt, kan een verlaging van de F_v / F_m rechtstreeks vertaald worden naar een verlies van de fotosynthesesnelheid. De beschadiging van fotosysteem II ten gevolge van foto-inhibitie is momentaan. De uiteindelijke mate van foto-inhibitie is een resultante van de beschadiging door een overmaat aan licht en de herstelprocessen die in de plant plaatsvinden. Na verlaging van de lichtintensiteit vergt het herstel van het fotosysteem nog meerdere uren tot dagen (Haalstra, 1989).

2.5 Waterverbruik

De hoeveelheid water die de planten kregen toegediend, werd dagelijks berekend door het aantal druppelbeurten te vermenigvuldigen met de (gemeten) watergift per druppelbeurt. Deze watergift per druppelbeurt werd periodiek gemeten door in elk compartiment de waterafgifte van 4 druppelaars te registreren. Dagelijks werd van één rij per afdeling het drainwater opgevangen en gewogen. Op basis van het verschil tussen aanvoer en afvoer werd het (bruto) waterverbruik per plant per dag berekend. Hierbij is niet gecorrigeerd voor veranderingen van het watergehalte van het substraat.

2.6 Statistiek

De behandelingen van het experiment (i.e. standaard schermen en verlengd schermen) werden verloot over de 4 naast elkaar gelegen kasafdelingen, resulterend in de volgende verdeling:

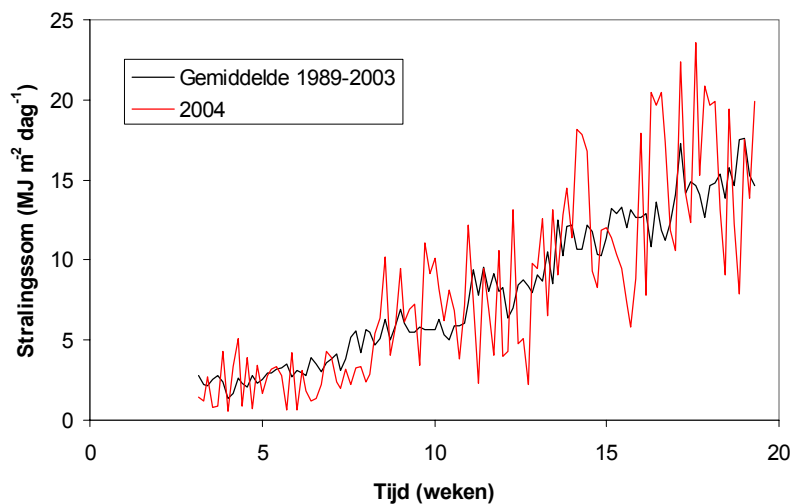
Kasafdeling	Behandeling
10.4	Standaard schermen
10.6	Verlengd schermen
10.8	Verlengd schermen
10.10	Standaard schermen

Middels ANOVA werd de significantie van de effecten van de aangelegde behandelingen op de gemeten parameters getoetst (95% betrouwbaarheid).

3. Resultaten van het experiment

3.1 Klimaat

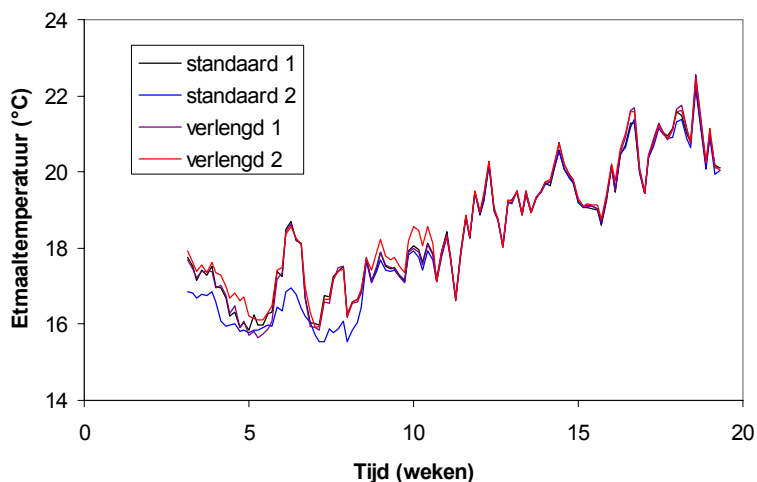
Voor de analyse van de gewasontwikkeling en vruchtproductie bij de beide schermbehandelingen is het van belang het klimaat in de verschillende kascompartimenten te kennen. Gewasgroei wordt sterk bepaald door de hoeveelheid licht. In onderstaande figuur staan de dagsommen van de globale straling buiten weergegeven voor de maanden januari – april 2004 en gemiddeld over deze maanden in de jaren 1989-2003.



Figuur 3.1. Dagsommen van de globale straling buiten in de periode januari tot en met april 2004 vergeleken met de langjarige gemiddelden (1989-2003) over dezelfde periode.

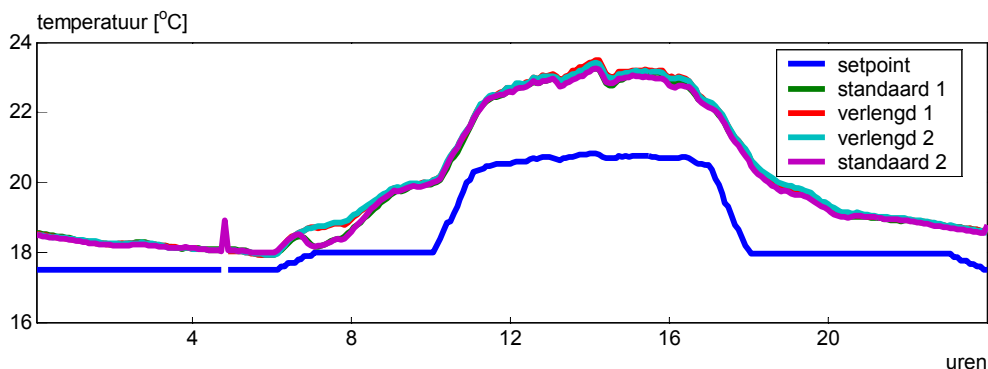
Over de gehele proefperiode, van 12 januari tot en met 3 mei was de stralingsom in 2004 2.5% hoger dan het langjarig gemiddelde. De eerste twee maanden van 2004 waren donker ten opzichte van het langjarige gemiddelde. In januari 2004 was er ruim 12% minder licht dan het langjarige gemiddelde, in februari was dat 3%. Om te voorkomen dat het gewas te 'dun' zou worden, is in deze periode geteeld met een lage gemiddelde etmaaltemperatuur, zoals in Figuur 3.2 te zien is. Pas toen het eind februari zonniger werd, werd de teelttemperatuur verhoogd. Dit betekende wel een trage start van de teelt, met daardoor een late zetting van de eerste tros.

Uit de dagelijkse lichtsommen buiten is de lichtsom in de behandelingen standaard schermen (scherm openen bij 5 W/m²) en verlengd schermen (scherm openen bij 50 W/m²) te berekenen. In de periode 12 januari tot en met 3 mei blijkt in de verlengd schermen afdeling 0.34% minder licht te zijn geweest dan in de standaard schermen afdeling.



Figuur 3.2. Gemiddelde etmaaltemperaturen in de 2 afdelingen waarin standaard werd geschermd (scherm openen bij 5 W/m^2) en de 2 afdelingen waarin verlengd werd geschermd (scherm openen bij 50 W/m^2) in de periode januari tot en met april 2004.

Aan het begin van de teelt lag de temperatuur in afdeling 2 standaard schermen gemiddeld ongeveer $1 \text{ }^\circ\text{C}$ lager dan in de overige afdelingen. In de periode half maart – begin mei waren de setpoints van de kasklimaatinstellingen in alle afdelingen identiek. In die periode zijn aanvullende metingen aan het kasklimaat gedaan. Resultaten hiervan zijn in onderstaande figuren weergegeven.

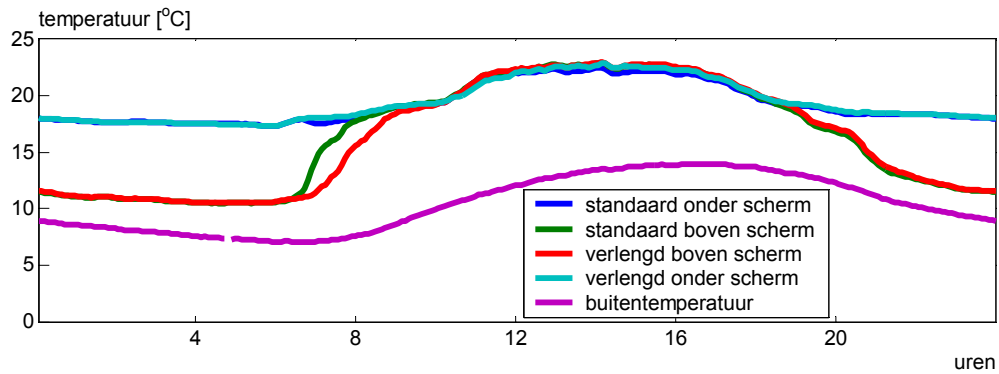


Figuur 3.3. Gerealiseerde kasluchttemperatuur en setpoint verwarmen gedurende een etmaal gemiddeld over de periode 15 maart – 4 mei.

In Figuur 3.3 is een gemiddeld gerealiseerd dagverloop van de kasluchttemperatuur en het setpoint verwarmen in de periode 15 maart – 4 mei weergegeven. Hieruit zijn een paar opvallende zaken te herleiden. Er is een duidelijk verschil tussen de behandelingen waar te nemen in de gerealiseerde kasluchttemperatuur tussen circa 7 en 9 uur in de ochtend. In de afdelingen standaard 1 en 2 blijft de gerealiseerde kasluchttemperatuur in die periode duidelijk achter op die van de verlengd geschermd afdelingen. Er is gemiddeld gesproken zelfs sprake van een temperatuurval in de standaard geschermd afdelingen van circa $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, terwijl dit in de verlengd geschermd afdelingen gemiddeld gesproken niet is waar te nemen. Daarnaast is het, algemeen gesproken, opvallend dat de in de nacht gerealiseerde kasluchttemperatuur duidelijk boven het setpoint verwarmen ligt. Dit moet worden toegeschreven aan het uitgebreid schermen en de inzet (hoewel beperkt) van een minimumbuis temperatuur op het ondernet. Het setpointverwarmen is op kloktijd (dus niet aan de zontijd gerelateerd) gestuurd, zodat deze gedurende deze periode

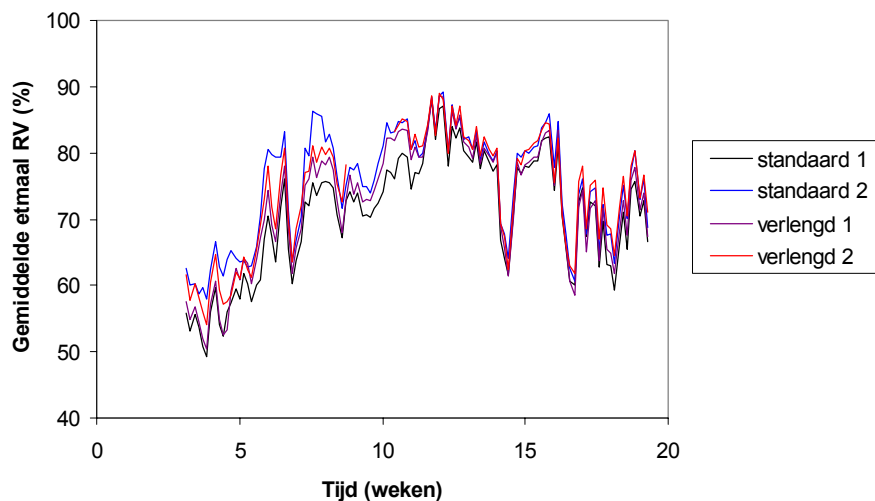
op ieder moment van de dag gelijk is geweest. Gedurende de dag is het setpoint verwarmen op 19 °C ingesteld, met een lichtverhoging van 2 °C.

In Figuur 3.4 zijn de gemiddelde kasluchttemperaturen boven en onder het scherm van de afdelingen standaard 1 en verlengd 1 in de periode 15 maart tot 4 mei weergegeven. Om een idee van het effect van het scherm op de temperatuur boven het scherm te laten zien, is ook de gemiddelde buitentemperatuur over deze periode weergegeven.



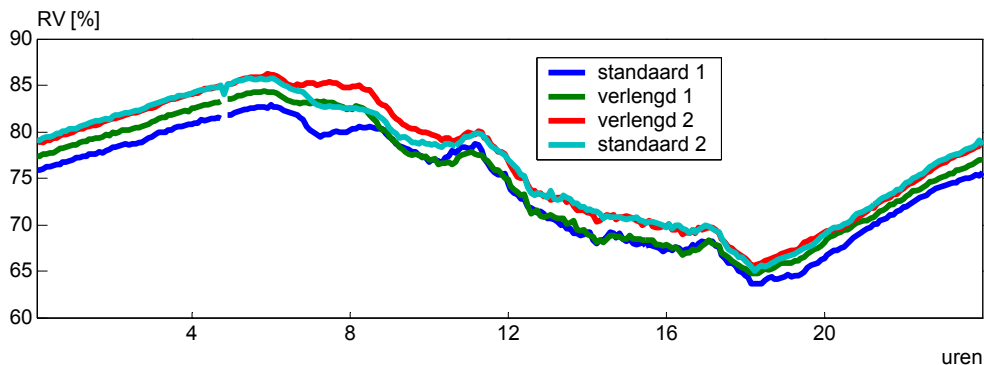
Figuur 3.4. Gemiddelde kasluchttemperaturen boven en onder het scherm van de afdelingen standaard 1 en verlengd 1 en de gemiddelde buitentemperatuur in de periode 15 maart tot 4 mei.

De luchtvochtigheid in de verschillende afdelingen vertoonde soms behoorlijke verschillen, maar deze verschillen zijn niet zodanig systematisch dat in de verlengd schermen behandeling (scherm openen bij 50 W/m²) de relatieve luchtvochtigheid altijd hoger of lager lag dan in de standaard schermen afdeling (scherm openen bij 5 W/m²). Gedurende de hele proef is de relatieve luchtvochtigheid onder de 90% geweest, waardoor geen grote problemen met schimmelaantastingen te verwachten waren. In de proef zijn dan ook geen aantastingen waargenomen.



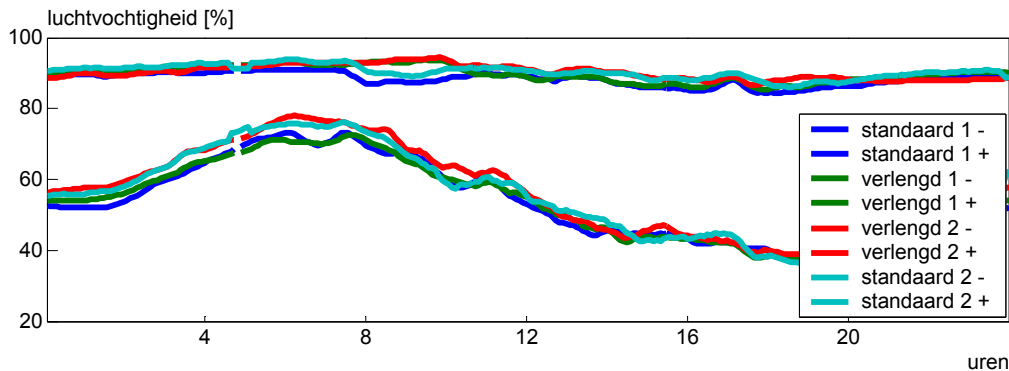
Figuur 3.5. Etmaalgemiddelden van de relatieve luchtvochtigheden van de kaslucht in de compartimenten waarin standaard werd geschermd (scherm openen bij 5 W/m²) en de afdelingen waarin verlengd werd geschermd (scherm openen bij 50 W/m²) in de periode januari tot en met april 2004.

De in Figuur 3.4 al waargenomen temperatuurverschillen tussen de 2 behandelingen komen in de luchtvochtigheid weer terug. Door het eerder openen van het scherm in afdelingen waarin standaard wordt geschermd (scherm openen bij 5 W/m^2) daalt de RV duidelijk. Daarnaast is er, algemeen gesproken, een behoorlijk verschil in de gemiddelde RV's, waarbij afdeling standaard 1 duidelijk droger is. Ook is duidelijk waarneembaar dat gedurende de avond en nacht de RV constant stijgend is, wat samenhangt met afnemende ventilatie en het schermgebruik. Immers door het scherm zal er minder condensatie tegen het kasdek plaatsvinden.



Figuur 3.6. Gerealiseerde relatieve luchtvochtigheid van de kaslucht gedurende een etmaal gemiddeld over de periode 15 maart – 4 mei.

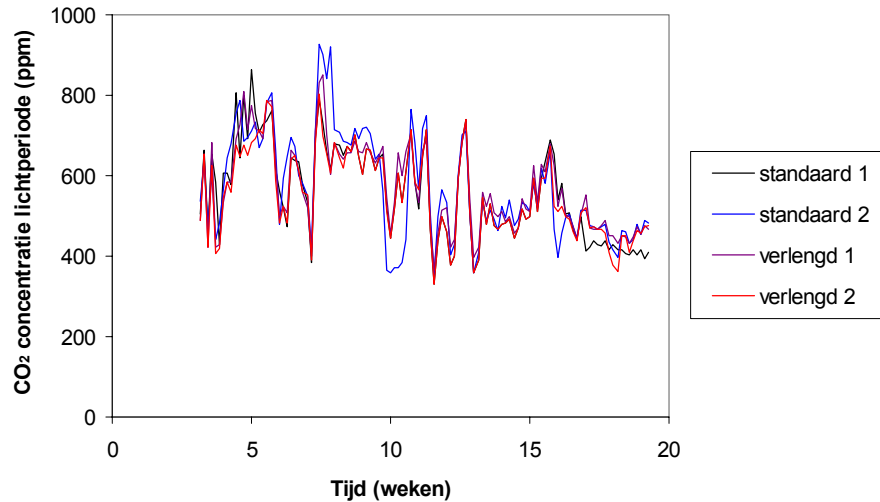
Omdat gemiddelden alleen een globaal beeld geven, is in Figuur 3.7 een overzicht van de absolute maxima en minima van de kaslucht RV gegeven.



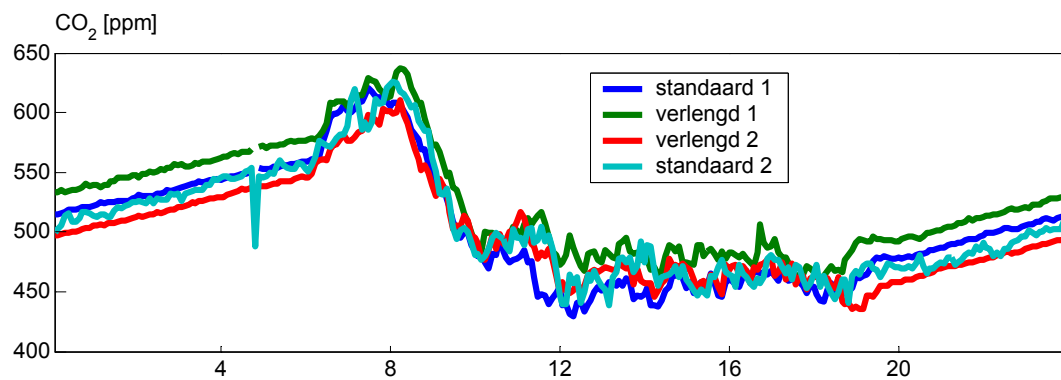
Figuur 3.7. Gerealiseerde maximale (+) en minimale (-) relatieve luchtvochtigheden van de kaslucht gemiddeld over de periode 15 maart – 4 mei.

Ook hieruit komt naar voren dat afdeling standaard 1 droger is dan de overige afdelingen. Daarnaast is ook hier het effect van het eerder openen van het scherm in de standaard geschermd afdelingen te herkennen. Ten behoeve van het meten van de effecten op de ruimtetemperatuur bij het openen van het scherm zijn in de afdelingen standaard 1 en verlengd 1 extra meetboxen, zowel boven als onder het scherm gemonteerd. Hierdoor is zowel informatie met betrekking tot de temperatuur als de RV boven het onder het scherm beschikbaar gekomen.

Het CO_2 -niveau in de kaslucht lag voor de afdelingen standaard schermen 1 en de beide verlengd schermen afdelingen redelijk op eenzelfde niveau, maar fluctueerde in de standaard schermen afdeling 2 nogal.

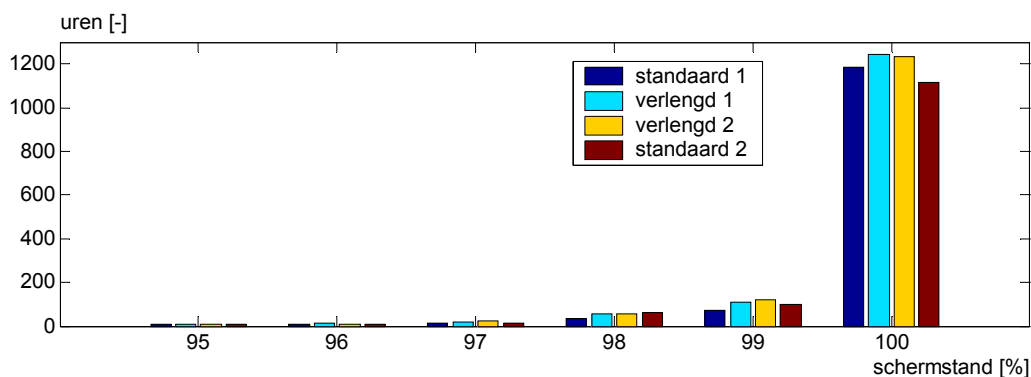


Figuur 3.8. Gemiddelden van de CO₂-concentraties in de kaslucht gedurende de lichtperiode in de compartimenten waarin standaard werd geschermd (scherm openen bij 5 W/m²) en de afdelingen waarin verlengd werd geschermd (scherm openen bij 50 W/m²) in de periode januari tot en met april 2004.



Figuur 3.9. Gemiddelde CO₂-niveau voor ieder uur van de dag in de periode 15 maart - 3 mei. De lichtperiode in dit tijdvak is van circa 07:00 tot 19:00 uur.

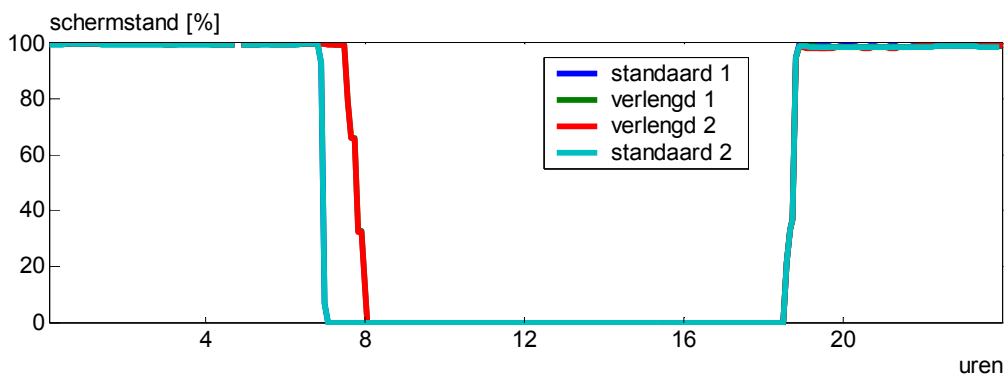
In de totale proefperiode is in de standaard geschermd afdelingen circa 1380 uur en in de verlengd geschermd afdelingen circa 1545 uur geschermd. Dit zijn de uren dat het scherm voor meer dan 95% gesloten is geweest. Door de verlengd schermen strategie werden er dus ruim 10% meer uren geschermd.



Figuur 3.10. Histogram van de het aantal schermuren met de daarbij behorende schermstand voor de gehele meetperiode.

Uit Figuur 3.10 blijkt dat in de afdeling standaard 2 het scherm minder uren volledig gesloten is geweest dan in afdeling standaard 1. Daar en tegen heeft deze afdeling wel meer uren op een kier gestaan dan afdeling standaard 1. Dat het absolute niveau van schermuren in de standaard afdelingen lager ligt dan in de verlengd geschermd afdelingen, is evident.

Gedurende de teeltperiode kan, gezien de gewasontwikkeling, verwacht worden dat naar het einde van de teelt er vaker hoge vochniveaus ontstaan. Door de grenzen (setpoints voor RV en buitentemperatuur waarbij nog geschermd wordt) hoog te leggen, zal er veel geschermd worden. In Figuur 3.11 is een overzicht gegeven van de gemiddelde schermstand voor ieder uur van de dag in de periode 17 tot en met 20 maart 2004. Dat de lijnen in de ochtend bij het openen niet exact parallel lopen is het gevolg van het open criterium van het verlengd schermen. Het criterium van 50 W m^{-2} aan straling kan op donkere dagen enkele uren na zonsopkomst liggen (terwijl in de andere afdeling het scherm direct geopend wordt) en dit op zonnige dagen al na circa een half uur bereikt kan worden. Er is dus geen verschil in de snelheid van openlopen. Het scherm wordt in alle afdelingen op het zelfde moment gesloten.

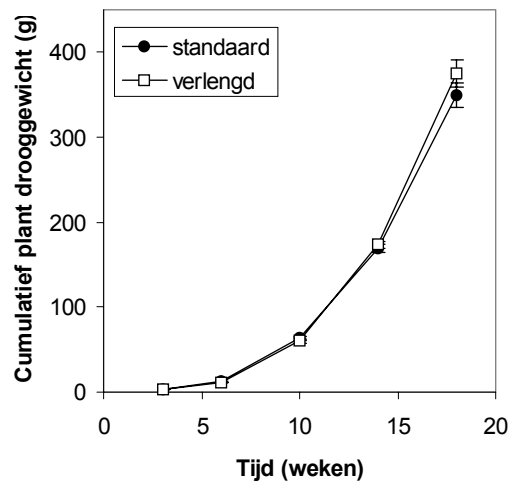


Figuur 3.11. Gemiddeld dagverloop van de schermstand in de periode 17 tot en met 20 maart 2004.

3.2 Gewasgroei

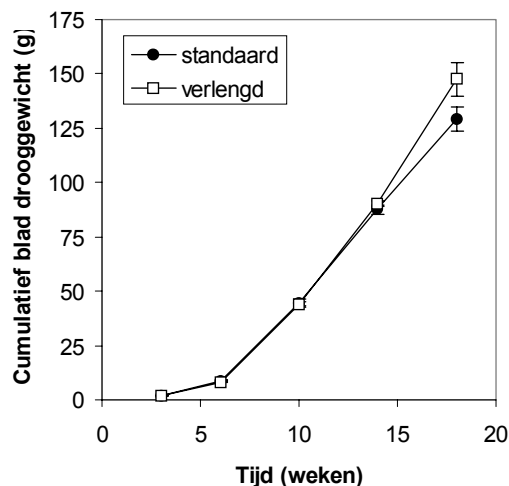
3.2.1 Experiment

Het cumulatieve drooggewicht van de planten blijkt niet te verschillen tussen de standaard schermen (scherm openen bij 5 W/m²) en de verlengd schermen (scherm openen bij 50 W/m²) behandeling (Figuur 3.12). Alleen bij de eindogst lijkt de verlengd schermen behandeling te resulteren in een hoger plant drooggewicht dan de standaard schermbehandeling. Dit verschil is echter statistisch niet significant.



Figuur 3.12. Verloop van het cumulatieve drooggewicht van de totale plant in de tijd bij behandelingen 'standaard schermen' (scherm openen bij 5 W/m²) en 'verlengd schermen' (scherm openen bij 50 W/m²). Meetpunten zijn het gemiddelde van 12 planten met de standaard afwijking van het gemiddelde. Het gewicht is inclusief geogste vruchten en geplukt blad maar exclusief de wortel.

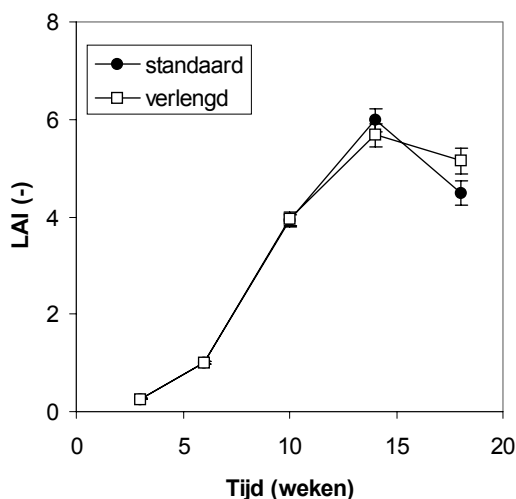
De effecten van de schermbehandelingen op drooggewichten van bladeren, stengels en vruchten worden in onderstaande figuren weergegeven.



Figuur 3.13. Verloop van het cumulatieve drooggewicht van het blad (aan de plant en reeds geplukt) in de tijd bij behandelingen 'standaard schermen' (scherm openen bij 5 W/m²) en 'verlengd schermen' (scherm openen bij 50 W/m²). Meetpunten zijn het gemiddelde van 12 planten met de standaard afwijking van het gemiddelde.

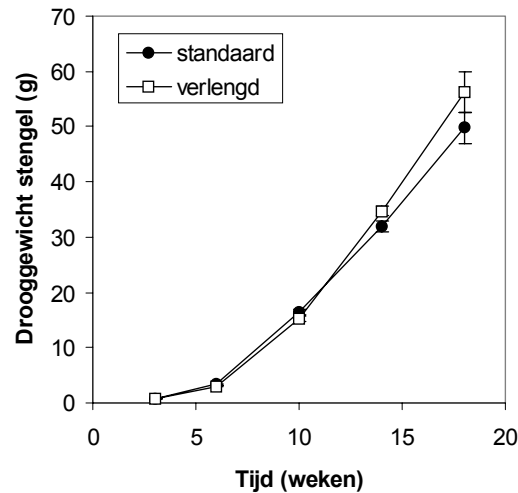
Het cumulatieve bladdrooggewicht blijkt niet te verschillen tussen de beide schermenbehandelingen (Figuur 3.13). Bij de laatste oogst, eind april, lijkt het gemiddeld gewicht van de bladeren aan de plant en de bladeren die al geplukt waren hoger voor de verlengd schermen behandeling (scherm openen bij 50 W/m^2) dan voor de standaard schermen behandeling (scherm openen bij 5 W/m^2). Dit verschil is statistisch echter niet significant.

Uit het verloop van de LAI in de tijd valt af te lezen dat de ontwikkeling van de bladoppervlakte gelijk op ging tussen beide behandelingen (Figuur 3.14). Vanaf week 11 werd blad geplukt. Vanaf die tijd was het aantal bladeren aan de planten in beide behandelingen ongeveer 24. Op het oog waren er geen verschillen in gewasstand tussen de beide behandelingen.



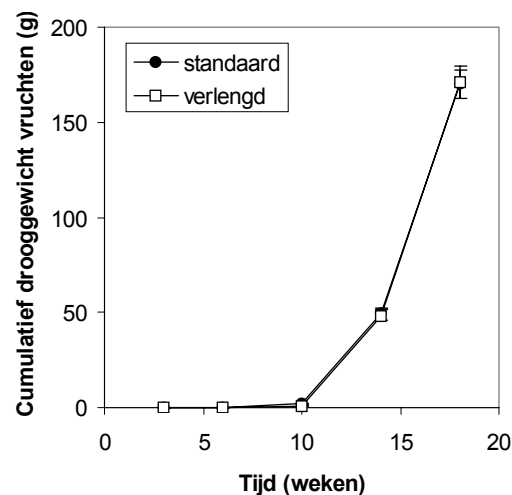
Figuur 3.14. Verloop van de bladoppervlakte index (LAI; m^2 bladoppervlak per m^2 grondoppervlak) in de tijd bij behandelingen 'standaard schermen' (scherm openen bij 5 W/m^2) en 'verlengd schermen' (scherm openen bij 50 W/m^2). Meetpunten zijn het gemiddelde van 12 planten met de standaard afwijking van het gemiddelde.

Het drooggewicht van de stengel van planten bij de verlengd schermen behandeling lijkt aan het einde van het experiment hoger te zijn dan bij de standaard schermen behandeling (Figuur 3.15). Deze verschillen zijn echter statistisch niet significant. Overigens blijkt dat de lengte van de stengel geen verschil vertoont tussen de beide behandelingen. Bij de eind oogst is de stengellengte van de standaardschermen behandeling (scherm openen bij 5 W/m^2) 406 cm, terwijl de lengte bij de verlengd schermen behandeling (scherm openen bij 50 W/m^2) 407 cm is.



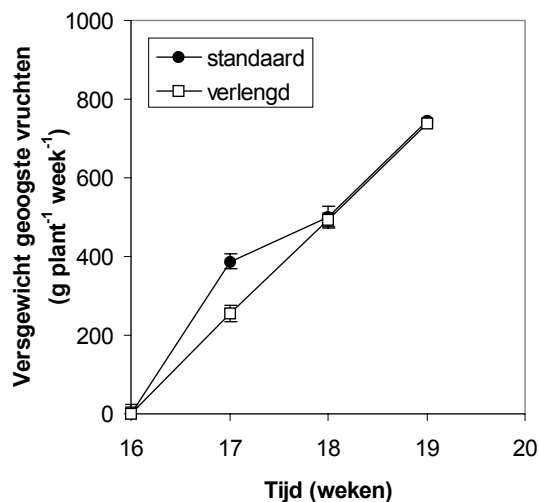
Figuur 3.15. Verloop van het drooggewicht van de stengel in de tijd bij behandelingen 'standaard schermen' (scherm openen bij 5 W/m^2) en 'verlengd schermen' (scherm openen bij 50 W/m^2). Meetpunten zijn het gemiddelde van 12 planten de standaardafwijking van het gemiddelde.

Het cumulatieve drooggewicht van de vruchten, dus aan de plant en reeds (rijp) geoogst, bleek in het geheel niet te verschillen tussen de schermenbehandelingen (Figuur 3.16).



Figuur 3.16. Verloop van het cumulatieve drooggewicht van de vruchten (aan de plant en reeds geoogst) in de tijd bij behandelingen 'standaard schermen' (scherm openen bij 5 W/m^2) en 'verlengd schermen' (scherm openen bij 50 W/m^2). Meetpunten zijn het gemiddelde van 12 planten met de standaardafwijking van het gemiddelde.

Het aantal geoogste vruchten en het versgewicht van de geoogste vruchten per plant was voor de eerste oogst in de standaard schermen behandeling iets hoger dan in de verlengd schermen behandeling (Figuur 3.17). In de tweede en derde oogstweek werd voor beide behandelingen hetzelfde aantal vruchten en hetzelfde gewicht aan vruchten geoogst.

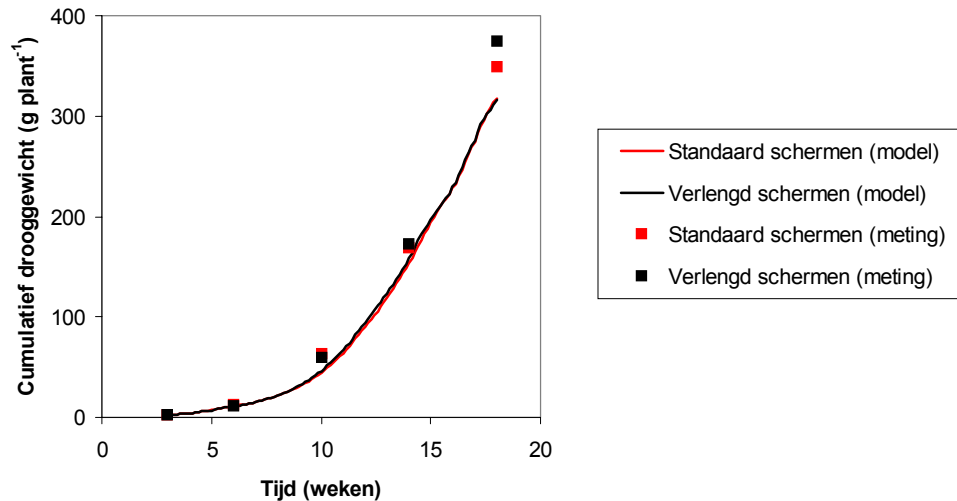


Figuur 3.17. Verloop van het versgewicht van de geoogste vruchten per plant per vruchtoogst in de tijd bij behandelingen 'standaard schermen' (scherm openen bij 5 W/m²) en 'verlengd schermen' (scherm openen bij 50 W/m²). Meetpunten zijn het gemiddelde van 12 rijen met elke 15 planten met de standaardafwijking van het gemiddelde.

Het gemiddeld vruchtgewicht verschilde niet tussen de beide schermenbehandelingen en liep in de tijd op van circa 80 gram naar circa 90 gram per vrucht.

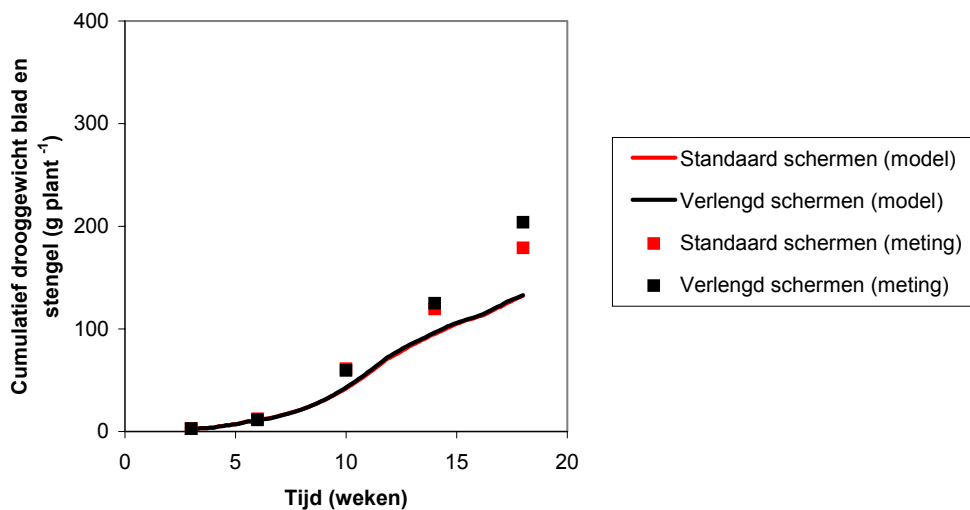
3.2.2 Modelvalidatie van het experiment

Met een gewasgroeimodel voor tomaat is de groei van het gewas gedurende het experiment nagerekend. Het gewasgroeimodel dat hiervoor is gebruikt, is uitgebreid beschreven in paragraaf 4.1. Het model berekent aan de hand van klimaatgegevens (straling, temperatuur en CO₂ concentratie) en de teeltgegevens (o.a. plantdatum en plantdichtheid) de groei van het gewas. Bladplukken werd opgelegd volgens het regime zoals dat in de proef is aangehouden. Uit de uitgevoerde berekeningen blijkt dat er geen effect is van de twee opgelegde schermbehandelingen en de kasklimaten die bij die behandelingen gerealiseerd zijn op de totale bovengrondse groei van het gewas (Figuur 3.18).



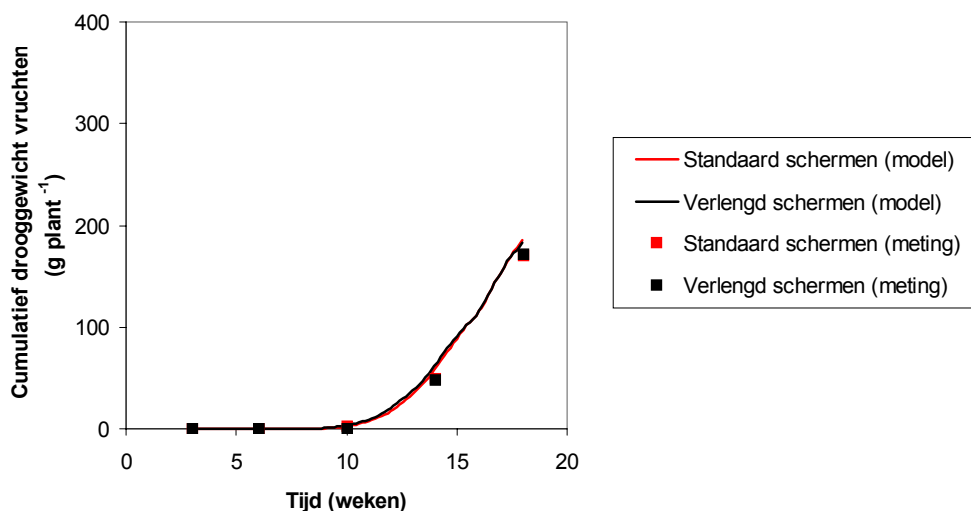
Figuur 3.18. Gesimuleerde (lijnen) en gemeten (punten) cumulatieve drooggewichten van de totale plant bij de behandelingen 'standaard schermen' (scherm openen bij 5 W/m^2) en 'verlengd schermen' (scherm openen bij 50 W/m^2).

Uit de berekeningen blijkt verder dat het bladgewicht niet wordt beïnvloed door de schermbehandelingen. De afwijking tussen de modelberekeningen en de metingen heeft als reden dat in de proef (op advies van de teeltbegeleider) meer blad is aangehouden dan in de praktijk gangbaar is. Dit heeft echter geen consequenties voor het vergelijken van de schermbehandelingen.



Figuur 3.19. Gesimuleerde (lijnen) en gemeten (punten) cumulatieve drooggewichten van bladeren en stengels bij de behandelingen 'standaard schermen' (scherm openen bij 5 W/m^2) en 'verlengd schermen' (scherm openen bij 50 W/m^2).

Uit de modelberekeningen blijkt tenslotte dat de schermbehandelingen geen effect hebben op het vruchtgewicht dat door de planten wordt gevormd (zowel rijpe als onrijpe vruchten).



Figuur 3.20. Gesimuleerde (lijnen) en gemeten (punten) cumulatieve drooggewichten van de vruchten bij de behandelingen 'standaard schermen' (scherm openen bij 5 W/m^2) en 'verlengd schermen' (scherm openen bij 50 W/m^2).

Uit de metingen in het experiment en de modelberekeningen kan geconcludeerd worden dat de schermbehandelingen geen effect hebben gehad op gewasgroei, ontwikkeling en vruchtproductie.

3.3 Bladfotosynthese

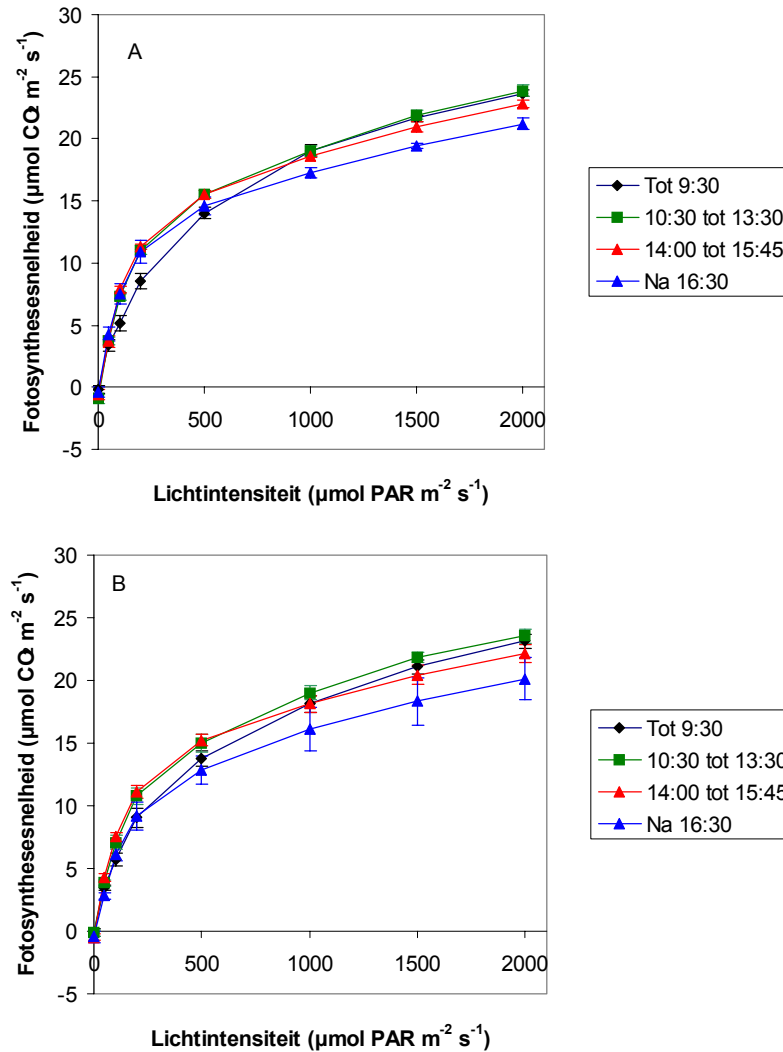
3.3.1 Lichtresponscurves

Op een aantal dagen gedurende het experiment is de fotosynthese bij een reeks lichtintensiteiten gemeten. Deze metingen vonden gedurende de dag plaats, afwisselend in een afdeling waar standaard werd geschermd (scherm openen bij 5 W/m^2) en een afdeling waar verlengd werd geschermd (scherm openen bij 50 W/m^2). Deze metingen vonden plaats in 3 series. De eerste serie werd gemeten in januari aan jonge, vegetatieve planten onder zeer constante klimaatcondities in de kas. De tweede serie werd gemeten begin maart aan planten waaraan jonge, nog onrijpe vruchten hingen en de derde serie werd gemeten in april aan vruchtdragende planten waarvan de tomaten oogstrijp waren.

In onderstaande figuren staan de lichtresponscurves weergegeven die zijn gemeten in de standaard geschermd afdeling (Figuur 3.21A) en in de verlengd geschermd afdeling (Figuur 3.21B). Om de figuren overzichtelijk te houden, zijn de dagen ingedeeld in 4 tijdsblokken (zie legenda in de figuur). De data van de lichtresponscurves die zijn gemeten in deze tijdsblokken zijn gemiddeld en staan zo weergegeven in de figuren.

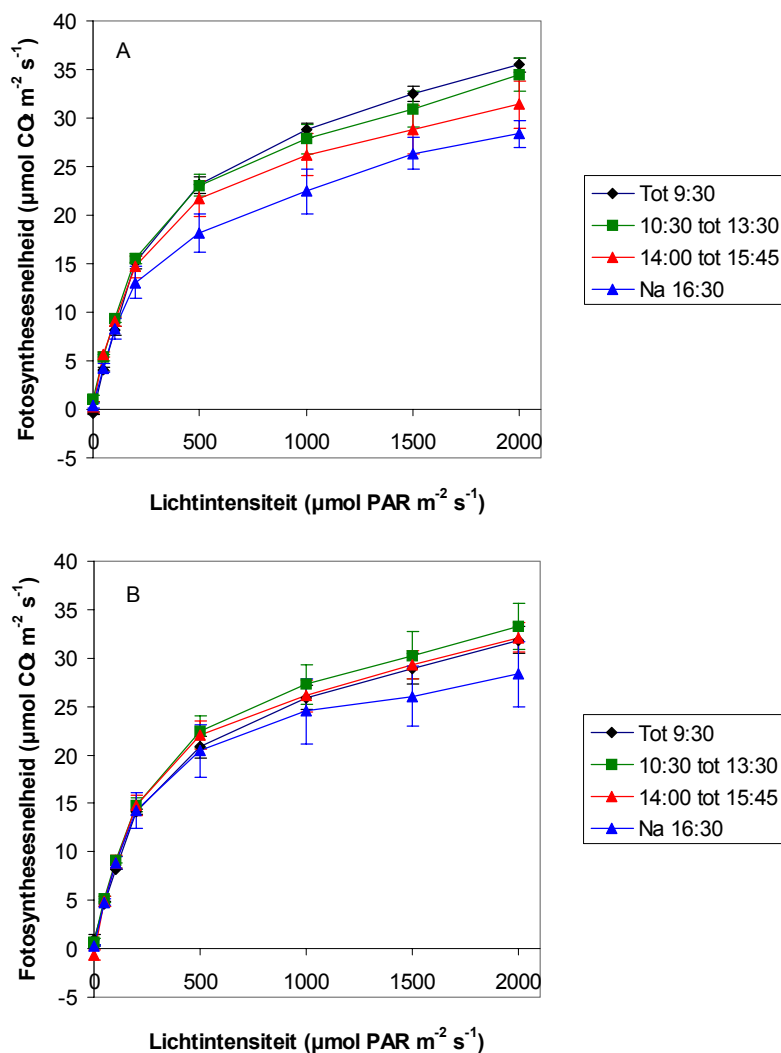
In de eerste meetperiode, in januari 2004, is er weinig verschil te zien tussen de lichtresponscurves gemeten op de verschillende momenten van de dag. Vanaf het moment dat de zon op komt (circa 8:30 uur) tot ongeveer 16:30 uur blijft de fotosynthese op een zelfde niveau. In het laatste gedeelte van de dag, na 16.30 uur, ligt de lichtresponscurve lager dan de lichtresponscurves eerder op de dag. Dat betekent dat de plant bij een zelfde lichtintensiteit minder fotosynthetiseert.

Er is geen verschil in niveau van de fotosynthese tussen planten die in de standaard geschermd afdelingen (scherm open bij 5 W/m^2) of in de verlengd geschermd afdelingen (scherm open bij 50 W/m^2) hebben gestaan. De maximale fotosynthese van de standaard geschermd planten ligt tussen de 21 en $24 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en van de verlengd geschermd planten tussen de 20 en $24 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.



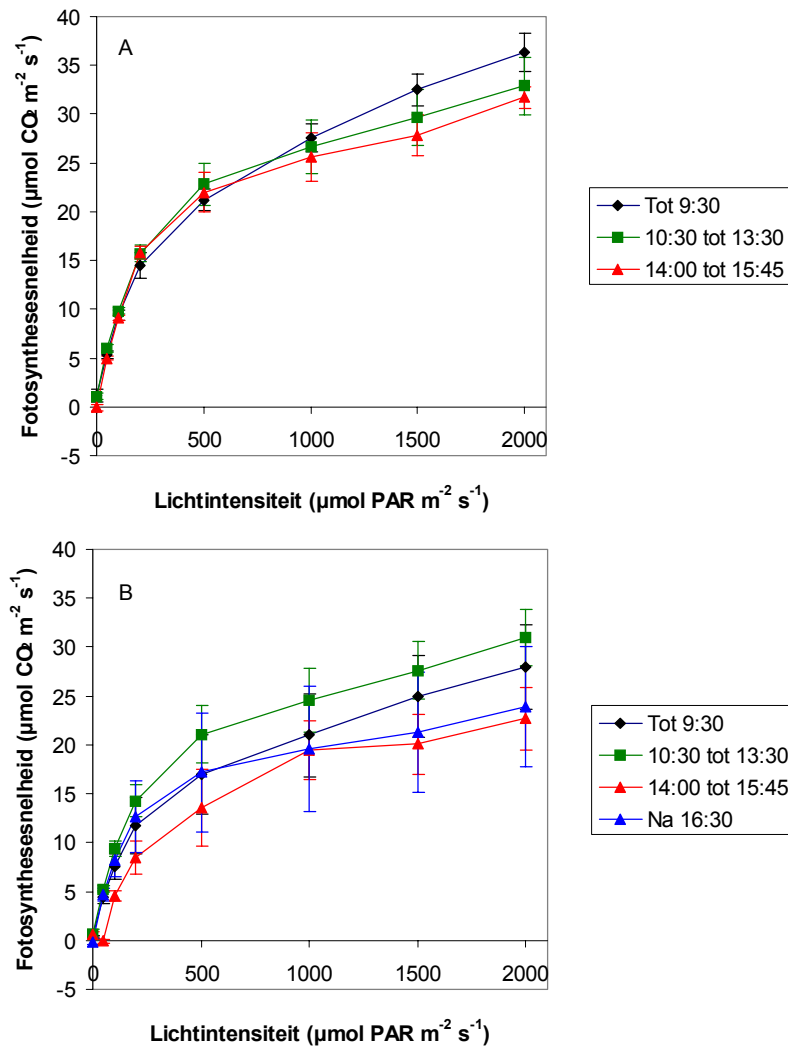
Figuur 3.21. Lichtresponscurven van de netto bladfotosynthesesnelheid in verschillende tijdvakken in de standaard geschermd afdeling (A; scherm openen bij 5 W/m²) en de verlengd geschermd afdeling (B; scherm openen bij 50 W/m²) in de eerste meetserie (januari 2004). Waarden zijn gemiddelden van 3 meetdagen \pm standaard afwijking van het gemiddelde. Zonop ongeveer 8:30 uur, zononder ongeveer 17:00 uur.

Ook in de tweede serie liggen de lichtresponscurves gedurende de dag bij zowel de standaard schermen behandeling (scherm openen bij 5 W/m²) als bij de verlengd schermen behandeling (scherm openen bij 50 W/m²) dicht bij elkaar (Figuur 3.22). Alleen na 16:30 uur blijkt de fotosynthese bij een zekere lichtintensiteit lager te liggen dan gedurende andere momenten van de dag.



Figuur 3.22. Lichtresponscurves van de netto bladfotosynthesesnelheid in verschillende tijdvakken in de standaard geschermd afdeling (A; scherm openen bij 5 W/m^2) en de verlengd geschermd afdeling (B; scherm openen bij 50 W/m^2) in de tweede meetserie (begin maart 2004). Waarden zijn gemiddelden van 3 meetdagen \pm standaard afwijking van het gemiddelde. Zonop ongeveer 7:00 uur, zononder ongeveer 18:30 uur.

In de derde meetserie, die plaatsvond aan vruchtdragende planten, is geen systematisch verloop van de fotosynthese waargenomen (Figuur 3.23). Lichtresponscurves gemeten in de verschillende tijdsblokken van de dag verschillen niet significant van elkaar. De grote spreiding in de resultaten van de 3^e meetserie wordt veroorzaakt door het feit dat niet consequent bladeren uit de bovenste bladlaag zijn gemeten. Er is gemeten aan bladeren van enigszins verschillende hoogtes in het gewas. Deze bladeren zijn in de voorgaande periode gegroeid bij verschillende (maximale) lichtintensiteiten. Dit heeft hun (maximale) fotosynthesecapaciteit beïnvloed. Dit levert verschillen op in fotosynthesesnelheid bij de vaste omstandigheden in de bladcuve, hetgeen de spreiding in de metingen veroorzaakt. Deze spreiding is niet gekoppeld aan de behandeling, maar zit in alle meetreeksen van de derde meetserie.

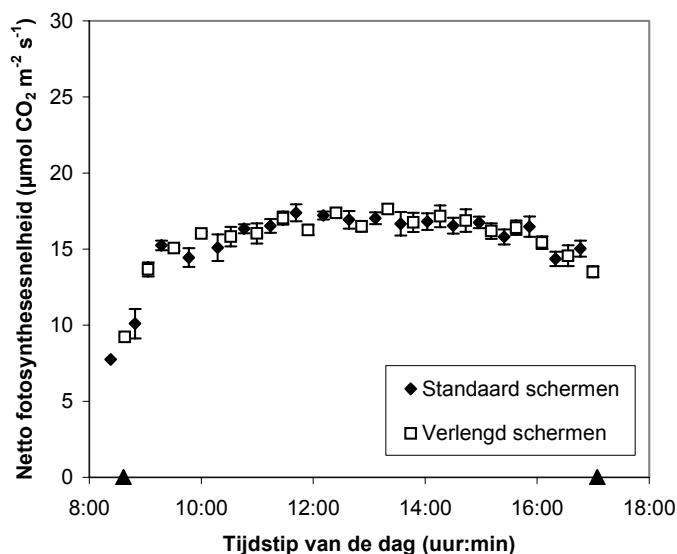


Figuur 3.23. Lichtresponscurves van de netto bladfotosynthesesnelheid in verschillende tijdvakken in de standaard geschermd afdeling (A; scherm openen bij 5 W/m²) en de verlengd geschermd afdeling (B; scherm openen bij 50 W/m²) in de derde meetserie (april 2004). Waarden zijn gemiddelden van 3 meetdagen \pm standaard afwijking van het gemiddelde. Zonop ongeveer 6:30 uur, zononder ongeveer 21:00 uur.

Uit de resultaten van de 3 meetseries blijkt dat de lichtresponscurves gedurende het grootste gedeelte van de lichtperiode op ongeveer hetzelfde niveau liggen. Alleen in de eerste meetserie is de fotosynthese aan het einde van de dag bij een zekere lichtintensiteit lager dan gedurende de rest van de dag. In de tweede en derde meetserie is dit verloop niet meer gevonden. Hieruit blijkt dat de plant gedurende het grootste gedeelte van de dag even efficiënt om kan gaan met het aangeboden licht. Dit geldt zowel voor planten in de standaard geschermd afdelingen (scherm openen bij 5 W/m²) als in de verlengd geschermd afdelingen (scherm openen bij 50 W/m²). De lichtresponscurves van beide behandelingen liggen op hetzelfde niveau, er is dus geen verschil in fotosynthese-eigenschappen van de bladeren tussen de behandelingen.

3.3.2 Metingen bij vaste lichtintensiteit

Naast lichtresponscurves is ook fotosynthese gedurende de dag bij één vaste lichtintensiteit (500 µmol m⁻² s⁻¹) in de bladkamer gemeten. De overige condities in de meetcuveet werden ook constant gehouden (700 ppm CO₂, 22 °C). Omdat deze metingen minder tijd kosten dan lichtresponscurves, is het hiermee mogelijk een nauwkeuriger beeld van het verloop van de fotosynthese gedurende de dag te verkrijgen.

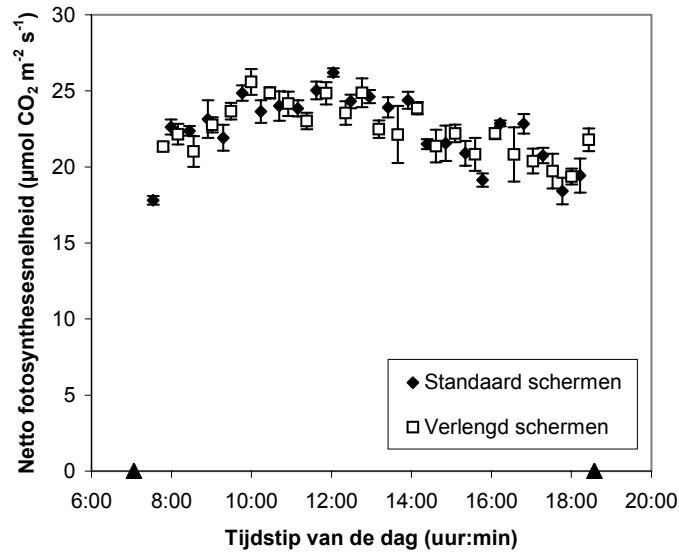


Figuur 3.24. Verloop van de netto fotosynthesesnelheid gemeten bij $500 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in de standaard geschermdede afdeling (scherm openen bij 5 W/m^2) en de verlengd geschermdede afdeling (scherm openen bij 50 W/m^2) gedurende de dag in de eerste meetserie (januari 2004). De driehoekjes op de x-as geven het tijdstip van zonop en zononder aan. Waarden zijn gemiddelden van 4 meetdagen \pm standaard afwijking van het gemiddelde.

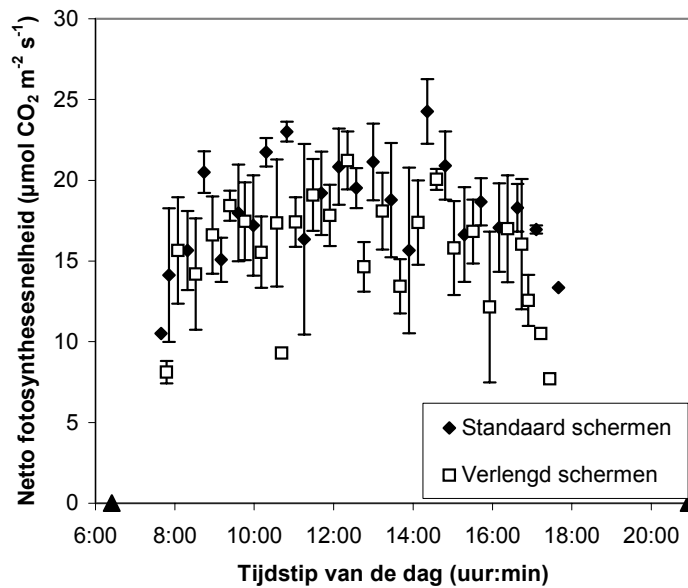
Uit Figuur 3.24 blijkt dat de fotosynthese in de ochtend na zonsopkomst in een half uur tot een uur toeneemt tot het niveau dat de plant gedurende de dag handhaaft. Dit niveau verloopt enigszins als een optimumcurve. 's Ochtends neemt de fotosynthese bij de vaste hoeveelheid licht toe tot het een optimum bereikt tussen 12:00 en 13:00 uur. Daarna neemt de fotosynthese weer enigszins af. De fotosynthese verloopt voor planten in de standaard geschermdede afdeling op dezelfde manier als voor planten in de verlengd geschermdede afdeling.

Ook in de tweede serie (maart) is er geen verschil in niveau van de fotosynthese tussen planten uit de standaard geschermdede afdelingen (scherm openen bij 5 W/m^2) en de verlengd geschermdede afdelingen (scherm openen bij 50 W/m^2 ; Figuur 3.25). Het verloop van de fotosynthese gedurende de dag verloopt vergelijkbaar met de fotosynthesemetingen in de eerste serie (januari). Aan het begin van de dag neemt de fotosynthese toe tot het hoogste niveau bereikt tussen circa 10:00 en 14:30 uur. Daarna neemt de fotosynthese geleidelijk af tot het moment van zononder. Uit de statistische analyse blijkt het fotosyntheseniveau na 14:30 uur lager te liggen dan tussen 9:00 en 14:00 uur.

In de derde meetserie is het verloop van de fotosynthese gedurende de dag vergelijkbaar met de metingen in de eerste en tweede serie (Figuur 3.26). In deze metingen is de spreiding echter bijzonder groot. Deze wordt veroorzaakt doordat niet consequent aan bladeren uit de bovenste bladlaag gemeten zijn. Er is gemeten aan bladeren van enigszins verschillende hoogtes in het gewas. Deze bladeren zijn in de voorgaande periode gegroeid bij verschillende (maximale) lichtintensiteiten. Dit heeft hun (maximale) fotosynthesecapaciteit beïnvloed. Dit levert verschillen op in fotosynthesesnelheid bij de vaste omstandigheden in de bladcuve, hetgeen de spreiding in de metingen veroorzaakt. Deze spreiding is niet gekoppeld aan de behandelingen standaard of verlengd schermen, maar zit in alle meetreeksen van deze meetserie.



Figuur 3.25. Verloop van de netto fotosynthesesnelheid gemeten bij $500 \mu\text{mol PAR m}^2 \text{s}^{-1}$ in de standaard geschermd afdeling (scherm openen bij 5 W/m^2) en de verlengd geschermd afdeling (scherm openen bij 50 W/m^2) gedurende de dag in de tweede meetserie (begin maart 2004). De driehoekjes op de x-as geven het tijdstip van zonop en zononder aan. Waarden zijn gemiddelden van 4 meetdagen \pm standaard afwijking van het gemiddelde.

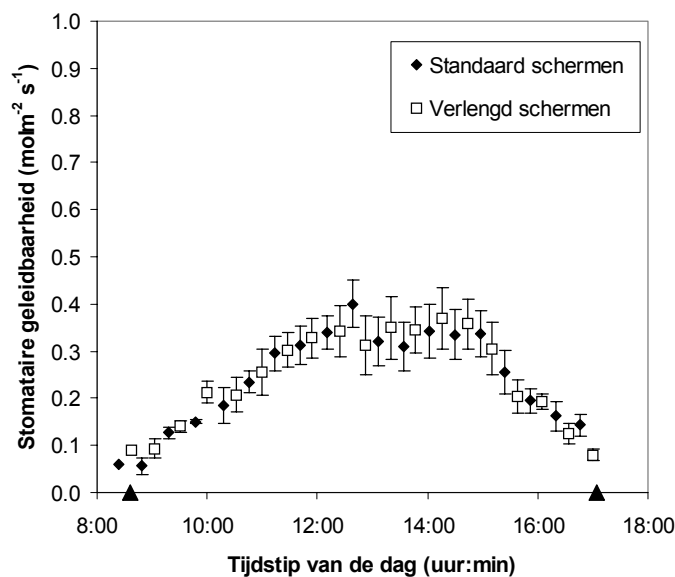


Figuur 3.26. Verloop van de netto fotosynthesesnelheid gemeten bij $500 \mu\text{mol PAR m}^2 \text{s}^{-1}$ in de standaard geschermd afdeling (scherm openen bij 5 W/m^2) en de verlengd geschermd afdeling (scherm openen bij 50 W/m^2) gedurende de dag in de derde meetserie (eind april 2004). De driehoekjes op de x-as geven het tijdstip van zonop en zononder aan. Waarden zijn gemiddelden van 4 meetdagen \pm standaard afwijking van het gemiddelde.

3.3.3 Huidmondjesopening en bladverdamping

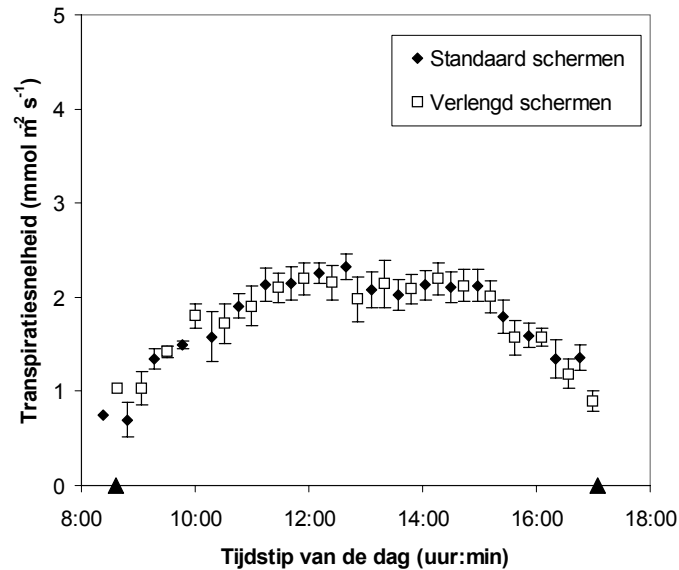
Gelijktijdig met de fotosynthese werd ook het verloop van de huidmondjesopening gedurende de dag gemeten. Deze metingen zijn uitgevoerd onder standaard omstandigheden in de bladcuve, te weten een temperatuur van 22 °C, lichtintensiteit van 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en CO_2 concentratie van 700 ppm. De resultaten staan in onderstaande figuren weergegeven.

Uit Figuur 3.27 is te zien dat de huidmondjes op het moment dat de zon opkomt bijna gesloten zijn (lage stomataire geleidbaarheid). Wanneer de straling toeneemt, openen de huidmondjes zich verder. De huidmondjes beginnen zich te sluiten wanneer de lichtintensiteit aan het einde van de dag weer afneemt. Op het moment van zonsondergang zijn de huidmondjes weer bijna gesloten. Het feit dat de huidmondjes 's ochtends vroeg en aan het einde van de middag minder ver open staan dan midden op de dag is een aanwijzing dat planten 's ochtends vroeg en aan het einde van de middag minder actief zouden kunnen zijn dan midden op de dag.



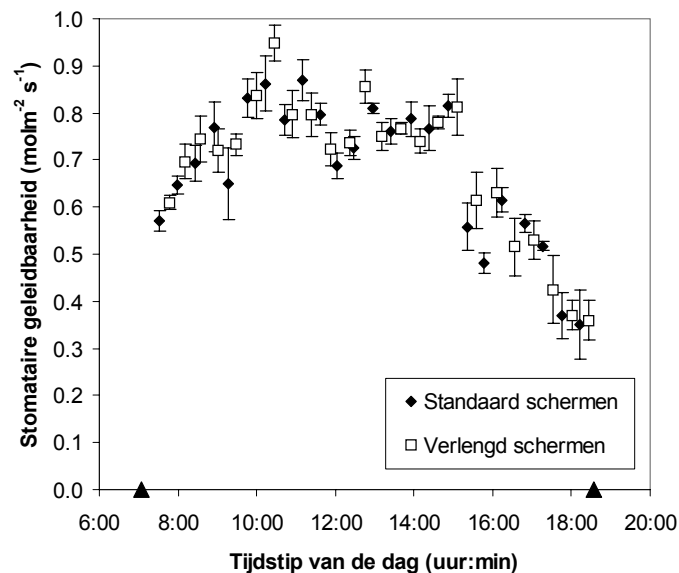
Figuur 3.27. Verloop van de stomataire geleidbaarheid gemeten bij 500 $\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in de standaard geschermd afdeling (scherm openen bij 5 W/m^2) en de verlengd geschermd afdeling (scherm openen bij 50 W/m^2) gedurende de dag in de eerste meetserie (januari 2004). De driehoekjes op de x-as geven het tijdstip van zonop en zononder aan. Waarden zijn gemiddelden van 4 meetdagen \pm standaard afwijking van het gemiddelde.

Het patroon van de bladverdamping (Figuur 3.28) volgt het patroon van de huidmondjesopening. De verdamping wordt bepaald door de huidmondjesopening. De huidmondjesopening wordt bepaald door het verloop van de straling gedurende de dag.



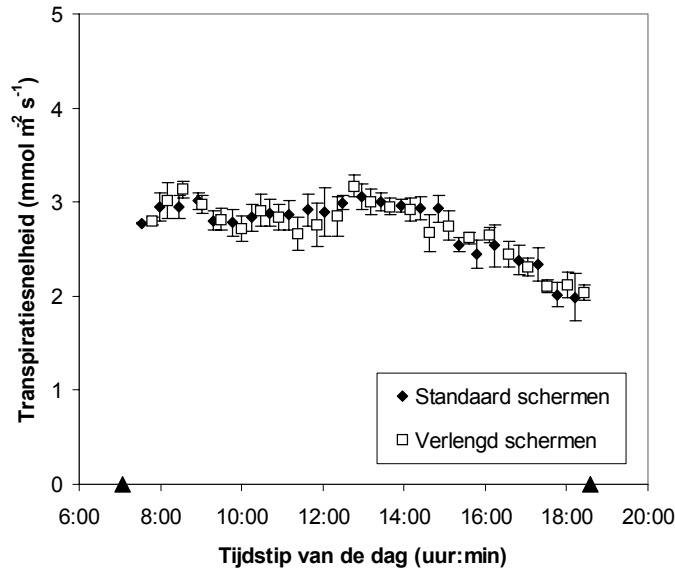
Figuur 3.28. Verloop van de transpiratiesnelheid gemeten bij $500 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in de standaard geschermd afdeling (scherm openen bij 5 W/m^2) en de verlengd geschermd afdeling (scherm openen bij 50 W/m^2) gedurende de dag in de eerste meetserie (januari 2004). De driehoekjes op de x-as geven het tijdstip van zonop en zononder aan. Waarden zijn gemiddelden van 4 meetdagen \pm standaard afwijking van het gemiddelde.

In de tweede meetserie is de lichtintensiteit in de kas veel hoger dan tijdens de eerste meetserie. De huidmondjes staan hierdoor verder open dan in de eerste meetserie. In onderstaande figuur is dit te zien, omdat de stomataire geleidbaarheid (maat voor de huidmondjesopening) hoger ligt dan in Figuur 3.27. Ook hier is het patroon van huidmondjesopening in de ochtend en sluiting aan het einde van de dag te zien.



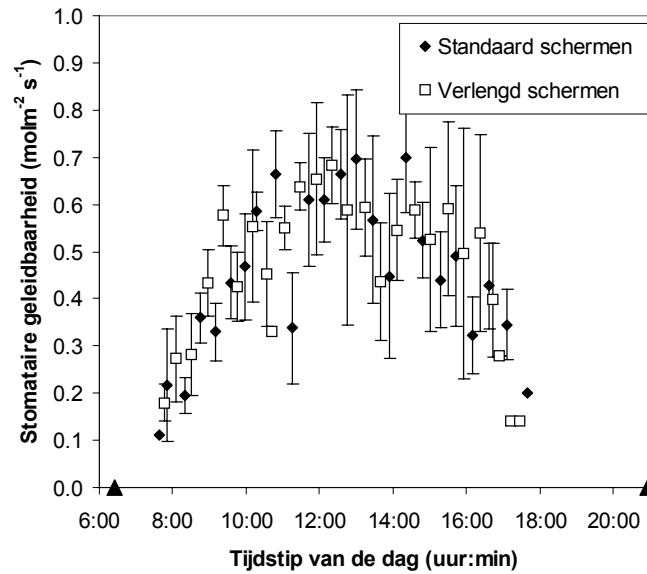
Figuur 3.29. Verloop van de stomataire geleidbaarheid gemeten bij $500 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in de standaard geschermd afdeling (scherm openen bij 5 W/m^2) en de verlengd geschermd afdeling (scherm openen bij 50 W/m^2) gedurende de dag in de tweede meetserie (begin maart 2004). De driehoekjes op de x-as geven het tijdstip van zonop en zononder aan. Waarden zijn gemiddelden van 4 meetdagen \pm standaard afwijking van het gemiddelde.

De transpiratiesnelheid (Figuur 3.30) is in de tweede meetserie (maart) hoger dan in de eerste serie (januari), hetgeen ook weer te maken heeft met het feit dat de huidmondjes verder open staan. Dit wordt weer veroorzaakt door hogere stralingsniveaus. De toename van de transpiratie aan het begin van de dag zoals verwacht zou worden is niet te zien. De afname aan het einde van de dag daarentegen wel.



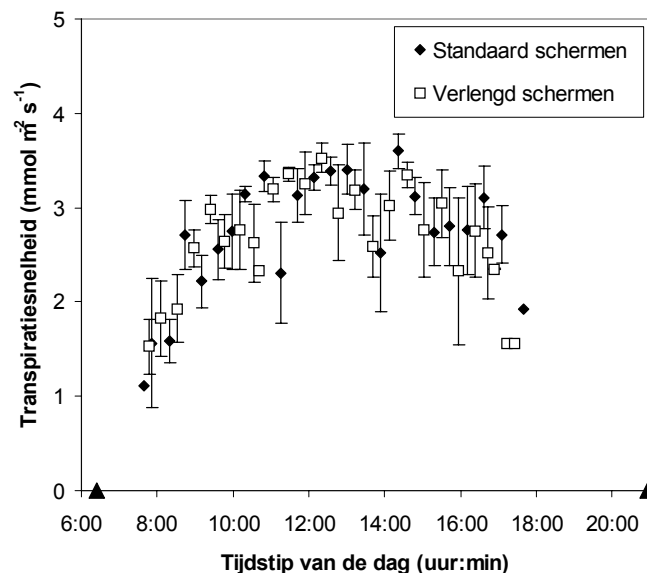
Figuur 3.30. Verloop van de transpiratiesnelheid gemeten bij $500 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in de standaard geschermd afdeling (scherm openen bij 5 W/m^2) en de verlengd geschermd afdeling (scherm openen bij 50 W/m^2) gedurende de dag in de tweede meetserie (begin maart 2004). De driehoekjes op de x-as geven het tijdstip van zonop en zononder aan. Waarden zijn gemiddelden van 4 meetdagen \pm standaard afwijking van het gemiddelde.

Ook in de derde meetserie (april) is een duidelijk verloop van de stand van de huidmondjes gedurende de dag te zien (Figuur 3.31). Aan het begin van de dag zijn de huidmondjes bijna gesloten (lage stomataire geleidbaarheid). Wanneer de lichtintensiteit gedurende de dag toeneemt, openen de huidmondjes zich verder. (Ruim) voordat het donker wordt beginnen de huidmondjes zich weer te sluiten. Dit patroon is duidelijk ondanks de grote spreiding in de resultaten van de metingen. Dit wordt veroorzaakt doordat in deze meetserie gemeten is aan bladeren van verschillende bladlagen, in plaats van aan bladeren op een vaste hoogte in het gewas. De bladeren waaraan in deze serie gemeten is, verschillen in de mate van beschaduwing door bovenliggende bladeren en daarmee in het lichtniveau dat ze voorafgaand aan de metingen hebben ontvangen. Dit veroorzaakt de grote spreiding in de metingen.



Figuur 3.31. Verloop van de stomataire geleidbaarheid gemeten bij $500 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in de standaard geschermd afdeling (scherm openen bij 5 W/m^2) en de verlengd geschermd afdeling (scherm openen bij 50 W/m^2) gedurende de dag in de derde meetserie (eind april 2004). De driehoekjes op de x-as geven het tijdstip van zonop en zononder aan. Waarden zijn gemiddelden van 4 meetdagen \pm standaard afwijking van het gemiddelde.

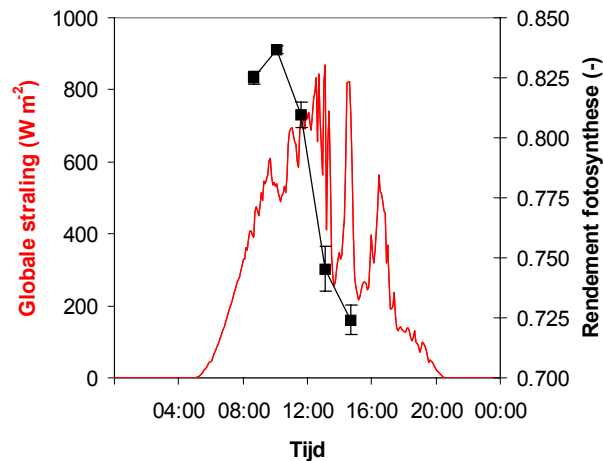
In deze derde meetserie volgt het patroon van de bladverdamping het patroon van de huidmondjesopening weer redelijk (Figuur 3.32). Beide patronen volgen het verloop van de straling gedurende de dag.



Figuur 3.32. Verloop van de transpiratiesnelheid gemeten bij $500 \mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in de standaard geschermd afdeling (scherm openen bij 5 W/m^2) en de verlengd geschermd afdeling (scherm openen bij 50 W/m^2) gedurende de dag in de derde meetserie (eind april 2004). De driehoekjes op de x-as geven het tijdstip van zonop en zononder aan. Waarden zijn gemiddelden van 4 meetdagen \pm standaard afwijking van het gemiddelde.

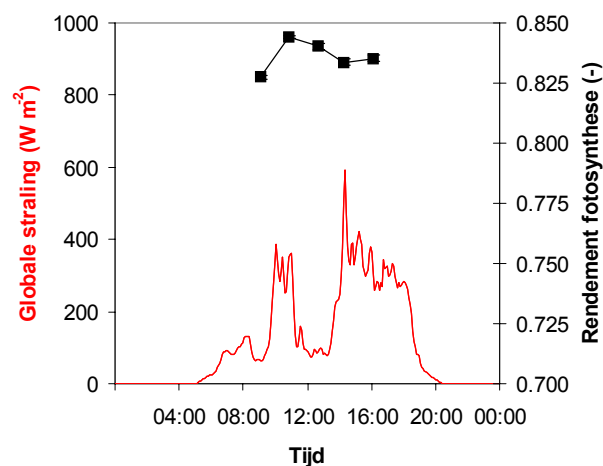
3.4 Foto-inhibitie

Op een aantal zomerse dagen werden in een tomatengewas in Naaldwijk chlorofylfluorescentie-metingen gedaan. Deze metingen werden gedaan op twee zeer zonnige dagen en één minder zonnige dag. Met deze metingen werd nagegaan of er beschadigingen aan het fotosysteem (foto-inhibitie) optrad als gevolg van te veel licht. Op beide zeer zonnige dagen bleek vanaf ongeveer 10 uur 's ochtends dat er inderdaad foto-inhibitie optrad. Het maximaal haalbare rendement van de lichtreacties van de fotosynthese, dat onder normale omstandigheden een waarde heeft van ongeveer 0,84, werd bij een overmaat aan licht niet meer gehaald (Figuur 3.33). De beschadiging van het fotosynthesesysteem bleek op te treden vanaf een globale straling van 600-700 W m² (buiten de kas)



Figuur 3.33. Verloop van de globale straling en het rendement van de lichtreacties van de fotosynthese gedurende een zonnige dag (3 augustus 2004).

Op minder zonnige dagen, wanneer de lichtintensiteit niet boven de circa 600 W m² uitkomt, blijkt dat het rendement van de lichtreacties van de fotosynthese gedurende de dag op het niveau van ongeveer 0,84 kan blijven (Figuur 3.34).

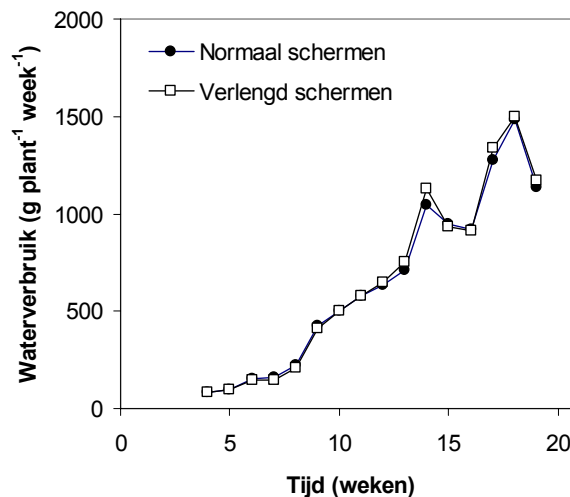


Figuur 3.34. Verloop van de globale straling en het rendement van de lichtreacties van de fotosynthese gedurende een bewolkte dag (5 augustus 2004)

Wat het effect van het optreden van foto-inhibitie op de fotosynthese en dus uiteindelijk op de productie is, is afhankelijk van de lichtintensiteit. Bij veel licht is het effect op de fotosynthese veel lager dan het effect op het maximale rendement van de lichtreacties, gemeten met chlorofyl fluorescentie. Dit wordt veroorzaakt door een overcapaciteit van de lichtreacties ten opzichte van de donkerreacties van de fotosynthese. Foto-inhibitie komt dus niet direct tot uiting in de maximale fotosynthesesnelheid bij lichtverzadiging. Pas wanneer zoveel reactiecentra van het fotosysteem II zijn beschadigd dat zelfs bij het op volle snelheid draaien van de onbeschadigde centra van fotosysteem II het elektrontransport beperkend is voor de fotosynthese, zal foto-inhibitie zichtbaar worden in een afname van de fotosynthese. Als de hoeveelheid licht echter de beperkende factor wordt, kan een verlaging van de F_v/F_m rechtstreeks vertaald worden naar een verlies van de fotosynthesesnelheid. In hoeverre dit op zonnige dagen daadwerkelijk het geval is, zou nader bepaald moeten worden met behulp van fotosynthesemetingen (CO_2 gasuitwisseling).

3.5 Waterverbruik

Op basis van de watergift en de gemeten drain werd per afdeling berekend wat het dagelijkse waterverbruik per plant was. Zowel het wekelijkse waterverbruik (Figuur 3.35) als het cumulatieve waterverbruik over de hele proefperiode (Tabel 3.1) bleek niet te verschillen tussen de standaard geschermdede behandeling en de verlengd geschermdede behandeling.



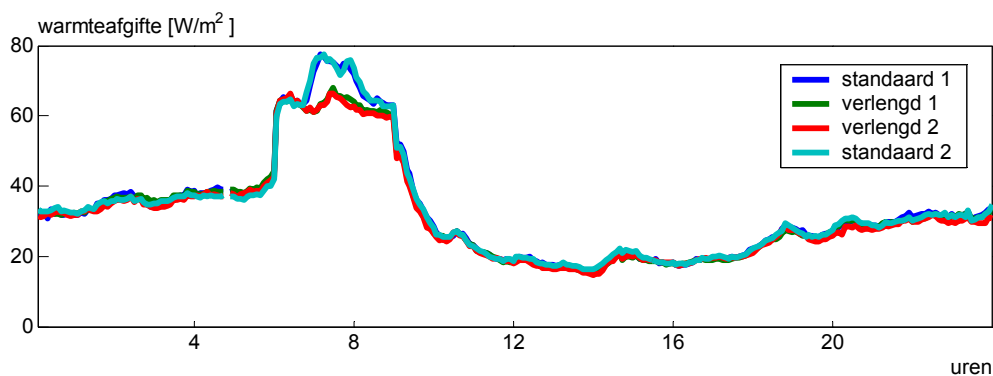
Figuur 3.35. Wekelijkse waterverbruik per plant in de standaard geschermdede afdeling (scherm openen bij 5 W/m^2) en in de verlengd geschermdede afdeling (scherm openen bij 50 W/m^2).

Tabel 3.1. Cumulatief waterverbruik per plant in de standaard geschermdede afdeling (scherm openen bij 5 W/m^2) en in de verlengd geschermdede afdeling (scherm openen bij 50 W/m^2).

Behandeling	Waterverbruik (g plant ⁻¹)
Standaard schermen	71480
Verlengd schermen	72696
LSD (P=0.95)	9481

3.6 Energiegebruik

Voor de bepaling van het energieverbruik zijn de gegevens gebruikt vanaf 15 maart omdat vanaf toen alle kas-klimaatinstellingen gelijk waren. Het energieverbruik in de proef is niet direct met behulp van warmtemeters of vergelijkbare apparatuur gemeten. Daarom is in dit project een methode gebruikt die aan de hand van het temperatuurverschil tussen de kaslucht en de verwarmingsbuizen de warmteafgifte van de buizen berekend (Verveer & Becque, 1995). Met de warmteafgifte kan dan op een eenvoudige manier het energieverbruik bepaald worden (Knies, 1999). In de afdelingen zijn 2 identieke (qua omvang) verwarmingsnetten aanwezig, één laagliggend net, uitgevoerd als een buisrail systeem en een tweede net hoog in de kas, direct hangend onder de tralie. Van beide netten zijn er 4 buizen met een doorsnede van 51 mm per kap van 3.2 meter. Voor 15 maart is er vrij veel met het bovenste net gestookt, daarna vrijwel alleen met het ondernet. Als het ondernet niet genoeg warmte kon leveren werd het bovennet bijgeschakeld. Dit is echter slechts sporadisch rondom het moment van het schermopenen voorgekomen. In Figuur 3.36 is de gemiddelde gerealiseerde warmteafgifte van het onder- en bovennet gedurende de dag in de periode 15 maart - 3 mei weergegeven.



Figuur 3.36. Gemiddelde gerealiseerde warmteafgifte van het onder- en bovennet gedurende de dag in de periode 15 maart - 3 mei.

Uit deze figuur komt dus duidelijk het verschil tussen de behandelingen naar voren. Het verschil in warmteafgifte geeft in de periode 15 maart tot 4 mei gemiddeld in de verlengd geschermd afdelingen (scherm openen bij 50 W/m²) een vermindering van circa 3.5% aan energieverbruik ten opzichte van de standaard geschermd afdelingen (scherm openen bij 5 W/m²). Dit kan uiteraard niet direct 1 op 1 worden omgezet in een jaarrond besparing (zie scenario berekeningen). In deze periode is circa 4.3 m³ m² verbruikt (berekend uit warmteafgifte van de buis bij 4 buizen van 51 mm buizen per kap van 3.2 meter).

3.7 Analyse verschillende openingsmethoden

Eén van de doelstellingen van dit project is te zien of de manier van het openen van het scherm invloed heeft op het energieverbruik en pieken in de warmtevraag. Om hier uitspraken over te kunnen doen, is gedurende een beperkt aantal dagen afgeweken van de standaard openingsstrategie, waarbij 5 maal een stap van 1% wordt gemaakt, met daartussen een wachttijd van 5 minuten. Door deze stappen en wachttijden krijgt het klimaat de gelegenheid zich aan te passen zodat er geen temperatuurval kan ontstaan. Omdat de schermen gestuurd worden op looptijd en er geen terugkoppeling is van de gerealiseerde schermstand, hoeft de eerste verstelling vanuit een gesloten positie of een verstelling waarbij de richting omkeert (van dicht naar open of omgekeerd) niet in de geplande opening te resulteren als gevolg van rek in de trekdraden en dergelijke. De schermstand werd wel gemeten en geregistreerd (Figuur 2.1), echter dit werd gedaan met een extern systeem dat niet met de klimaatregelaar is verbonden, zodat er geen terugkoppeling in de klimaatcomputer plaatsvond. In de in dit project gebruikte afdelingen blijkt een eerste stap van 1 procent een verstelling van maar circa 0.6% tot gevolg te hebben.

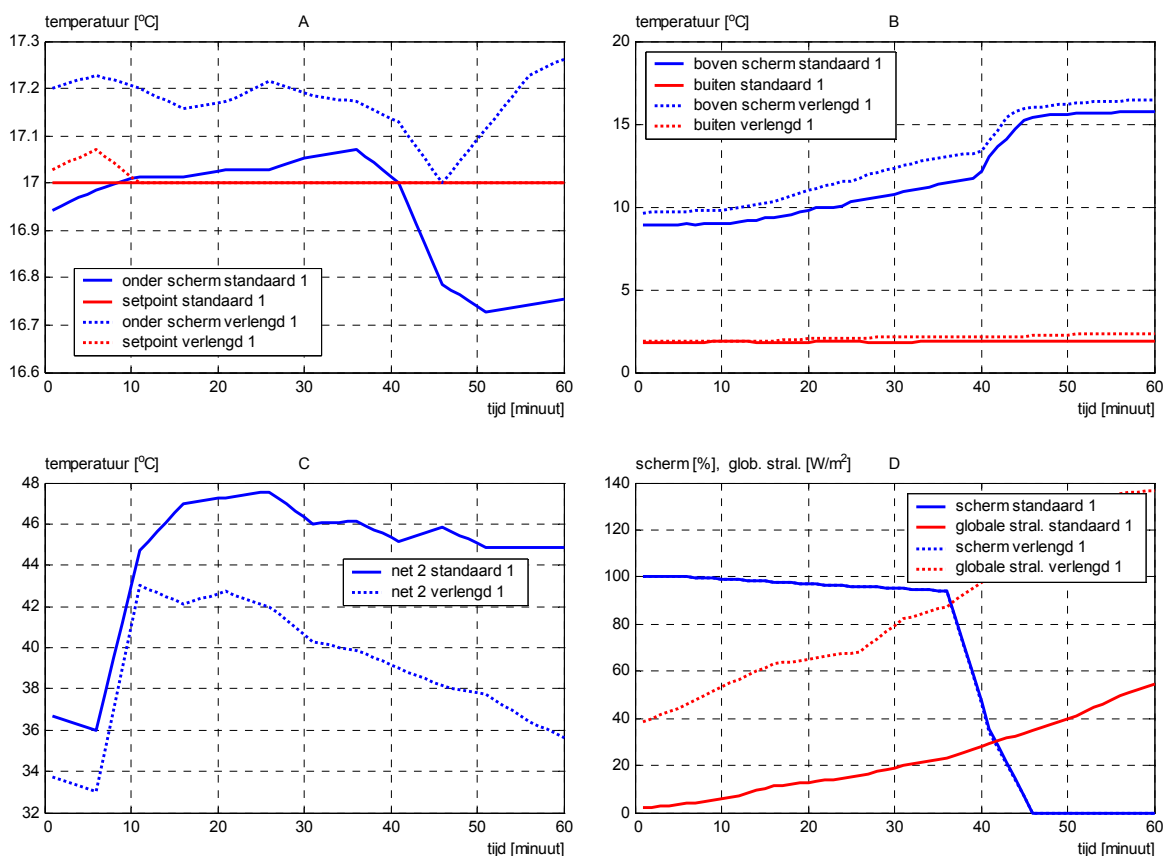
Om na te gaan wat de gevolgen zijn van de manier van het openen van het scherm (snelheid en wachttijden) op het kasklimaat is de manier van openen van het scherm gevarieerd (Tabel 3.2). Om de verschillende cases goed te kunnen vergelijken is de voorregeling op de buistemperatuur hier tijdelijk overbrugd. Aan een eventuele warmtevraag uit een afdeling is snel te voldoen doordat de afdelingen op een ringleiding zijn aangesloten die op temperatuur ligt.

Tabel 3.2. *Overzicht van setpoints van de schermregeling.*

Case	Aantal stappen openen [-]	Wachttijd tussen stappen [minuut]	Schermopening per stap [%]	Opmerking
1	5	5	1	standaard regeling in 1x openlopen
2	0	5	1	
3	5	2	0.5	
4	5	2	1	
5	5	2	1.5	
6	10	1	0.5	
7	10	1	1	
8	10	1	1.5	
9	5	5	0.5	
10	5	5	1	
11	5	5	1.5	

De in Tabel 3.2 aangegeven cases zijn enkele malen herhaald in de tijd en hebben uiteindelijk 24 bruikbare dagen opgeleverd. Op deze dagen waren het scherm en de ramen in beide afdelingen volledig gesloten op het moment dat het scherm geopend werd op basis van het ingestelde criterium van 5 en 50 W m² straling voor respectievelijk de standaard en de verlengd schermen afdeling. Dit relatief kleine aantal dagen wordt veroorzaakt door neveneffecten in de regeling die ervoor kunnen zorgen dat op het moment dat het scherm volgens de instellingen open zou moeten lopen, er bijvoorbeeld een vochtkier is ingesteld om vocht af te voeren of dat de ramen geopend zijn om warmte en/of vocht af te voeren. Doordat er voor gekozen was een minimumbuistemperatuur in te stellen om de teeltwijze van de praktijk zoveel mogelijk te benaderen, kon het voorkomen dat het onder het scherm te warm werd, waardoor er door de klimaatregelaar een temperatuurkier in het scherm werd gezet. Deze dagen zijn uit de analyse verwijderd omdat er op deze momenten geen stabiele situatie aanwezig is.

Omdat de gevolgen van het openen iedere keer weer net iets anders uitpakken (omdat de uitgangssituatie op het moment van openen steeds verschillend is) is van een aantal van de in Tabel 3.2 beschreven cases, dat meer dan 1 keer is voorgekomen, het gemiddelde verloop van de verwarming, de schermen, de kasluchttemperatuur beneden en boven het scherm, de globale straling, de buitentemperatuur en het setpoint verwarmen in een vierluik weergegeven (Figuur 3.37). Als eerste wordt de standaard (voor deze proef) door de klimaatcomputer uitgevoerde regeling besproken. In de standaardregeling wordt het scherm geopend zodra de globale straling een niveau van 5, dan wel 50 W m² heeft bereikt voor respectievelijk de standaard en de verlengd schermen strategie. Om de verschillende openingsstrategieën met elkaar te kunnen vergelijken is het moment waarop het scherm van geheel gesloten naar de eerste kier is gegaan zodanig verschoven dat deze punten in de figuren op het zelfde punt op de x-as (5 minuut) liggen. Omdat het log-interval van de klimaatcomputer 5 minuten is (en de gemiddelde waarde van de laatste 5 minuten wordt opgeslagen), maar de regelaar wel iedere minuut een regelactie kan uitvoeren, is in Figuur 3.37D de globale straling niet exact 5 en 50 W m² op de 5e minuut. De in deze figuur gepresenteerde data geven het gemiddelde verloop weer van 8 achtereenvolgende dagen (periode 2 tot en met 9 maart 2004) dat het scherm geopend is.



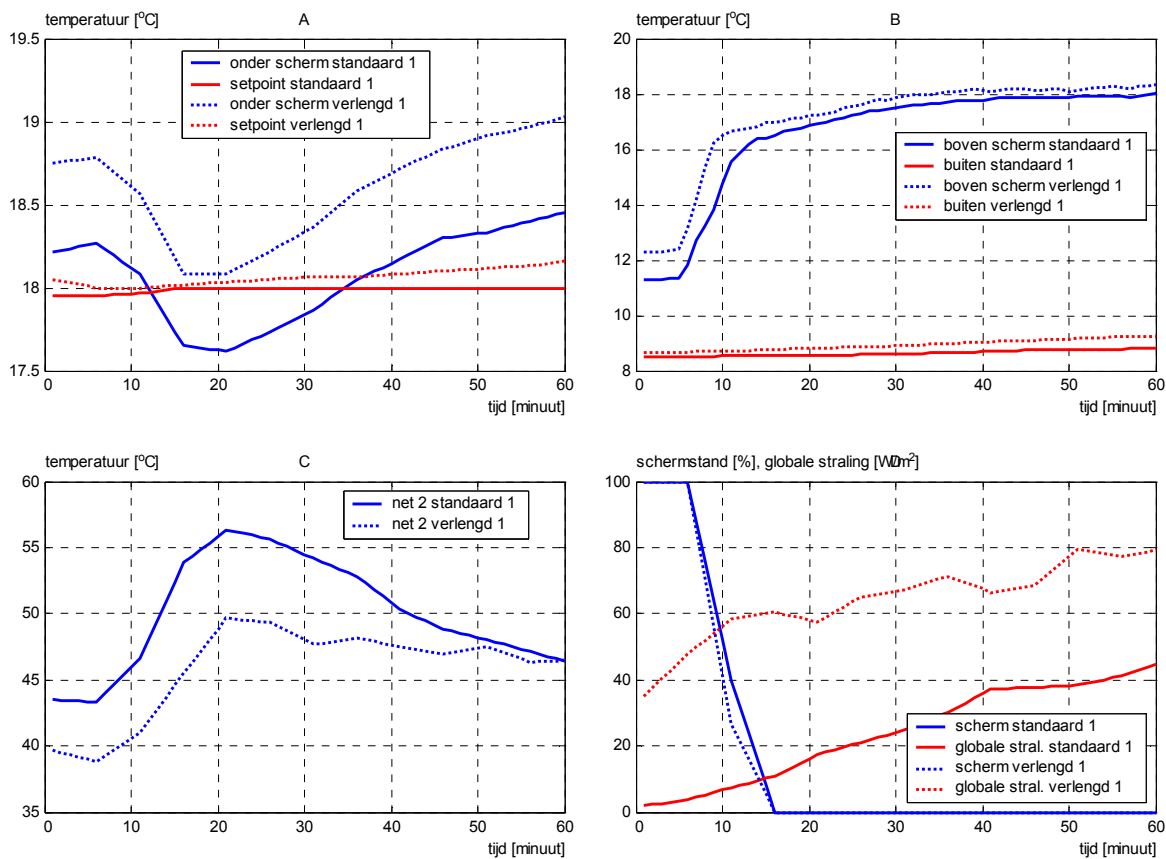
Figuur 3.37. Verloop van de kasluchttemperatuur (A), de luchttemperatuur boven het scherm en buiten (B), de temperatuur van het primaire verwarmingsnet (C) en de schermstand en globale straling (D) als gemiddelde van 8 dagen (2-9 maart) gepresenteerd voor de standaard (scherm openen bij $5 W/m^2$) en verlengd schermen strategie (scherm openen bij $50 W/m^2$) (stappen van 1% met 5 minuten wachttijd tot en met 95% schermstand waarna het scherm in één keer geheel geopend wordt).

In de standaard regeling wordt het scherm iedere 5e minuut 1% verder geopend tot een schermstand van 95%, waarna het scherm in 1 keer geheel wordt opengetrokken. De schermstanden zijn ook in Figuur 3.37D te zien. Door het verschuiven op de x-as liggen de lijnen van de 2 openingsstrategieën (5 en $50 W/m^2$) exact op elkaar. Op het moment van openen ligt de kasluchttemperatuur onder het scherm, waarop de regeling reageert, rond of net iets boven het setpoint verwarmen (Figuur 3.37A). Zolang het scherm nog vrijwel dicht is (tot de schermstand van 95%), daalt de kasluchttemperatuur vrijwel niet of stijgt zelfs nog iets tot minuut 35 á 40. Wanneer het scherm in 1 keer verder wordt opengetrokken, daalt de kasluchttemperatuur wel met circa 0.4 °C en 0.2 °C voor respectievelijk de standaard (scherm openen bij $5 W/m^2$) en verlengd schermen strategie (scherm openen bij $50 W/m^2$). Dat dit relatief kleine temperaturredalingen zijn, is onder andere het gevolg van de voorlooptreging op de verwarmingstemperatuur zoals uit Figuur 3.37C blijkt. Immers op het moment dat het scherm van gesloten op de eerste keer van 1% wordt gezet, wordt de buistemperatuur direct met circa 8 °C verhoogd, ondanks het feit dat daar voor het behalen van setpointtemperatuur (Figuur 3.37A) geen reden voor is. Door deze voorloop wordt de te verwachten temperaturredaling bij het openen van het scherm al bij voorbaat enigszins opgevangen. In praktijkkassen zal het verwarmingssysteem hiervoor meer tijd nodig hebben omdat daar meestal geen ringleiding ter beschikking is, de eventuele piek in de gasafname nog daargelaten. Achteraf beschouwd had het scherm iets sneller mogen openlopen tot 95%. Er was immers nog sprake van een gelijkblijvende dan wel stijgende kasluchttemperatuur. Om het scherm na 95% in één keer geheel open te sturen was echter te veel van het goede omdat de kasluchttemperatuur dan (kortstondig) onderuit gaat. Dat de temperatuurval bij de verlengd schermen strategie kleiner is, zal zeer waarschijnlijk het gevolg zijn van de fors toegenomen globale straling.

Deze is bij het openlopen van het scherm (vanaf 95 naar 0%) bij de standaard regeling circa 25 en bij de verlengd schermen regeling circa 90 W m⁻² (Figuur 3.37D) ondanks dat de buitentemperatuur vrijwel niet is toegenomen (Figuur 3.37B). Dit komt ook tot uiting in de buistemperatuur, die over de geprojecteerde periode in de standaard strategie (scherm openen bij 5 W/m²) ongeveer 7 °C hoger ligt dan bij de verlengd schermen strategie (scherm openen bij 50 W/m²), waarbij de ruimtetemperatuur van de standaard regeling ook nog eens onder het setpoint verwarmen is gekomen. De temperatuur boven het scherm (Figuur 3.37B) gaat vrijwel direct oplopen zodra er een kier in het scherm wordt getrokken. Het scherm bij de verlengd schermen strategie (scherm openen bij 50 W/m²) is circa 50 minuten (gemiddeld over 8 cases) later geopend dan bij de standaard strategie (scherm openen bij 5 W/m²).

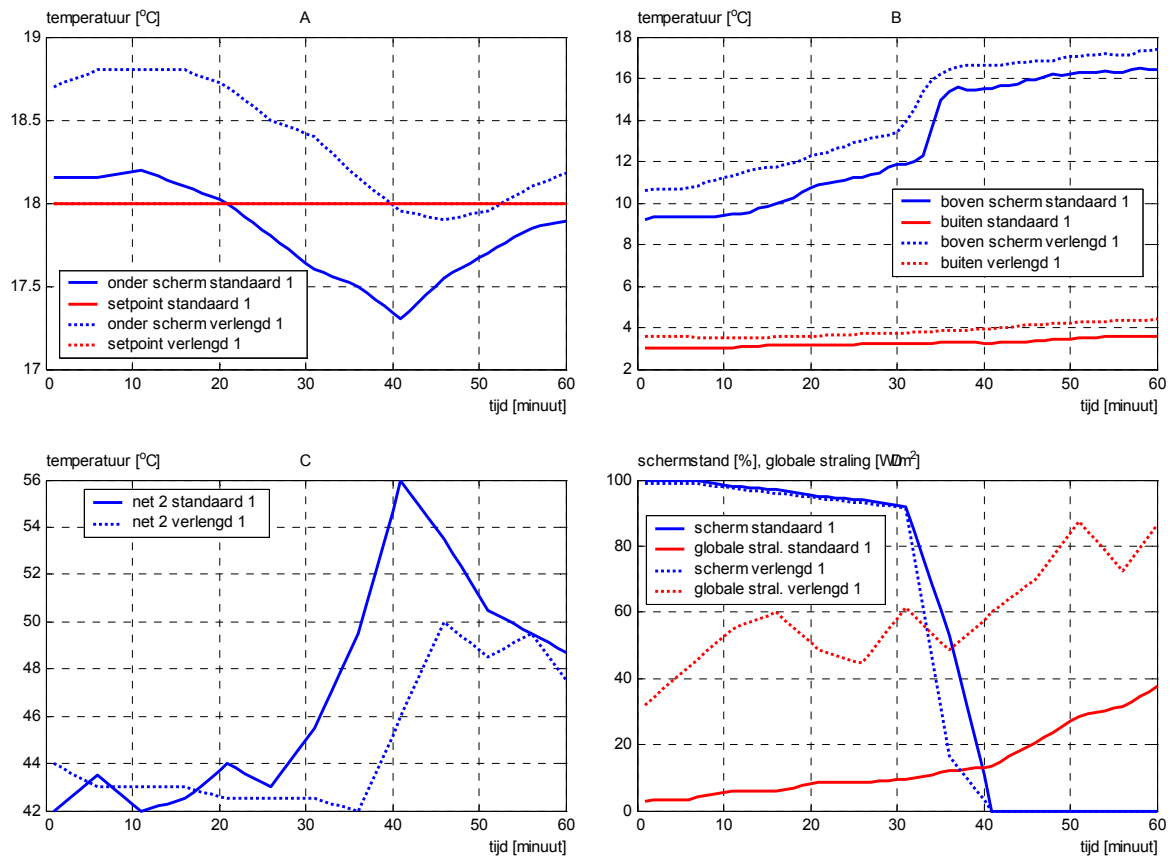
De voorlooptregeling op de buistemperatuur is vervolgens uitgeschakeld omdat deze in de analyse verstorend werkt. In een experimentele kas (met ringleidingen e.d.) is dit goed te doen, immers de afdelingen zijn klein en de omlooptijd van het verwarmingssysteem is kort. Echter, in de praktijk wordt dit iets anders aangepakt. Hier zal er een kleinere sprong (om een verbruikspiek te voorkomen) gegeven worden en het scherm blijft nog minimaal de omlooptijd van het verwarmingscircuit dicht. Hierdoor kan de kasluchttemperatuur iets toenemen en het verwarmingssysteem op temperatuur komen. Vervolgens wordt pas gestart met het openen van het scherm.

Als tegenhanger van het langzaam openen van het scherm, kan het scherm ook in 1 keer geheel geopend worden. In Figuur 3.38 is het gemiddelde verloop over 6 dagen weergegeven waarbij het scherm in 1 keer geheel geopend is, dus zonder enige kier. Door de looptijd van het scherm (circa 6 minuten van geheel open naar geheel dicht) wordt de schermstand niet als een echte sprong weergegeven in Figuur 3.38C. Wel is te zien dat in vergelijking tot Figuur 4.37 de temperatuurval veel groter is, tot circa 0.8 °C, waarbij ook nog opgemerkt dient te worden dat de buitentemperatuur in deze periode ongeveer 7 °C hoger lag dan bij Figuur 3.37. Het verschil in temperatuur boven en onder het scherm was hierbij ongeveer 1.5 °C kleiner. Dat de setpoint verwarmen lijn van de verlengd schermen afdeling niet gelijk is aan die van de standaard schermen afdeling komt doordat op 2 van de 6 dagen die hier als gemiddelde worden gepresenteerd er al zoveel licht was dat er een lichtverhoging op het setpoint verwarmen werd doorgevoerd.



Figuur 3.38. Verloop van de kasluchttemperatuur (A), de luchttemperatuur boven het scherm en buiten (B), de temperatuur van het primaire verwarmingsnet (C) en de schermstand en globale straling (D) als gemiddelde van 6 dagen (13 - 18 maart) gepresenteerd voor de standaard en verlengd schermen strategie waarbij het scherm in één keer geheel geopend wordt.

Als derde wordt een vrijwel vergelijkbare case weergegeven als in Figuur 3.37, met dit verschil dat in plaats van 1% schermverstelling per 5 minuten, nu 1.5% schermverstelling wordt doorgevoerd (Figuur 3.39). Samen met het pas verhogen van de buistemperatuur als deze onder het setpoint verwarmen zakt, geeft dit een temperatuurval van ongeveer 0.8 °C. Dat de gerealiseerde kasluchttemperatuur boven het setpoint verwarmen ligt, is het gevolg van de inzet van een minimumbuistemperatuur van 43 °C.



Figuur 3.39. Verloop van de kasluchttemperatuur (A), de luchttemperatuur boven het scherm en buiten (B), de temperatuur van het primaire verwarmingsnet (C) en de schermstand en globale straling (D) als gemiddelde van 6 en 9 april 2004 gepresenteerd voor de standaard (scherm openen bij $5 W/m^2$) en verlengd schermen strategie (scherm openen bij $50 W/m^2$) waarbij het scherm in stappen van 1.5% met 5 minuten wachttijd tot en met 92.5% schermstand geopend wordt, waarna het scherm in één keer geheel open loopt.

Uit de analyse van de andere openingsstrategieën blijkt dat er in alle gevallen een temperatuurval ontstaat. Door het gebruik van de minimumbuistemperatuur was op de meeste dagen de kasluchttemperatuur boven het setpoint verwarmen, zodat de buistemperatuur pas verhoogd werd als de kasluchttemperatuur onder het setpoint verwarmen was gekomen. Op het moment dat de ruimtetemperatuur onder het setpoint verwarmen komt, was er al een daling van de ruimtetemperatuur ontstaan, zodat de temperatuurval groter werd dan strikt noodzakelijk. Daarnaast moet de kracht van de zon in het gevorderde voorjaar (na half maart) niet onderschat worden. Op vele dagen is in de verlengd schermen strategie de globale straling tijdens het openen van het scherm al zover toegenomen dat de verwarming vrijwel niet meer hoeft bij te komen om de temperatuurval op te vangen.

4. Modelaanpassingen

4.1 Gewasgroeimodel

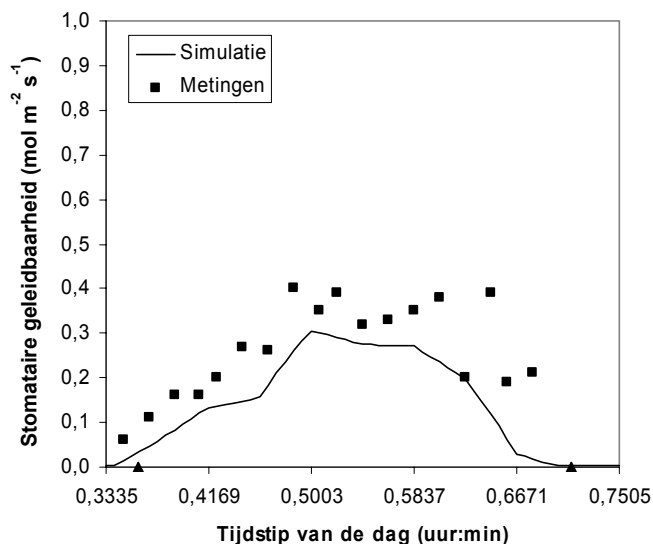
De gewasgroeimodellen ontwikkeld door Plant Research International kunnen aan de hand van klimaatgegevens en teeltgegevens groei en water- en nutriëntenbehoefte berekenen (Gijzen, 1994; Heuvelink, 1996; Marcelis *et al.*, 2000). De klimaatgegevens die als input voor het model dienen zijn de globale straling buiten de kas, de temperatuur en CO₂-concentratie in de kas en het open of gesloten zijn van het energiescherm. Deze gegevens zijn afkomstig uit metingen (nasimuleren experiment) of uit simulatie met KASPRO (scenariostudie). Het gewasgroei-model bevat afzonderlijke modules voor het simuleren van verschillende componenten van het kas-gewassysteem: transmissie van straling door het kasdek, lichtonderschepping door het gewas, blad- en gewasfotosynthese, drogestofproductie, drogestofverdeling over organen (wortels, stengels, bladeren en trossen met vruchten), vruchtoogst en bladpluk. Voor het model werden de parameterinstellingen gebruikt die horen bij het gewas tomaat. Het versgewicht van geoogste vruchten werd berekend door het drooggewicht te delen door een verondersteld drogestofgehalte van 5.5%. Het plukken van bladeren gaat standaard per sectie van 3 bladeren, en gebeurt ongeveer één week voordat bijbehorende tros rijp is. Bij het nasimuleren van de proef werd het bladplukken aan het model opgelegd volgens de geregistreerde momenten van bladpluk.

Transmissie van straling door het kasdek, lichtonderschepping door het gewas en fotosynthese werden berekend met een tijdstap van een uur. De tijdstap voor de onderdelen drogestofproductie, drogestofverdeling en voor vruchtoogst en bladpluk was 1 dag.

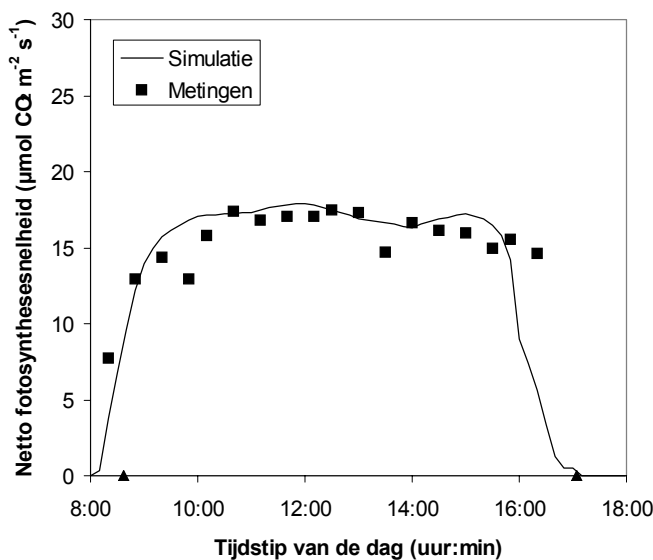
In het gewasgroei-model wordt er van uitgegaan dat de fotosynthese bepaald wordt door de straling, CO₂ concentratie en temperatuur, maar niet door het moment van de dag. Gedurende het experiment zijn metingen gedaan aan bladfotosynthese en stomataire geleidbaarheid (paragraaf 3.3). Deze zijn gebruikt om te bepalen of het gewasgroei-model aangepast zou moeten worden voor het verloop van de fotosynthese gedurende de dag.

Eerst is beoordeeld of het gemeten huidmondjesgeleidbaarheidspatroon over de dag nagesimuleerd kon worden. In het model wordt de huidmondjesgeleidbaarheid vooral bepaald door lichtintensiteit en daarnaast ook door temperatuur, CO₂ en luchtvochtigheid. Als lichtintensiteit is genomen de hoeveelheid licht die het model simuleert juist boven het gewas, omdat de metingen boven in het gewas hebben plaatsgevonden aan onbeschaduwde volgroeide bladeren. Figuur 4.1 laat zien dat het model het dagelijks verloop in de stomataire geleidbaarheid voor bladeren boven in het gewas, gemeten op 23 januari, redelijk goed beschrijft. Vervolgens is beoordeeld of het gemeten dagpatroon van de bladfotosynthese na te simuleren is op basis van de huidmondjesgeleidbaarheid. Daartoe is stomataire geleidbaarheid gesimuleerd (Figuur 4.1) op basis van actueel licht, CO₂ en temperatuur, terwijl de bladfotosynthese werd berekend bij de vaste omstandigheden van de bladkamer (500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 700 ppm CO₂ en 22 °C). De resultaten geven aan dat het gesimuleerde niveau van de fotosynthese goed overeen komt met de metingen (Figuur 4.2). Ook het patroon in de bladfotosynthese, een snelle toename tussen 8.30 (zonop) en 9.30 uur en vervolgens constant, komt overeen met de metingen op 23 januari.

Uit deze resultaten is te concluderen dat de metingen van stomataire geleidbaarheid en bladfotosynthese geen aanleiding geven om het model aan te passen ten behoeve van de scenariostudies in dit project.



Figuur 4.1. Verloop van de gemeten en gesimuleerde stomataire geleidbaarheid op 23 januari.



Figuur 4.2. Verloop van de gemeten en gesimuleerde bladfotosynthesesnelheid op 23 januari.

4.2 KASPRO

In het kader van dit project zijn een aantal mogelijkheden aan het kasklimaatmodel KASPRO toegevoegd. In de standaardregeling wordt het scherm op eenzelfde wijze geopend, onafhankelijk van de momentane situatie. Door geen rekening te houden met de omstandigheden, zal op koude dagen het scherm te snel en op warme dagen te langzaam opengaan. Om deze situatie te verbeteren, is het moment waarop het scherm ineens (na een aantal stappen) geheel geopend wordt, variabel gemaakt. Hiervoor is een zogenaamde 'fractie ineens open' geïntroduceerd. Deze 'fractie ineens open' wordt uit de 'opensnelheid tabel' gehaald. Deze wordt eenmalig bepaald op het moment dat het signaal 'schermmoetopen' gegeven wordt. In onderstaande tabel is het temperatuurverschil tussen onder en boven het scherm gegeven en de bijbehorende schermfractie waarna het scherm ineens geopend mag worden. Het scherm wordt in stappen van 0.5% met een wachttijd per stap van 2 minuten tot en met de 'fractie ineens open' geopend waarna het scherm in één keer verder open loopt totdat het geheel geopend is.

ΔT – scherm (onder – boven) [°C]	Scherminstand waarbij ineens open [-]
4.2	1
6.3	0.95
8.6	0.9

In de praktijk wordt bij het openen van het scherm rekening gehouden met een eventuele daling van de kasluchttemperatuur door de buistemperatuur te verhogen en het scherm nog eventjes (ongeveer de omlooptijd van het verwarmingscircuit) dicht te houden. In het model wordt dit gesimuleerd door op het moment dat het scherm geopend gaat worden, de vermogensvraag van de verwarmingsbuizen afhankelijk van het temperatuurverschil binnen – buiten eenmalig te verhogen. Vervolgens wordt er een wachttijd in acht genomen die weer afhankelijk is van de buitentemperatuur volgens onderstaande tabel.

Buitemperatuur [°C]	Wachttijd [min]
-10	20
15	2
30	0

Met KASPRO zijn ook scenarioberekeningen uitgevoerd (zie hoofdstukken 5 en 6) waarbij het scherm pas geopend wordt indien er een ingestelde waarde van het temperatuurverschil tussen de compartimenten boven en onder het scherm (ΔT -scherm) bereikt is. Uit verkenningen met deze regeling, bleek dat er regelmatig zodanige vochtproblemen ontstonden dat bij toepassing van deze setpoints een klimaat gerealiseerd zou worden waarbij een goede teelt niet realistisch zou zijn. De oorzaak hiervan is dat het regelmatig voorkomt dat bij lage buitentemperaturen (en dus een groot warmteverlies van het bovencompartiment) het bovencompartiment in temperatuur achterblijft, terwijl er door voldoende straling in het ondercompartiment de temperatuur toeneemt en door het licht de verdamping op gang komt. Het scherm moet dan op een kierstand gaan staan om vocht af te voeren. Als het scherm op een maximale kierstand van 3% staat is de vochtafvoer nog te beperkt, waarop de luchtramen opengaan om vocht af te voeren. Hierdoor wordt het bovencompartiment wel ontvochtigd, maar ook gekoeld zodat er niet aan de voorwaarde ΔT -scherm < setpoint wordt voldaan. Daarop is aan het kasklimaatmodel een toevoeging gedaan die checkt of het setpoint RV niet langer dan een half uur wordt overschreden nadat de maximale schermkierstand is bereikt. Is dit het geval, dan wordt het scherm alsnog geopend.

5. Opzet van de scenarioberekeningen

5.1 Keuze van de scenario's

Met het kasklimaatmodel KASPRO en het gewasgroeimodel zijn de effecten van een aantal scenario's die betrekking hebben op het gebruik van schermen in de tomatenteelt doorgerekend. De effecten van deze scenario's op kasklimaat, energieverbruik en productie van het gewas zijn gekwantificeerd. Op basis van de ervaringen in het experiment en uit voorgaande onderzoeken zijn de volgende scenario's vastgesteld:

1. Referenties
 - Tomatenteelt zonder scherm
 - Behandeling standaard schermen zoals in experiment is toegepast (scherm openen bij een globale straling van 5 W m^{-2} buiten)
 - Behandeling verlengd schermen zoals in experiment is toegepast (scherm openen bij een globale straling van 50 W m^{-2} buiten)
2. Scherm openen afhankelijk van globale straling buiten
3. Scherm openen afhankelijk van tabel van globale straling buiten en buitentemperatuur
4. Scherm openen afhankelijk van ΔT -scherm (temperatuurverschil onder en boven het scherm)
5. Openingsnelheid afhankelijk van ΔT -scherm bij een toegestane daling van de kasluchttemperatuur (temperatuurval) met $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$
6. Scherm in stappen openen tot een vastgestelde ΔT -scherm is bereikt waarna het scherm ineens geheel geopend wordt.

Deze scenario's zijn gebaseerd op de kennis van luchtstromingen door schermmaterialen en schermkieren (Van de Braak & Miguel, 1996) en het regelen van kieren (Van de Braak *et al.*, 1998; Kempkes *et al.*, 2000). In de berekeningen is uitgegaan van een nieuw scherm. Aanvullend zijn berekeningen gedaan met een scherm dat vervuild is geraakt, zoals in de praktijk na enkele jaren het geval is.

5.2 Uitgangspunten van de berekeningen

In het model wordt een tomatengewas geteeld dat op 12 december wordt geplant en op 20 november wordt geruimd. De kas is een modern Venlo warehouse van 40.000 m^2 met een kapmaat van 4.8 en een vakmaat van 5 meter. Er zijn 2 verwarmingsnetten, een buisrailsysteem van 6 51-ers per kap en een hijsverwarming van 3 28-ers per kap. Deze hijsverwarming wordt als condensornet gebruikt, alleen als de gevraagde buistemperatuur van het buisrailnet boven de $65 \text{ }^\circ\text{C}$ komt, gaat de hijsverwarming meelopen met het buisrailnet. De ketel heeft een nominaal vermogen van 150 W/m^2 en is uitgerust met een combicondensator. Ten behoeve van de CO_2 -dosering is het bedrijf uitgerust met een warmteopslagtank van $100 \text{ m}^3/\text{ha}$. De CO_2 wordt gedoseerd tussen zonsopkomst en zonsondergang tot een niveau van 1000 ppm (overdag). In de nacht wordt er geen CO_2 gedoseerd. De CO_2 -dosering wordt modulerend ingesteld, afhankelijk van de vullingsgraad van de buffer. Is de buffer na een warme nacht slechts voor een klein deel ontladen, dan wordt de doseercapaciteit (lineair) bepaald aan de hand van de ruimte in de buffer en het aantal uren dat er (nog) CO_2 gedoseerd mag worden. Als de buffer vol is, wordt er gestopt met de CO_2 -dosering. Het setpoint verwarmen is de eerste 10 dagen na de teeltstart (12 december) dag en nacht 19 graden . Vervolgens wordt de nachttemperatuur tot half januari met $1 \text{ }^\circ\text{C}$ verlaagd tot $18 \text{ }^\circ\text{C}$. Van 15 januari tot en met 1 april zijn de dag en nachttemperaturen respectievelijk 18.5 en $17.5 \text{ }^\circ\text{C}$, waarna in de maand april er nog een halve graad van het setpoint wordt afgehaald. Van 1 mei tot en met 15 november is het setpoint verwarmen overdag 18 en in de nacht $16 \text{ }^\circ\text{C}$. De laatste week van de teelt is het setpoint verwarmen dag en nacht $16 \text{ }^\circ\text{C}$. De lengte van de dagperiode varieert gedurende het seizoen en loopt van zonsopkomst (winter) tot 3 uur na zonsopkomst (zomer) en eindigt 1 uur na zonsondergang. De nachtperiode is de rest van de dag.

Om de regeling rustig te houden, en warmte niet te snel weg te luchten, wordt er een dode zone ingesteld (ruimte tussen het setpoint verwarmen en het setpoint ventileren). In de wintermaanden bij de teeltstart is deze 3 °C en gedurende het voorjaar wordt deze langzaam verlaagd tot deze een waarde van circa 0.5 °C (overdag vanaf 1 april) heeft bereikt. In tabelvorm:

Datum	Stooktemperatuur (dag – nacht)	Stooktemperatuur- tijdstip ¹⁾	Dode zone (°C)	Dode zone tijdstip ¹⁾
12-dec	19 – 19	op – on+1	3	0
22-dec	19 – 18	op – on+1	2	0
15-jan	18.5 – 17.5	op+1 – on+1	1.5	0
1-apr	18 – 17	op+2 – on+1	0.5 – 1	op-2 – op+3
1-mei	18 – 16	op+3 – on+1		
15-mei			0.5	0
15-sep			0.5 – 1	op-2 – op+4
15-okt			1 – 1	op-2 – op+3
15-nov	16	0	1 – 1.5	op-2 – op+3
20-nov	5	0		

¹⁾ '0' betekent in deze dag en nacht gelijk, 'op' is zonsopkomst en 'on' zonsondergang.

Van de teeltstart tot 15 mei is er een minimumbuis van 45 °C overdag en 38 °C gedurende de nacht. Deze buistemperatuur wordt afgebouwd op licht tussen 60 en 360 W m². Na 15 mei is de minimumbuisstemperatuur 40 °C gedurende dag. De buistemperatuur is begrensd op 80 °C. Er wordt geen gebruik gemaakt van assimilatiebelichting en temperatuurintegratie.

De kas is uitgerust met een beweegbaar horizontaal- en gevelscherm. Bij alle berekeningen is gebruik gemaakt van een SLS10-Ultra-plus scherm, met een transmissie voor direct licht van 88% en voor diffuus licht van 81%. Het scherm wordt in principe alleen in de periode 15 oktober tot 1 mei gebruikt. Daarbij gelden aanvullende eisen met betrekking tot de buitentemperatuur. In de periode 12 december tot en met 15 januari wordt er geschermd als de buitentemperatuur lager is dan 12 °C en er aan de voorwaarde van het stralingssetpoint (globale straling) wordt voldaan, van 15 januari tot 1 april als de buitentemperatuur onder de 10 °C en de rest van het jaar als de buitentemperatuur onder de 8 °C ligt.

De klimaatregeling houdt rekening met het vochniveau in de kas. Bij te hoge vochniveaus neemt de kans op schimmelinfecties toe. Het setpoint voor de maximaal toelaatbare luchtvochtigheid (setpoint RV) is daarom ingesteld op 85% overdag en 88% gedurende de nacht. De laatste week voor de teeltwisseling wordt dit verhoogd tot respectievelijk 88 en 91%. Mocht de RV tijdens het schermen te hoog oplopen, dan wordt er een vochtmier van maximaal 3% in het scherm getrokken. Blijft de RV dan nog te hoog, dan mag het raam maximaal 5% geopend worden. Is de RV dan binnen een half uur nadat de ramen op de maximale stand zijn gezet nog tot op het setpoint RV gedaald, dan wordt het scherm opengetrokken.

Bij het veelvuldig schermen kan het voorkomen dat de kasluchttemperatuur boven het setpoint verwarmen uitkomt, met name indien er ook nog met een minimumbuisstemperatuur wordt gewerkt. Indien de kasluchttemperatuur meer dan 1.5 °C boven het setpoint verwarmen komt, wordt er een temperatuurkier in het scherm van 2% getrokken totdat het temperatuurverschil weer minder dan 1.5 °C is geworden.

Alle berekeningen zijn gedaan aan de hand van een representatief buitenklimaat. Hiervoor is een synthetisch jaar samengesteld uit weergegevens die bij het KNMI zijn verzameld, het SEL-jaar (Breuer & Van de Braak, 1989).

Voor de simulaties met het gewasgroeimodel is net als voor KASPRO uitgegaan van een teelt die start op 12 december (dag 347) en eindigt op 18 november (dag 323). Voor de lichtdoorlatendheid van het scherm geldt dat deze standaard op 83% werd gesteld, terwijl dit voor berekeningen met een vuil scherm werd verlaagd tot 50%. Verdere aansturing van de scenario's vond plaats via de klimaatdata (globale straling buiten, kasluchttemperatuur, CO₂) gegenereerd met het kasklimaatmodel KASPRO, incl. de gegevens over schermopening.

Aangezien er ook economische berekeningen worden uitgevoerd, moeten er ook energieprijzen (kosten) en productprijzen (opbrengsten) worden meegenomen. De gasprijs wordt op € 0.12 per m³ gas gesteld, en voor de prijzen van losse tomaten (per 4 weekse periode) worden deze gebruikt zoals die in de meest recente KWIN (2003) per 4 weekse periode staan vermeld (zie onderstaande tabel).

Tabel 5.1. KWIN prijzen tomaat voor de verschillende periodes van het jaar.

Periode	Prijs [€/kg]
1	
2	
3	1.67
4	1.51
5	0.91
6	0.54
7	0.58
8	0.66
9	0.73
10	0.90
11	0.89
12	0.57
13	0.73

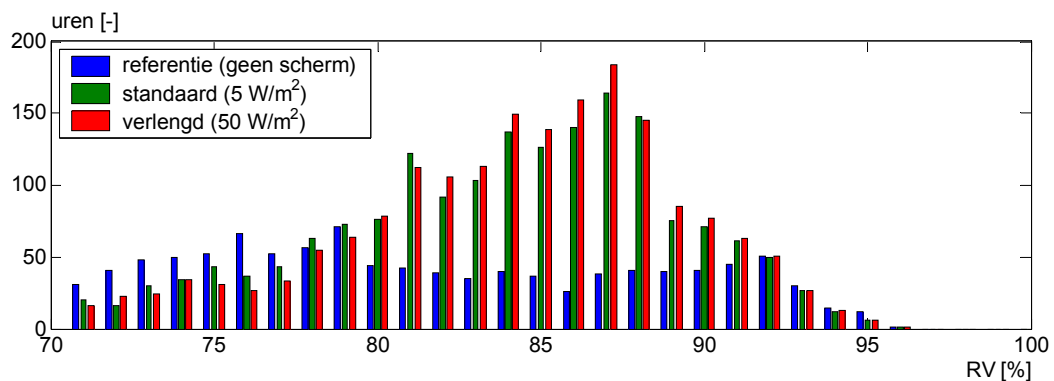
6. Resultaten van de scenarioberekeningen

6.1 Referenties

Voor de referenties zijn 3 teelten in beschouwing genomen.

- Tomatenteelt zonder scherm.
- Teelt waarbij standaard wordt geschermd zoals in het experiment is toegepast (scherm openen bij 5 W/m^2).
- Teelt waarbij verlengd wordt geschermd zoals in het experiment is toegepast (scherm openen bij 50 W/m^2).

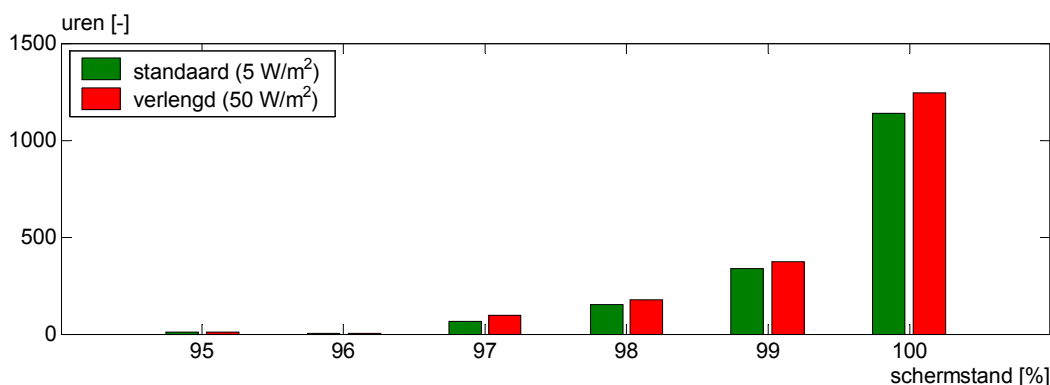
Toepassing van een scherm heeft niet alleen grote gevolgen voor het energiegebruik, maar ook voor het klimaat. Dit komt het beste tot uiting in de RV. Immers door het schermen zal tijdens de uren dat er geschermd wordt de RV toenemen doordat er minder vocht tegen het kasdek kan condenseren. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 6.1 waar een histogram is opgenomen van de RV. Bij deze 3 cases wordt 0, 1718 en 1924 uur geschermd voor een teelt zonder scherm, een teelt waarin het scherm bij 5 W/m^2 geopend (en gesloten) wordt (standaard schermen) en bij 50 W/m^2 geopend (en gesloten) wordt (verlengd schermen). Hiervoor zijn van deze 3 cases al die uren genomen waar bij het verlengd schermen het scherm meer dan 90% gesloten is geweest. Dit is gedaan omdat op deze manier er over het zelfde aantal uren gesproken wordt, zodat er beter een vergelijking gemaakt kan worden. Eventuele schermuren tijdens de teeltwisseling zijn niet meegenomen.



Figuur 6.1. Histogram van de gerealiseerde RV's voor de cases geen scherm, standaard schermen (scherm openen bij 5 W/m^2) en verlengd schermen (scherm openen bij 50 W/m^2) voor alle uren tijdens de teelt waar het scherm in de verlengd schermen case meer dan 90% gesloten is geweest.

In het histogram zijn niet alle 1924 uren weergegeven. In de case zonder scherm is de RV nog 594 uren lager geweest dan 65%. Voor de standaard en verlengd schermen case is dit nog 76 respectievelijk 55 uur. Omdat het setpoint RV gedurende de nacht, waarin de meeste schermuren gemaakt worden, 88% is, worden hier ook de meeste uren gerealiseerd. Immers de regeling zal rondom het setpoint gaan bewegen. Bij de verlengd schermen strategie is er een toename van het aantal uren met echt hoge (meer dan 90%) RV's te zien. Ook als er niet geschermd wordt, wordt het setpoint RV nog regelmatig overschreden. Voor alle geselecteerde uren (de 1924 uren dat het scherm in de verlengd schermen regeling meer dan 90% gesloten is geweest) is het setpoint RV 148, 188 en 220 uur overschreden voor respectievelijk de referentie, de standaard (scherm openen bij 5 W/m^2) en de verlengd schermen (scherm openen bij 50 W/m^2) case. Met een overschrijding van het setpoint worden die uren geteld waarbij het setpoint meer dan 1% is overschreden. Dit omdat de regeling ook enige ruimte nodig heeft. Er zijn dan ook vaak veel uren rondom het setpoint. Door alleen die uren te tellen die meer dan 1% boven het setpoint liggen, worden alleen de uren met een echte overschrijding geteld. Het scherm is niet alle schermuren volledig gesloten. Op momenten dat de RV of de temperatuur onder het scherm te hoog oploopt, mag er een vocht- dan wel

temperatuurkier getrokken worden. Het histogram van Figuur 6.2 laat de gerealiseerde schermstanden van deze 3 cases zien.



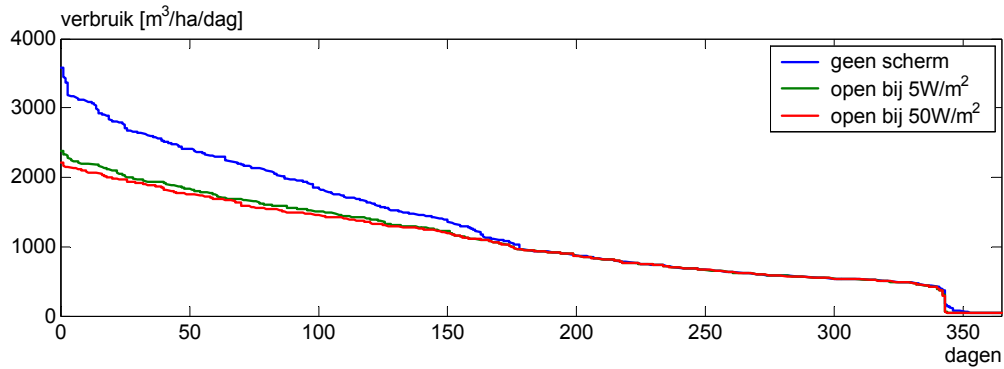
Figuur 6.2. Histogram van de gerealiseerde schermstanden voor de referentie, standaard (scherm openen bij 5 W/m²) en verlengd schermen (scherm openen bij 50 W/m²) case.

Het blijkt dat er bij het verlengd schermen zowel meer uren gekieerd moet worden als dat er uren zijn waarbij het scherm volledig gesloten kan blijven. Uit nadere analyse is gebleken dat in de periode december (na de teeltstart) tot en met januari er meer uren zijn dat het scherm volledig gesloten blijft door het verlengd schermen terwijl in het voorjaar er tijdens het verlengd schermen meer gekieerd moet worden. In de winter zijn er dagen bij waarbij het scherm volledig gesloten blijft bij de verlengd schermen strategie.

Het energieverbruik van deze 3 cases is 47.0, 39.4 en 38.4 m³/m²/jaar voor respectievelijk de referentie, het standaard- (scherm openen bij 5 W/m²) en het verlengd schermen (scherm openen bij 50 W/m²). De inzet van een scherm bespaart circa 16% energie, terwijl door het verlengd schermen nog eens zo'n 2.5% energie op jaarbasis bespaard wordt. De tomatenproductie is 61.86 kg per m² per jaar wanneer geen scherm gebruikt wordt. In de case standaard schermen blijft de productie op dit niveau. Wanneer verlengd geschermd wordt, daalt de berekende productie met 0.1 kg per m² per jaar. Er is geen verschil in productie tussen de niet geschermd en de standaard geschermd afdelingen, omdat er in beide wel scherminstallaties en doeken aanwezig zijn, maar deze in de niet geschermd afdeling niet gebruikt worden. Het lichtverlies als gevolg van de scherminstallatie is dus wel aanwezig in de niet geschermd afdeling.

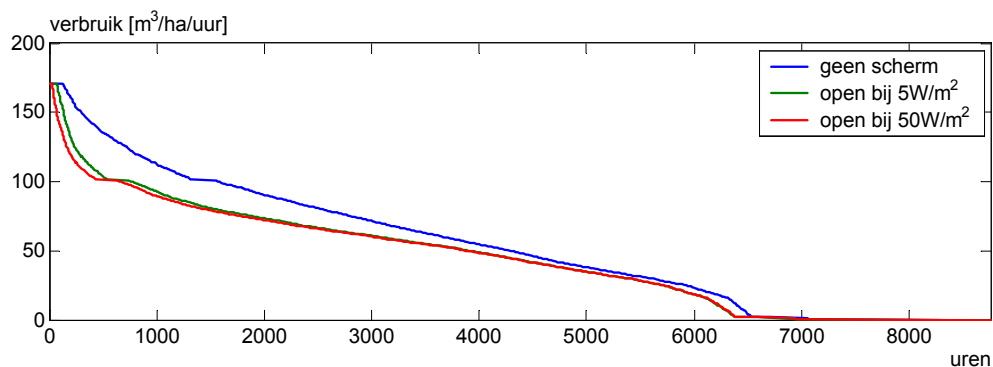
Verbruikspatroon

Naast het totale energieverbruik, is het afnamepatroon heden ten dage ook van belang. Hoe vlakker het afnamepatroon gedurende de dag en het jaar is, des te gunstiger dit voor de gasprijs is. Bij alle berekeningen is, zoals in paragraaf 6.1 is besproken, het uitgangspunt geweest dat het verwarmingssysteem maximaal 150 W/m² aan warmte kan produceren, wat overeenkomt met een afname aan gas van circa 171 m³/ha/uur. In de praktijk zal bij een wijziging van de bedrijfsuitrusting (aanschaf van een scherm) of het gebruik hiervan (weinig of veel schermen) het gascontract worden aangepast. Bij de scenarioberekeningen is er voor gekozen dit niet te doen om de verschillende scenario's zo goed mogelijk te kunnen vergelijken. In Figuur 6.3 is een jaarbelastingduurkromme van het dagverbruik van gas van de 3 referentiecasses weergegeven. (In een jaarbelastingduurkromme zijn de afzonderlijke dag- dan wel uurverbruiken gesorteerd op volgorde van grootte, met de grootste als eerste).



Figuur 6.3. Jaarbelastingduurkrommen van de dagverbruiken van gas voor de cases geen scherm, standaard schermen (open bij 5 W/m²) en verlengd schermen (open bij 50 W/m²).

Uit deze figuur valt direct het enorme verschil op in dagafname tussen wel of geen scherm. Op de dagen dat er geen scherm gebruikt wordt, zal er in principe ook geen verschil zijn in dagafname. Na 343 dagen is het einde van het teeltjaar bereikt, en daalt het dagverbruik naar een niveau van enkele tientallen m³/ha/dag om de kas vorstvrij en de ketel op temperatuur te houden (boven de 60°C). Indien er geen energiescherm aanwezig is, dan is de maximale dagafname 3579 m³/ha/dag. Voor de referentie openen bij 5 en 50 W/m² is dit respectievelijk 2382 en 2222 m³/ha/dag. Door toepassing van een scherm kan de maximale dagafname dus met circa 30% verkleind worden. Afhankelijk van de gekozen schermstrategie weinig (openen bij 5 W/m²) of veel (openen bij 50 W/m²) kan er nog eens circa 7% op de dagafname bespaard worden. In Figuur 6.4 zijn de jaarbelastingduurkrommen van de uurlijkse gasverbruiken van deze 3 referentie cases weergegeven.



Figuur 6.4. Jaarbelastingduurkrommen van de uurverbruiken van gas voor de cases geen scherm, standaard schermen (open bij 5 W/m²) en verlengd schermen (open bij 50 W/m²).

Uit deze figuur blijkt dat alle cases op het maximale uurverbruik van circa 171 m³/ha/uur uitkomen. Echter, het aantal uren met dit hoge uurverbruik verschilt fors tussen de cases. Wanneer geen scherm gebruikt wordt, wordt gedurende 118 uur het maximale uurverbruik gerealiseerd, bij schermen bij 5 en 50 W m² is dit respectievelijk 71 en 25 uur. De circa 400 uur dat de lijn bij een verbruik van 100 m³/ha/uur ligt, wordt veroorzaakt door het CO₂-doseran, dat een maximum van 100 m³/ha/uur heeft (zie paragraaf 4.1). Dit wil niet zeggen dat er op jaarbasis slechts 400 uur CO₂ gedoseerd wordt. Echter, door de modulerende werking van de brander om de buffer gedurende de dag gelijkmatig te vullen, moet de CO₂-branderstand vaak lager worden ingesteld (zie ook paragraaf 6.1). Naast deze 'gewone' regelingen, zijn er ook berekeningen uitgevoerd waarin de aanwezigheid van een vuil scherm in plaats van een ideaal nieuw scherm is gesimuleerd. De verschillen in afname patroon als gevolg van een vuil scherm blijken marginaal te zijn (data niet getoond).

Samenvattend

Het (berekende) energieverbruik van een tomatenteelt zonder scherm is $47.0 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{jaar}$. Wanneer een scherm gebruikt wordt dat bij $5 \text{ W}/\text{m}^2$ straling geopend wordt, daalt het energieverbruik met 16% naar $39.4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{jaar}$. Langer doorschermen (openen bij $50 \text{ W}/\text{m}^2$) bespaart nog eens $1 \text{ m}^3 \text{ gas}/\text{m}^2/\text{jaar}$. Het aantal schermuren dat gerealiseerd wordt is respectievelijk 1718 en 1924 uur per jaar. De productie zonder scherm is 61.86 kg tomaten per m^2 per jaar. Bij toepassing van een scherm dat bij $5 \text{ W}/\text{m}^2$ straling buiten geopend wordt, wordt de productie niet beïnvloed. Langer doorschermen (openen bij $50 \text{ W}/\text{m}^2$) kost 0.1 kg productie per m^2 per jaar. Toepassing van een energiescherm heeft grote gevolgen voor het dagelijkse gasafnamepatroon. Zonder energiescherm is de maximale dagafname $3579 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{dag}$. Door toepassing van een scherm dat bij $5 \text{ W}/\text{m}^2$ geopend wordt kan de dagafname met 30% verlaagd worden tot $2382 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{dag}$ met gunstige gevolgen voor de gasprijs.

6.2 Scherm openen afhankelijk van globale straling buiten

Bij de in paragraaf 6.2.1 gebruikte regeling bij standaard en verlengd schermen, wordt het scherm altijd geopend zodra aan de voorwaarde (de globale straling komt boven een bepaald niveau) wordt voldaan. In deze paragraaf worden de resultaten van deze regeling besproken voor een range aan setpoints, te weten: 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100 en 150 W globale straling per m^2 .

De fasen in de teelt waarbij geschermd kan worden lopen van 12 december (plantdatum) tot 1 mei en van 15 oktober tot 20 november (teeltwisseling). Dit zijn in totaal 4226 uur. Van deze uren is in het SEL jaar 3641 uur de globale straling $<180 \text{ W}/\text{m}^2$, 3540 uur $<150 \text{ W}/\text{m}^2$, 3350 uur $<100 \text{ W}/\text{m}^2$, 3018 uur $<50 \text{ W}/\text{m}^2$ en 2446 uur $<5 \text{ W}/\text{m}^2$. Dit is dus het maximaal haalbare aantal schermuren bij deze setpoints. Dat dit aantal niet gehaald zal worden, ligt onder andere aan het feit dat er extra voorwaarden aan het schermgebruik zijn gesteld (paragraaf 5.1) zoals de buitentemperatuur waarboven niet geschermd mag worden. In de periode 12 december tot en met 15 januari wordt er geschermd als de buitentemperatuur lager is dan $12 \text{ }^\circ\text{C}$, van 15 januari tot 1 april als de buitentemperatuur onder de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ en de rest van het jaar als de buitentemperatuur onder de $8 \text{ }^\circ\text{C}$ ligt. De keuze voor deze setpoints is redelijk arbitrair en liggen enkele graden boven de in de praktijk toegepaste waarden. Dit wordt gedaan om minimaal $6 \text{ }^\circ\text{C}$ tot $7 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatuurverschil te creëren tussen binnen en buiten. Hierdoor is er altijd enige warmtevraag zodat de door de tuinders gewenste luchtcirculatie rondom het gewas (voorkomen van een dood klimaat) in stand gehouden wordt.

Bij hoge setpoints voor het openingscriterium van het scherm, is te verwachten dat er veel vochtproblemen ontstaan, immers bij hoge stralingsniveaus wordt de verdamping gestimuleerd, terwijl de vochtafvoer bij het in deze berekeningen gebruikte scherm beperkt is. Met een eenvoudig k-waarde model kan de warmtevraag van een kas globaal bepaald worden. De k-waarde is een warmteverliescoëfficiënt en geeft aan hoeveel warmte er door het kasdek verloren gaat. Afhankelijk van het temperatuurverschil binnen en buiten de kas kan hiermee de benodigde warmtevraag van de kas berekend worden. Een kas zonder scherm heeft een k-waarde van ongeveer $8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, terwijl de k-waarde bij een volledig gesloten scherm kan dalen tot $4 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Andersom kan hiermee ook globaal berekend worden hoeveel de zon bij kan dragen aan de verwarming. Zo kan van een kas met een k-waarde van 8, als het scherm geopend is, met 150 W m^{-2} globale straling (buiten de kas gemeten) er circa 14 graden temperatuurverschil binnen-buiten overbrugd worden (bij een transmissie van de kas van 75%) zonder dat er aanvullende verwarming nodig is. De transmissie van de kas wordt hierbij betrokken omdat niet alle zonnestraling in de kas terecht komt. Hierdoor kan er in de cases met hoge stralingsetpoints om het scherm te openen ook vaak op temperatuur gekieerd moeten worden. Immers, de zon zal het compartiment onder het scherm kunnen opwarmen tot boven het setpoint verwarmen. In Tabel 6.1 zijn de belangrijkste resultaten weergegeven.

Tabel 6.1. Schermuren per jaar en gevolgen van het schermen op de RV, het PAR licht op gewasniveau en het energieverbruik voor verschillende stralingsniveaus waarboven het scherm geopend wordt.

Scherm open [W/m ²]	Scherm uren [-]	Uren ¹⁾ RV < 60 [-]	Uren ¹⁾ RV > 85 [-]	Uren ¹⁾ RV > 90 [-]	Uren ¹⁾ RV>Setp. [-]	PAR (dif) op gewas ¹⁾ [MJ/m ² /jaar]	PAR (dir) op gewas ¹⁾ [MJ/m ² /jaar]	Gasverbruik [m ³ /m ² /jaar]
1	1673	43	752	158	156	16.25	1.99	39.6
2	1680	42	757	158	170	16.23	1.98	39.6
5	1718	38	770	164	168	16.18	1.96	39.4
10	1759	35	785	159	176	16.05	1.92	39.2
25	1853	28	804	163	175	15.68	1.83	38.8
50	1924	25	822	166	190	15.04	1.69	38.4
100	2014	23	845	168	203	13.87	1.38	38.1
150	2049	24	861	170	214	13.31	1.20	38.0

¹⁾ Omdat verschillende openstrategieën tot verschillen in gerealiseerde schermuren leiden, zijn om de resultaten te kunnen vergelijken, hier voor alle cases alle schermuren van case scherm open bij 150 W/m² genomen. Met andere woorden, de 2049 uur dat het scherm gesloten is geweest in de case 'open bij 150 W/m²', is er 14.51 MJ/m² aan PAR licht op het gewas gevallen. In dezelfde 2049 uur is in de case 'open bij 1 W/m²' 18.24 MJ/m² aan PAR licht op het gewas gevallen. Dit lijkt een enorm verschil, echter bedenk dat dit op jaarbasis circa 1270 MJ/m² is.

Uit de tabel blijkt dat er door het oprekken van het criterium om het scherm te openen fors meer schermuren (+ 20%) gerealiseerd kunnen worden, die ook een energiebesparing van circa 4% kan opleveren ten opzichte van het direct openen van het scherm als het licht wordt. Het aantal uren met een RV van boven de 90% neemt toe, echter er zijn geen cases met uren met een RV boven de 95%. Met andere woorden, het blijft beheersbaar. Het setpoint RV varieert gedurende de dag (paragraaf 5.2) tussen 85 en 88%. Er is ook een uitsplitsing naar uren boven het setpoint RV gemaakt. Daaruit blijkt dat ook bij de case van 1 W/m² er al 156 uren zijn met een RV boven het setpoint. Door het intensiever schermen neemt dit toe tot ruim 224 uur bij de case 150 W/m². Bij het bepalen van het aantal uren boven een bepaald RV niveau zijn voor alle cases die uren geselecteerd waar de schermstand > 90% was van de case openen bij 150 W/m² globale straling. Met andere woorden alle uren dat het scherm van case 150 W/m² meer dan 90% gesloten is geweest, is voor alle cases gebruikt om de frequentieverdeling van de RV's te maken. Van de 2049 uur dat het scherm in de case 150 W/m² gesloten is geweest, is in deze case de RV 170 uur hoger dan 90% geweest, terwijl dit in de case 1 W/m² slechts 158 van de 2049 uur het geval is geweest.

Als het scherm dicht blijft op momenten dat het licht is, zal door de (beperkte) transmissie van het scherm een deel van het licht onderschept (gereflecteerd dan wel geabsorbeerd) worden. Voor de gewasgroei is het PAR-licht van belang. Uit Tabel 6.1 blijkt dat door het langer schermen er in de case 150 W/m² op gewasniveau bijna 4% minder direct en ruim 18% minder diffuus licht per jaar bij het gewas komt dan bij de case openen bij 1 W/m². Ter vergelijking, op jaarbasis is er voor het gewas circa 900 MJ/m² diffuus en 370 MJ/m² direct PAR-licht beschikbaar. Dan blijkt dat er door het verlengd schermen op jaarbasis minder dan een half procent minder PAR-licht voor het gewas beschikbaar is bij de case openen bij 150 W/m² ten opzichte van openen bij 1 W/m².

De tomatenproductie is voor de verschillende stralingsniveaus waarbij het scherm geopend werd gesimuleerd met het gewasgroei-model. Uit de berekeningen blijkt dat het openen van het scherm bij een globale straling buiten van 150 W/m² een productieverlaging geeft van 0.3 kg/m², doordat het scherm over de gehele teelt 376 uur meer gesloten is dan bij schermopening bij 1 W/m² (Tabel 6.2). De productieverlaging begint op te treden wanneer het scherm bij lichtintensiteiten groter dan 5 W/m² geopend wordt.

Tabel 6.2. Invloed van het stralingsniveau waarbij het scherm geopend wordt op berekende tomatenproductie.

Schermscherm open (W/m ²)	Productie (kg/m ² /seizoen)
1	61.86
2	61.86
5	61.86
10	61.85
25	61.80
50	61.75
100	61.64
150	61.57

Wanneer echter een financiële afweging wordt gemaakt van de gasbesparing (€ 0,12 per m³ gas) tegen het verlies aan productie (KWIN prijzen, Tabel 5.1) blijkt dat deze geringe productieverlaging zwaarder weegt dan de besparing van 1.6 m³ gas per m² per jaar door het scherm pas bij 150 W/m² te openen (Tabel 6.3). In deze afweging blijkt het scherm openen bij 10 W/m² optimaal.

Tabel 6.3. Gasverbruik, tomatenproductie en economisch resultaat voor simulaties waarbij het scherm op basis van globale straling buiten geopend wordt. (tomatenprijs volgens KWIN – gasprijs € 0.12 per m³).

Schermscherm open (W/m ²)	Gasverbruik (m ³ /m ² /seizoen)	Productie (kg/m ² /seizoen)	Productie (€/m ² /seizoen)	Gasbesparing ¹ (€/m ²)	Productie- verlies ¹ (€/m ²)	Netto resultaat ¹ (€/m ²)
1	39.51	61.86	49.77	-	-	-
2	39.43	61.86	49.77	0.010	0.001	0.009
5	39.25	61.86	49.76	0.032	0.005	0.026
10	39.03	61.85	47.75	0.057	0.015	0.042
25	38.64	61.80	49.68	0.105	0.092	0.013
50	38.32	61.75	49.59	0.143	0.176	- 0.033
100	38.00	61.64	49.43	0.181	0.343	- 0.162
150	37.86	61.57	49.30	0.198	0.473	- 0.275

¹ Ten opzichte van scherm openen zodra het licht is (open bij 1 W/m² globale straling buiten).

Deze financiële afweging blijkt zeer gevoelig te zijn voor de gasprijs en de tomatenprijs. Wanneer wordt gerekend met een gasprijs van € 0.18 per m³ en een gemiddelde jaarrond tomatenprijs van € 0.90 per kg levert dit uitkomsten op zoals in Tabel 6.4 staan weergegeven.

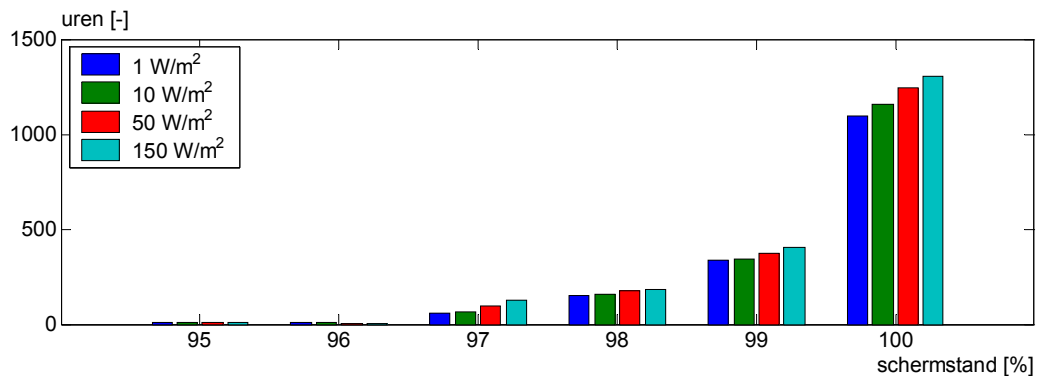
Tabel 6.4. Gasverbruik, tomatenproductie en economisch resultaat voor simulaties waarbij het scherm op basis van globale straling buiten geopend wordt. (vaste tomatenprijs € 0.90 per kg – gasprijs € 0.18 per m³).

Scherms open (W/m ²)	Gasverbruik (m ³ /m ² /seizoen)	Productie (kg/m ² /seizoen)	Productie (€/m ² /seizoen)	Gasbesparing ¹ (€/m ²)	Productieverlies ¹ (€/m ²)	Netto resultaat ¹ (€/m ²)
1	39.51	61.86	55.68	-	-	-
2	39.43	61.86	55.68	0.015	0.000	0.015
5	39.25	61.86	55.68	0.047	0.001	0.046
10	39.03	61.85	55.67	0.086	0.007	0.079
25	38.64	61.80	55.62	0.157	0.053	0.104
50	38.32	61.75	55.58	0.215	0.100	0.115
100	38.00	61.64	55.47	0.272	0.203	0.069
150	37.86	61.57	55.41	0.297	0.266	0.031

¹ Ten opzichte van scherm openen zodra het licht is (open bij 1 W/m² globale straling buiten).

Bij deze hogere gasprijzen en lagere tomatenprijs blijkt dat de energiebesparing wel opweegt tegen het productie-verlies. Het netto resultaat in euro's per m² is weliswaar gering, maar hierbij moet bedacht worden dat in deze afweging eventuele wijzigingen in het gascontract niet zijn meegenomen.

In Figuur 6.5 zijn voor de cases 'scherm openen bij 1, 10, 50 en 150 W/m²' de gerealiseerde schermstanden weergegeven.



Figuur 6.5. Histogram van de gerealiseerde schermstanden voor de cases scherm openen bij 1, 10, 50, 150 W/m².

Uit de figuur blijkt dat er maar een kleine toename in het aantal uren is dat het scherm volledig gesloten is bij de case 150 t.o.v. case 50. Het aantal uren dat het scherm op een kier dan wel de maximale kier van 3% staat neemt duidelijk toe bij een toename van het stralingsetpoint waarbij het scherm geopend moet worden. De maximale kier wordt vooral ingezet om vocht af te voeren, wat ook overeenkomt met het aantal uren met een RV > 85 en >90.

De berekeningen zijn uitgevoerd met een zogenaamd ideaal scherm, dat nooit vuil wordt, terwijl in de praktijk bekend is dat de transmissie van een scherm in de tijd afneemt. Om de invloed hiervan op het energieverbruik en de productie te bepalen zijn er berekeningen gemaakt met een scherm dat voor 40% vervuild is. Bij deze berekeningen

is er van uitgegaan dat de transmissie voor loodrechte straling daalt tot 53% en voor diffuus licht naar 49%. Ook andere schermeigenschappen worden hierdoor beïnvloed. De verhouding transmissie, reflectie en absorptie (die samen 1 moeten zijn) zal veranderen. Bij vervuiling zal er over het algemeen meer absorptie en minder reflectie plaatsvinden. Zo is aangenomen dat de absorptie van het materiaal van 4% bij een nieuw materiaal toeneemt tot 25% bij een vervuild scherm. In Tabel 6.5 zijn de resultaten van de berekeningen met een vervuild scherm weer gegeven.

Tabel 6.5. *Schermuren per jaar en gevolgen van het schermen op de RV, het PAR licht op gewasniveau en het energieverbruik voor verschillende stralingsniveaus waarboven het scherm geopend wordt met een scherm dat voor 40% vervuild is.*

Schermscherm	Schermscherm	Uren ¹⁾	Uren ¹⁾	Uren ¹⁾	Uren ¹⁾	PAR (dif)	PAR (dir)	Gasverbruik
open	uren	RV < 60	RV > 85	RV > 90	RV>Setp.	op gewas ¹⁾	op gewas ¹⁾	[m ³ /m ² /jaar]
[W/m ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[MJ/m ² /jaar]	[MJ/m ² /jaar]	
1	1666	44	753	158	162	16.80	2.09	39.6
2	1679	43	761	160	163	16.74	2.08	39.5
5	1716	38	768	161	171	16.59	2.05	39.4
10	1760	35	777	161	174	16.24	2	39.2
25	1851	28	800	165	172	15.26	1.87	38.8
50	1917	27	823	161	189	13.39	1.64	38.5
100	2012	24	846	163	199	10.09	1.10	38.1
150	2062	24	858	170	216	8.57	0.78	38.0

¹⁾ *Omdat verschillende openstrategieën tot verschillen in gerealiseerde schermuren leiden, zijn om de resultaten te kunnen vergelijken, hier voor alle cases alle schermuren van case 'scherm openen bij 150 W/m²' genomen.*

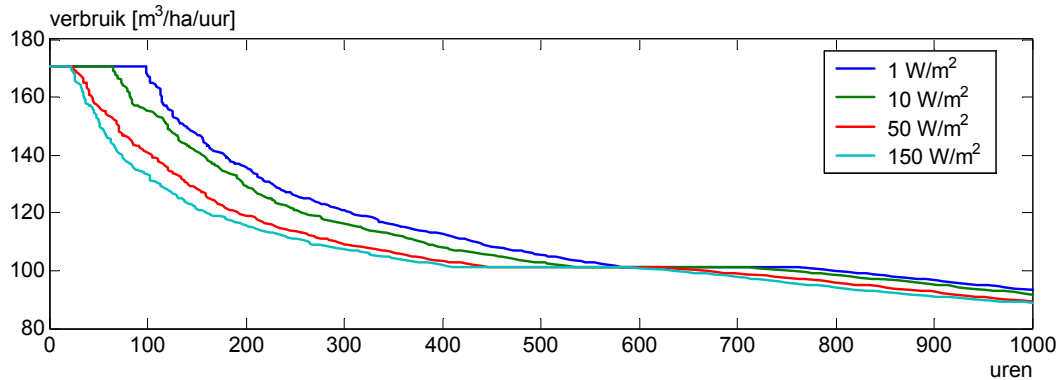
Het energieverbruik neemt niet of slechts fractioneel toe. Een toename is ook alleen te zien bij het scherm openen bij hoge stralingsniveaus. Doordat er minder licht (energie) door het vuile scherm komt, zal het compartiment onder het scherm in sommige gevallen dus ook iets minder opwarmen, waardoor er net iets meer verstoekt zal moeten worden. Het aantal schermuren neemt om deze reden dan ook wat toe. De kleine toename van het aantal uren met RV's > 90% is waarschijnlijk het gevolg van de iets hogere schermtemperatuur doordat er meer licht door het scherm geabsorbeerd wordt. Hierdoor zal er iets minder water tegen het doek condenseren waardoor de RV wat hoger wordt.

De invloed van de vervuiling is groter op de hoeveelheid PAR die door het scherm komt. Waar bij een schoon scherm slechts 18% minder diffuus licht op het gewas komt loopt dit bij een vuil scherm op tot ruim 49%. De in Tabel 6.1 weergegeven stralingsom aan PAR is de totale hoeveelheid PAR licht dat tijdens alle schermuren van case 150 W/m² (met een schermstand > 90%) op het gewas is gevallen. Met andere woorden, van de 2062 uur dat het scherm in de case 150 W/m² is dicht geweest, is er in de case 1 W/m² 16.8 MJ/m² diffuus PAR-licht op het gewas gevallen, terwijl dit in de case 150 W/m² 8.6 MJ/m² is.

Bij gebruik van een vuil scherm, dat wil zeggen 50% lichtdoorlatendheid in plaats van 83% lichtdoorlatendheid zijn de productieverliezen groter vanwege meer lichtverlies bij gesloten laten van het scherm. Wanneer het scherm bij 5 W/m² geopend wordt kost de vervuiling van het scherm 0.06 kg productie per m² per jaar. Bij openen bij 50 W/m² kost de vervuiling echter al 0.38 kg productie per m² per jaar. Dit betekent bij het hebben van een sterk vervuild scherm de afweging tussen wel of niet openen eerder zal doorslaan naar het openen van het scherm zo gauw het licht is.

Verbruikspatroon

In Figuur 6.6 zijn de jaarbelastingduurkrommen van een viertal van deze cases (scherm openen bij 1, 10, 50 en 150 W/m² globale straling per m²) weergegeven. Omdat de detaillering van de grafiek van de uren met de hoogste verbruiken het meest interessant zijn, zijn hier, in tegenstelling tot de grafiek in paragraaf 6.2.2 waar alle uren gepresenteerd zijn, alleen de 1000 uren met het hoogste verbruik weergegeven.



Figuur 6.6. Jaarbelastingduurkrommen van de 1000 hoogste uurverbruiken van 4 cases waarbij het scherm bij een vast stralingsniveau geopend wordt.

Uit de figuur wordt duidelijk, dat ondanks hoge stralingsniveaus waarbij het scherm pas geopend wordt, er toch nog altijd uren (hoewel zeer beperkt in aantal) overblijven met de maximale gasafname. Dit hoeven niet altijd uren te zijn rondom de schermopening. Ook gedurende de dag is het mogelijk dat er forse temperatuurdalingen voorkomen, vooral bij wisselvalige weertypen. Hierbij valt te denken aan voorjaarsweer met zonnige perioden, waarbij de zon de kas op temperatuur houdt. Valt de zon weg, en daalt de temperatuur fors (regen of hagel), dan moet eerst het hele verwarmingssysteem weer op temperatuur worden gebracht, waardoor piekafnamen kunnen ontstaan. De uurafname daalt bij de case 'openen bij 150 W/m²' veel sneller dan bij de case 'openen bij 1 W/m²'. Wordt als willekeurige grens bijvoorbeeld een afname van 120 m³/ha/uur gekozen, dan wordt bij de 150 W/m² case deze grens circa 163 uur overschreden en bij de case open bij 1 W/m² circa 309 uur.

Samenvattend

Naarmate het scherm geopend wordt bij een hogere globale straling neemt het aantal schermuren met ongeveer 400 toe van 1673 (scherm openen bij 1 W/m²) tot 2049 (scherm openen bij 150 W/m²). Het bijbehorende energieverbruik daalt met 4% van 39.6 m³/m²/jaar naar 38.0 m³/m²/jaar. Het aantal uren met een relatieve luchtvochtigheid boven de 90% neemt toe naarmate er langer wordt geschermd. Er zijn echter geen uren met een relatieve luchtvochtigheid boven de 95%. Het scherm openen bij 150 W/m² in plaats van 1 W/m² kost 0.3 kg productie/m²/jaar. Wanneer een financiële afweging wordt gemaakt van de gasbesparing (€ 0.12 per m² gas) tegen het verlies aan productie (op basis van KWIN prijzen) blijkt deze geringe productieverlaging zwaarder te wegen dan de besparing van 1.6 m³ gas per m² per jaar door het scherm pas te openen bij 150 W/m². In deze financiële afweging is het scherm openen bij 10 W/m² optimaal. Wanneer echter gerekend wordt met een gasprijs van € 0.18 per m² gas en een gemiddelde tomatenprijs van € 0.90 per kg weegt de energiebesparing wel op tegen de productiederving en kan langer doorgeschermd worden. In deze berekeningen zijn echter eventuele wijzigingen in het gascontract niet meegenomen.

Naarmate het scherm pas bij hogere stralingsniveaus geopend wordt, daalt het aantal uren met de maximale gasafname. Dit betekent dat verlengd schermen een goede manier is pieken in het gasverbruik af te vlakken en de temperatuur in de kas op het gewenste setpoint te houden.

6.3 Scherm openen afhankelijk van globale straling en buitentemperatuur

Bij de in paragraaf 6.2.1 en 6.2.2 gebruikte regeling wordt het scherm altijd geopend zodra aan de voorwaarde (de globale straling komt boven een bepaald niveau) wordt voldaan, wat een zeer eenvoudige regeling is, daar deze geen rekening houdt met de buitentemperatuur. Dit betekent dat op erg koude dagen (waar het vaak helder weer is, waardoor er sneller aan de voorwaarde voor opening wordt voldaan) het scherm energietechnisch gezien te vroeg open gaat waardoor er veel moet worden bijgestookt om de setpointtemperatuur te handhaven. Op deze dagen zal er ook sneller een temperatuurval ontstaan bij het openen. Om deze problemen te voorkomen kan het scherm ook op een combinatie van buitentemperatuur en straling worden geopend. Dit betekent dat bij lage buitentemperaturen het scherm bij hogere stralingsniveaus geopend zal worden dan bij hoge buitentemperaturen. In deze paragraaf worden de resultaten van deze regeling besproken.

In totaal zijn er een zestal cases met verschillende combinaties uitgewerkt van buitentemperatuur en stralingsniveau waarbij het scherm geopend zal worden. In Tabel 6.6 zijn de combinaties weergegeven en het aantal uren op jaarbasis dat de buitentemperatuur in het SEL-jaar onder een bepaalde buitentemperatuur ligt.

Tabel 6.6. Combinaties van buitentemperatuur en stralingsniveau waarbij het scherm geopend zal worden en het aantal uren (op jaarbasis) dat de buitentemperatuur in het SEL-jaar onder de aangegeven temperatuur ligt.

Buitentemperatuur [°C]	Uren met lagere buitentemperatuur in SEL-jaar	Case					
		A	B	C	D	E	F
		Globale straling [W/m ²]					
-15	0	900	280	140	280	100	200
-10	0	627	240	120	240	100	200
-5	7	354	200	100	175	100	200
0	213	150	160	80	120	20	100
5	1409	65	120	60	75	5	83
10	4022	18	80	40	40	5	66
15	6468	1	40	20	15	5	50

Bovenstaande tabel is een basis, die kan worden overruled door de standaardinstelling voor de buitentemperatuur waar beneden niet geschermd wordt, zoals in paragraaf 5.1 besproken is.

Case A is een enigszins gewogen tabel met als doel dat er weinig temperatuurverschil tussen binnen en buiten is op het moment dat het scherm geopend wordt. Bij erg koud weer blijft het scherm zeker dicht en bij wat hogere buitentemperaturen (vanaf ca. 0°C) hoeft er maar weinig bijgestookt te worden. De 150 W/m² straling is goed voor een temperatuurverschil binnen – buiten de kas van 16 °C.

Case B: Op basis van een k-waarde model (warmteoverdrachtcoëfficiënt [W/m²/°C]) is berekend wat de globale straling moet zijn om het warmteverlies van de kas door de zon op te laten heffen. Hierbij is een k-waarde van 8 genomen, wat globaal het warmteverlies van de kas is als er geen scherm aanwezig is. Bij de berekening is uitgegaan van een setpointtemperatuur van 20 °C.

Case C: Op basis van k-waarde model is berekend wat de globale straling moet zijn om het warmteverlies van de kas door de zon op te laten heffen. Hierbij is een k-waarde van 4 genomen, dat is globaal het warmteverlies van de kas als het scherm dicht is.

Deze 3 scenario's zijn zuiver vanuit het oogpunt van kasklimaat en energiebalans beredeneerd en hebben mogelijk sterk negatieve effecten op de gewasgroei.

Case D: Combinatie van cases B en C waar de k-waarde van 8 naar 4 loopt, om te komen tot een scenario dat de gewasgroei niet te sterk negatief zal beïnvloeden, door het voorkomen van een te groot lichtverlies als gevolg van het schermen.

Case E: Deze case is vergelijkbaar met de referentie (standaard schermen, scherm openen bij 5 W/m²) en is een afspiegeling van in de praktijk genoemde waarden.

Case F: Deze case is vergelijkbaar met de referentie (verlengd schermen, scherm openen bij 50 W/m²).

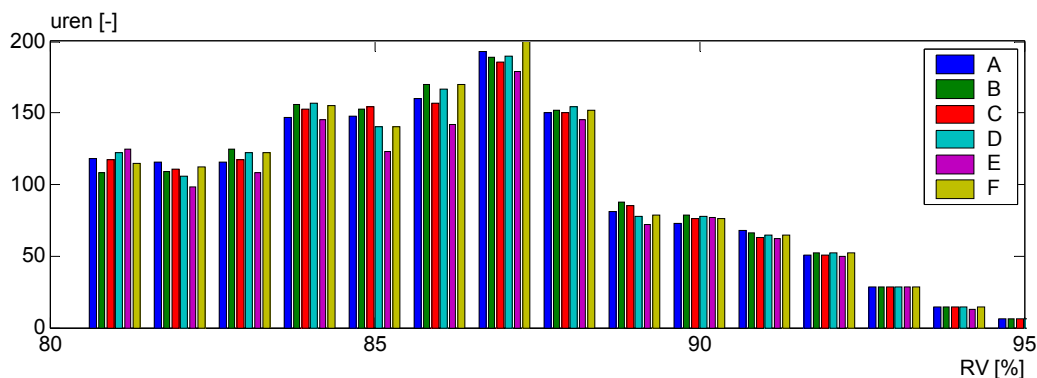
Het totaal aantal gerealiseerde schermuren tijdens de teelt van loopt op van 1748 voor case E tot 2033 voor case B.

Tabel 6.7. Schermuren en gevolgen van het schermen op de RV, het PAR licht op gewasniveau en het energieverbruik voor 6 verschillende schermopenen strategieën op basis van buitentemperatuur en globale straling.

Scherm open [W/m ²]	Scherm uren [-]	Uren ¹⁾ RV < 60 [-]	Uren ¹⁾ RV > 85 [-]	Uren ¹⁾ RV > 90 [-]	Uren ¹⁾ RV>Setp. [-]	PAR (dif) op gewas ¹⁾ [MJ/m ²]	PAR (dir) op gewas ¹⁾ [MJ/m ²]	Gasverbruik [m ³ /m ² /jaar]
A	1963	23	825	168	192	12.38	1.17	38.2
B	2033	24	845	167	208	11.65	1.03	38.0
C	1938	25	817	163	187	12.65	1.29	38.3
D	1978	23	833	166	194	12.22	1.17	38.2
E	1748	29	775	160	173	13.98	1.59	39.2
F	1988	23	843	166	199	12.15	1.16	38.2

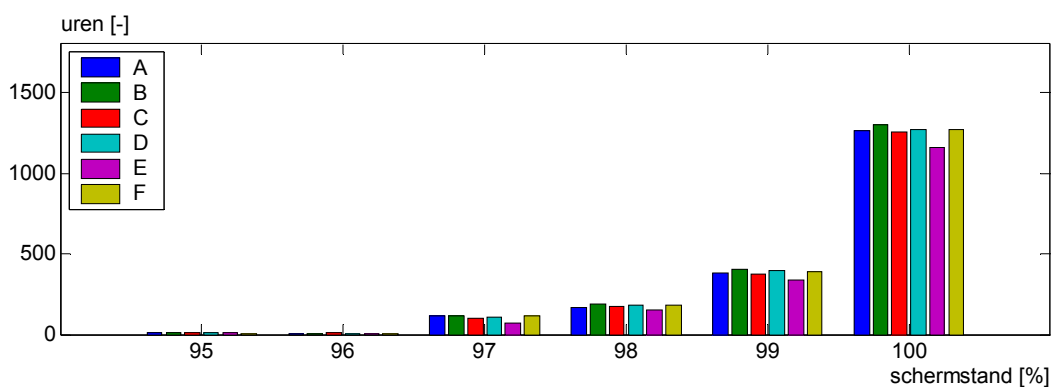
¹⁾ Omdat verschillende openstrategieën tot verschillen in gerealiseerde schermuren leiden, zijn om de resultaten te kunnen vergelijken, hier voor alle cases alle schermuren van case B genomen.

Wanneer de Tabellen 6.1 (Scherm openen alleen op globale straling) en 6.7 worden vergeleken valt op dat het scherm openen op straling en buitentemperatuur resulteert in meer schermuren dan de referentie case verlengd schermen. Dit komt ook terug in de energieverbruiken, die op case E na vergelijkbaar dan wel lager zijn. Case E is op zijn beurt qua prestaties goed vergelijkbaar met de referentie case verlengd schermen (scherm openen bij 50 W/m²). Uit deze cases blijkt opnieuw dat door het maken van meer schermuren het energieverbruik daalt, maar het aantal uren met hoge RV's toeneemt. In Figuur 6.7 zijn de gerealiseerde RV's van de verschillende cases op de uren dat er geschermd is (dit is voor alle cases de schermuren van case B) gepresenteerd.



Figuur 6.7. Histogram van de gerealiseerde RV's voor de 6 cases voor alle uren tijdens de teelt waar het scherm in case B meer dan 90% gesloten is geweest.

Uit deze figuur kan worden opgemaakt dat, om te voorkomen dat er (veel) uren met hoge RV's ontstaan, er duidelijk minder schermuren gemaakt moeten worden (vergelijk van case B en F met case E). De regeling is wel in staat om RV's hoger dan 95% te voorkomen, hoewel dit fors boven het gestelde setpoint van 88% zit. Het aantal uren met een forse overschrijding van het setpoint RV is voor de verschillende cases vrijwel gelijk. Dit kan enerzijds het gevolg zijn van uren dat het heel moeilijk is om vocht af te voeren, bijvoorbeeld op momenten met een hoge buitentemperatuur en een hoge RV terwijl het setpoint verwarmen laag is. Anderzijds kost het de regeling enige tijd om het scherm open te trekken als de RV te lang te hoog blijft. In de tussentijd kan de verdamping bijvoorbeeld sterk zijn toegenomen terwijl er door de regelacties (schermkier en raamkier) te weinig vocht wordt afgevoerd en de RV blijft stijgen. Als het raam uiteindelijk op de maximale kier van 5% staat, nadat het scherm met stappen op 3% kier is gezet (dan zijn er minimaal 45 minuten verstreken), dan moet de RV vervolgens nog eens een half uur te hoog blijven voordat het scherm, als laatste redmiddel om de RV te verlagen, volledig geopend wordt. De meeste uren liggen in de klassen rondom de 88% RV, dus rondom het setpoint. De gevolgen van de scenario's voor de gerealiseerde schermstanden is in Figuur 6.8 weergegeven.



Figuur 6.8. Histogram van de gerealiseerde schermstanden voor de 6 cases met schermopenen afhankelijk van combinatie buitentemperatuur en straling.

De toename van het aantal uren met hoge RV's voor met name de B en F case, resulteert ook in een toename van het aantal uren dat het scherm op een kier dan wel op de maximale kier van 3% staat. Uit deze cases kan niet een echte winnaar worden aangewezen, immers de beste energetische (laagste verbruik) scenario's resulteren in de meeste uren met hoge RV's. De resultaten van de referentie verlengd schermen (scherm openen bij 50 W/m² aan globale straling) wordt door de meeste cases (uitgezonderd case E) in ieder geval energetisch en meestal ook op RV verbeterd. In Tabel 6.8 is wederom de vermindering weergegeven van het PAR-licht dat door het gewas wordt

onderschept. Hierbij moet men zich goed realiseren dat deze getallen gelden voor de vergelijking van deze 6 cases. De case met het meeste aantal schermuren (B) laat tijdens de uren dat het licht is en dat het scherm meer dan 90% gesloten is nog 11.7 MJ aan diffuse PAR en 1 MJ aan directe PAR door. Voor case E met de minste schermuren is dit respectievelijk 14 en 1.6 MJ.

De gevolgen van de schermstrategieën van cases A tot en met F op de productie van tomaten staan weergegeven in Tabel 6.8.

Tabel 6.8. Tomatenproductie en economisch resultaat bij simulaties waarbij het scherm op basis van globale straling en temperatuur buiten geopend wordt.

Case	Gasverbruik (m ³ /m ² /seizoen)	Productie (kg/m ² /seizoen)	Productie (€/m ² /seizoen)	Gasbesparing ¹ (€/m ²)	Productieverlies ¹ (€/m ²)	Netto resultaat ¹ (€/m ²)
A	38.11	61.69	49.49	0.168	0.284	-0.116
B	37.91	61.61	49.35	0.192	0.416	-0.224
C	38.20	61.72	49.54	0.157	0.231	-0.074
D	38.08	61.67	49.34	0.171	0.428	-0.257
E	39.07	61.85	49.75	0.052	0.021	0.031
F	38.06	61.66	49.45	0.174	0.320	-0.146

¹ Ten opzichte van scherm openen bij 1 W/m² globale straling buiten (gasverbruik 39.51 m³/m²/seizoen en productie 61.86 kg/m²/seizoen).

De productie bij scenario E, waarin het scherm al bij lage stralingsniveaus geopend wordt (erg koud dan bij 100 W/m², boven 0 °C dan bij 5 W/m²) ligt op hetzelfde niveau als wanneer het scherm geopend wordt bij 1 W/m², onafhankelijk van de buitentemperatuur, terwijl wel 0.4 m³ gas per m² bespaard wordt. Bij alle andere cases is de productie tot 0.2 kg/m²/jaar lager. Wanneer de kostenbesparing door een lager energieverbruik (1.3-1.6 m³ gas/m²/jaar) van deze cases wordt afgewogen tegen het (financiële) productieverlies, blijkt dat het productieverlies het zwaarste weegt.

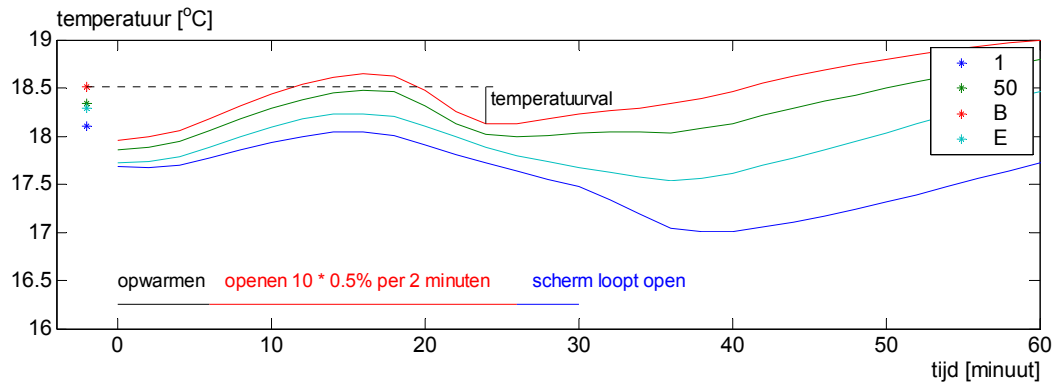
De weergegeven resultaten op het gebied van het gasverbruik zijn jaarrond energieverbruiken. Bij het openen van het scherm wordt echter ook vaak een piekafname gerealiseerd, met name als het scherm (te) snel geopend wordt. Als eerste stap is van bovengenoemde 6 cases van iedere dag de temperatuurval bepaald. Hiermee wordt bedoeld de temperatuurdaling (grootste temperatuurverschil ten opzichte van het setpoint verwarmen op het moment dat het scherm definitief wordt opengetrokken) van de kasluchttemperatuur die ontstaat binnen een half uur nadat het scherm geopend is. De tijd gaat in op het moment dat aan de voorwaarde 'scherm moet open' is voldaan. Deze voorwaarde kan vanuit een situatie met een kier of maximale vochtkierpositie ontstaan. Omdat bij de verschillende scenario's verschillende openlooptijden van het scherm horen, kan er een groot tijdsverschil tussen het moment waarop het signaal 'scherm moet open' en het moment dat het scherm geheel geopend is, zitten. Denk hierbij bijvoorbeeld ook aan de verhoging van de buistemperatuur en de bijbehorende wachttijd, zoals in paragraaf 6.2 besproken is. Omdat het alles bij elkaar meer dan een uur kan duren voordat het scherm uiteindelijk geheel open loopt, en er in deze tussentijd veel in het klimaat kan veranderen (globale straling, setpoint verwarmen), is er voor gekozen het setpoint verwarmen op het moment waarop het scherm definitief openloopt als referentie voor de temperatuurvalbepaling te nemen.

In Tabel 6.9 is aangegeven hoe vaak in een jaar een bepaalde temperatuurval voorkwam. Ter vergelijking zijn ook de resultaten van de regeling openen op alleen de globale straling (1 en 50 W/m²) in de tabel opgenomen.

Tabel 6.9. Aantal malen per jaar dat een temperatuurval voorkomt en de gemiddelde temperatuurval voor de cases A tot en met F en de cases scherm openen bij globale straling van 1 dan wel 50 W/m².

Scherm open	Temperatuurval					Keren scherm open [-]
	>0.2 °C [-]	>0.5 °C [-]	>1 °C [-]	>1.5 °C [-]	Gemiddelde selectie [°C]	
1 W/m ²	110	105	24	0	1.3	134
50 W/m ²	94	91	20	0	0.8	130
Case A	87	85	19	1	0.7	133
Case B	76	76	17	3	0.8	126
Case C	90	85	17	0	0.8	133
Case D	86	85	20	0	0.8	132
Case E	109	105	16	0	1.1	133
Case F	85	84	18	0	0.8	132

Door de verschillende regelingen wordt het scherm op totaal verschillende momenten van de dag geopend. Daarmee varieert ook het setpoint verwarmen, de buitentemperatuur en de globale straling waarbij het scherm geopend wordt. Hierdoor is het lastig een éénduidige verklaring te vinden voor de verschillen in temperatuurval die zijn ontstaan. Zo is bij case B die de meeste schermuren maakt, op het moment dat het scherm definitief opengaat, het setpoint verwarmen gemiddeld 18.5 °C terwijl deze bij case E gemiddeld 17.9 °C is. Daarnaast is de kasluchttemperatuur bij case B gemiddeld hoger (0.1 °C) dan bij case E (gemiddeld 0.4 °C). Op het moment van openen is bij case B de globale straling gemiddeld 67 W/m², waar deze bij case E slechts 15 W/m² is. Opvallend in deze tabel is dat het aantal malen dat er duidelijk een temperatuurval voorkomt in de cases B en F waar de meeste schermuren worden gemaakt, niet kleiner is, maar dat de temperatuurval gemiddeld over het jaar gezien wel kleiner is. Case E blijkt in aantallen keren dat er een temperatuurval optreedt niet op te vallen, maar als er zich een temperatuurval voordoet, is deze gemiddeld gesproken wel groter. De enige verklaring hiervoor is dat het verwarmingssysteem later en trager zal reageren doordat bij deze cases de ruimte temperatuur vaak boven het setpoint verwarmen ligt, wat meestal veroorzaakt wordt door de minimumbuistemperatuur die rond zonsopkomst circa 40 °C en bij zonsondergang en tijdens de nacht 35 °C is. Op het moment dat het sein 'scherm moet open' wordt gegeven, wordt er wel een buistemperatuurverhoging doorgevoerd, maar de buizen zijn aan het afkoelen om de ruimtetemperatuur te laten dalen. Deze buistemperatuurverhoging heeft dan minder effect dan in een situatie waar de buizen al warm zijn om de ruimtetemperatuur te verhogen. In Figuur 6.9 zijn voor de cases B en E en de 1 en 50 W/m² openstrategie de gemiddelde temperatuurverlopen (en temperatuurval) van de kasluchttemperatuur weergegeven vanaf het moment dat het signaal 'scherm moet open' wordt gegeven. Dat de in de figuur aangegeven temperatuurval niet overeenkomt met de temperatuurval uit Tabel 6.4 komt doordat de in de figuur gepresenteerde lijnen gemiddelden zijn van waarden die in de tijd gezien op verschillende momenten hun laagste waarden kunnen hebben. Met andere woorden, het moment van de laagste temperatuur is in de tijd gezien niet voor alle keren dat er temperatuurval optreedt gelijk.



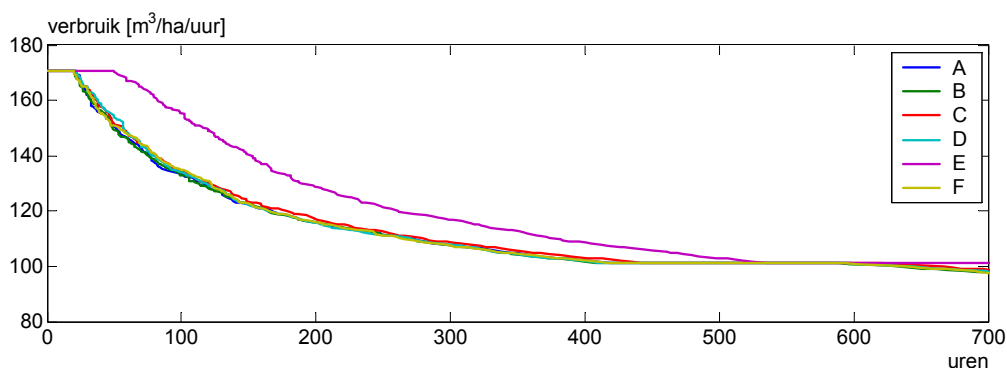
*Figuur 6.9. De gemiddelde temperatuurverlopen (en temperatuurval) van de kasluchttemperatuur vanaf het moment dat het signaal 'scherm moet open' wordt gegeven voor de cases B en E en de 1 en 50 W/m² openstrategie. De * geven de setpointtemperatuur op het moment van definitief openen aan.*

In deze figuur zijn ook nog enkele fasen tijdens het openen gegeven. Op het moment dat de controller bepaalt dat het scherm open moet, wordt er een buistemperatuurverhoging doorgevoerd en volgt er een wachttijd volgens de tabel uit paragraaf 4.2. Aangezien de buitentemperatuur gemiddeld over alle dagen dat het scherm gebruikt wordt circa 5 á 6 °C is op het moment van openen, zal de wachttijd een minuut of 7 bedragen. Daarna wordt het scherm in stappen van 0.5% met een wachttijd van 2 minuten geopend tot een schermstand van 95%, waarna het in één keer geheel openloopt. Het temperatuurverloop (temperatuurval) komt niet helemaal overeen met wat men zou verwachten op basis van de 3 weergegeven tijdfasen omdat de lijnen een gemiddeld temperatuurverloop weergeven over alle dagen dat het scherm geopend is. Het moment waarop de laagste temperatuur bereikt wordt, is bij case E en bij openen bij 1 W/m² globale straling later ten opzichte van het moment van scherm openen bij de overige cases. Dit komt overeen met de gemiddeld grotere temperatuurval van deze 2 cases.

De resultaten met een vervuild scherm laten vergelijkbare gevolgen zien als in paragraaf 6.2.2 besproken is. Bij gebruik van een vervuild scherm neemt het energieverbruik fractioneel toe (bij de toepassingen met veel scherm uren). Door het vuile scherm komt er in vergelijking tot de vergelijkbare situatie met een schoon scherm tot 5% minder PAR op het gewas terecht. Voor het scherm openen bij 50 W/m² betekent dat de productie met nog eens 0.4 kg per m² per jaar afneemt.

Verbruiksafname patroon

Evenals de afname patronen in paragraaf 6.2.2, blijkt ook bij deze cases er weinig verschil te zijn zoals uit Figuur 6.11 blijkt, waarin de 700 uur met de hoogste uurafname van deze 6 cases zijn gepresenteerd. Case E is de case met veruit de minste schermuren (1748) gevolgd door case C (1938) dat het op 2 na hoogste aantal uren met het maximale gasverbruik noteert.



Figuur 6.11. Jaarbelastingsduurkrommen van de 700 hoogste uurverbruiken van 6 cases waarbij het scherm bij een combinatie van buitentemperatuur en stralingsniveau geopend is.

Samenvattend

In de praktijk wordt het scherm vaak niet alleen geopend op basis van globale straling buiten, maar op een combinatie van straling en buitentemperatuur. Wanneer het scherm op zowel buitentemperatuur als op straling geopend wordt, is het aantal schermuren hoger en het energieverbruik lager dan wanneer het scherm alleen op straling wordt geopend. Het aantal uren met hogere relatieve luchtvochtigheden neemt dan echter wel toe. Voor de verschillende schermopeningstabellen die zijn opgesteld geldt dat ze wel heel verschillend lijken, maar dat het aantal schermuren, het energieverbruik (m^3 gas/ m^2 /jaar) en het piekverbruik op een zeer vergelijkbaar niveau liggen, te vergelijken met de 'verlengd schermen' behandeling in het experiment (scherm openen bij 50 W/m^2 straling). De enige schermopeningstabel die een hoger energieverbruik realiseert is de tabel die vergelijkbaar is met de 'standaard schermen' behandeling in het experiment (scherm openen bij 5 W/m^2). Deze schermopeningstrategie realiseert dan ook een productie vergelijkbaar met de standaard schermen behandeling, terwijl alle andere schermopeningstrategieën tot 0.2 kg tomaten per m^2 per jaar minder produceren.

6.4 Scherm openen afhankelijk van het temperatuurverschil boven - onder het scherm

In het experiment zijn ook temperatuurmetingen boven het scherm uitgevoerd (zie beschrijving in paragraaf 3.8). Hoewel de resultaten van deze metingen niet éénduidig waren, is via scenarioberekeningen verder onderzoek gedaan om tot een regeling te komen waarbij het moment van openen van het scherm wordt bepaald door het verschil in temperaturen tussen de compartiment boven en onder het scherm (ΔT -scherm). De gedachte hierachter is dat door opwarming van het bovencompartiment door de zon, bij het openen de temperatuurverval gereduceerd wordt en er uiteindelijk minder bijgestookt hoeft te worden om de setpointtemperatuur te kunnen handhaven. In tegenstelling tot de andere cases wordt het scherm hier pas geopend als de ΔT -scherm een ingesteld minimum heeft bereikt, onafhankelijk van de globale straling, met een openloopsnelheid gelijk aan de referentie (0.5% openen per 2 minuten tot 95%). Er wordt pas gecontroleerd of aan het ΔT -scherm criterium wordt voldaan als de globale straling meer is dan 1 W m^2 . Het scherm werd in dit scenario aan het einde van de dag gesloten als de straling minder werd dan 2 W m^2 .

In dit scenario wordt het scherm geopend bij een temperatuurverschil boven en onder het scherm van 4, 6, 8, 10 of $12 \text{ }^\circ\text{C}$. Er is voor gekozen om een minimale ΔT -scherm van $4 \text{ }^\circ\text{C}$ aan te houden omdat er is gebleken dat het te vaak voorkomt dat er weersomstandigheden zijn die er voor zorgen dat het bovencompartiment (te) koud blijft, terwijl de temperatuur onder het scherm door het licht wel wordt opgewarmd en het gewas (fors) gaat verdampen, met alle vochtproblemen (vochtafvoer) van dien (zie ook paragraaf 4.2). Het scherm wordt ook geopend als niet aan de ΔT -scherm voorwaarde wordt voldaan, maar de RV meer dan een half uur boven het setpoint RV blijft als het scherm op de maximale kierstand staat en het raam geopend is om vocht af te voeren (maximaal 5%).

In Tabel 6.10 zijn de effecten van de verschillende ΔT regelingen op RV en gasverbruik weergegeven.

Tabel 6.10. Schermuren en gevolgen van het schermen op de RV, PAR op gewasniveau en het energieverbruik voor 6 verschillende schermopenen strategieën op basis van het temperatuurverschil boven en onder het scherm.

ΔT scherm open [°C]	Scherm uren [-]	Uren ¹⁾ RV < 60 [-]	Uren ¹⁾ RV_> 85 [-]	Uren ¹⁾ RV > 90 [-]	Uren ¹⁾ RV>Setp. [-]	PAR (dif) op gewas ¹⁾ [MJ/m ²]	PAR (dir) op gewas ¹⁾ [MJ/m ²]	Gasverbruik [m ³ /m ² /jaar]
4	2012	28	832	182	180	15.28	2.24	38.3
6	1904	29	804	178	162	16.10	2.36	38.7
8	1810	29	795	175	151	17.14	2.77	39.1
10	1735	31	788	175	146	18.20	3.10	39.5
12	1709	38	783	177	151	18.63	3.32	39.6

¹⁾ Omdat verschillende openstrategieën tot verschillen in gerealiseerde schermuren leiden, zijn hier om de resultaten te kunnen vergelijken, voor alle cases alle schermuren van de case met een temperatuurverschil van 4 °C tussen het boven en ondercompartiment van het scherm op het moment van openen genomen.

Vergelijk van deze regeling met de regeling waarbij het scherm wordt geopend op een tabel globale straling en buitentemperatuur (paragraaf 6.2.3) laat zien dat deze regeling gemiddeld gesproken wat slechter presteert in energieverbruik (jaarrondverbruik) bij vergelijkbare aantallen schermuren. Wel valt op dat er minder uren zijn waarbij de RV boven de 85% ligt. De uren met een overschrijding van het RV setpoint is duidelijk lager (vergelijk met Tabel 6.7).

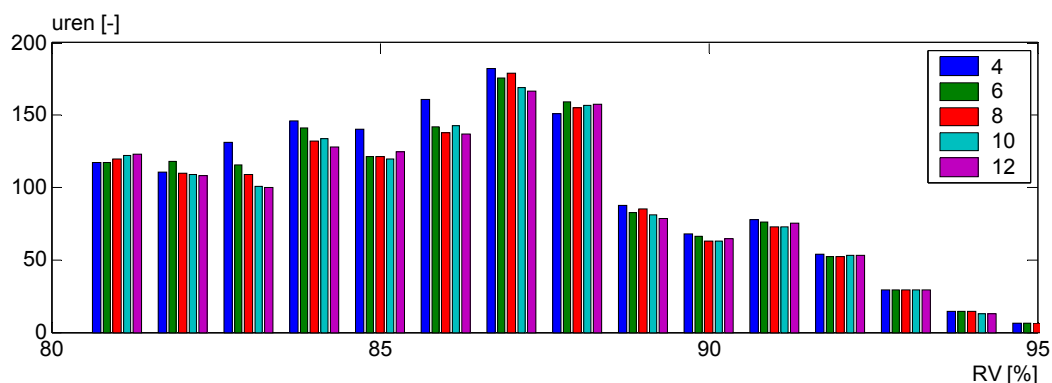
In Tabel 6.11 is te zien wat de gevolgen zijn van het openen van het scherm op het temperatuurverschil boven – onder het scherm op de productie van tomaten. Wanneer een temperatuurverschil van 12 °C wordt aangehouden zijn zowel gasverbruik als productie nagenoeg hetzelfde als wanneer het scherm wordt geopend zo gauw er licht is (openen bij 1 W/m² straling). Naarmate het openen van het scherm langer op zich laat wachten (lager temperatuurverschil boven – onder) worden er meer schermuren gemaakt (Tabel 6.10). Het gasverbruik daalt dan (met 1.3 m³/m²/seizoen), maar de productie ook (met 0.3 kg/m²/seizoen). De kostenreductie door het gebruik van minder gas blijkt echter niet op te wegen tegen de opbrengstreductie door het lichtverlies (Tabel 6.11).

Tabel 6.11. Gasverbruik, tomatenproductie en economisch resultaat bij simulaties waarbij het scherm op basis van het verschil in temperatuur boven en onder het scherm geopend wordt.

ΔT scherm open [°C]	Gasverbruik (m ³ /m ² /seizoen)	Productie (kg/m ² /seizoen)	Productie (€/m ² /seizoen)	Gasbesparing ¹ (€/m ²)	Productieverlies ¹ (€/m ²)	Netto resultaat ¹ (€/m ²)
4	38.17	61.54	49.26	0.160	0.509	-0.349
6	38.54	61.60	49.36	0.117	0.412	-0.295
8	38.95	61.69	49.50	0.067	0.266	-0.199
10	39.34	61.80	49.65	0.020	0.116	-0.096
12	39.49	61.84	49.72	0.002	0.044	-0.042

¹ Ten opzichte van scherm openen bij 1 W/m² globale straling buiten (gasverbruik 39.51 m³/m²/seizoen en productie 61.86 kg/m²/seizoen)

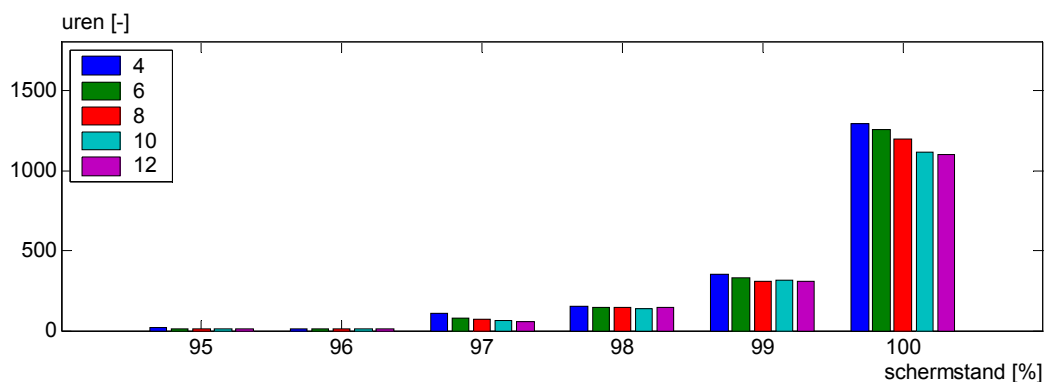
In Figuur 6.12 zijn de gerealiseerde RV's van de verschillende cases op de uren dat er geschermd is (dit is voor alle cases de schermuren van case ΔT 4) gepresenteerd.



Figuur 6.12. Histogram van de gerealiseerde RV's voor de 5 cases met een ΔT regeling voor alle uren tijdens de teelt waar het scherm in case ΔT 4 meer dan 90% gesloten is geweest.

Uit deze figuur is duidelijk op te maken dat er een behoorlijk aantal uren met een (forse) RV overschrijding is. Doordat de cases met een kleine ΔT ook veel uren overdag schermden, is bij een RV niveau van rond de 85% ook een groot aantal uren te vinden voor de cases ΔT 4 en 6. Overdag is het setpoint RV immers 85%, waar deze in de nacht 88% is. Er zijn voor alle cases relatief kleine verschillen in uren met grote RV overschrijdingen.

In Figuur 6.13 zijn de gerealiseerde schermstanden weergegeven. Uit deze figuur is goed op te maken dat de ΔT 4 regeling de meeste uren op de maximale vochtkierstand van 3% heeft gestaan.



Figuur 6.13. Histogram van de gerealiseerde schermstanden voor de 5 cases met schermopenen afhankelijk van ΔT tussen boven en ondercompartiment van het scherm.

Deze cases zijn niet direct vergelijkbaar met cases uit de voorgaande paragrafen omdat de regeling zich hier met name richt op het openen van het scherm en dus minder op het sluiten. Voor het sluiten is de standaard instelling gebruikt (scherm sluit bij 2 W/m^2). Het moment van openen wordt door deze regeling uitgesteld. Zo blijft het scherm in december en januari vele dagen dicht liggen in de cases met een kleine ΔT . Worden de resultaten van case ΔT 12 uit deze tabel vergeleken met case 'scherm open bij 2 W/m^2 ' in Tabel 6.1 uit paragraaf 6.2.2, dan blijkt dat het aantal schermuren vergelijkbaar is. Met andere woorden regelen op een ΔT van $12 \text{ }^\circ\text{C}$ levert geen extra schermuren op.

In Tabel 6.12 zijn de gevolgen van deze regeling op de temperatuurval weergegeven.

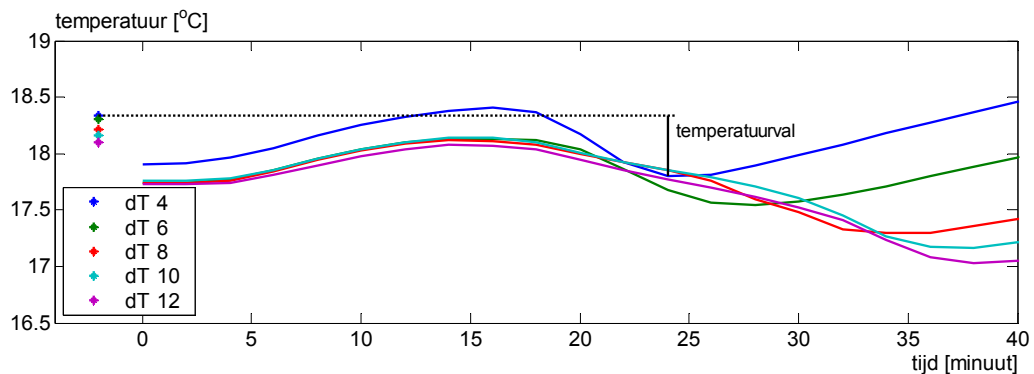
Tabel 6.12. Aantal malen per jaar dat temperatuurval voorkomt, de gemiddelde temperatuurval voor de cases $\Delta T 4$ tot en met $\Delta T 12$ en de gemiddelde globale straling waarbij het scherm geopend is.

Scherm open dT [°C]	Globale straling [W/m ²]	Temperatuurval				Gemiddelde selectie ¹⁾ [°C]
		>0.2 °C [-]	>0.5 °C [-]	>1 °C [-]	>1.5 °C [-]	
4	60	80	72	11	2	0.7
6	46	98	88	11	3	0.9
8	29	105	102	15	0	1.1
10	14	110	106	20	1	1.2
12	6	109	106	22	0	1.2

¹⁾ De gemiddelde temperatuurval (en de overige gepresenteerde getallen in deze tabel) zijn een selectie van alle keren dat het scherm is geopend en er dus potentieel temperatuurval kon ontstaan. Alleen de keren dat het scherm geopend is en waarbij het raam niet meer dan 5% geopend is geweest rondom het moment van definitief openlopen en het scherm niet binnen een uur na te zijn geopend weer dicht loopt zijn geselecteerd.

Dat de gemiddelde temperatuurval bij kleinere ΔT 's niet spectaculair afneemt, is het gevolg van de vochtregeling. Bij de $\Delta T 4$ regeling komt het vaker voor dat het scherm op vocht wordt open gedwongen. Op het moment dat het scherm wordt vrijgegeven om helemaal open te lopen komt de standaard vochtregeling op de ramen in. Het vocht is dan te hoog, zodat naast het openlopen van het scherm er ook (mogelijk fors) op de RV gelucht wordt, wat de temperatuurval verergert (het raam kan al op een maximale vochtier van 5% staan als het scherm op de maximale kierstand staat). Het aantal malen met grote temperatuurval vermindert bij $\Delta T 4$, onder andere omdat er een aantal dagen is dat het scherm dicht blijft. Dit zullen met name koude dagen zijn, waar de potentiële temperatuurval het grootst is. De prestaties van deze regeling zijn niet echt beter dan die van de in paragraaf 6.2.3 besproken regeling.

In Figuur 6.14 zijn de gemiddelde kasluchttemperatuurverlopen (en temperatuurval) vanaf het moment dat het signaal 'scherm moet open' wordt gegeven van de 5 ΔT cases weergegeven.



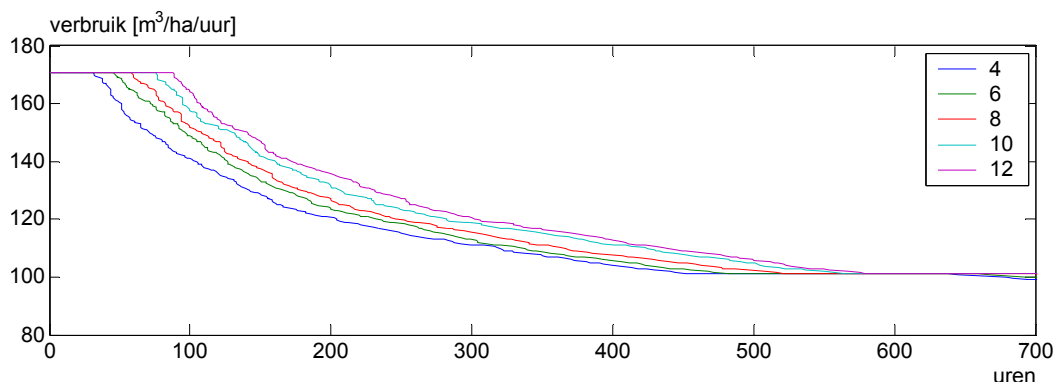
Figuur 6.14. De gemiddelde temperatuurverlopen (en temperatuurval) van de kasluchttemperatuur vanaf het moment dat het signaal 'scherm moet open' wordt gegeven voor de 5 ΔT cases. De * geven de setpointtemperatuur op het moment van openen weer.

Doordat deze lijnen weergaves zijn van het gemiddelde van 80 tot 110 keer in het jaar dat het scherm is open gelopen, valt het koudste moment bij de $\Delta T 4$ regeling veel eerder dan bij bijvoorbeeld de $\Delta T 12$ regeling. Bij de $\Delta T 4$ regeling is op vele dagen de ruimtetemperatuur een half uur na het openen gemiddeld al weer in temperatuur

gestegen ten opzichte van de ruimtetemperatuur op het moment van openen. Dat de verschillen tussen de cases na circa 35 minuten zoveel (tot circa 1.5 °C) op kunnen lopen, komt doordat het bij de ΔT_4 regeling gemiddeld gesproken veel later op de dag is, zodat het buitenklimaat (licht) het kasklimaat meer beïnvloed heeft dan bij de ΔT_{12} regeling. Daarnaast is er een fors verschil in temperatuurval tussen de verschillende cases (Tabel 6.12).

Verbruiksafname patroon

Evenals de afname patronen in voorgaande paragrafen, blijkt ook bij deze cases dat er redelijk weinig verschillen (tot circa 40 uur) zijn in uren met maximaal gasverbruik zoals uit Figuur 6.15 blijkt, waar de 700 uur met de hoogste uurafname van deze 5 cases zijn gepresenteerd.



Figuur 6.15. Jaarbelastingduurkrommen van de 700 hoogste uurverbruiken van 5 cases waarbij het scherm pas bij een minimaal temperatuurverschil tussen het compartiment boven en onder het scherm geopend is.

Uit deze figuur blijkt dat de verbruiksafnamepatronen logisch verlopen met het temperatuurverschil over het scherm waarbij het scherm geopend mag worden. Dit komt ook overeen met de jaarverbruiken zoals in Tabel 6.10 zijn gegeven. Ook de case waarbij het scherm geopend mag worden met het kleinste temperatuurverschil over het scherm bereikt altijd nog 30 uur de maximale afname.

Samenvattend

Naast het sturen van het moment van schermopening op basis van licht of een combinatie van licht en temperatuur, kan ook het temperatuurverschil boven – onder het scherm als openingscriterium gebruikt worden. Wanneer een temperatuurverschil boven – onder het scherm (ΔT -scherm) van 12 °C wordt aangehouden zijn zowel het gasverbruik als productie nagenoeg hetzelfde als wanneer het scherm wordt geopend zodra er licht is (openen bij 1 W/m²). Naarmate het openen van het scherm langer op zich laat wachten (kleiner temperatuurverschil boven – onder het scherm) worden er meer schermuren gemaakt. Dit aantal loopt op van 1709 bij een ΔT -scherm van 12 °C tot 2012 bij ΔT -scherm van 4 °C. Het energieverbruik loopt daarmee terug van 39.6 m³ gas/m²/jaar (ΔT -scherm van 12 °C) naar 38.3 m³ gas/m²/jaar (ΔT -scherm van 4 °C). De prestaties van de regeling waarbij het scherm geopend wordt afhankelijk van de ΔT -scherm komen daarmee overeen met de regeling waarbij het scherm geopend wordt op een combinatie van straling en buitentemperatuur. Het jaarrond regelen op vaste instellingen van ΔT -scherm levert geen verbetering op ten opzichte van jaarrond regelen op straling en buitentemperatuur.

6.5 Openingsnelheid afhankelijk van de ΔT -scherm op het moment van openen

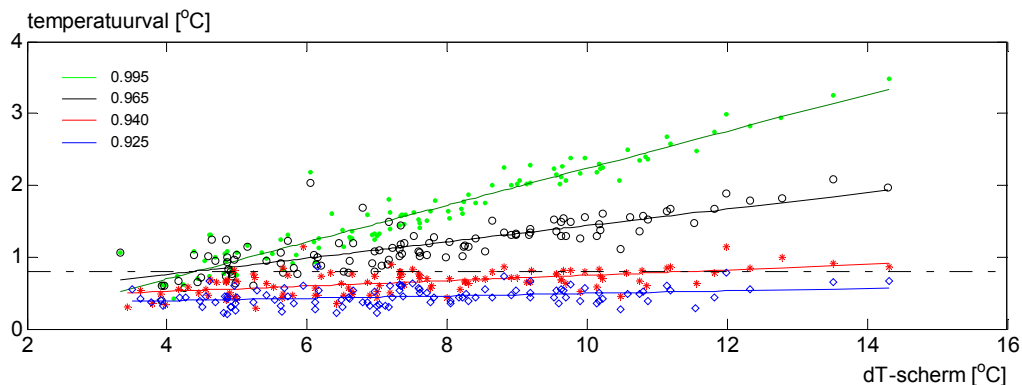
De temperatuur boven het scherm is afhankelijk van een groot aantal variabelen zoals de buitentemperatuur, de bewolgingsgraad, windsnelheid, eventuele neerslag en de temperatuur onder het scherm. Bij alle in voorgaande paragrafen besproken cases is alleen het moment van openen gevarieerd. Was de openingsprocedure eenmaal gestart, dan is het scherm tijdens de openingsprocedure altijd in 10 stappen van 0.5% met een wachttijd van 2 minuten geopend. In de praktijk wordt het scherm vaak (meestal op gevoel) bij kouder weer trager geopend.

In deze paragraaf is gekeken of er een relatie te vinden is tussen het temperatuurverschil boven en onder het scherm, de gevolgde openingsnelheid en de eventuele temperatuurval. Immers, als hier een eenduidige relatie uit zou volgen, dan zou het scherm beter volgens deze strategie geopend kunnen worden, waardoor temperatuurval en piekverbruiken voorkomen kunnen worden en het scherm toch zo snel mogelijk geopend kan worden om zoveel mogelijk licht in de kas te krijgen.

In het simulatiemodel KASPRO wordt een bovencompartiment met een eigen temperatuur gecreëerd als het scherm gesloten is. Daarnaast zijn in het model mogelijkheden om de openingsnelheid te beïnvloeden. Dit is de stap die per keer gemaakt wordt, het aantal stappen en de wachttijd tussen 2 stappen (veelvoud van 2 minuten). Met het model is het dus mogelijk om in een paar rekenexercities de openingsnelheid te variëren. In een 4-tal simulaties is de standaard openingsprocedure (in KASPRO) gevolgd (met stappen van 0.5% per 2 minuten openlopen totdat er een schermstand X bereikt wordt (fractie Ineens Open) waarna het scherm ineens helemaal verder openloopt. Hierbij is met een 'fractie Ineens Open' van tussen de 0.995 en 0.925 gewerkt. In alle cases in de voorgaande paragrafen was dit altijd 0.95. Voor iedere berekening is op de dagen dat het scherm gebruikt en geopend wordt, de temperatuurval bepaald in relatie tot het temperatuurverschil boven en onder het scherm (ΔT -scherm). De dagen tijdens de teeltwisseling zijn daarbij niet meegenomen. De absolute ondergrens voor de 'fractie Ineens Open' is 0.9, daaronder neemt de nauwkeurigheid van de berekende temperatuur in het bovencompartiment te veel af. Per case is bekeken welke grenzen realistisch zijn, immers wordt er met een wachttijd van 6 minuten tussen de schermstappen van 0.5% gewerkt, dan zou het meer dan 2 uur duren voordat het scherm op 90% staat. In de tussentijd kunnen een groot aantal andere parameters (denk aan globale straling en of RV) het klimaat al zodanig hebben beïnvloed dat het gerealiseerde klimaat geen gevolg meer is van het schermopenen maar van deze andere klimaatfactoren.

De temperatuur dip is gedefinieerd als het grootste temperatuurverschil van de kaslucht onder het scherm en het setpoint verwarmen tussen het moment waarop het scherm definitief wordt opengetrokken en 20 minuten na het ineens openlopen van het scherm. Het moment van openen is bij deze 4 cases volgens de referentie waarbij het scherm altijd opengaat zodra er een globale straling is bereikt van 5 W/m^2 .

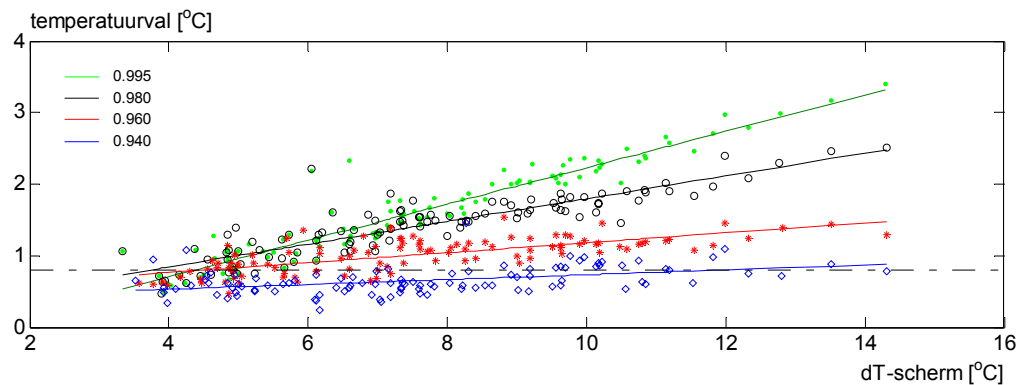
De resultaten van deze 4 berekeningen zijn in Figuur 6.16 gepresenteerd. In deze figuur is voor alle dagen dat het scherm wordt gebruikt (uitgezonderd de teeltwisselingsperiode en de eerder genoemde selectiecriteria) de temperatuurval gegeven die ontstaat nadat het scherm is geopend. Omdat het mogelijk is dat op het moment dat de temperatuurval wordt gemeten ook de ramen open kunnen staan als gevolg van een temperatuur- of vochtoverschrijding en dit de temperatuurval ernstig kan verstoren (vergroten), zijn de dagen dat het raam op enig moment in de periode tussen scherm openen en het moment dat de laagste temperatuur bereikt is meer dan 5% geopend is geweest, buiten beschouwing gelaten. Voor de 4 verschillende openingsnelheden (schermstand waarna het scherm in één keer geheel geopend wordt) zijn middels lineaire regressie 'Best Fit' lijnen in de figuur weergegeven. Geheel willekeurig is op een temperatuurval-niveau van $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ een horizontale lijn in de figuur getrokken. De snijpunten met de 'Best Fit' lijnen van de verschillende openingsnelheden kunnen nu gebruikt worden om het scherm, afhankelijk van de ΔT -scherm op snelheid te openen en daarbij de temperatuurval te beperken.



Figuur 6.16. Temperatuurval met het bijbehorende temperatuurverschil tussen boven en onder het scherm bij 4 verschillende scherm ineens open strategieën en een wachttijd van 2 minuten tussen de afzonderlijke stappen.

Uit de figuur blijkt dat een ΔT over het scherm van minder dan 4 °C, waarbij het raam vrijwel volledig gesloten is, slechts sporadisch voorkomt. Immers de dagen dat er op de geselecteerde tijdstippen op enig moment meer dan 5% raam in stand zijn niet meegenomen. Indien er naar correlaties tussen de ΔT over het scherm en de temperatuurval wordt gekeken, blijkt de case waarbij het scherm na 99.5% al in één keer open loopt veruit de hoogste correlatie te hebben (r^2 0.92). Bij de case die pas bij 92,5% schermstand opent (r^2 0.11), (dan is het scherm al meer dan 30 minuten aan het openlopen) komt het regelmatig voor dat er in het geheel geen temperatuurval optreedt. Hier is de warmtestoot in de buizen en de buisregeling (op kasluchttemperatuur) zodanig dat er geen temperaturodaling optreedt. Indien het openen erg lang duurt, kan het gevolgen hebben voor de gewasgroei.

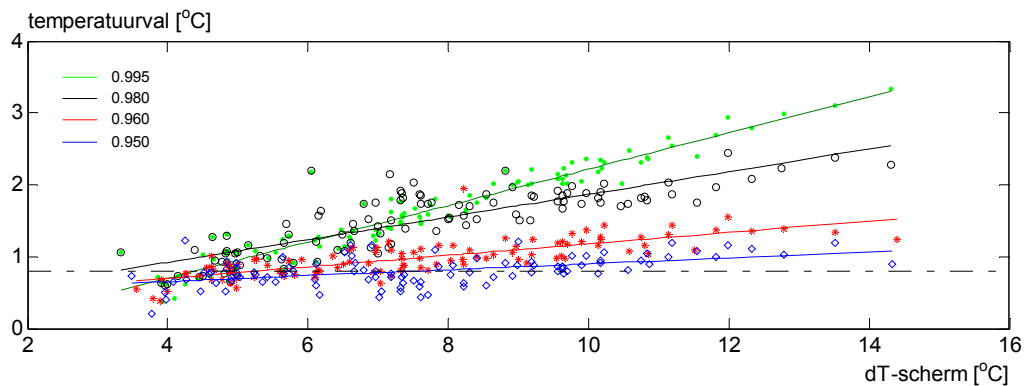
In Figuur 6.17 is de temperatuurval en het temperatuurverschil tussen boven en onder het scherm bij 4 verschillende scherm ineens open strategieën met een wachttijd van 4 minuten tussen de afzonderlijke stappen weergegeven.



Figuur 6.17. Temperatuurval met het bijbehorende temperatuurverschil tussen boven en onder het scherm bij 4 verschillende scherm ineens open strategieën en een wachttijd van 4 minuten tussen de afzonderlijke stappen.

Bij deze case, met een wachttijd van 4 minuten, is er voor gekozen om als grootste ' fractie ineens open' 0.94 te kiezen. Hierbij doet het scherm er al 30 minuten over om de maximale kierstand te bereiken. Daarbij blijkt ook dat de correlatie van de gefitte lijn van deze case erg laag is.

In Figuur 6.18 is de temperatuurval en het temperatuurverschil tussen boven en onder het scherm bij 4 verschillende scherm ineens open strategieën met een wachttijd van 6 minuten tussen de afzonderlijke stappen weergegeven.



Figuur 6.18. Temperatuurval met het bijbehorende temperatuurverschil tussen boven en onder het scherm bij 4 verschillende scherm ineens open strategieën en een wachttijd van 6 minuten tussen de afzonderlijke stappen.

De correlatie tussen de temperatuurval en de ΔT -scherm is bij deze strategie voor alle cases wat lager dan in de strategieën met 4 en 2 minuut wachttijd.

De variatie die in dit scenario is aangelegd in de snelheid van openen en de schermstand waarbij het scherm ineens geheel opengaat (Tabel 6.13) heeft weinig effect op het gasverbruik en de productie. Voor een wachttijd van 2 minuten tussen de schermstappen geldt dat het volledig openen van het scherm vanaf 92.5% schermstand een beter resultaat geeft dan volledig openen vanaf 99.5% schermstand. Voor wachttijden van 4 en 6 minuten geldt het omgekeerde. Dit is het gevolg van de lengte van de procedure om het scherm open te krijgen. Immers, voordat het scherm een schermstand van 92.5% met stappen van 0.5% en een wachttijd van 6 minuten heeft bereikt zijn 90 minuten verstreken. Indien dit dagelijks gebeurt, zouden er op jaarbasis al snel 200 schermen meer gemaakt worden. In de voorgaande scenario's is gerekend met een standaard manier van schermopenen waarbij het scherm in 10 stappen van 0.5% met een wachttijd van 2 minuten wordt geopend. Uit Tabel 6.13 blijkt dat de aangelegde variaties in wachttijd en schermstand waarbij het scherm ineens wordt geopend geen verbetering op te leveren ten opzichte van de beschreven standaard manier van schermopenen.

Tabel 6.13. Gasverbruik, tomatenproductie en economisch resultaat bij simulaties van een aantal regelingen waarbij het scherm bij een vaste schermstand (99.5% en 92.5%) in één keer definitief wordt opgetrokken; 3 wachttijden (2, 4 en 6 minuten) tussen 2 schermstappen van 0.5%. Schermopeningsprocedure wordt gestart zodra de globale straling meer dan 5 W/m² is.

Wacht tijd (min)	Schermsstand (%)	Gasverbruik (m ³ /m ² /seizoen)	Productie (kg/m ² /seizoen)	Productie (€/m ² /seizoen)	Gasbesparing ¹ (€/m ²)	Productieverlies ¹ (€/m ²)	Netto resultaat ¹ (€/m ²)
2	99.5	39.41	61.86	49.76	-0.019	0.000	-0.019
2	92.5	39.15	61.85	49.74	0.010	0.027	-0.017
4	99.5	39.41	61.85	49.76	-0.019	0.010	-0.029
4	92.5	38.98	61.77	49.64	0.032	0.129	-0.097
6	99.5	39.38	61.86	49.76	-0.016	0.000	-0.016
6	92.5	38.83	61.73	49.59	0.050	0.180	-0.130

¹ Ten opzichte van scherm openen bij 5 W/m² globale straling buiten (gasverbruik 39.25 m³/m²/seizoen en productie 61.86 kg/m²/seizoen)

Als een temperatuurval van 0.8 °C (horizontale lange streep – korte streep lijn in de voorgaande figuren) aanvaardbaar wordt geacht, kan de gemiddelde opening worden bepaald afhankelijk van de ΔT op het moment van het scherm moet open signaal, waarna het scherm ineens geopend mag worden. Daarna zal vervolgens een temperatuurval van gemiddeld circa 0.8 °C optreden. Zo kan er met behulp van de figuren een tabel (Tabel 6.14) gemaakt worden waar afhankelijk van de ΔT -scherm (temperatuur onder het scherm – temperatuur boven het scherm) het moment van ineens openlopen bepaald wordt. In de tabel zijn de ΔT waarden weergegeven, waarbij het scherm ineens opgetrokken mag worden om gemiddeld door het jaar een temperatuurval van 0.8 °C te bereiken. Tussen de aangegeven waarden is bij de vervolgberekeningen waar nodig lineair geïnterpoleerd. Met de waarden uit deze tabel (Tabel 6.14) is vervolgens een modelberekening gedaan, waarbij gecontroleerd kan worden of deze regeling beter presteert dan de standaardregeling.

Tabel 6.14. Schermstand waarbij het scherm ineens geheel geopend wordt afhankelijk van de ΔT -scherm.

Scherm helemaal openen [%]	ΔT [°C] bij dip van 0.8 °C		
	2 minuut wachttijd	4 minuut wachttijd	6 minuut wachttijd
99.5	4.4	4.4	4.4
98.0			
96.5	4.5		
96		4.5	5.2
95			7.6
94.0	11.5	12	
92.5	27.8		

Met de in Tabel 6.14 weergegeven waarden zijn nieuwe simulatieberekeningen uitgevoerd. De schermstand waarbij het scherm in 1 keer volledig wordt opgetrokken, op het moment dat het signaal 'scherm moet open' gegeven wordt, is daarbij bepaald door de ΔT -scherm op dat moment. Er is lineair geïnterpoleerd tussen de waarden in bovenstaande tabel. Wordt bijvoorbeeld het scherm geopend met een wachttijd van 2 minuten en op het moment dat de regelaar het signaal 'scherm moet open' geeft is er een ΔT van 11.5 °C, dan wordt het scherm in één keer helemaal geopend zodra er een schermstand van 94% is bereikt.

Naast vaste schermstanden waarbij het scherm altijd in één keer wordt geopend, is in deze tabel ook een combinatie opgenomen, die bepaald is met de resultaten van Tabel 6.14. Afhankelijk van de ΔT -scherm op het moment dat het signaal scherm moet open wordt gegeven, wordt met behulp van Tabel 6.15 bepaald bij welke schermstand het scherm helemaal open loopt.

Uit Tabel 6.15 blijkt dat de combinatie als een soort gemiddelde van de groep (met 1 wachttijd) presteert. Daarbij zijn de verschillen tussen de wachttijden zo klein, dat voor de combinatie met een wachttijd van 2 minuten tussen de stappen van het scherm gekozen kan worden. Hierbij wordt er evenveel energie verbruikt als bij de andere wachttijden, maar treed wel net iets meer licht toe.

Tabel 6.15. Lichtsom, gasverbruik en uren met maximale gasafname en de temperatuurval voor een aantal regelingen met een vaste schermstand waarbij het scherm in één keer definitief wordt opengetrokken en de combinatie hiervan voor 3 wachttijden (2,4 en 6 minuut) tussen 2 schermstappen.

Wachttijd	Schermstand ineens openen	Lichtsom PAR [MJ/m ²] ¹⁾	Gasverbruik [m ³ /m ² /jaar]	Uren maximale gasafname	Gemiddelde temperatuurval [°C]
2	99.5	328.79	39.5	86	1.6
	96.5	328.72	39.4	87	1.3
	94	328.56	39.3	68	1.1
	92.5	328.42	39.3	69	1.0
	combinatie	328.65	39.4	73	1.2
4	99.5	328.79	39.5	87	1.5
	98	328.72	39.4	76	1.2
	96	328.53	39.3	62	0.9
	94	328.22	39.2	48	0.7
	combinatie	328.64	39.4	74	1.2
6	99.5	328.78	39.5	85	1.5
	98	328.66	39.4	63	1.3
	96	328.30	39.2	52	0.9
	95	328.04	39.1	40	0.8
	combinatie	328.64	39.4	75	1.2

¹⁾ Som van PAR direct, PAR diffuus in de periode dat het scherm dicht zou kunnen (15 oktober - 1 mei, met uitzondering van de teeltwisseling tussen 20 november – 12 december)

Voor de combinatie tabel geldt dat 2, 4 of 6 minuten wachttijd geen verschil geeft in gasverbruik of productie van tomaten (Tabel 6.16). Deze regelingen kosten iets meer gas dan wanneer het scherm geopend wordt bij 5 W/m² volgens de standaard manier van schermopenen. Het effect op productie is evenals het effect op gasverbruik marginaal.

Tabel 6.16. Gasverbruik, tomatenproductie en economisch resultaat bij simulaties van een aantal regelingen waarbij het scherm in één keer definitief wordt opengetrokken, afhankelijk van de ΔT over het scherm; combinatie hiervan voor 3 wachttijden (2, 4 en 6 minuten) tussen 2 schermstappen van 0.5% op basis van nieuw scenario gemaakt op basis van resultaten in Tabel 6.15. Schermopeningsprocedure wordt gestart zodra de globale straling meer dan 5 W/m^2 is.

Wacht tijd (min)	Gasverbruik ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{seizoen}$)	Productie ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{seizoen}$)	Productie ($\text{€}/\text{m}^2/\text{seizoen}$)	Gasbesparing ¹ ($\text{€}/\text{m}^2$)	Productieverlies ¹ ($\text{€}/\text{m}^2$)	Netto resultaat ¹ ($\text{€}/\text{m}^2$)
2	39.30	61.86	49.76	- 0.006	0.009	- 0.015
4	39.30	61.85	49.76	-0.006	0.013	- 0.019
6	39.31	61.86	49.76	- 0.007	0.006	- 0.013

¹ Ten opzichte van scherm openen bij 5 W/m^2 globale straling buiten (gasverbruik $39.25 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{seizoen}$ en productie $61.86 \text{ kg}/\text{m}^2/\text{seizoen}$).

Samenvattend

In bovenstaande paragraaf is het effect van de ΔT -scherm en snelheid van openen van het scherm op een eventuele temperatuurval en het piekverbruik bepaald. Het blijkt dat bij een groter temperatuurverschil boven – onder het scherm de temperatuurval groter is naarmate het scherm bij een meer gesloten schermstand volledig open wordt getrokken. Er is een schermregeling ontwikkeld waarbij de openingssnelheid van het scherm wordt bepaald door het temperatuurverschil boven – onder het scherm. Het blijkt echter dat wanneer deze regeling jaarrond wordt gebruikt, deze niet beter functioneert dan de standaard manier van schermopenen die in dit project is gebruikt (scherm in 10 stappen van 0.5% met een wachttijd van 2 minuten openen).

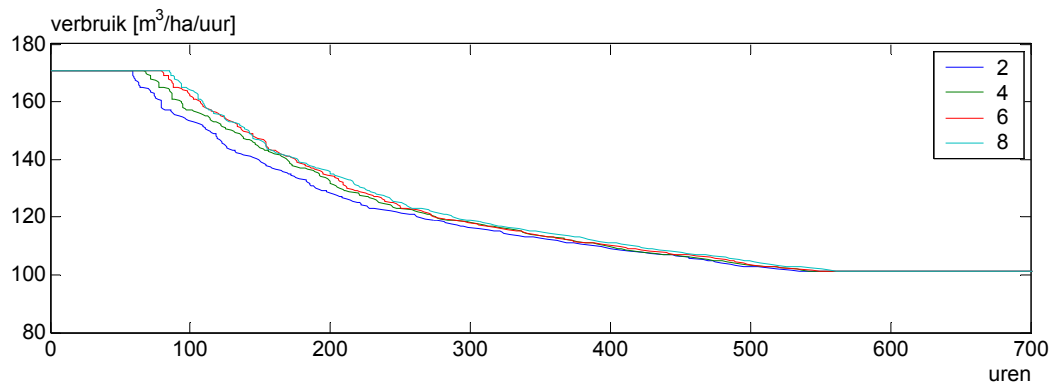
6.6 Scherm in stappen openen totdat de ΔT -scherm een ingestelde waarde bereikt heeft.

Bij deze regeling wordt niet het moment van openen door de regeling beïnvloed maar de manier waarop het scherm open loopt. Hierbij wordt gekeken naar het temperatuurverschillen tussen het compartiment boven en dat onder het scherm (ΔT -scherm). Het scherm wordt net zo lang in stappen opengetrokken totdat er een ingestelde ΔT is bereikt, waarna het scherm in één keer verder open loopt. In deze regeling zijn ΔT 's toegepast van 2, 3, 4, 5, 6, 7 en 8 °C. Voor alle cases in deze paragraaf is er van de standaard regeling uitgegaan waarbij het scherm op een globale straling van 5 W/m^2 geopend wordt. In tegenstelling tot de referentie waar het scherm altijd in stappen tot 95% schermstand wordt geopend, waarna het scherm geheel opengaat, wordt in deze regeling het scherm in stappen geopend totdat de ingestelde ΔT is bereikt. Als maximale kier is 90% schermstand aangehouden. De bedoeling van deze regeling is niet zozeer het aantal schermuren uit te breiden, maar met name temperatuurval te voorkomen. In Tabel 6.17 zijn de schermuren en de gevolgen van het schermen op de RV, het PAR licht op gewasniveau en het energieverbruik voor 7 verschillende ΔT 's waarop het scherm helemaal geopend mag worden weergegeven.

Tabel 6.17. Schermuren en gevolgen van het schermen op de RV, het PAR licht op gewasniveau en het energieverbruik voor 7 verschillende momenten waarop het scherm helemaal geopend mag worden op basis van het temperatuurverschil boven en onder het scherm.

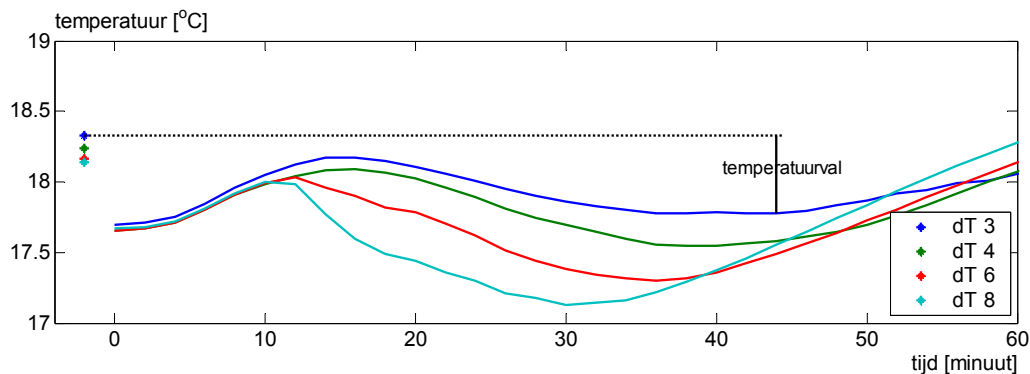
Scherm open ΔT [°C]	Scherm uren [-]	Uren ¹⁾ RV < 60 [-]	Uren ¹⁾ RV > 85 [-]	Uren ¹⁾ RV > 90 [-]	Uren ¹⁾ RV > Setp. [-]	PAR (dif) op gewas ¹⁾ [MJ/m ²]	PAR (dir) op gewas ¹⁾ [MJ/m ²]	Gasverbruik [m ³ /m ² /jaar]
2	1799	17	795	157	171	1.16	0.27	39.2
3	1739	17	768	153	153	1.19	0.28	39.3
4	1684	17	745	148	136	1.25	0.35	39.4
5	1680	18	744	149	128	1.26	0.37	39.4
6	1675	18	740	148	128	1.29	0.41	39.5
7	1678	18	739	148	130	1.30	0.42	39.5
8	1675	18	737	151	133	1.30	0.42	39.5

Doordat het vrij lang kan duren voordat het temperatuurverschil klein genoeg is geworden om het scherm geheel te openen, is er toch nog een behoorlijk verschil in het aantal schermuren. Het scherm doet er gemiddeld gesproken circa 25 minuten langer over om een ΔT van 2 of een schermstand van 90% te halen vergeleken met een ΔT van 8 °C. Bij een ΔT groter dan 5 °C stabiliseert het aantal schermuren en uren RV overschrijding. Zoals uit de tabel blijkt, neemt het energieverbruik slechts weinig af. Er zijn echter wel degelijk effecten op de gasafname zoals in Figuur 6.19 is te zien.



Figuur 6.19. Jaarbelastingduurkrommen van de 700 hoogste uurverbruiken van 4 cases (ΔT van 2, 4, 6 en 8 °C) waarna het scherm pas helemaal geopend mag worden.

De hoogste uurafname daalt van 85 uur voor de ΔT 8 tot circa 59 uur voor de ΔT 2. De toepassing van deze regeling leidt tot een aanmerkelijk daling van de temperatuurval. In Figuur 6.20 is de gemiddelde temperatuurval weergegeven.



Figuur 6.20. De gemiddelde temperatuurverlopen (en temperatuurval) van de kasluchttemperatuur vanaf het moment dat het signaal 'scherm moet open' wordt gegeven voor 4 ΔT cases. De * geven de setpointtemperatuur op het moment van openen weer.

De omvang van de temperatuurval wordt in Tabel 6.18 nog eens weergegeven.

Tabel 6.18. Aantal malen per jaar dat temperatuurval voorkomt, de gemiddelde temperatuurval voor de cases ΔT 4 tot en met ΔT 8 en de gemiddelde globale straling waarbij het scherm geopend is.

ΔT scherm open [°C]	Globale straling [W/m ²]	Temperatuurval				Gem. selectie [°C]
		>0.2 °C [-]	>0.5 °C [-]	>1 °C [-]	>1.5 °C [-]	
2	6	88	14	0	0	0.6
3	6	100	17	0	0	0.7
4	6	110	57	1	0	1.0
5	6	109	103	9	0	1.2
6	6	111	111	52	1	1.3
7	6	109	108	85	4	1.4
8	6	110	109	86	26	1.4

Zoals uit de tabel blijkt, is er een duidelijke invloed op de temperatuurval, zowel in het gemiddeld als in aantal keren met een grote temperatuurval. Dat het aantal keren met een temperatuurval > 0.2 °C bij een kleinere ΔT afneemt komt door het selectie criterium dat tijdens en direct na het openen van het scherm het raam niet meer dan 5% geopend mag zijn geweest. Als het scherm er langer over doet om open te lopen, dan zullen er meer vochtproblemen ontstaan en kan de kaslucht meer opwarmen.

Samenvattend

In bovenstaande paragraaf is een regeling beschreven waarbij niet het moment van openen wordt beïnvloed, maar de manier waarop het scherm openloopt. Het scherm wordt in stappen geopend tot het temperatuurverschil boven – onder het scherm een ingestelde waarde heeft bereikt. Deze regeling heeft als doel de temperatuurval te voorkomen die meestal pas optreedt als het scherm in één keer openloopt. Het aantal schermuren dat gemaakt wordt neemt toe als de ΔT -scherm waarbij het scherm ineens open getrokken mag worden kleiner is. Het energieverbruik neemt daarmee echter maar weinig af. Wel blijkt dat het maximale uurverbruik gedurende minder uren per jaar gerealiseerd wordt als het scherm pas bij een kleinere ΔT -scherm open mag lopen. De toepassing van de regeling leidt tot een aanmerkelijke daling van de temperatuurval, van 1.4 °C bij een ΔT van 8 °C tot 0.6 °C bij een ΔT van 2 °C. Deze regeling realiseert daarmee het doel waarvoor hij ontwikkeld was.

7. Terugkoppeling met tuinders

Op 17 maart 2005 zijn de resultaten van dit onderzoeksproject besproken met de begeleidingscommissie onderzoek (BCO) tomaat van LTO. Daarbij waren aanwezig:

- Paul van Schie, Marc Groenewegen, Corné Smulders, tomatentelers en leden BCO
- Bart van den Bosch, tomatenteler en voorzitter landelijke tomatencommissie
- Jan Mulder, BCO
- Joke Vreugdenhil, LTO
- Joke Klap, PT
- Ruud Kaarsemaker, PPO

In deze presentatie werd de opzet van het project toegelicht, de wijze waarop het experiment is uitgevoerd en de resultaten die het experiment opgeleverd heeft. Ook de opzet van de scenarioberekeningen en de resultaten daarvan zijn toegelicht.

De resultaten van het experiment laten zien dat groei en ontwikkeling van het gewas bij beide behandelingen (scherm openen bij 5 W m^{-2} of 50 W m^{-2} instraling) niet aantoonbaar verschilt. Volgens de telers is dit niet verrassend, want als het scherm dicht is wordt 20% van het weinige licht weggenomen. Eén van de telers gaf aan dat hij soms het scherm zelfs de hele dag dicht laat. Hierop ging de discussie over wat het belang van licht is. In het begin van de teelt is licht belangrijk voor het vormen van bladoppervlakte zodat het alle licht wat in de kas valt door het gewas gebruikt kan worden en niet op de grond valt en daarmee verloren gaat. Moet je op een donkere winterdag wel je scherm openen om van alle licht te profiteren, of laat je het dicht want er is toch al heel weinig licht? Er werd verder gesteld dat een tekort aan licht zich met name bij een vroege (december)planting zou laten zien, terwijl in de proef pas in 2^e week januari is geplant.

Naar aanleiding van de resultaten gaven de telers aan dat zij het lichtverlies door het scherm niet zozeer als een probleem zagen, maar dat met name vocht de beperkende factor is in het gebruik van het energiescherm. Als je pas in januari plant, loop je niet zo gauw in de problemen, maar als er in december geplant wordt, zijn de planten in februari al zo groot dat ze zodanig veel verdampen dat de luchtvochtigheid onder het scherm te hoog oploopt. Dan wordt het scherm geopend. De telers geven aan dat je in het voorjaar wel lang kunt schermen, maar dat ze dat niet doen om te voorkomen dat het gewas te 'zwak' wordt. Met name in de zomer verwachten ze dan problemen met het gewas. Ze geven aan dat een onderzoek naar schermgebruik om die reden eigenlijk een heel teeltseizoen moet duren.

Het energieverbruik in het experiment werd afgeleid van de warmteafgifte van de buizen. De energiebesparing gaf aanleiding tot een discussie over de wijze van schermopenen. Met name op het gebied van vochtkieren ontspon zich een levendige discussie. Er bleek een aantal telers te zijn die absoluut geen kieren wil trekken, terwijl er ook werd gevraagd welke regelstappen het effectiefst zijn om vocht af te voeren. Uit een aantal onderzoeken is gebleken dat het beter is om eerst een kier in het scherm te trekken en dan pas het raam te openen. Telers vrezden door te kieren met het scherm dat ze horizontale temperatuurverschillen (trek) in de kas krijgen. Enkele telers geven verder aan dat ze een (beperkte) temperaturdaling door het direct of snel openen van het scherm niet als een probleem ervaren en dat liever doen dan kieren in te zetten om het compartiment boven het scherm op te warmen.

Vervolgens werden de scenarioberekeningen besproken. In het scenario waarbij het scherm al bij 1 W m^{-2} straling wordt geopend, worden 1673 schermuren gemaakt. Dit levert een gasverbruik op van 39.6 m^3 per m^2 per jaar op en een productie van 68.1 kg tomaten per m^2 per jaar. Het aantal schermuren dat gemaakt is in dit scenario wordt door de ene teler veel gevonden, door de ander niet, waarbij duidelijk de geografische ligging in het land van hun eigen bedrijf meespeelt. Het gasverbruik vindt men aan de lage kant, de berekende productie aan de hoge kant. Als resultaat wordt ook het verschil tussen de besparing door minder gasverbruik (à € 0.12 per m^3 gas) en het verlies aan productie (KWIN prijzen tomaten) getoond. De telers geven aan dat ze de besparing beperkt vinden en dat ze het belangrijker vinden een goed gevoel te hebben over de stand van het gewas dan 'een paar centen besparing'.

De telers kijken per dag wat ze die dag met het scherm gaan doen: direct openen of langer dicht laten. De beperking van de scenarioberekeningen zoals die zijn uitgevoerd in dit project is dat ze het hele schermseizoen met dezelfde instellingen rekenen. Het zou aanbeveling verdienen om in de scenarioberekeningen ruimte te bieden aan de dagelijkse afwegingen over al dan niet openen van het scherm.

Conclusies van de telers was dat de effecten van het langer doorschermen 's ochtends op zowel gasverbruik als productie minimaal zijn. Een voordeel van (langer) schermen is dat het gascontract gunstiger afgesloten kan worden, dat kan wel grotere financiële voordelen opleveren. Als nadeel van langer schermen (wat synoniem staat voor veel schermuren maken) is de (vermeende) ontwikkeling van een zwak gewas, waardoor met name bij zomerse omstandigheden bij hoge verdampingsniveaus het gewas productieachterstand zou oplopen.

8. Conclusies en discussie

In dit project is een experiment uitgevoerd waarin twee schermstrategieën zijn vergeleken (scherm openen bij 5 en bij 50 W/m²). Verder is een aantal scenarioberekeningen met een kasklimaatmodel en een gewasgroei-model uitgevoerd waarin het moment van schermopening werd bepaald door straling, de combinatie van straling en buitentemperatuur en door het temperatuurverschil onder en boven het scherm. Ook zijn de effecten van de wijze van schermopening op energieverbruik, productie en temperatuurval berekend.

In het experiment zijn in de periode januari tot en met april 2004 metingen gedaan aan de gewasgroei. Er werd geen effect van de aangelegde schermbehandelingen op totaal plantgewicht of gewichten van bladeren, stengels en vruchten aangetoond. Wel bleek in deze periode een energiebesparing van ongeveer 3% gerealiseerd te zijn.

In het experiment is de plantactiviteit gedurende de dag bepaald door de fotosynthese van de planten onder vaste omstandigheden van licht, temperatuur en CO₂ concentratie te meten. De fotosynthese bleek na zonsopkomst in circa een uur toe te nemen tot het niveau dat de plant gedurende het grootste gedeelte van de dag handhaaft. In de laatste uren van de dag, voordat de zon onder gaat, neemt de fotosynthese (gemeten onder vaste omstandigheden) met ongeveer 20% af. Deze metingen tonen aan dat het niet zo is dat het licht na zonsopkomst veel belangrijker is dan het licht in de uren die daarop volgen, en dat het scherm om die reden onmiddellijk na zonsopkomst geopend zou moeten worden.

Uit de modelberekeningen bleek dat toepassen van een scherm een energiebesparing oplevert van 16% (39.6 m³ gas per m² per jaar ten opzichte van 47.0 m³/m²/jaar). Overeenkomstige energiebesparingspercentages werden gevonden door Van der Sluis *et al.* (1995) en Esmeijer (2004). Toepassing van een scherm heeft verder grote gevolgen voor het dagelijkse gasafnamepatroon. De maximale dagafname wordt hierdoor met ruim 30% verlaagd, van 3600 m³/ha/uur tot 2400 m³/ha/uur. Het aantal uren met een uurverbruik boven de 130 m³/ha/uur neemt met ongeveer 400 uur per jaar fors af bij de toepassing van een scherm. Een scherm biedt dus de mogelijkheid een gascontract met een lagere maximale uurafname af te sluiten, wat een flinke kostenbesparing op kan leveren.

Uit de scenarioberekeningen bleek dat het optimaliseren van het schermgebruik een verdere energiebesparing opleverde van 3%. Echter, wanneer meer schermuren worden gemaakt, leidt het lichtverlies dat optreedt tot een productiedaling. Het productieverlies bij schermopenen bij 5 W/m² is minimaal, maar loopt op naar 0.3 kg tomaten per m² per jaar wanneer het scherm geopend wordt bij 150 W/m². Wanneer een financiële afweging gemaakt wordt tussen de energiebesparing (€ 0.12 per m³ gas) en het productieverlies (KWIN prijzen tomaten) bij het scenario waarbij het scherm geopend wordt afhankelijk van de globale straling buiten bleek dat het scherm openen bij 10 W/m² optimaal is. Wanneer echter gerekend wordt met een gasprijs van € 0.18 per m³ gas en een gemiddelde tomatenprijs van € 0.90 per kg weegt de energiebesparing wel op tegen de productiederving en kan langer doorgeschermd worden. In deze berekeningen zijn de veranderingen in het gascontract niet meegenomen. Naarmate het scherm pas bij hogere stralingsniveaus geopend wordt, daalt het aantal uren met de maximale gasafname. Dit betekent dat meer schermen een goede manier is pieken in het gasverbruik af te vlakken en daarmee de energiekosten te beperken.

Wanneer het moment van openen niet alleen gestuurd wordt door het lichtniveau, maar door een combinatie van buitentemperatuur en straling, is het aantal schermuren hoger en het energieverbruik lager dan wanneer het scherm alleen op straling wordt geopend. De regeling waarbij het scherm geopend wordt op basis van het temperatuurverschil boven – onder het scherm (ΔT -scherm) realiseert producties en energieverbruiken die vergelijkbaar zijn met de regeling waarbij het scherm geopend wordt op basis van licht en buitentemperatuur. Het jaarrond regelen op vaste instellingen van de ΔT -scherm levert geen verbetering op ten opzichte van het jaarrond regelen op straling en buitentemperatuur.

Uit berekeningen naar de wijze van schermopenen (stapgrootte, wachttijd en schermstand waarbij het scherm ineens geopend wordt) blijkt dat de manier waarop het scherm geopend wordt nauwelijks effect heeft op het energieverbruik. Wel is met een dergelijke regeling een aanmerkelijke daling van de kouval die optreedt bij het openen van het scherm te realiseren.

Bij alle scenarioberekeningen is gerekend met vaste scherminstellingen, die het hele schermseizoen door constant zijn. Dit is natuurlijk niet de praktijk; tuinders maken in principe elke dag weer de afweging op welk moment ze het scherm zullen openen. Afhankelijk van de stand van het gewas en de weersomstandigheden zullen ze het scherm snel openen of langer dicht houden. Mits ze dit goed doen, zullen tuinders hierdoor een hogere energiebesparing realiseren met minder productieverlies dan wanneer jaarrond dezelfde instellingen worden gebruikt zoals in de berekeningen is gedaan. Om de dagelijkse afweging tussen wel of niet openen van het scherm goed te kunnen maken hebben tomatentuinders behoefte aan handzame beslissingsondersteunende tools. Het zou aanbeveling verdienen in een vervolgproject een dergelijk beslissingsondersteunend algoritme te ontwikkelen dat productie en energiebesparing zodanig financieel af kan wegen dat het scherm op elke afzonderlijke dag op het gunstigste moment kan worden geopend.

9. Communicatie

Aan het begin van dit project was er al de nodige belangstelling van de (vak) pers, getuige de volgende artikelen:

- Tomaat laten uitslapen bespaart energie. Wb 6(2): 4, 15 januari 2004
- 'Uitslapen' tomaat bespaart energie. Agrarisch Dagblad 18(89): 1, 17 januari 2004
- De tomaat mag best uitslapen. Westlandsche Courant 104(279), 27 januari 2004

Op 10 maart 2004 bezochten tomatentelers van de telersvereniging Tasty Tom het experiment. Doelstelling en werkwijze van het project werden toegelicht en er werd een bezoek gebracht aan het experiment. Omdat enkele telers het pepinomozaïekvirus in hun kas hadden, werd het experiment vanuit de corridor bezichtigd. Resultaten tot nu toe werden besproken. In de discussie werd besproken welke overwegingen voor de tuinders een rol spelen in hun keuze wel of geen scherm te installeren. De belangrijkste reden om een scherm te plaatsen zijn de fiscale voordelen die voortkomen uit de 'groenlabelkas' waarin een scherm geïnstalleerd moet zijn. Andere redenen die genoemd werden waren piekafvlakking en het opvangen van een beperkte verwarmingscapaciteit. Deze tuinders waren van mening dat een scherm 10-12 m³/m² bespaart. Als groot nadeel werd genoemd dat het scherm circa 4% licht kost, en daarmee circa 3% productie.

Aan het einde van het project zijn Frank Kempkes en Anja Dieleman geïnterviewd over de resultaten van het experimentele gedeelte van het project. Naar aanleiding is een artikel in het januarinummer (2005) van 'Onder Glas' verschenen, getiteld 'Onderzoek bij tomaat toont aan: langer schermen geen probleem'.

De resultaten van het experiment en de scenarioberekeningen zijn op 17 maart 2005 gepresenteerd aan de leden van de begeleidingscommissie onderzoek (BCO) tomaat van LTO (zie hoofdstuk 7).

Over de scenarioberekeningen is in juni een (vervolg)artikel verschenen in 'Onder Glas' getiteld 'Scherm bij tomaat kan forse energiebesparing opleveren'.

Tenslotte zal de samenvatting van dit rapport aangeboden worden aan Groenten & Fruit.

10. Literatuur

- Bodlaender, K.B.A., M. van de Waart & J. Marinus, 1985.
Effects of drought on water use, photosynthesis and transpiration of potatoes. 2. Drought, photosynthesis and transpiration. Proceedings international seminar Wageningen.
- Braak, N.J. van de & A.F. Miguel, 1996.
Optimaal schermgebruik in kassen. Fase 1 modelvorming processen. IMAG nota P 96-71.
- Braak, N.J. van de, J.J.G. Breuer, F.L.K Kempkes, G.L.A.M. Swinkels & C.M.J. Bloemhard.
Optimaal schermgebruik in kassen. Evaluatie regelstrategieën. IMAG nota P 98-02.
- Chaumont, M., J.F. Morot-Gaudry & C.H. Foyer, 1994.
Seasonal and diurnal changes in photosynthesis and carbon partitioning in *Vitis vinifera* leaves in vines with and without fruit. *Journal of Experimental Botany* 45: 1235-1243.
- Correia, M.J., M.M.C. Chaves & J.S. Pereira, 1990.
Afternoon depression in photosynthesis in grapevine leaves – evidence for a high light stress effect. *Journal of Experimental Botany* 41: 417-426.
- De Koning, A.N.M., 1994.
Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: a quantitative approach. Proefschrift Wageningen Universiteit, 240 pp.
- Esmeijer, M.H., 2004.
Tomatenteelt met een beperkte gasaansluitwaarde. Rapport nr. 41600011, PPO Glastuinbouw, 37 pp.
- Farquhar, G.D., S. Von Caemmerer & J.A. Berry, 1980.
A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. *Planta* 149: 78-90.
- Gary, C., J.F. Barczi, N. Bertin & M. Tchamitchian, 1995.
Simulation of individual organ growth and development on a tomato plant: a model and a user-friendly interface. *Acta Horticulturae* 399: 199-205.
- Goudriaan, J. & H.H. van Laar, 1994.
Modelling potential crop growth processes. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 238 pp.
- Greiner de Mothes, M.A., M. Baumgarten & D. Knoppik, 1996.
Hysteresis in the response of photosynthesis to CO₂ and saccharide pools of wheat leaves grown at normal and enhanced CO₂. *Photosynthetica* 32: 181-191.
- Gijzen, H., 1994.
Development of a simulation model for transpiration and water uptake and an integral growth model. AB-DLO Report 18, AB-DLO Wageningen, 90 pp.
- Hand, D.W., G. Clark, M.A. Hannah, J.H.M. Thornley & J. Warren Wilson, 1992.
Measuring the canopy net photosynthesis of glasshouse crops. *Journal of Experimental Botany* 43: 375-381.
- Hand, D.W., J. Warren Wilson & B. Acock, 1993.
Effects of light and CO₂ on net photosynthesis rates of stands of aubergine and Amaranthus. *Annals of Botany* 71: 209-216.
- Heath O.V.S. & B. Orchard, 1957.
Temperature effects on the minimum intercellular space carbon dioxide concentration. *Nature* 180: 180-181.
- Heuvelink, E., 1996.
Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. Proefschrift Landbouwwuniversiteit Wageningen, 326 pp.
- Heuvelink, E., 1996.
Dry matter partitioning in tomato: validation of a dynamic simulation model. *Annals of Botany* 77: 71-80.
- Heuvelink, E., 1999.
Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development. *Annals of Botany* 83: 413-422.

- Ito, T., 1971.
Photosynthetic activity of vegetable plants and its horticultural significance. II. The time course of photosynthesis in tomato plants as influenced by some external and internal factors, especially by water and starch contents in the leaf. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* 40: 41-47.
- Kempkes, F.L.K., N.J. van de Braak, A.T.M. Zwinkels & G. Houter.
Schermkieren in de praktijk. Onderzoek naar verbetering regeling, temperatuurverschillen en gewasontwikkeling bij paprika, IMAG nota P 2000-30.
- Kitano, M. & H. Eguchi, 1993.
Dynamic analysis of water relations and leaf growth in cucumber plants under midday water deficit. *Biotronics* 22: 73-85.
- Knies, P., N.J. van de Braak & F.L.K. Kempkes, 1999.
Energieonderzoek in kasexperimenten; onderzoek naar de nauwkeurigheid van verschillende methoden. IMAG Nota P 99-107, 14 pp.
- KWIN - Kwantitatieve Informatie voor de Glastuinbouw, 2003 – 2004.
Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.
- Marcelis, L.F.M., H.A.G.M. van den Boogaard & E. Meinen, 2000.
Control of crop growth and nutrient supply by the combined use of crop models and plant sensors. In: *Proc. Int. Conf. Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post-Harvest Processing*. IFAC. pp. 351-356.
- Nederhoff, E.M., 1994.
Effects of CO₂ concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops. *Proefschrift Landbouwniversiteit Wageningen*, 213 pp.
- Ruijs, M.N.A., C.E. Rijnders, F.L.K. Kempkes & M.H. Esmeijer, 2005.
Evaluatie van schermgebruik in de praktijk. Een kwantitatieve en kwalitatieve analyse. LEI rapport 3.05.01, 94 pp.
- Singh, D.P., A. Kumar, P. Singh & H.C. Sharma, 1993.
Diurnal patterns of wheat canopy photosynthesis, evapotranspiration and water use efficiency at different phases of growth in the field. *Photosynthetica* 28: 143-149.
- Van der Sluis, B.J., A.A. Rijdsdijk, G.P.A. van Holsteijn & N.J.A. van der Velden, 1995.
Het gebruik van energieschermen bij tomaat. LEI publicatie 4.138, 86 pp.
- Verveer, J.B. & C.D. Becque, 1995.
Handboek verwarming glastuinbouw. Nutsbedrijf Westland N.V. , 192 pp.

Bijlage I.

Bespreking teeltrecept

Verslag van de bespreking gehouden op 24 maart 2004 met als doel te komen tot een teeltrecept rondom het gebruik van schermen in de tomatenteelt

Aanwezig:

Leo Oprel, LNV

Anja Jolman, PT

Ted Duijvestijn, tomatenteler

Bert Houter en Arie de Gelder, PPO

Feije de Zwart en Frank Kempkes, A&F

Leo Marcelis en Anja Dieleman, PRI

Afwezig met kennisgeving:

René Vijverberg, tomatenteler

1. Opening

Doel van deze bijeenkomst is te komen tot een teeltrecept waarmee een substantiële energiebesparing rond het gebruik van schermen in de tomatenteelt gerealiseerd kan worden.

2. Vaststellen teeltrecept

In eerste instantie werd in deze vergadering het teeltrecept omschreven als een document met setpoints waarop het kasklimaat geregeld kan worden. In de praktijk is echter bij bijna elke tuinder de bestaande uitrusting en de teeltstrategie zodanig verschillend dat een generiek recept geen zin heeft. Gaande de vergadering bleken alle aanwezigen het er over eens dat het teeltrecept zoals het in dit project wordt gehanteerd een discussiedocument is waarin van een aantal instellingen rondom het schermen wordt aangegeven wat mogelijk is en wat de voor- en nadelen zijn.

3. Teeltrecept

Gedurende de bijeenkomst is gesproken over de factoren die van invloed zijn op het schermgebruik. Uitgangspunten hierbij waren: optimaliseren van de productie en een goede ontvochtiging, bij een zo laag mogelijk energieverbruik (en daarmee ook een reductie in CO₂ uitstoot). Randvoorwaarde was dat schermtype, schermstrategie, klimaatinstellingen en teeltstrategie te realiseren moest zijn in een nieuwe kas zoals die op dit moment (technisch) gerealiseerd zou kunnen worden.

Het teeltrecept zoals het is voortgekomen uit deze bespreking, uit voorbereidende gesprekken met Ted Duijvestijn en René Vijverberg en andere tomatentelers staat hierna beschreven.

4. Afsluiting

Het blijkt bijzonder moeilijk te zijn om tot een generiek teeltrecept te komen, waarin concrete instellingen voor vocht, temperatuur en schermopening gegeven worden. Afgesproken is dat het teeltrecept zoals het naar aanleiding van deze bijeenkomst wordt opgesteld een discussiedocument is waarin van een aantal instellingen rondom het schermen aangegeven wordt wat mogelijk is en wat de voor- en nadelen zijn. In de scenarioberekeningen die in het kader van dit project uitgevoerd zullen worden, worden effecten van gewijzigde instellingen op kasklimaat, energieverbruik, gewasgroei en productie gekwantificeerd. In de workshop die aan het einde van het project zal plaatsvinden zullen de reacties van tuinders op de resultaten van dit project geïnventariseerd worden. Verslaglegging van de berekeningen en workshop zal gedaan worden in het eindrapport van het project.

Discussiedocument schermgebruik bij tomaat

Vergeleken met de teelt van bijvoorbeeld paprika wordt in tomaten nog relatief weinig geschermd. Belangstelling voor het gebruik van schermen in tomaat neemt de laatste jaren echter sterk toe. Ons project richt zich op het optimaal inzetten van het aanwezige scherm door op jaarbasis meer schermuren te realiseren en het openen van het scherm op een regeltechnisch juiste manier uit te voeren. Binnen dit project wordt dit 'teeltrecept' opgeleverd waarin beschreven wordt welke factoren een rol spelen bij het gebruik van de schermen en welke overwegingen hierbij te maken zijn.

Schermen

Aan de installatie en het gebruik van schermen in een (nieuwe) kas zitten een aantal voordelen en een aantal nadelen. Deze worden hier puntsgewijs opgesomd en verder in de tekst nader uitgewerkt.

Voordelen van schermen:

- Lager energieverbruik (m^3 aardgas per m^2)
- Piekafvlakking en dus lagere contractcapaciteit
- Extra sturingsinstrument voor kasklimaat (temperatuur, licht en vocht) en dus voor gewasgroei
- Gelijkmatiger kasluchttemperatuur en planttemperatuur
- Hogere luchtvochtigheid bij de start van de teelt
- Fiscale aftrek investeringen Groenlabel kas

Nadelen van schermen:

- Lichtverlies bij een gesloten scherm
- Lichtverlies door het opgevouwen scherm pakket (ca 4%)
- Kennis en ervaring nodig om scherm als extra sturingsinstrument voor kasklimaat goed te benutten
- Mogelijk te hoge luchtvochtigheid in voorjaarsmaanden
- Investeringskosten

In het algemeen kan worden gesteld dat door het gebruik van beweegbare schermen in de kas op jaarbasis 20 tot 25% energie bespaard kan worden ($9-11 m^3/m^2$). Bepalend voor de besparing zijn de eigenschappen van het scherm, periode van het jaar waarin het scherm wordt gebruikt en de tijdsduur dat het scherm geheel of gedeeltelijk is gesloten (aantal schermuren). Het scherm kan gebruikt worden als (extra) instrument om het gewenste kasklimaat te realiseren. De teeltstrategie van de tuinder (ras, plantdatum, plantdichtheid, afzetmarkt) is van doorslaggevend belang voor de wijze waarop het scherm gebruikt wordt.

In de tomatenteelt worden bijna uitsluitend vrij heldere schermdoeken gebruikt, waarin meestal polyethyleen is verwerkt. Dit materiaal maakt dat zonlicht van buiten als diffuus licht op het gewas valt. Meest gebruikte schermtypes in de tomatenteelt zijn SLS 10 en het nieuwere SLS 10 Ultra plus. SLS 10 Ultra plus is bijvoorbeeld een scherm met een lichtdoorlatendheid van 88% voor direct licht en 81% voor diffuus licht dat in geheel gesloten toestand een momentane energiebesparing van 43% kan bereiken (gegevens van Ludvig Svensson). In het voorjaar, wanneer er een sterk verdampend gewas in de kas staat is het oplopen van de luchtvochtigheid onder het scherm tot te hoge niveaus een belangrijke reden om te stoppen met schermen. Om langer door te kunnen schermen zonder vochtproblemen was er behoefte aan schermen die meer vocht doorlaten. Dit leidde tot het ontwikkelen van opener doeken, waarbij één op de vijf, tien, twaalf, vijftien of twintig bandjes is verwijderd zodat een permanente perforatie ontstaat (Ludvig Svensson). In feite is er bij een dergelijk scherm sprake van een vaste schermkier. Bij het sluiten van het scherm loopt de luchtvochtigheid onder deze schermen minder op dan onder het standaard scherm, maar de energiebesparing is wel lager (tot 34% bij een 1 op 5 doek). Op bestaande bedrijven waar geen scherminstallatie aanwezig is, wordt ook wel gebruik gemaakt van een geperforeerd vast foliescherm, dat rond de teeltwisseling wordt geïnstalleerd en meestal 5 tot 7 weken na de start van de teelt weer verwijderd wordt.

Vocht

De meest bepalende factor voor het aantal uren dat geschermd wordt in het voorjaar is de luchtvochtigheid onder het scherm. Wanneer te lang doorgedaan wordt met schermen bij toenemende buitentemperaturen of een sterk verdampend gewas in de kas, wordt de luchtvochtigheid in de kas te hoog, waardoor een zwak gewas ontstaat met een lagere productie. Maar als grootste probleem van een hoge luchtvochtigheid wordt de verhoogde kans op schimmelziekten, met als uiteindelijke consequentie het mogelijk uitvallen van planten ervaren. In hoeverre de luchtvochtigheid onder het scherm een probleem is hangt onder andere af van de vochtdoorlatendheid van het scherm. Een te hoge luchtvochtigheid onder het scherm kan verder voorkomen worden door een vochtkier in het scherm te trekken. Uit gesprekken met tuinders bleek dat hier zeer terughoudend mee omgegaan wordt. Dit heeft twee redenen. De eerste is dat bij het kieren op vocht luchtstromingen in de kas kunnen ontstaan die leiden tot een temperatuurval van 3-4 °C langs de gevels, wat uiteindelijk leidt tot een verminderde groei van het gewas op die plaatsen hetgeen ongewenst is. De tweede reden is dat blijkt dat onder schermen waarbij de grootte van de schermkier niet nauwkeurig geregeld kan worden een ongelijkmatige temperatuur- en vochtverdeling kan ontstaan. Uit het project 'Optimaal schermgebruik in kassen: evaluatie regelstrategieën' is bekend dat eerst vochtafvoer via schermkieren en dan pas vochtafvoer via het raam energetisch het beste resultaat geeft. In het project 'Schermkieren in de praktijk: onderzoek naar verbeterde regeling, temperatuurverschillen en gewasontwikkeling bij paprika' is deze strategie met succes toegepast en in het rapport 'Strategieverkenning verdamping: verlaagde verdamping als middel om energie te besparen' is de werking van deze regeling nog eens bevestigd. Tuinders die we gesproken hebben geven aan eigenlijk alleen via de ramen vocht af te voeren. Wanneer vocht onder het scherm dan nog problematisch lijkt te worden, wordt in principe geen vochtkier getrokken vanwege de vermeende nadelen, maar wordt het scherm in zijn geheel geopend. Om de vochtregeling goed te krijgen is het van groot belang een precieze spleetopening/raamopening te kunnen realiseren. Dit is te optimaliseren door het gebruik van frequentie geregelde motoren, motoren met een grote vertraging of motoren met een korte looptijd, maar ook een terugmelding zodat bekend is waar het scherm zich uiteindelijk bevindt. Ook van belang is dat de regeling niet proportioneel maar integrerend is. Wanneer door aanverwante maatregelen de dektemperatuur verlaagd kan worden om de condensatie en daarmee de vochtafvoer tegen het dek te vergroten, zoals bijvoorbeeld bij dekkoeeling, is de vochtuithouding onder het scherm beter in de hand te houden. Dit biedt mogelijkheden meer schermuren te maken en een hogere energiebesparing te bereiken. Een aspect dat niet vergeten mag worden is dat planten onder een scherm door de hogere luchtvochtigheid minder verdampen en daarom ook minder waterbehoefte hebben. Daartegenover staat dat de planttemperatuur door het scherm toe zal nemen omdat de uitstraling sterk beperkt wordt als het scherm dicht is. De watrigheid moet dan ook aan het gebruik van schermen aangepast worden.

Temperatuur

Met name in koude nachten zorgt een gesloten scherm voor energiebesparing, omdat minder gestookt hoeft te worden om de gewenste temperatuur te handhaven. Bijkomend voordeel van schermen bij deze lagere buitentemperaturen is dat bij buizen tussen het gewas hittede schade aan het gewas voorkomen kan worden. In het algemeen geldt dat de verticale temperatuurverdeling onder een gesloten scherm veel gelijkmatiger is dan in een kas zonder scherm. Daarnaast zijn de horizontale temperatuurverschillen in het algemeen kleiner. Dit heeft als voordeel een gelijkmatiger gewasgroei en -ontwikkeling onder het scherm. Over het algemeen wordt het scherm 's ochtends geopend op een combinatie van licht en buitentemperatuur, hoewel de strategie voor schermopening sterk kan verschillen per bedrijf. Deze strategie wordt verder beïnvloed door sneeuwval, windsnelheid en dergelijke. Andere tuinders openen hun scherm op tijd, of in een heel enkel geval op temperatuurverschil onder en boven het scherm.

Voordat het scherm geopend wordt, wordt de kas in de regel eerst opgestookt tot de dagtemperatuur. Dit opstoken dient voorzichtig te gebeuren, waarna het scherm rustig opengetrokken wordt. Door het scherm rustig open te trekken, wordt een sterke afname van de temperatuur (temperatuurval) voorkomen. Het is dan niet nodig deze temperatuurval op te vangen met een hoge buistemperatuur, waarmee een mogelijk warmteoverschot voorkomen wordt. Immers, na zonsopkomst neemt over het algemeen de warmtevraag fors af. Als de buizen dan erg warm zijn, zou een warmteoverschot kunnen ontstaan dat vervolgens weggelucht zou moeten worden, waarmee de behaalde energiewinst in één klap verloren zou gaan. Wanneer tijdens het openen een geringe temperatuurval optreedt gedurende een korte periode (ca 10 min) wordt dit door de tuinders niet als een probleem gezien voor het gewas.

Verder blijkt dat de stijging van de temperatuur (van nacht naar dagniveau) gelijkmatiger gebeurt onder een scherm dan in een kas zonder scherm.

Het openen van de schermen gebeurt in kleine stapjes. Hierbij geldt in het algemeen dat regelingen die een doek in delen van procenten kunnen sturen beter zijn dan wanneer het gelijk per procent gaat. Bij grote vakmaten is de eerste stap van 1 procent anders snel te groot (ruim 4 á 5 cm). Na een aantal stapjes, wordt het scherm in één keer verder opengetrokken, nadat het directe gevaar voor temperatuurval is geweken. Anders ontstaan horizontale temperatuurverschillen in de kas, die ongelijkheid in het gewas geven en onrust in de klimaatregeling hetgeen tot verbruikspieken kan leiden. In de praktijk wordt wel veel aandacht besteed aan de schermopeningstrategie aan het begin van de dag, maar in veel mindere mate aan de sluiting van het scherm. Mogelijkerwijs zou er nog energiewinst te behalen zijn door overdag onder sommige omstandigheden het scherm te sluiten en criteria aan te leggen voor het sluiten van het scherm aan het einde van de dag.

Algemeen bekend is dat de piek aan energieverbruik die in de koude periodes vroeg in de morgen nodig is om de kasluchttemperatuur te verhogen van de nacht- naar de dagtemperatuur bij het gebruik van een scherm aanzienlijk minder hoog is dan wanneer geen scherm wordt gebruikt. Hierdoor is het mogelijk de piek in het gasverbruik in de morgen af te vlakken en daarmee de contractcapaciteit van het bedrijf te verlagen waarmee de kosten voor het energieverbruik verder gereduceerd worden. Enkele van de tuinders die we in het kader van dit project gesproken hebben gaven aan dat het feit dat zij een ketel met een beperkte capaciteit hebben een belangrijk argument was om een scherm te installeren.

Een voordeel van het gelijkmatige klimaat onder het scherm is dat dit meer mogelijkheden biedt voor de toepassing van temperatuurintegratie dan in een meer variabel klimaat. In de praktijk wordt de bandbreedte van temperatuurintegratie die een teler wil toepassen bepaald door de koudste (en warmste) plekken in de kas. Als deze temperatuurverschillen klein zijn, kan deze ruimte gebruikt worden voor de temperatuurintegratieregeling, waarmee energie bespaard kan worden.

Plantdatum en plantdichtheid

Als het buiten koud is, condenseert waterdamp uit de kas tegen het koude kasdek en wordt in de vorm van condenswater via condensgootjes afgevoerd. Tomaten worden in de koudste periode van het jaar (november/december) geplant. Jonge planten met weinig bladeren verdampen dan weinig. Het gecombineerde effect van een lage verdamping en een grote vochtafvoer via condensatie tegen het dek, kan leiden tot een te droog klimaat in de kas. Door toepassing van een scherm wordt de vochtafvoer via het kasdek aanzienlijk gereduceerd en ontstaat er een minder droog klimaat voor de jonge planten. Een scherm waarbij de opstartfase van het gewas optimaal kan verlopen, moet daarom voldoen aan de volgende eisen: zo hoog mogelijke lichtdoorlatendheid en zo gering mogelijke vochtdoorlatendheid. Een dergelijk scherm zal in februari, wanneer er een volgroeid en een sterk verdampend gewas in de kas staat niet meer ideaal zijn. Dan is een meer vochtdoorlatend scherm gewenst om zonder vochtproblemen nog veel schermuren te maken en energiebesparing te kunnen realiseren. Per saldo zullen tuinders met een vroege plantdatum daarom kiezen voor een scherm met een hogere vochtdoorlatendheid. Wanneer later geplant wordt (eind december), is een minder vochtdoorlatend scherm gewenst. Onder een dichter doek, met een hogere energiebesparing kan een hogere temperatuur gerealiseerd worden voor een snelle opkweek van het gewas. Het gewas verdampt nog weinig, en vochtafvoer via het doek is nog niet gewenst. Tegen de tijd dat er een sterk verdampend gewas staat, zijn de buitentemperaturen al wat hoger, en zal het scherm gedurende minder uren gebruikt gaan worden.

Analoog aan de plantdatum kan ook de plantdichtheid (stengeldichtheid) aangepast worden aan het gebruik van schermen. In de praktijk wordt de tomatenteelt gestart met een plantdichtheid van 2-2.5 planten/m². Op het moment dat in het voorjaar de buitentemperaturen en de lichtintensiteit oplopen, worden aan de planten extra stengels aangehouden. Het moment dat het schermseizoen eindigt (begin tot medio april) valt dan samen met het moment dat deze extra stengels voor meer gewasverdamping zorgen.

Groen Label kas

Een Groen Label kas is een kas die voldoet aan eisen op het gebied van besparing van energie, nutriënten, gewasbeschermingsmiddelen en vermindering van lichthinder. Voor alle teelten gelden basiseisen die verplicht zijn om het Groen Label Kas certificaat te verkrijgen en per teelttype moet een minimale hoeveelheid punten in een keuze-

systeem gehaald worden. Voor het installeren van een scherm wordt ook een aantal punten verkregen. Met het certificaat zijn een aantal fiscale voordelen te behalen. Zo kan via een groenfonds geld geleend worden met een rentepercentage dat 1-2 procentpunten lager ligt dan de gemiddelde marktrente. Met een Groen Label Kas certificaat kan verder gebruik gemaakt worden van de MIA regeling (milieu investeringsaftrek) en de VAMIL regeling (willekeurige afschrijving milieu-investeringen), waarmee de fiscale winst kan worden verlaagd, waardoor minder belasting hoeft te worden betaald. Hierdoor kan een scherm op fiscale gronden bijdragen aan de winstgevendheid van het tuinbouwbedrijf.

Licht

Het belangrijkste nadeel van het gebruik van schermen is dat het schermdoek in opgevouwen toestand circa 4% van het licht wegvangt, en daarmee circa 3% productie kost. Voor sommige telers weegt dit nadeel dusdanig zwaar dat ze ook bij het nieuw bouwen van een kas geen schermdoek installeren. Het lichtverlies door het opgevouwen schermdoek kan aanzienlijk verminderd worden door het doek in de constructiedelen (tralieligger) te laten wegvouwen, wat het lichtverlies kan reduceren tot 2 á 3%. Overigens kan dit productieverlies gedeeltelijk gecompenseerd worden door betere omstandigheden onder het scherm (gelijkmatiger temperatuur en luchtvochtigheid).

Geraadpleegde literatuur

- Bloem, L., 2000.
Schermen in de glastuinbouw. Energie- en teeltaspecten. Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, 127 pp.
- Braak, N.J. van de, J.J.G. Breuer, F.L.K. Kempkes, G.L.A.M. Swinkels & C.M.J. Bloemhard, 1998.
Optimaal schermgebruik in kassen: Evaluatie regelstrategieën. IMAG nota P 98-02.
- Kempkes, F.L.K, N.J. van de Braak, A.T.M. Zwinkels & G. Houter, 2000.
Schermkieren in de praktijk. IMAG nota P 2000-30.
- Stanghellini, C., C. Blok, M. Esmeijer & F.L.K. Kempkes, 2003.
Strategieverkenning verdamping: verlaagde verdamping als middel om energie te besparen. IMAG nota P 2003-02.
- Visser, P., 2003.
Balanceren tussen licht, warmte en vocht. Groenten & Fruit 5: 20-21.
- Visser, P., 2003.
Nieuwe schermen laten meer vocht door. Groenten & Fruit 38: 26-27.

