

# Teeltconcept voor de geconditioneerde kas

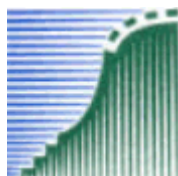
Marcel Raaphorst  
Frank Kempkes (PRNA&F)  
Ep Heuvelink (PRNTPK)  
Ruud Kaarsemaker  
Menno Bakker (PRNTPK)

© 2006 Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

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

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

Dit project is gefinancierd door het energieprogramma van het ministerie van LNV samen met het Productschap Tuinbouw.



Projectnummer: 41414089

**Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.**

Business Unit Glastuinbouw

Adres : Kruisbroekweg 5  
: Postbus 8, 2670 AA Naaldwijk  
Tel. : 0174 - 636700  
Fax : 0174 - 636835  
E-mail : [infoglastuinbouw.ppo@wur.nl](mailto:infoglastuinbouw.ppo@wur.nl)  
Internet : [www.ppo.wur.nl](http://www.ppo.wur.nl)

# Inhoudsopgave

	pagina
SAMENVATTING	5
1 INLEIDING	7
1.1 Probleemstelling	7
1.2 Doelstellingen	7
1.3 Afbakening	7
2 METHODE	9
2.1 KASPRO berekeningen	9
2.1.1 Uitgangspunten (klimaatjaar, koelvermogen etc.)	9
2.1.2 Uitvoer van data naar INTKAM model	9
2.2 INTKAM berekeningen	10
2.2.1 Beschrijving simulatiemodel	10
2.2.2 Parameters	10
2.2.3 Enkele opmerkingen	10
2.3 Economische berekeningen	11
3 RESULTATEN	13
3.1 Geschiktheid van INTKAM voor (semi)gesloten kassen	13
3.2 Cases	13
3.3 Gewasgroei en productie	14
3.3.1 Gerealiseerde temperatuur	14
3.3.2 Gerealiseerd CO <sub>2</sub> -niveau	16
3.3.3 Invloed van geconditioneerd telen op productie	17
3.3.4 Berekening groei en productie voor de cases	20
3.4 Warmtevraag en koudevraag	22
3.5 Economische evaluatie	26
3.5.1 Bepaling van de grootte van de investering, de verbruiken en opbrengsten	26
3.5.2 Bepaling van de case met de laagste energie- en investeringskosten	27
3.5.3 Bepaling van de economisch meest optimale case	28
3.5.4 De prijs van koude	29
4 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	31
4.1 Discussie	31
4.2 Conclusies	32
4.3 Aanbevelingen	33
LITERATUUR	34
BIJLAGE 1 DE PROCESSEN IN EEN TOMATENPLANT	35
BIJLAGE 2 GEWASGROEI- EN PRODUCTIESIMULATIES GESLOTEN KAS 2002, 2004 EN 2005	39
BIJLAGE 3 HOGE TEMPERATUURSTRESS BIJ TOMAAT	47
BIJLAGE 4 GEBRUIKTE BASISSETPOINTS EN KASEIGENSCHAPPEN	51
BIJLAGE 5 UITGANGSPUNTEN EN WERKWIJZE ECONOMISCHE BEREKENINGEN	53

Werkwijze berekening capaciteiten	53
Berekening investeringskosten per m <sup>2</sup> gesloten kas	55
Berekening van de kosten en opbrengsten per m <sup>2</sup> gesloten kas	55
BIJLAGE 6 BEREKENINGEN DIMENSIONERING PER CASE	57

# Samenvatting

In een (semi)gesloten kas is het mogelijk om gedurende het gehele jaar vrijwel elke temperatuur bij een hoog CO<sub>2</sub>-niveau te handhaven. Zeker in gesloten kas van Themato, waar een hoge koelcapaciteit is geïnstalleerd, blijft de dagtemperatuur met gesloten ramen vrijwel altijd onder de 27°C, terwijl de etmaaltemperatuur zelfs de hele zomer onder de 20°C kan blijven. Het is echter de vraag of een hoge koelcapaciteit economisch verantwoord is. Ofwel: worden de kosten die in de extra koelcapaciteit worden gestoken om de temperatuur te allen tijde met gesloten ramen laag te kunnen houden, terugverdiend met een hogere productie? En wat is de invloed op het energieverbruik?

Daarom heeft PPO-Glastuinbouw in samenwerking met PRI en A&F onderzocht wat de invloed is van de temperatuurinstellingen op de productie van tomaat en op het energieverbruik in een (semi)gesloten kas. Ook is onderzocht hoe groot de investering in koelcapaciteit moet zijn om de gewenste temperatuurinstellingen te kunnen bereiken. Hiervoor is gebruik gemaakt van rekenmodellen.

De productie wordt bepaald door de gewasfotosynthese en het percentage van de gewasfotosynthese dat naar de vruchten gaat. Uit literatuuronderzoek is gebleken dat de temperatuur binnen de range van 15°C tot 30°C slechts geringe invloed heeft op de bruto gewasfotosynthese bij tomaat. Een lichtverhoging op de stooktemperatuur heeft dus nauwelijks of geen invloed op de fotosynthese en kost alleen maar energie. Anderzijds heeft het voor de gewasfotosynthese ook geen nut om tijdens zonnige uren de kas ver onder de 30°C te koelen. Overigens kan een langdurige blootstelling aan etmaaltemperaturen van meer dan 25°C tot enkele procenten productieverlies leiden, mogelijk door een verminderde stuifmeelkwaliteit en daardoor een achterblijvende vruchtzetting. Bij langdurige etmaaltemperaturen van 29 °C is dit productieverlies zelfs 25%. Of een kort durende blootstelling aan nog hogere temperaturen tot productieverlies leidt is niet bekend.

Naast de geringe invloed op de fotosynthese heeft de temperatuur vooral invloed op de plantopbouw. Zo geeft een hogere temperatuur meer bladstrekking, en door de snellere afsplitsing van nieuwe trossen worden de assimilaten verdeeld over meer vruchten die hierdoor minder groot worden. Bij een te lage temperatuur worden niet genoeg vruchten aangemaakt om een voldoende hoog aandeel van de assimilaten in productie om te zetten. Per saldo is het effect van temperatuur op de uiteindelijke productie gering onder de voorwaarden dat er voldoende bladoppervlak (LAI) is en de fotosynthese en assimilatenvraag in balans blijven.

Als een hogere temperatuur kan worden geaccepteerd kan worden bespaard op het koelsysteem. Bij een (semi)gesloten kas bepaalt de benodigde capaciteit van de warmtepompen, de doubletten, de warmtebuffers en de dagbuffers een belangrijk deel van de rentabiliteit. Een ander voordeel van koelen bij hogere kastemperaturen is, dat het koelwater tot een hogere temperatuur kan worden opgewarmd en de geoogste warmte meer waarde krijgt. Per geoogste GigaJoule warmte is dan ook minder koelwater nodig.

Bij een koelsetpoint van 28°C is maximaal ongeveer 440 m<sup>3</sup>/ha.uur aan koelwater van 10°C nodig om het hele jaar de kas gesloten te kunnen houden. Gedurende slechts 100 uren is meer dan 300 m<sup>3</sup>/ha.uur koelwater nodig. Als gedurende deze 100 uren de ramen worden geopend kan dus met een 31% kleinere koelcapaciteit worden gewerkt. Dit kost productie omdat het CO<sub>2</sub>-niveau gedurende deze 100 uren niet op 1000 ppm kan worden gehouden, maar dit productieverlies weegt niet op tegen de voordelen van de lagere investering in de koelcapaciteit.

Met modellen zijn berekeningen gedaan voor 12 cases die onderling verschillen in streefwaarden voor dag- en nachttemperatuur, lichtverhoging, dode zones tussen stooklijn en koellijn, en bladmassa (LAI). Uit de berekeningen is gebleken dat de case met de laagste dag- en nachttemperatuur en de grootste dode zone en de hoogste LAI economisch gezien als beste uit de bus is gekomen. Bij deze case is jaarrond een nachttemperatuur van 16°C en een minimum dagtemperatuur van 18°C aangehouden. De dagtemperatuur

werd verhoogd met een lichtverhoging van 3°C bij hogere instraling tot 400 Watt en hierboven werd een dode zone van 6°C aangehouden voordat werd begonnen met koelen. Het maximum setpoint waarbij werd gekoeld in deze case was hiermee gesteld op 27°C.

Vervolgens is berekend dat als de maximum temperatuur niet op 27°C maar op 29°C wordt ingesteld, de investeringskosten met 8% lager kunnen zijn terwijl de productie slechts weinig daalt. Ook bij een nog hogere maximum kastemperatuur bij een kleinere koelcapaciteit zou nog een beter economisch eindresultaat kunnen worden gehaald. Dit pleit voor een semi-gesloten kas met een beperkte koelcapaciteit van minder dan 400 m<sup>3</sup> koelwater per hectare per uur, waarbij momentane temperaturen bij tomaat tot 31°C worden getolereerd.

Als in de zomer onvoldoende koelwater beschikbaar is kan de warmtepomp worden gebruikt voor productie van extra koelwater. Hiervoor is berekend dat het alleen interessant is om de warmtepomp te gebruiken zo lang de bij het koelen geogste warmte nuttig kan worden gebruikt. Als echter al zoveel warmte is geogst dat deze (deels) moet worden geloosd, wordt het conditioneren met koude uit een warmtepomp zelfs duurder dan het openen van de ramen en het doseren van extra CO<sub>2</sub>.

Geconcludeerd kan worden dat een semi-gesloten kas met een beperkte koelcapaciteit voor de tomatenteelt economisch rendabeler is dan een gesloten kas die de kastemperatuur altijd op 27°C kan houden. De temperatuur mag best hoger oplopen zo lang de etmaaltemperatuur niet langdurig boven de 26°C komt en de afsplitsing van nieuwe bladeren en vruchten niet zo hoog wordt dat het gemiddelde vruchtgewicht te laag wordt. Ook mogen de luchtramen op piekmomenten worden geopend. Een semi-gesloten kas hoeft dan niet meer dan 300 m<sup>3</sup>/ha.uur koelwater van 10°C ( $\pm$  400 W/m<sup>2</sup>) te verwerken.

# 1 Inleiding

## 1.1 Probleemstelling

Teeltomstandigheden in (semi)gesloten kassen wijken behoorlijk af van die in open kassen. Zo komen in een (semi)gesloten kas omstandigheden voor die in de “open” kas niet voorkomen. Deze omstandigheden zijn bijvoorbeeld de combinatie van veel licht en hoge CO<sub>2</sub> concentraties en veranderde luchtbeweging. Bovendien is het in een (semi)gesloten kas mogelijk om vele combinaties van RV, temperatuur en CO<sub>2</sub>-niveau te realiseren, onafhankelijk van de hoeveelheid globale straling of de buitentemperatuur. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk om in de zomer bij hoge buitentemperaturen de kastemperatuur toch op een laag niveau te houden. Het is echter niet bekend in hoeverre dit gunstig is voor de productie of het energieverbruik.

Op basis van ervaringen bij Themato blijkt de beschikbaarheid van koude een beperkende factor bij volledig gesloten kassen te zijn. De teeltstrategie behelst de afweging tussen de momenten waarop koude wordt ingezet voor koeling en/of ontvochtiging, of dat het kasklimaat wordt geregeld via natuurlijke ventilatie.

Caseberekeningen met KASPRO, voor de situatie van een gesloten kas gecombineerd met productieberekeningen met INTKAM, kunnen een beeld schetsen van de mogelijkheden om het klimaat in een (semi)-gesloten kas te sturen en de plantkundige gevolgen van deze sturingsmogelijkheden. Hierin wordt de kennis van energiezuinige teeltstrategieën van de conventionele kassen benut bij de optimalisatie.

## 1.2 Doelstellingen

### Technische doelstellingen

Ontwikkeling van een optimale combinatie van koeling en productie voor een (semi)-gesloten kas systeem, mede gebaseerd op de kennis van energiezuinige strategieën uit de open kassen

### Energie doelstellingen

(Semi)-gesloten kassystemen besparen ruim 30% op het energieverbruik indien alle geogoste warmte nuttig wordt aangewend. De teeltstrategie die in dit project ontwikkeld wordt moet de realisatie van deze energiebesparing mogelijk maken terwijl de productie wordt gemaximaliseerd.

### Nevendoelstellingen

Een bredere kennis van de sturingsmogelijkheden voor (semi)-gesloten kassen. Toepassing van de strategie voor energiezuinig telen uit een conventionele kas laat zien of deze regeling breder toepasbaar is.

### Toepassingstermijn

Dit onderzoek kan worden toegepast bij de ontwikkeling van kas- en teeltconcepten met kaskoeling.

### Doelgroep

De resultaten zijn bedoeld voor telers, adviseurs en installateurs van (semi)gesloten kassystemen

## 1.3 Afbakening

Het onderzoek beperkt zich tot het gewas tomaat, hoewel veel elementen ervan ook kunnen gelden voor andere gewassen.

Wat de invloed van hogere kastemperaturen is op de arbeidsomstandigheden is in dit onderzoek niet bekeken.





## 2 Methode

Om te onderzoeken wat de invloed is van verschillende kasklimaatregimes op de productie, het energieverbruik en de op dimensionering van de benodigde verwarmings- en koelinstallaties wordt gebruik gemaakt van modellen. Met het model KASPRO kan berekend worden wat de invloed is van kasklimaatinstellingen op onder andere het verloop van de temperatuur, de luchtvochtigheid, de CO<sub>2</sub>-concentratie, de warmtevraag en de koudevraag. Met het model INTKAM kan uit de temperatuur, de luchtvochtigheid en de CO<sub>2</sub>-concentratie in combinatie met de hoeveelheid licht worden bepaald hoe hoog de productie kan worden. Uit de resultaten uit KASPRO en INTKAM kan met een in Excel gebouwd bedrijfseconomisch model worden bepaald hoe groot de benodigde dimensionering is en wat het uiteindelijke bedrijfseconomische resultaat is bij het hanteren van bepaalde kasklimaatinstellingen.

### 2.1 KASPRO berekeningen

#### 2.1.1 Uitgangspunten (klimaatjaar, koelvermogen etc.)

Berekeningen met kasklimaatmodellen worden beïnvloed door het buitenklimaat. Om toch vergelijkingen te kunnen maken tussen verschillende systemen wordt gebruik gemaakt van een “gestandaardiseerd” buitenklimaat. De beschrijving van het buitenklimaat gaat dan ook uit van typisch Nederlandse weersomstandigheden. Deze dataset is weergegeven in het SEL-jaar (Breuer en Van de Braak, 1989). De kas is een moderne Venlo-kas, waarin tomaten worden geteeld met een plantdatum van 10 december en een ruimdatum van 30 november. De gewasontwikkeling en groei wordt in deze klimaatberekeningen als een vast gegeven beschouwd. Hierdoor is de groei in alle cases volgens een vast patroon (mits anders vermeld). In de gewasmodelberekeningen is de gewasgroei en ontwikkeling wel afhankelijk van het gerealiseerde klimaat. Er wordt een eenvoudig klimaatregiem aangehouden met een dagtemperatuur van 18 °C en een nachttemperatuur van 16 °C. Afhankelijk van de gekozen cases, zie paragraaf 3.2, zijn de temperatuursetpoints aangepast. Voor de energiebesparing is in de wintermaanden ook een beweegbaar transparant bandjesdoek gebruikt. De volledige set aan setpoints is in Bijlage 4 weergegeven. Om koud water te sparen is er in alle berekeningen voor gekozen gedurende de nacht de luchtramen te gebruiken om te ontvochtigen en te koelen.

Voor de koeling worden luchtkoelers gebruikt, die met koud water worden gevoed. Er is geen maximum aan het koudwaterdebiet gesteld. Uit de koudevraag zoals die in paragraaf 3.4 gepresenteerd is, volgt dan de maximale benodigde capaciteit voor de verschillende cases. De watertemperatuur is hierbij op 10 °C gesteld. Omdat de kasluchtcondities (temperatuur en vochniveau) variëren, kan niet direct een ‘geïnstalleerd’ koelvermogen worden aangegeven. Met één m<sup>3</sup> koudwater van 10 °C kan veel meer bereikt worden bij een kasluchttemperatuur van 30 °C en een RV van 60% dan bij een kasluchttemperatuur van 22 °C en een RV van 90%. Het koelvermogen is dus variabel. In de resultaten, paragraaf 3.4 zal dan over een gerealiseerde koelprestatie gesproken worden.

#### 2.1.2 Uitvoer van data naar INTKAM model

Vanuit de berekende klimaatparameters, worden inputbestanden voor het INTKAM model gemaakt. Het INTKAM model gebruikt de globale straling, buitentemperatuur, kasluchttemperatuur, buistemperatuur, de schermstand, het CO<sub>2</sub>-niveau en de dampdruk van de kaslucht als input. Dit zijn uurwaarden. Zoals het KASPRO model de gewasgroei en ontwikkeling als een vast gegeven ziet, zo maakt INTKAM van deze parameters gebruik als zijnde een vaststaand gegeven. Er is dus geen directe terugkoppeling van de plantprocessen op het klimaat. Anders gezegd: Als het gewas zich volgens het INTKAM model anders ontwikkelt dan waarmee KASPRO rekening heeft gehouden, wordt de output van KASPRO niet gecorrigeerd op een andere verdamping van het gewas. De fout die hiermee ontstaat is echter gering omdat de kleine inschattingfout op de verdamping op jaarbasis slechts een geringe invloed heeft op de kastemperatuur.

## 2.2 INTKAM berekeningen

### 2.2.1 Beschrijving simulatiemodel

Het voor de simulaties gebruikte model INTKAM is het standaard gewasgroei-simulatiemodel zoals dat door Plant Research International al in vele voorgaande projecten is gebruikt. Hierbij werden parameterinstellingen gebruikt, behorend bij het gewas tomaat.

Hieronder volgen kort de belangrijkste zaken aangaande dit model.

De globale straling buiten de kas, de temperatuur en CO<sub>2</sub>-concentratie in de kas zijn input voor het model. Deze gegevens kunnen worden opgelegd maar kunnen ook afkomstig zijn uit metingen (nasimuleren experiment) of uit simulatie met KASPRO (casestudie). 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. In voorkomende gevallen werd het versgewicht van geoogste vruchten berekend door het drooggewicht te delen door een verondersteld drogestofgehalte. Het plukken van bladeren gaat standaard per sectie van 3 bladeren, en gebeurt ca. 1 week voordat bijbehorende tros rijp is.

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, vruchtoogst en bladpluk was 1 dag.

### 2.2.2 Parameters

Parametrisering voor het analyseren van het temperatuureffect op gewasgroei- en productie (zie voor resultaten in paragraaf 3.3.3):

- Transmissie van de kas voor diffuse straling 73%
- Plantdichtheid 2,5 planten per vierkante meter
- Stengel en bladpluk strategie volgens proefgegevens THEMATO2005: start met 2,5 stengels, vanaf week 9: 3,3 stengels, vanaf week 15: 3,8 stengels.
- Gemiddeld 7,4 vruchten per tros
- Start van simulatie 1 januari (dag 1) en einde op 13 november (dag 317, is einde teelt)
- Klimaat: straling op basis van SELYEAR en temperatuur (16-20-24 °C) en CO<sub>2</sub> (500 en 1000 ppm) over de hele teelt met vaste waarden opgelegd.

Specifieke parametrisering voor de casestudies (zie voor resultaten in paragraaf 3.3.4):

- Transmissie van de kas 73%
- Plantdichtheid 2,5 planten per vierkante meter
- Stengelstrategie gericht op het nastreven van 2 LAI-niveau's: 2,5 en 3,5. Voor eerste strategie extra stengels op dag 64, 78 en 92, telkens bij 1 op 10 planten (uiteindelijke stengeldichtheid dus 3,25 stengels per m<sup>2</sup>). Voor de hoge LAI strategie werden extra stengels aangehouden op dezelfde dagen, maar dan bij 2 op 10 planten (uiteindelijke stengeldichtheid 4 stengels per m<sup>2</sup>). Een LAI van 3,5 bleek niet te realiseren vanwege de voor telers maximaal acceptabele stengeldichtheid van 4,0 stengels/m<sup>2</sup>. Alle stengels worden getopt op dag 260.
- Gemiddeld 7,0 vruchten per tros
- Start van simulatie 11 december (dag 345, plantdatum) en einde op 10 december (dag 344) van het volgende jaar
- Klimaat: op basis van voor de afzonderlijke cases met KASPRO gegenereerde inputfiles.

### 2.2.3 Enkele opmerkingen

In het model zitten diverse parameters die rasafhankelijk zijn zoals bloeisnelheid en maximale vruchtgrootte.

Er zijn standaard waarden gebruikt (ras Counter). Verwacht mag worden dat andere settings de conclusies van het rapport niet beïnvloeden, maar getallen zullen natuurlijk wel iets anders kunnen worden bij parametrisering voor een ander ras.

Bladplukken gebeurt per sectie van 3 bladeren, die gezamenlijk verwijderd worden ongeveer 1 week voordat de onderliggende tros rijp is. Niet alle telers hanteren dezelfde bladplukstrategie. Het zal duidelijk zijn dat meer blad aan de plant laten, een hogere lichtonderschepping en productie oplevert (Heuvelink et.al., 2005), maar uit oogpunt van oogstarbeid, afrijpingssnelheid van de vruchten en ziektenrisico wordt dit zelden gedaan.

Een hogere temperatuur geeft een snellere bladaanleg (hierboven), maar trossen rijpen ook sneller af. Door de gehanteerde algemeen toegepaste bladplukstrategie zitten bladeren dus korter aan de plant en zal het aantal bladeren aan de plant nauwelijks verschillen in afhankelijkheid van de temperatuur. De soms heersende gedachte dat we bij een hogere temperatuur een hogere bladoppervlakteindex (LAI) krijgen is dus onjuist.

## 2.3 Economische berekeningen

Bij de economische evaluatie wordt uitgegaan van conditionering en verwarming met een WKK, een warmtepomp en opslag van warmte en koude in aquifers en dagbuffers. Er wordt geen verwarmingsketel gebruikt. De WKK levert via een rookgasreiniger CO<sub>2</sub>, eventueel aangevuld met zuivere CO<sub>2</sub> uit tanks. De economisch meest optimale case is een afweging tussen de factoren productieopbrengsten en klimaatkosten. Meestal gaan hogere productieopbrengsten gepaard met hogere klimaatkosten. Daar waar de marginale productieopbrengsten gelijk zijn aan de marginale klimaatkosten ligt de optimale case.

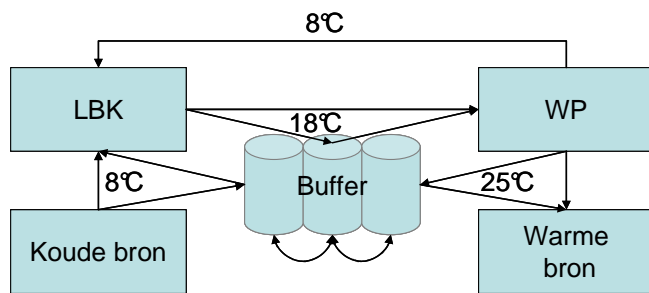
De productieopbrengsten worden in dit onderzoek bepaald door:

- de berekende productie
- de bruto marge, ofwel de prijs van een extra kg geproduceerde tomaten minus de kosten voor het verwerken (oogsten en gewasverzorgen) en afzetten (veilingkosten, verpakkingskosten) van een extra kg tomaten.

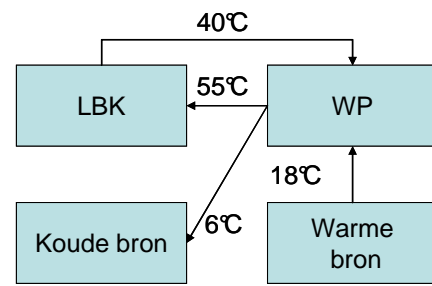
De klimaatkosten worden bepaald door:

- het energieverbruik (warmte, koude en CO<sub>2</sub>)
- de energietarieven
- het verloop van de benodigde koelcapaciteit
- het verloop van de benodigde verwarmingscapaciteit
- de prijs van de benodigde investeringen
- de prestatie van de benodigde investeringen

Voor zover deze factoren niet door KASPRO en INTKAM worden berekend zijn schattingen gemaakt. De belangrijkste uitgangspunten en een voorbeeld van de berekeningswijze zijn vermeld in Bijlage 5. Een belangrijke factor bij de economische evaluatie is de dimensionering van de duurzame productiemiddelen zoals warmtepompen, de luchtbehandelingskasten (LBK), de doubletten van en naar de koude bron en de dagbuffers. In Figuren 1 en 2 is voor een zomersituatie en een wintersituatie aangegeven van welke temperaturen is uitgegaan bij de stromen tussen deze duurzame productiemiddelen.



**Figuur 1 Koelen**



**Figuur 2 Verwarmen.**

Uit het verloop van de warmtevraag en de koelvraag wordt berekend aan hoeveel open kas een gesloten kas warmte kan leveren en hoe groot de warmtepomp, de buffers en de pompcapaciteit naar de aquifer moet zijn. Ook kan worden bepaald hoeveel CO<sub>2</sub> nodig is in het gesloten areaal en het open areaal. Vervolgens kunnen de investeringskosten, de verbruikskosten en de warmte-opbrengsten worden bepaald.

In paragraaf 3.5 wordt voor alle doorgerekende cases deze economische evaluatie uitgevoerd.

## 3 Resultaten

In dit hoofdstuk wordt eerst nagegaan in hoeverre het model INTKAM geschikt is om de gewasgroei en de productie ook in een (semi)gesloten kas-situatie te voorspellen. Vervolgens is bepaald welke uitgangspunten worden gehanteerd voor het doorrekenen van de cases. Van deze cases is berekend wat de klimaatomstandigheden, de gewasgroei en de productie zijn. Ook is bepaald wat bij elke case de benodigde warmtevraag en koudevraag is. Ten slotte is bepaald bij welke case economisch gezien het hoogste resultaat is te behalen.

### 3.1 Geschiktheid van INTKAM voor (semi)gesloten kassen

Om te kunnen nagaan of het INTKAM model geschikt is om de productie in een (semi)gesloten-kas-situatie te voorspellen, zijn de berekeningen met het model vergeleken met de producties in de gesloten kas van PPO in 2002 en van Themato in 2004 en 2005. De resultaten hiervan staan vermeld in Bijlage 2. Voor alle drie de jaren voorspelt het model INTKAM een productieverhoging van ca. 17% bij gebruik van een gesloten kas. In 2002 was er geen conventionele kas om mee te vergelijken, in 2004 werd bij Themato deze voorspelde productieverhoging niet gehaald, vermoedelijk door suboptimale teelt (o.a. Botrytis). In 2005 is de gemeten meerproductie tot september vrijwel identiek aan de voorspelde meerproductie met INTKAM.

Deze analyse over 3 jaren geeft geen aanwijzingen om te veronderstellen dat INTKAM de situatie van een (semi)gesloten kas niet goed zou kunnen simuleren. INTKAM lijkt daarom geschikt om in vervolgstudies het klimaat en de teeltechniek in de (semi)gesloten kas te optimaliseren.

### 3.2 Cases

Tijdens een sessie met deskundigen op het gebied van kasklimaat en productie bij tomaat is gediscussieerd over het effect van hoge temperaturen op de productie. Tijdens de sessie is als meest cruciale vraag naar voren gekomen bij welke temperatuur (korte en lange termijn) de tomaat productieschade oploopt. Om toch een indruk te krijgen van de invloed van temperatuur op de bruto fotosynthese en de onderhoudsademhaling en het benodigde aantal stengels om de gevormde assimilaten zo veel mogelijk om te zetten in productie, zijn eerst verkennende berekeningen uitgevoerd met een brede temperatuurrange en meerdere LAI-niveaus. Hiernaast is een literatuurstudie uitgevoerd over de effecten van hoge temperatuur op de productie bij tomaat, waarvan de resultaten in Bijlage 3 zijn verwerkt. Uit deze literatuurstudie is onder andere gebleken dat het langdurig aanhouden van een etmaaltemperatuur hoger dan 26°C kan leiden tot 5% productieverlies. In een moderne Nederlandse kas met een volgroeid tomatengewas komt een langdurige etmaaltemperatuur van meer dan 26°C echter zelden tot nooit voor.

Uit verkennende berekeningen (zie ook Tabel 4) kwam naar voren dat relatief lage temperaturen de hoogste biomassa en productie geven. Echter, tussen 18 en 24 °C waren er geen grote effecten van temperatuur op de netto en bruto gewasfotosynthese. Het bladoppervlak moet in de lichtrijke perioden (periode 4-9) wel voldoende hoog zijn ( $LAI > 3$ ), voor een voldoende hoge lichtonderschepping (meer dan 90%). Vanuit die uitgangspunten zijn 12 cases vastgesteld (Tabel 1). Er is gekozen voor twee streefwaarden voor de LAI (2,5 of 3,5  $m^2/m^2$ ; bij de hogere streefwaarde meer stengels/ $m^2$  aangehouden), gecombineerd met twee setpoints voor de stooktemperatuur (D/N 18/16 met 3 °C lichtverhoging of 20/18 met 2 °C lichtverhoging) gecombineerd met drie trappen voor de dode zone tussen stooktemperatuur en koeltemperatuur (2, 4 of 6 °C). De dode zones van 2, 4 of 6 °C zijn zodanig gekozen dat flinke variatie in benodigde koelbehoefte zal ontstaan. Een dode zone van 6 °C bij 18 °C dagtemperatuur betekent dat de zon de kas mag opwarmen tot  $18+6=24$  °C en daarboven wordt pas gekoeld. Bij momentane temperaturen boven 24 °C loopt de netto gewasfotosynthese iets terug. Bij 20 °C stooktemperatuur zouden we daar al vaker overheen komen (dode zone 6 graden, dus alleen dan wanneer de straling zodanig is dat de kas meer dan 6 graden boven de stooktemperatuur opgewarmd wordt (+26 °C) wordt er gekoeld). De cases zijn zodanig gekozen dat we rond het 'grofweg vastgestelde' optimum voor productie zitten. In Bijlage 4 zijn de gebruikte basissetpoints weergegeven.

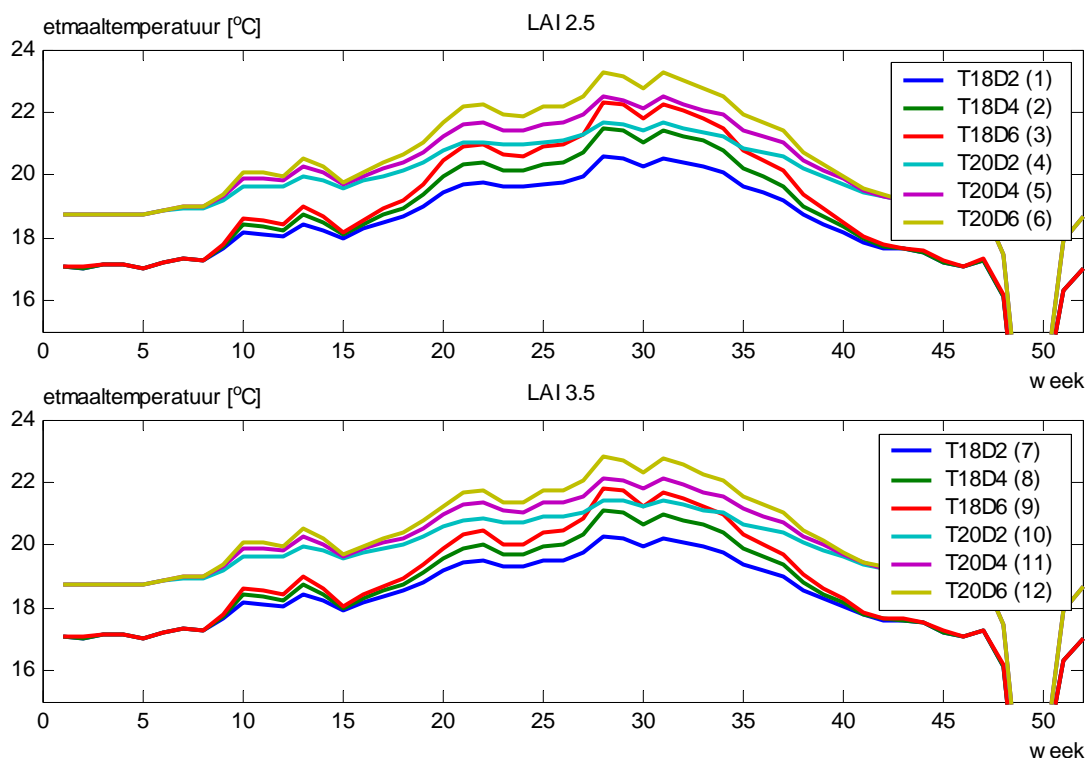
**Tabel 1** Cases met belangrijkste eigenschappen zoals deze zijn doorgerekend in de verschillende modellen.

case	LAI	setpoint verwarmen		dodezone		Lichtverhoging	Max setpoint koelen dag
		dag	nacht	dag	nacht		
1 – T18D2	2,5	18	16	2	1	3	23
2 – T18D4	2,5	18	16	4	1	3	25
3 – T18D6	2,5	18	16	6	1	3	27
4 – T20D2	2,5	20	18	2	1	2	24
5 – T20D4	2,5	20	18	4	1	2	26
6 – T20D6	2,5	20	18	6	1	2	28
7 – T18D2	3,5	18	16	2	1	3	23
8 – T18D4	3,5	18	16	4	1	3	25
9 – T18D6	3,5	18	16	6	1	3	27
10 – T20D2	3,5	20	18	2	1	2	24
11 – T20D4	3,5	20	18	4	1	2	26
12 – T20D6	3,5	20	18	6	1	2	28

### 3.3 Gewasgroei en productie

#### 3.3.1 Gerealiseerde temperatuur

Tussen de in paragraaf 3.2 aangegeven cases zullen verschillen in gerealiseerd klimaat ontstaan. In Figuur 3 zijn de weekgemiddelde etmaaltemperaturen weergegeven. Om duidelijk onderscheid te kunnen maken zijn alle cases in 2 blokken opgedeeld, één met de cases met LAI 2,5 en een tweede deel met de cases met een LAI van 3,5.



**Figuur 3** Weekgemiddelde etmaaltemperaturen voor 6 cases met een LAI van 2,5 en 6 cases met een LAI van 3,5.

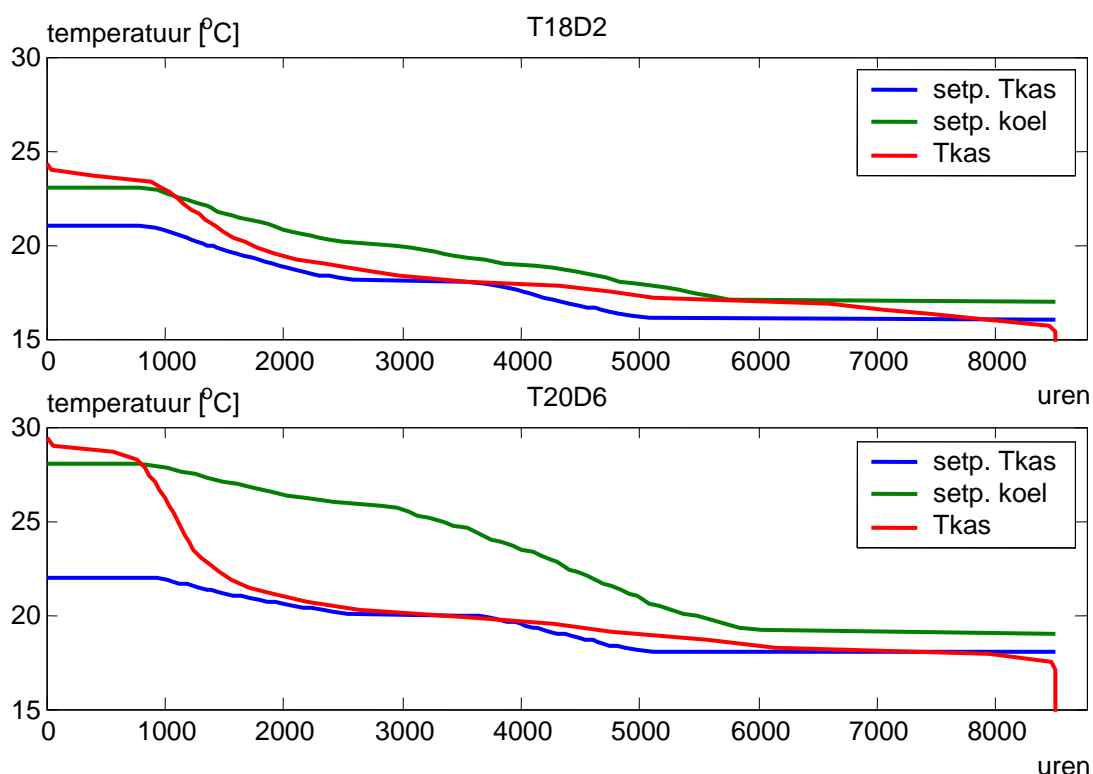
Uit Figuur 3 komt het verschil in setpoints (dag/nacht 18/16 of 20/18) duidelijk naar voren. Vooral in de winterperiode waar de zon niet vaak voor een zodanige temperatuurverhoging kan zorgen dat geventileerd (lees gekoeld) moet worden. Pas vanaf week 10 beginnen zich duidelijke verschillen af te tekenen. In de

perioden met weinig temperatuurverschillen is dan ook niet te verwachten dat zich duidelijke gewas(ontwikkeling) verschillen gaan voordoen. De verschillen in de zomer kunnen behoorlijk (tot ca. 2,5 °C) oplopen. De verschillen tussen een LAI van 2,5 of van 3,5 zijn in de wintermaanden verwaarloosbaar, en in de zomer zorgt het grotere bladoppervlak → meer verdamping en daarmee extra koeling van de kas, voor een enkele tienden graden lagere kasluchttemperatuur. De verschillen tussen de vergelijkbare cases zijn over de gehele linie vrijwel constant. In Tabel 2 zijn de gemiddelde jaartemperaturen weergegeven. Uit Tabel 2 blijkt dat de verschillen op jaarbasis op kunnen lopen tot ca. 0,6 °C binnen één groep. Hierbij wordt met een groep een gelijke LAI en een gelijk basis setpoint verwarmen (18 of 20 °C) bedoeld. Hoewel de verschillen tussen de groep LAI 2,5 en LAI 3,5 op het oog klein zijn, is er toch een goede reden om beiden te beschouwen (zie paragraaf 3.3).

**Tabel 2** Jaargemiddelde temperaturen.

case		LAI 2,5	LAI 3,5
T18 D2	1 / 7	18,2	18,1
T18 D4	2 / 8	18,5	18,3
T18 D6	3 / 9	18,8	18,6
T20 D2	4 / 10	19,6	19,5
T20 D4	5 / 11	19,9	19,8
T20 D6	6 / 12	20,2	20,0

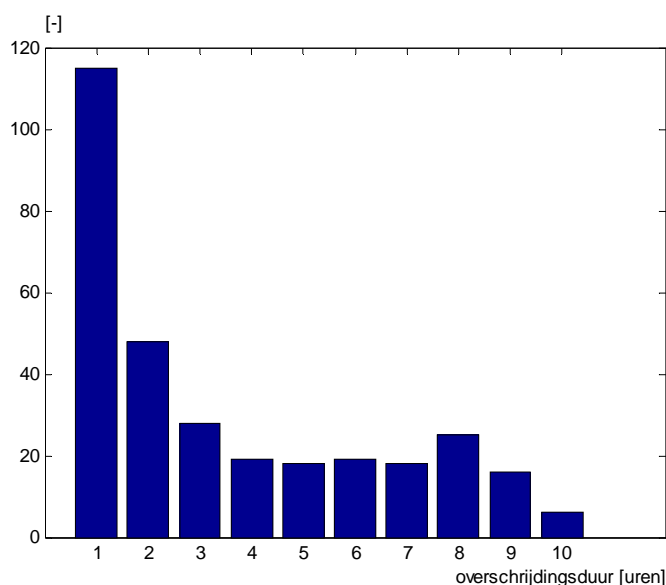
Om een indruk te geven van de momentane kastemperaturen zijn in Figuur 4 voor twee cases de jaarbelastingduurkrommen weergegeven van de setpoints voor verwarmen en koelen en de gerealiseerde kasttemperatuur.



**Figuur 4** Jaarbelastingduurkromme van het setpoint verwarmen, het setpoint koelen en de gerealiseerde kasluchttemperatuur voor de case T18D2 en T20 D6 bij een LAI van 2,5.

Figuur 4 laat zien dat de kasttemperatuur in een jaar tijd ongeveer 800-1000 uren boven het maximale temperatuursetpoint voor koeling uitkomt. Het gaat hierbij om beperkte overschrijdingen in temperatuur

gaat (maximaal ongeveer 3,2 en 6,4 °C voor resp. de cases T18D2 en T20D6). Om toch iets over de duur van deze overschrijdingen te zeggen, is in Figuur 5 een histogram van de overschrijdingsduur gemaakt voor de case T20D6 bij een LAI van 2,5. Uit Figuur 5 blijkt dat er maximaal 10 uur achtereen een overschrijding is van het setpoint koelen. Veruit de meeste keren zijn het afzonderlijke uren.



**Figuur 5** Histogram van het aantal malen dat een bepaalde overschrijdingsduur heeft plaatsgevonden voor de case T20D6 bij een LAI van 2,5.

### 3.3.2 Gerealiseerd CO<sub>2</sub>-niveau

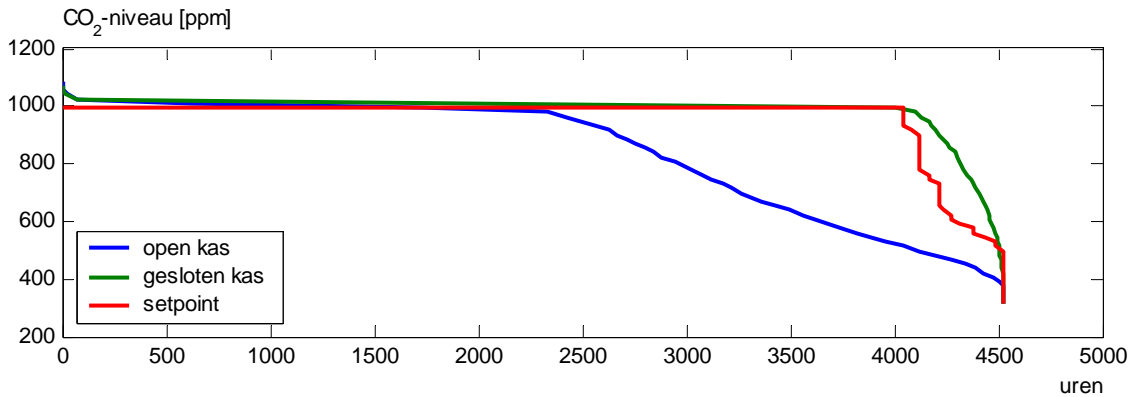
Een gesloten kas moet garant staan voor een continu hoog CO<sub>2</sub>-niveau. Uit analyse van de gegevens is gebleken dat het gerealiseerde CO<sub>2</sub>-niveau tijdens uren dat het licht was nooit duidelijk van het setpoint (1000 ppm) afweek. Hierbij zijn ook kleinere hoeveelheden CO<sub>2</sub>-gedoseerd. In Tabel 3 is de gedoseerde hoeveelheid CO<sub>2</sub> weergegeven.

**Tabel 3** CO<sub>2</sub>-dosering [kg/m<sup>2</sup>].

case		LAI 2,5	LAI 3,5
T18 D2	1 / 7	16,9	17,6
T18 D4	2 / 8	16,8	17,6
T18 D6	3 / 9	16,7	17,5
T20 D2	4 / 10	16,8	17,6
T20 D4	5 / 11	16,7	17,4
T20 D6	6 / 12	16,5	17,3

Deze doseerhoeveelheid ligt op ca. 50% van wat in een openkas gedoseerd wordt, waarbij het gewenste niveau van 1000 ppm ook nog eens een groot aantal uren niet gehandhaafd kan worden. In Figuur 6 is een jaarbelastingduurkromme van het CO<sub>2</sub>-setpoint en de gerealiseerde CO<sub>2</sub>-niveaus van een gesloten en open kas gegeven. De regeling zorgt ervoor dat zodra het licht wordt, het setpoint van 300 naar 1000 ppm verhoogd wordt. Omdat het enige tijd duurt om het setpoint op en af te bouwen is op jaarrondbasis circa 4050 uur (alleen overdag) het setpoint op 1000 ppm ingesteld. Uit Figuur 6 blijkt dat in de gesloten kas alle 4050 uren aan het gewenste CO<sub>2</sub>-setpoint voldaan kan worden. In de open kas is dit slechts ca 2300 uur het geval. In de open kas kan dus ruim 1700 uur niet aan het gewenste CO<sub>2</sub>-niveau voldaan worden. Er is dan onvoldoende CO<sub>2</sub> aanwezig. Voor een open teelt geldt dan ook dat de gift beperkt wordt door de warmtevraag, er van uitgaande dat geen warmte vernietigd wordt. Dosering van zuivere CO<sub>2</sub> zou een alternatief kunnen zijn, echter bij grote ventilatievouden is het vrijwel onmogelijk om het CO<sub>2</sub>-niveau op het gewenste niveau te handhaven.





**Figuur 6** Jaarbelastingduurkromme van het CO<sub>2</sub>-setpoint en de gerealiseerde CO<sub>2</sub>-niveaus van gesloten en open kas

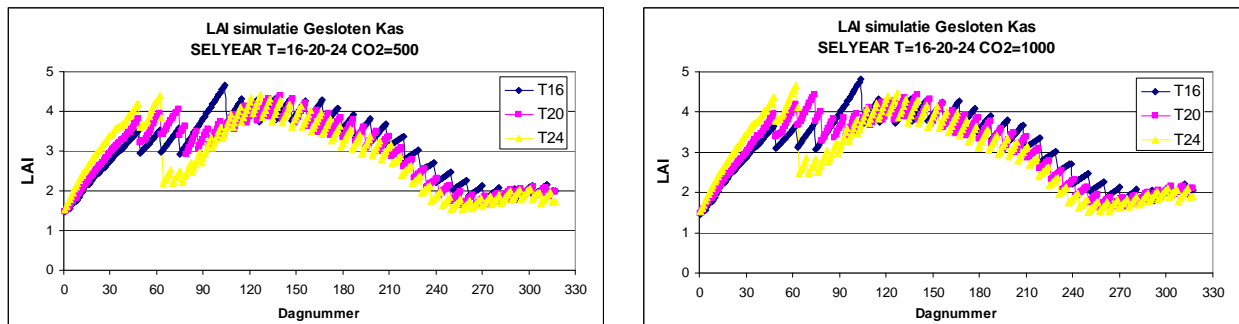
### 3.3.3 Invloed van geconditioneerd telen op productie

Om zicht te krijgen op de interactie tussen temperatuur en CO<sub>2</sub> is eerst voor een standaardteelt de drogestofproductie berekend bij een constante kastemperatuur van 16, 20 en 24 °C, en dat voor zowel 500 als 1000 ppm CO<sub>2</sub>. In Tabel 4 zijn de resultaten hiervan weergegeven. Bij de berekeningen is met een LAI verloop, vrijwel gelijk aan Themato-gewas in 2004 rekening gehouden. Er zijn berekeningen gemaakt met 2 CO<sub>2</sub>-niveaus, 500 en 1000 ppm bij een constante etmaaltemperatuur van 16, 20 of 24 °C. Straling volgens het SEL jaar (Breuer en Van de Braak, 1989). Er wordt uitgegaan van een drogestofgehalte van 5,5% in de vruchten.

**Tabel 4** Gemiddelde (dag 1- dag 317) dagelijkse bruto fotosynthese, onderhoudsademhaling, bladoppervlakte-index (LAI) en plantgewicht, dagnummer waarop de eerste tomaten geoogst kunnen worden en cumulatieve productie en het cumulatieve aantal geoogste trossen voor tomaat bij verschillende constante kastemperaturen en CO<sub>2</sub>-niveaus.

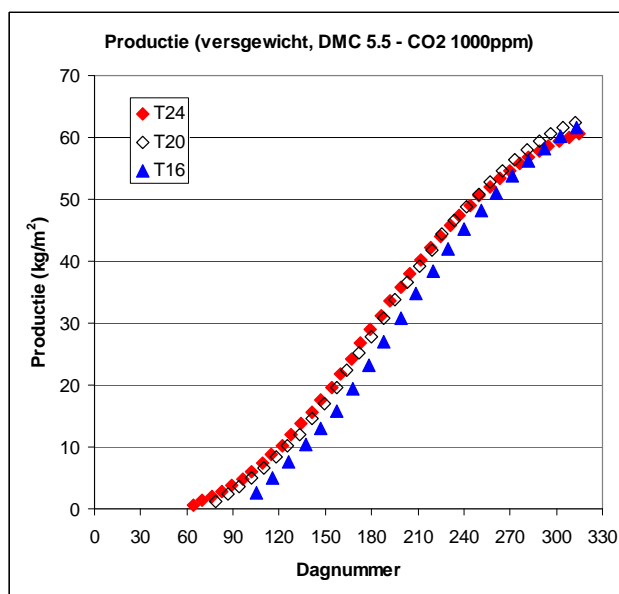
Kastemperatuur	Bruto fotosynthese	Onderhoud	LAI	Plantgewicht	Productie	Dag eerste oogst	Totaal aantal geoogste trossen per stengel
°C	g CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> .d	g CH <sub>2</sub> O /m <sup>2</sup> .d	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	-	-
<b>bij 500 ppm CO<sub>2</sub></b>							
16	35,1	3,23	3,06	15,3	54,7	105	21
20	34,5	3,76	2,97	14,6	54,3	79	31
24	33,5	3,44	2,88	13,6	51,7	64	40
<b>bij 1000 ppm CO<sub>2</sub></b>							
16	39,4	3,61	3,10	17,1	61,6	105	21
20	39,5	4,28	3,04	16,7	62,5	79	31
24	39,2	5,11	2,95	15,9	60,7	64	40

Het verloop van de gesimuleerde bladoppervlakte-index (LAI; Figuur 7) laat zien dat de LAI sneller toeneemt bij hogere temperatuur, maar dat gemiddelde LAI over de gehele teeltperiode juist iets lager is bij een hoge temperatuur. Bij 500 ppm CO<sub>2</sub> is tussen 16 en 20 °C minder dan 1% verschil in productie, terwijl de productie bij 24 °C 5% lager is dan bij 20 °C (Tabel 4). Wanneer we echter altijd 1000 ppm CO<sub>2</sub> hebben (gesloten kas), dan is de productie bij 20 °C 1,3% hoger dan bij 16 °C, terwijl deze bij 24 °C 3% lager is dan bij 20 °C. In beide gevallen is de lagere productie bij 24 °C een gevolg van een lagere gemiddelde bladoppervlakte-index (iets kleinere bladeren) en een (flink) toegenomen onderhoudsademhaling. Dat laatste als direct gevolg van de hogere temperatuur. Bij 500 ppm CO<sub>2</sub> is de onderhoudsademhaling lager bij 24 °C dan bij 20 °C. Blijkbaar wordt daar de toename in ademhaling per eenheid van biomassa meer dan gecompenseerd door een lagere hoeveelheid biomassa in de kas bij hogere temperatuur (lichter gewas, kleinere bladeren en vruchten).



**Figuur 7** Verloop LAI voor teelt zoals aangeduid in Tabel 4 (CO<sub>2</sub> 500 en 1000 ppm).

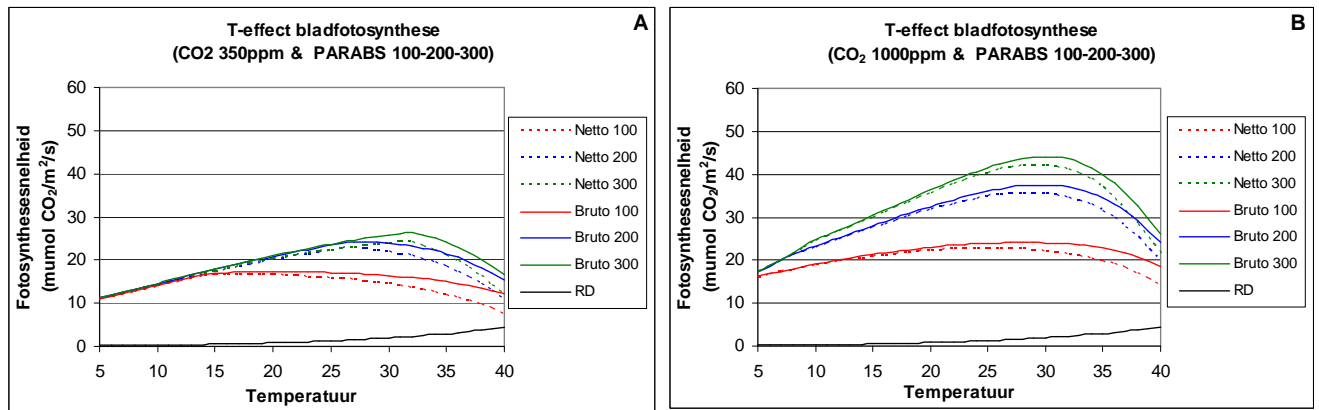
Het verloop van de productie in de tijd (Figuur 8) laat zien dat bij hogere temperatuur de productie eerder op gang komt en dat meer trossen geoogst worden. Ieder symbool in Figuur 8 staat voor de oogst van 1 tros: symbolen liggen dichter bij elkaar als de temperatuur hoger is. We constateren dat bij hoog CO<sub>2</sub> de optimale temperatuur hoger komt te liggen, en ook dat de productieverschillen als gevolg van temperatuur tussen 16 en 24 °C klein zijn, namelijk maximaal 5%. Er is in deze berekeningen geen rekening gehouden met een mogelijk effect van temperatuur op het drogestofgehalte van de vruchten. Uit het proefschrift van De Koning (1994) komt naar voren dat tussen 17-23 °C het drogestofgehalte van tomatenvruchten met 0,4 procentpunt toeneemt. Uitgaande van een drogestofgehalte van 5,5% betekent dat dus een opbrengstdaling met 7%.



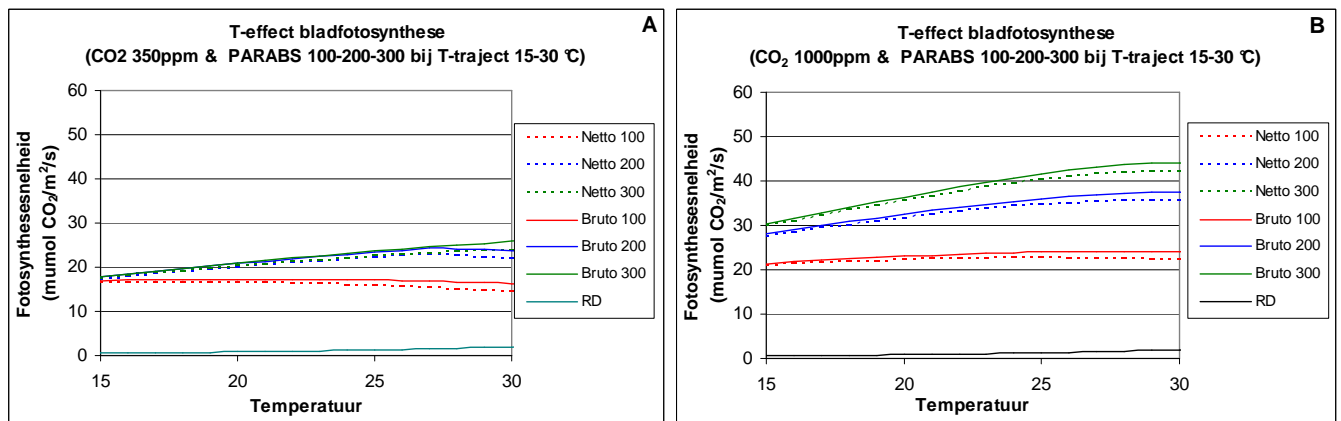
**Figuur 8** Cumulatieve productie per (kalender)dag bij een kasluchttemperatuur van 16, 20 of 24 °C en een CO<sub>2</sub>-niveau van 1000 ppm (berekend op basis van een drogestofgehalte van 5,5% in de vruchten).

In bovenstaande simulaties treden vele effecten tegelijkertijd op: temperatuursinvloed op bladfotosynthese, de LAI en de onderhoudsademhaling leiden tot een totaaleffect op de productie. Om meer inzicht te krijgen in de mogelijkheden van andere temperatuur-CO<sub>2</sub> combinaties in de gesloten kas, is apart naar de effecten van de klimaatsfactoren op bruto- en netto bladfotosynthese (Figuur 9A-B en Figuur 10A-B) en gewasfotosynthese (Figuur 11) gekeken, over een zeer brede range van temperaturen.

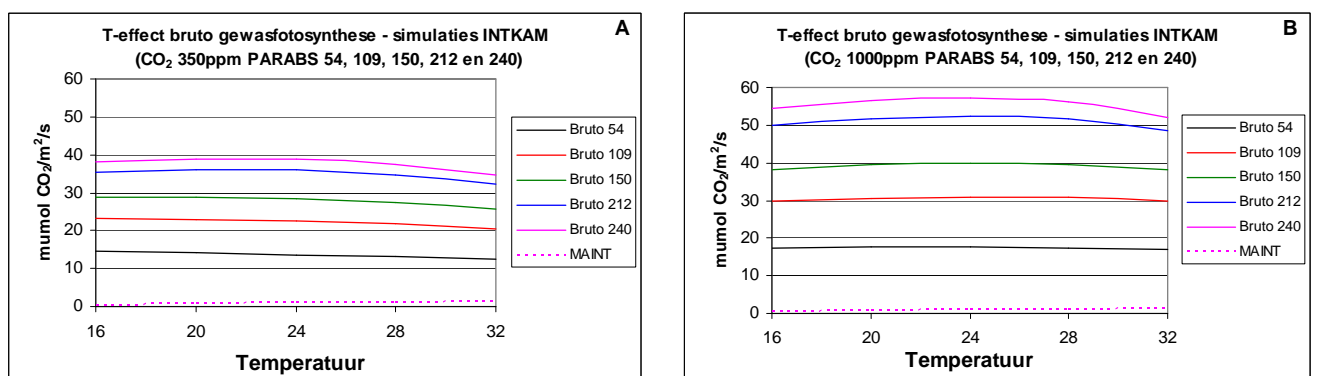
Onder laag licht (100 W/m<sup>2</sup> PAR) blijkt dat de netto bladfotosynthese nauwelijks afhangt van de temperatuur tussen 15 en 30 °C (Figuur 10 A-B). Bij veel licht (300 W/m<sup>2</sup> PAR) neemt de bladfotosynthese toe met de temperatuur tot ca. 30 °C. Bij 30 °C ten opzichte van 15 °C is de netto bladfotosynthese 37% hoger bij 350 ppm CO<sub>2</sub>, terwijl dat 41% is bij 1000 ppm CO<sub>2</sub>. Vergelijkbare respons, dat wil zeggen een sterk temperatuurseffect op de bladfotosynthese bij veel licht en hoog CO<sub>2</sub>, en veel minder temperatuursinvloed bij laag licht, werd ook gemeld door Dieleman (2003) voor paprika.



**Figuur 9** A-B Bruto en netto bladfotosynthese berekend met INTKAM, in afhankelijkheid van de momentane temperatuur (traject 5-40°C), geabsorbeerde straling (100-300 Watt PAR) bij 350 ppm CO<sub>2</sub> (A) en 1000 ppm CO<sub>2</sub> (B) (traject 5-40 °C).



**Figuur 10** A-B Bruto en netto bladfotosynthese berekend met INTKAM, in afhankelijkheid van momentane temperatuur, geabsorbeerde straling (100-300 Watt PAR) en CO<sub>2</sub>. Figuren 10 A en B zijn uitvergrotingen (traject 15-30 °C) van figuren 9 A en B (5-40 °C).



**Figuur 11** Bruto gewasfotosynthese (LAI=3) berekend met INTKAM, in afhankelijkheid van de momentane kasluchttemperatuur, geabsorbeerde straling (54-240 Watt PAR), en CO<sub>2</sub>

Deze sterke temperatuurseffecten zijn verdwenen als we ons richten op de bruto gewasfotosynthese (Figuur 11). In een gewas vlak de temperatuurrepons van de fotosynthese sterk af ten opzichte van die voor een blad. Dit is ook al eerder beschreven door Challa (1990). Een oorzaak hiervoor is dat het gemiddeld lichtniveau op de

bladeren in een gewas altijd laag is vergeleken met het lichtniveau boven het gewas. We zagen al in Figuur 10 A-B, dat alleen bij hoge lichtniveaus er een sterke toename in bladfotosynthese met temperatuur (binnen het traject 15-30 °C) is. Daarnaast geldt in een gewas een scala aan bladtemperaturen: bij veel licht in de zomer kan een blad wel een temperatuur hebben die 6 tot 8°C hoger is dan de kasluchttemperatuur, terwijl bladeren die volledig beschaduwde worden een temperatuur hebben die veel dicht bij de kastemperatuur zal liggen.

Vergelijken we de temperatuurrepons van de bruto gewasfotosynthese bij 350 ppm CO<sub>2</sub> met die bij 1000 ppm CO<sub>2</sub>, dan blijkt dat de optimumtemperatuur naar hogere waarden is opgeschoven, maar de temperatuurseffecten zijn klein, zoals al genoemd. Een voorbeeld: Bij 240 W/m<sup>2</sup> bovenop het gewas is bij 350 ppm CO<sub>2</sub> de optimumtemperatuur 22 °C, maar bij 16 °C is de bruto gewasfotosynthese maar 2,1% lager. Bij 1000 ppm CO<sub>2</sub> is de optimumtemperatuur 24 °C, dus hoger. Echter, bij 16 °C is de bruto gewasfotosynthese maar 4,2% lager. Belangrijk is om op te merken dat dus bij 350 ppm CO<sub>2</sub> bij temperaturen boven de 22 °C de bruto gewasfotosynthese afneemt met de temperatuur, terwijl dat bij 1000 ppm CO<sub>2</sub> pas vanaf 24 °C gebeurt. Bij 1000 ppm CO<sub>2</sub> heeft de momentane gewasfotosynthese dus nog voordeel van temperaturen boven 22 °C (tot 24 °C), terwijl bij 350 ppm CO<sub>2</sub> temperaturen boven 22 °C de gewasfotosynthese nadelig beïnvloeden.

We concluderen dat bij veel licht temperatuur (15-30 °C) grote invloed heeft op de bladfotosynthese, maar dat hiervan op gewasniveau nauwelijks iets terug te vinden is, doordat de lichtniveaus gemiddeld over alle bladeren veel lager zijn.

Doordat de bruto gewasfotosynthese bij hoog CO<sub>2</sub> tussen 16 en 24 °C vrijwel niet reageert op de temperatuur, zal temperatuurverhoging al snel negatief uitpakken voor de totale drogestofproductie. Dit komt namelijk doordat de onderhoudsademhaling sterk toeneemt met de temperatuur (ca. verdubbeling per 10 °C temperatuurstijging). Tussen 16 en 24 °C betekent dat dus een toename van de onderhoudskosten met 74%.

Ten slotte moeten we nog rekening houden met de invloed van temperatuur op de gewasontwikkeling. Bij een pas gepland gewas zal een hoge temperatuur gunstig zijn omdat sneller nieuwe bladeren afgesplitst worden. Dit is ook in Tabel 4 te zien aan het feit dat veel meer rijpe trossen zijn gevormd bij de hogere temperaturen. Bovendien worden dunnere bladeren gevormd bij hogere temperatuur en kan dus met dezelfde hoeveelheid bladgewicht meer licht onderschept worden. Door de snellere ontwikkeling is de eerste tros eerder rijp (Tabel 4) en wordt eerder bladgeplukt (Figuur 7). Ook zijn de bladeren kleiner zodat gemiddeld over een hele teelt de bladoppervlakte-index zal dalen met de temperatuur.

In Bijlage 1 is een overzicht weergegeven van plantprocessen en de interacties tussen klimaatomstandigheden, groei, plantopbouw en productie.

### 3.3.4 Berekening groei en productie voor de cases

Met deze achtergrondinformatie gaan we nu aan de slag met de uitkomsten voor de cases zoals eerder gedefinieerd. Het gaat hierbij dus om twee streefwaarden voor de LAI (2,5 of 3,5 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>), gecombineerd met twee setpoints voor de stooktemperatuur (D/N 18/16 met 3 °C lichtverhoging of 20/18 met 2 °C lichtverhoging) gecombineerd met drie trappen voor de dode zone tussen stooktemperatuur en koeltemperatuur (2, 4 of 6 °C). Een dode zone van 6 °C bij 18 °C dagtemperatuur en 3°C lichtverhoging betekent dat de zon de kas mag opwarmen tot 18+3+6=27 °C en daarboven wordt pas gekoeld.

De totaal geproduceerde biomassa en het totale vruchtdrooggewicht zijn 3,8 tot 4,7% hoger voor de strategie met bladoppervlakte-index (LAI) 3,5, vergeleken met 2,5. Hierbij moet echter opgemerkt worden dat de over de gehele teelt gemiddelde gerealiseerde LAI 2,56, resp. 2,20 was, dus vandaar dit vrij kleine effect van LAI. Dat de gerealiseerde LAI niet overeenkomt met het streven, komt doordat vastleggen van zowel de klimaatcondities als de stengeldichtheid, als de bladplukstrategie resulteert in een bepaalde LAI. Om de gewenste LAI van 3,5 te behalen zouden of hogere stengeldichtheden aangehouden moeten worden of zou minder oud blad geplukt moeten worden, wat echter niet wenselijk is in verband met de extra gewas- en oogstarbeid die dat met zich meebrengt.

**Tabel 5** Totale drogestofproductie (kg/m<sup>2</sup>) en totaal drooggewicht vruchten (kg/m<sup>2</sup>) voor de 12 cases.

Case	Code	LAI-doel	regime	Dode.zone	Lichtverhoging	totale drogestof-productie	drooggewicht vruchten	versgewicht vruchten (bij 5,5 % drogestof)
1	T18 D2	2,5	18/16	2	3	5,65	3,90	70.9
2	T18 D4	2,5	18/16	4	3	5,61	3,88	70.5
3	T18 D6	2,5	18/16	6	3	5,56	3,84	69.8
4	T20 D2	2,5	20/18	2	2	5,57	3,85	70.0
5	T20 D4	2,5	20/18	4	2	5,52	3,82	69.5
6	T20 D6	2,5	20/18	6	2	5,46	3,78	68.7
7	T18 D2	3,5	18/16	2	3	5,87	4,08	74.2
8	T18 D4	3,5	18/16	4	3	5,83	4,05	73.6
9	T18 D6	3,5	18/16	6	3	5,79	4,02	73.1
10	T20 D2	3,5	20/18	2	2	5,78	4,02	73.1
11	T20 D4	3,5	20/18	4	2	5,74	3,99	72.5
12	T20 D6	3,5	20/18	6	2	5,69	3,95	71.8

Verder blijkt uit Tabel 5 de laagste temperatuur (18/16 met een dode zone van 2 °C en 3 °C lichtverhoging) de hoogste productie te geven, al zijn de verschillen klein. De slechtste strategie, dat wil zeggen 20/18 met een dode zone van 6 °C en 2 °C lichtverhoging, geeft 3% productieverlaging ten opzichte van de beste strategie. Zulke kleine verschillen komen overeen met de genoemde geringe invloed van temperatuur op de bruto gewasfotosynthese en het feit dat de gerealiseerde etmaaltemperaturen (die zijn van belang voor de onderhoudsademhaling) weinig verschillen (Tabel 2): 18,1-20,2 °C. Het grootste verschil treedt in de zomer op (veel instraling) en dan gaat het om een gemiddelde etmaaltemperatuur van 20 °C die toeneemt tot 23 °C.

Een voorzichtige conclusie gebaseerd op berekeningen van gewasgroei en opbrengst met INTKAM is dat veel koelen, bijvoorbeeld altijd maximaal 20 °C handhaven, in de gesloten kas niet nodig is. Het laten oplopen van de temperatuur (dode zone en lichtverhoging) geeft nauwelijks productieverlies (max. 3% voor de hier bestudeerde cases) maar zal wel tot flinke besparing op de koelcapaciteit leiden.

De geringe effecten van temperatuur (16-24 °C) op productie, zowel bij 500 ppm CO<sub>2</sub> als bij 1000 ppm CO<sub>2</sub> komen overeen met resultaten uit kasexperimenten. De Koning rapporteerde al in 1989 dat een hogere temperatuur vroeg in de teelt vervroeging geeft. Echter, planten die gestart zijn bij 17 of 19 °C en half maart werden overgeplaatst naar 23 °C gaven aan het einde van periode 4 al een hogere productie dan planten die vanaf het begin constant bij de hoge temperatuur hadden gestaan. Bij de productie tot en met periode 7 (16 juli) scoorden de planten die continu bij een lage temperatuur hadden gestaan het beste.

Uit het onderzoek van Kaarsemaker (2002) kwam naar voren dat de temperatuurrepons een rasafhankelijkheid vertoont. Er werden 8 rassen geteeld (plantdatum begin december; einde teelt eind mei) bij 17,9 °C of bij 20,8 °C. 'Capita' en 'Frondito' produceerden meer drogestof, een hoger totaal vruchtdroog- en versgewicht bij de lage temperatuur, voor 'Tradiro' en 'Gourmet' was het juist omgekeerd. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat bij 'Frondito' bij de hoge temperatuur veel neusrut optrad, hetgeen de lage vruchtproductie deels verklaart. 'Calypso', 'Chaser', 'Pronto' en 'Prospero' lieten geen effect van temperatuur op de totale drogestofproductie van vrucht en plant samen zien. Voor 'Chaser' en 'Pronto' was ook geen temperatuurseffect op de vruchtversproductie, terwijl voor 'Calypso' deze hoger was voor de lage temperatuur en voor 'Prospero' juist omgekeerd. Er waren geen herhalingen in deze proef zodat effecten niet getoetst konden worden. Uit onderzoek van Van der Ploeg, waarbij deels dezelfde rassen werden gebruikt en ongeveer dezelfde teeltduur en temperatuurniveaus, kwam voor geen van de rassen een significante invloed van temperatuur op de totale drogestofproductie en vruchtproductie naar voren.

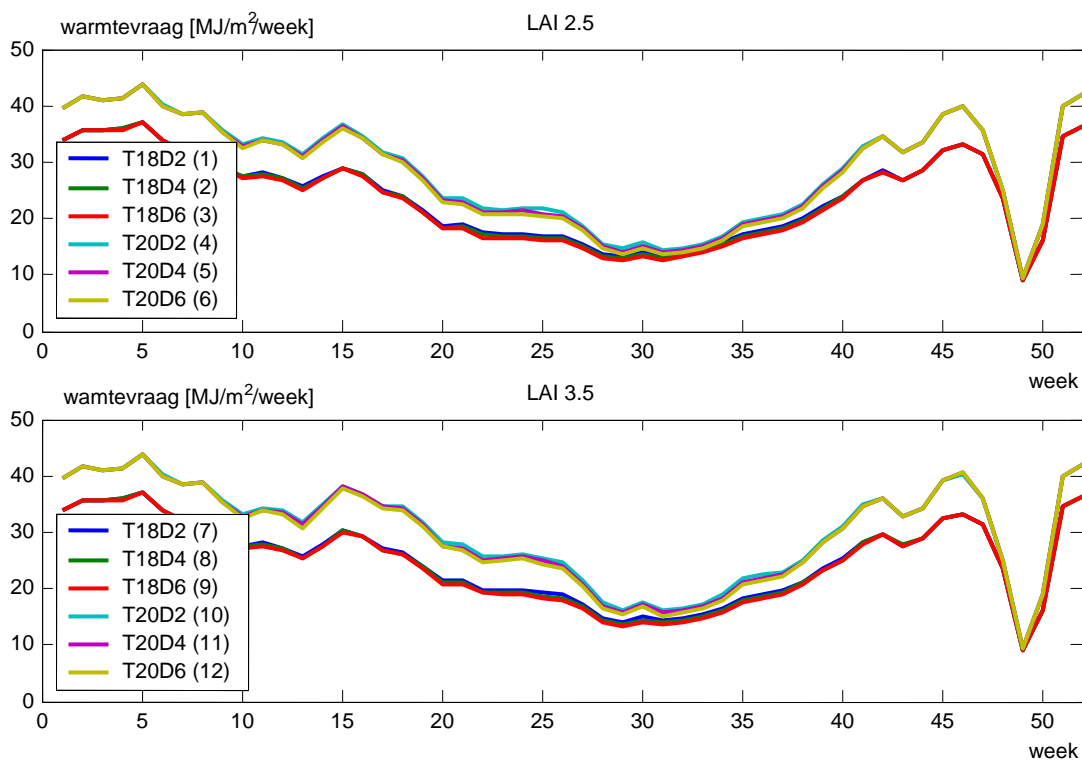
Zowel op basis van de simulaties als op basis van experimenten komen we tot de conclusie dat, ook in een conventionele kas een lagere stooktemperatuur dan gebruikelijk voor tomaat geen groei- of productiebeperking oplevert. Dat roept de vraag op waarom tuinders niet bij een lagere temperatuur telen, omdat hiermee energie bespaard kan worden. Voor tomaat geldt de vuistregel: 15,5% energiebesparing bij 2°C lagere setpoint stooktemperatuur (Dueck et. al. 2005). Een mogelijk antwoord hierop ligt in het belang dat wordt gehecht aan de gewasontwikkeling (aantal afgesplitste vruchten en snelheid van afrijping) welke door een hogere temperatuur wordt versneld. Het verdient aanbeveling om het belang dat telers hechten aan deze gewasontwikkeling nader te onderzoeken.

### 3.4 Warmtevraag en koudevraag

De warmtevraag is uiteraard afhankelijk van de setpointinstellingen. De warmtevraag in de beginfase van de teelt zal tussen de 2 groepen (LAI 2,5 of 3,5) niet verschillen. De gewasontwikkeling gaat even snel. Daardoor is het gebruik in de perioden 13, 1, 2 en 3 dan ook gelijk. In de andere perioden ontstaat een verschil tussen de 2 groepen omdat er verschillen in LAI en daarmee verdamping zijn, die zijn weerslag heeft op de warmtevraag. Binnen 1 groep (case 1 t/m 6 en 7 t/m 12) is er duidelijk onderscheid tussen het setpoint verwarmen (20/18 of 18/16) voor respectievelijk de dag- en nachttemperatuur. Op jaarbasis kost een 2 °C hoger setpoint ca. 250 MJ. Een aanpassing (verhoging) van de dode zone bespaart ongeveer 20 á 25 MJ (ca. 2%) op jaarbasis. In Figuur 12 is de warmtevraag per week voor de 2 groepen weergegeven. De sterke verlaging van de warmtevraag in de weken 48-50 is het gevolg van de teeltwisseling.

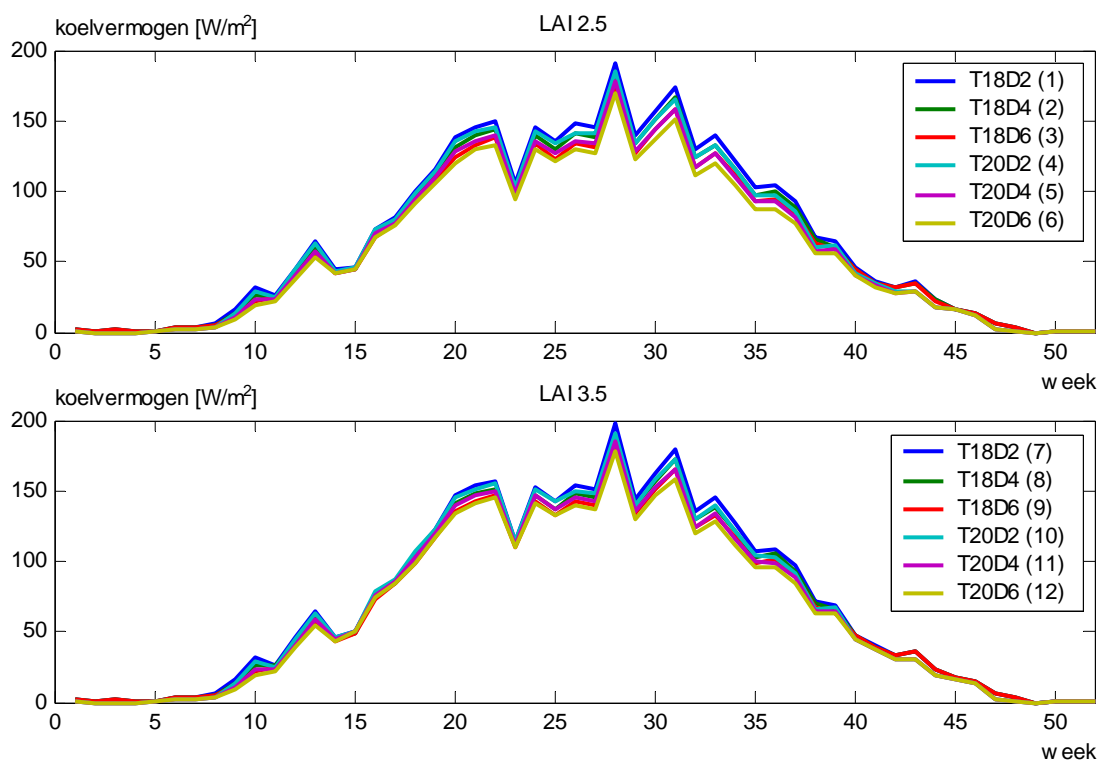
**Tabel 6** Warmtevraag [MJ] per periode en het gehele jaar voor de cases met een LAI van 2,5 (1 t/m 6) en een LAI van 3,5 (7 t/m 12).

case	Periode													totaal
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	5,97	5,42	4,57	4,61	3,57	2,89	2,55	2,33	2,79	3,66	4,74	4,72	4,40	1257,74
2	5,97	5,42	4,53	4,57	3,52	2,83	2,47	2,26	2,72	3,62	4,73	4,72	4,39	1247,11
3	5,96	5,41	4,50	4,54	3,48	2,77	2,41	2,20	2,67	3,58	4,73	4,71	4,39	1237,57
4	6,90	6,58	5,56	5,73	4,52	3,63	3,05	2,55	3,08	4,27	5,65	5,43	5,09	1494,08
5	6,90	6,57	5,51	5,68	4,44	3,53	2,96	2,48	3,00	4,22	5,65	5,43	5,09	1480,50
6	6,90	6,57	5,47	5,64	4,39	3,46	2,88	2,39	2,95	4,18	5,65	5,43	5,09	1469,02
7	5,97	5,42	4,57	4,78	3,98	3,29	2,81	2,48	2,96	3,87	4,87	4,75	4,40	1303,93
8	5,97	5,42	4,53	4,74	3,94	3,24	2,74	2,41	2,90	3,84	4,86	4,75	4,39	1294,31
9	5,96	5,41	4,51	4,71	3,91	3,19	2,68	2,34	2,85	3,80	4,86	4,74	4,39	1285,51
10	6,90	6,58	5,57	5,96	5,21	4,31	3,49	2,85	3,44	4,67	5,87	5,46	5,09	1574,65
11	6,90	6,57	5,51	5,92	5,14	4,23	3,41	2,78	3,36	4,64	5,86	5,47	5,09	1562,45
12	6,90	6,57	5,47	5,88	5,10	4,17	3,34	2,72	3,29	4,60	5,85	5,47	5,09	1552,08



**Figuur 12** Warmtevraag op weekbasis.

Naast de warmtevraag, is in een (semi)gesloten kas de koudevraag ook van groot belang. De koelbehoefte van een gesloten kas is in Figuur 13 weergegeven. Zoals al eerder gemeld, is de koelprestatie van het systeem afhankelijk van de kasluchtcondities. In de berekeningen is de voorraad aan koud water geen beperkende factor geweest. In Figuur 13 is dit vertaald in een weekgemiddeld koelvermogen. In de wintermaanden is (vrijwel) geen koeling nodig. In de weken met de hoogste koelvraag, is gemiddeld 174 tot 202 W/m<sup>2</sup> ofwel 29,4 tot 34,1 kWh per m<sup>2</sup> per week aan koude gebruikt om de kas te koelen. Dit wil nog niet zeggen dat dit ook in alle gevallen voldoende is geweest. Het aantal uren met te weinig koelcapaciteit, is in Tabel 7 weergegeven. Hierbij is een tekort gedefinieerd als het aantal uren dat de kasluchttemperatuur meer dan 0,5 of 2,5 °C boven het setpoint koelen uitkomt.



**Figuur 13** Gerealiseerd koelvermogen (weekgemiddelde waarden)

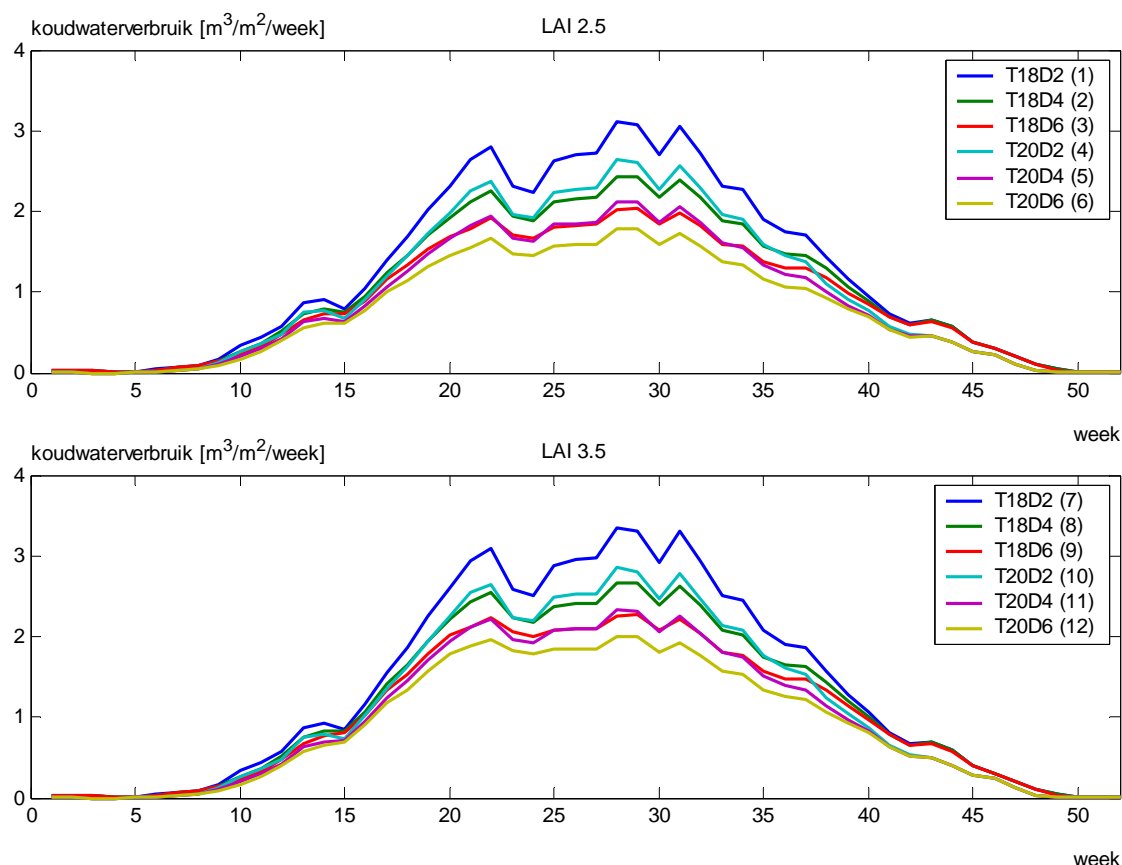
**Tabel 7** Uren overschrijding van het setpoint koelen met meer dan 0,5 °C en 2,5 °C.

case	0,5 °C		2,5 °C		
	LAI 2,5	LAI 3,5	LAI 2,5	LAI 3,5	
T18 D2	1 / 7	1207	927	36	16
T18 D4	2 / 8	1090	864	46	20
T18 D6	3 / 9	1002	787	54	22
T20 D2	4 / 10	1007	788	3	0
T20 D4	5 / 11	886	693	4	0
T20 D6	6 / 12	792	624	5	0

Het aantal uren met een temperatuuroverschrijding van meer dan 0,5 °C is groot, echter het ligt op een lager niveau ten opzichte van een open kas waar dit ca. 2100 uur het geval is. Uit de tabel is ook de (koelende) invloed van de extra bladoppervlakte zichtbaar. Het aantal uren met een overschrijding van meer dan 2,5 °C blijft beperkt, zeker bij de groep cases met de setpoint 20 °C dag- en 18 °C nachttemperatuur. De toename van het aantal uren met een overschrijding van meer dan 2,5 °C bij een grotere dode zone, 36 en 54 voor respectievelijk een dode zone van 2 en 6 °C, moet gezocht worden in de regeling. In de open kas wordt het setpoint ca. 1400 uur meer dan 2,5 °C overschreden.

Zoals vermeld, is de toevoer van koud water uit de aquifer de beperkende factor bij het koelen. Gedurende het teeltseizoen is er dan ook een grote variatie in het waterdebiet dat voor het koelen gebruikt moet

worden. In Figuur 14 is het waterverbruik als een weektotaal weergegeven. Ondanks het kleine verschil in koelvermogen tussen de cases is er een groot verschil in het koudwaterverbruik doordat bij de cases met een hoge kasttemperatuur minder koelwater nodig is voor het zelfde koelvermogen. In Tabel 8 zijn de periode- en de jaar-totalen gegeven.



**Figuur 14** Weektotalen van het koudwaterverbruik.

**Tabel 8** Koudwaterverbruik [ $\text{m}^3/\text{m}^2$ ] per periode en het gehele jaar voor de cases met een LAI van 2,5 (1 t/m 6) en een LAI van 3,5 (7 t/m 12).

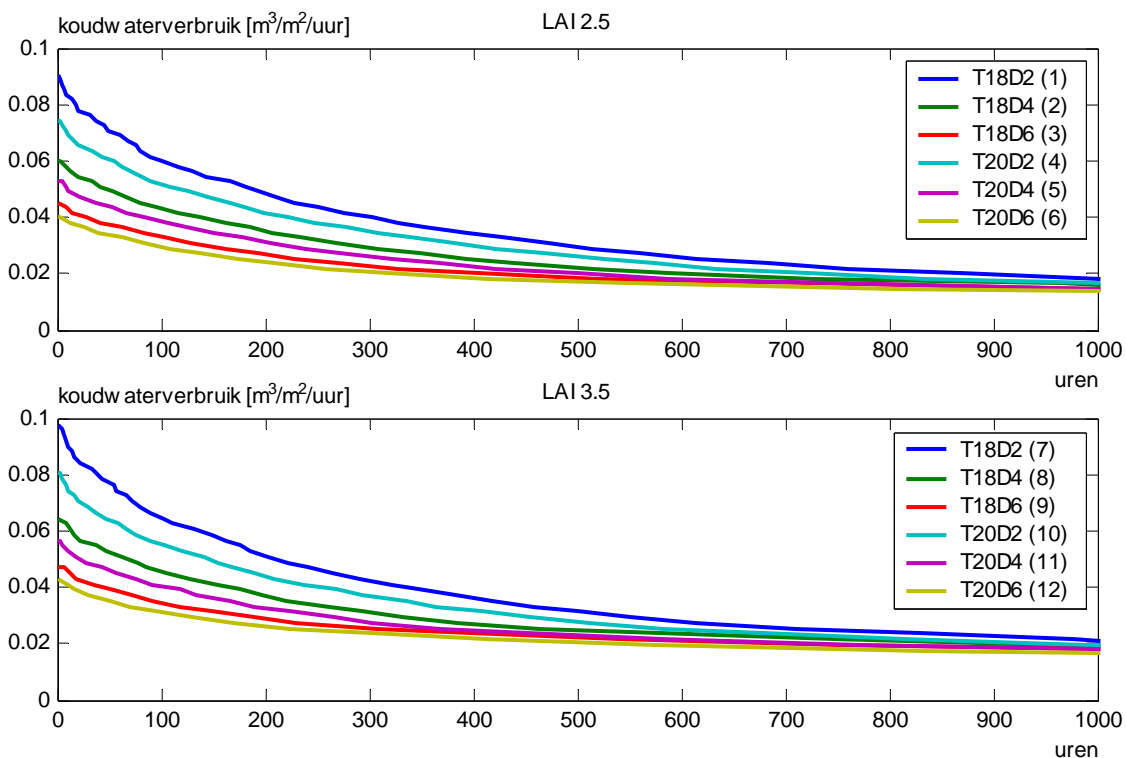
case	periode													totaal
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	0,08	0,25	1,82	3,91	8,02	10,09	11,62	10,85	8,03	4,77	2,37	0,80	0,03	62,64
2	0,08	0,24	1,56	3,49	6,77	8,26	9,18	8,68	6,60	4,36	2,32	0,80	0,03	52,38
3	0,08	0,23	1,40	3,27	6,03	7,16	7,70	7,31	5,72	4,07	2,29	0,79	0,02	46,07
4	0,00	0,14	1,50	3,35	6,85	8,61	9,82	9,12	6,68	3,76	1,71	0,50	0,00	52,03
5	0,00	0,13	1,26	2,99	5,84	7,14	7,94	7,45	5,56	3,42	1,67	0,50	0,00	43,90
6	0,00	0,12	1,12	2,79	5,20	6,21	6,73	6,35	4,82	3,20	1,66	0,50	0,00	38,70
7	0,08	0,25	1,83	4,17	8,93	11,22	12,62	11,74	8,72	5,26	2,53	0,83	0,03	68,21
8	0,08	0,24	1,56	3,79	7,74	9,45	10,15	9,54	7,32	4,89	2,50	0,83	0,03	58,12
9	0,08	0,23	1,41	3,58	7,09	8,47	8,73	8,21	6,49	4,63	2,48	0,81	0,02	52,24
10	0,00	0,14	1,51	3,62	7,75	9,69	10,75	9,89	7,37	4,24	1,87	0,52	0,00	57,33
11	0,00	0,13	1,27	3,28	6,78	8,28	8,87	8,23	6,26	3,94	1,84	0,52	0,00	49,40
12	0,00	0,12	1,13	3,10	6,25	7,50	7,71	7,14	5,56	3,75	1,84	0,52	0,00	44,62

Uit Tabel 8 blijkt dat “piek” in het koudwaterverbruik zich over de perioden 5 t/m 9 uitspreidt. Nu blijkt ook dat ondanks het koelende effect van het grotere bladoppervlak (cases 7 t/m 9) het waterverbruik toch nog iets toeneemt. Een deel hiervan gaat in de ontvochtiging zitten, en daarnaast neemt de koelprestatie bij hogere vochniveaus iets af. Ook blijkt dat een grotere dode zone (dus een hogere kasluchttemperatuur)



fors, tot ongeveer 25%, op water kan besparen binnen één groep van cases (zelfde LAI en of zelfde setpoints verwarmen).

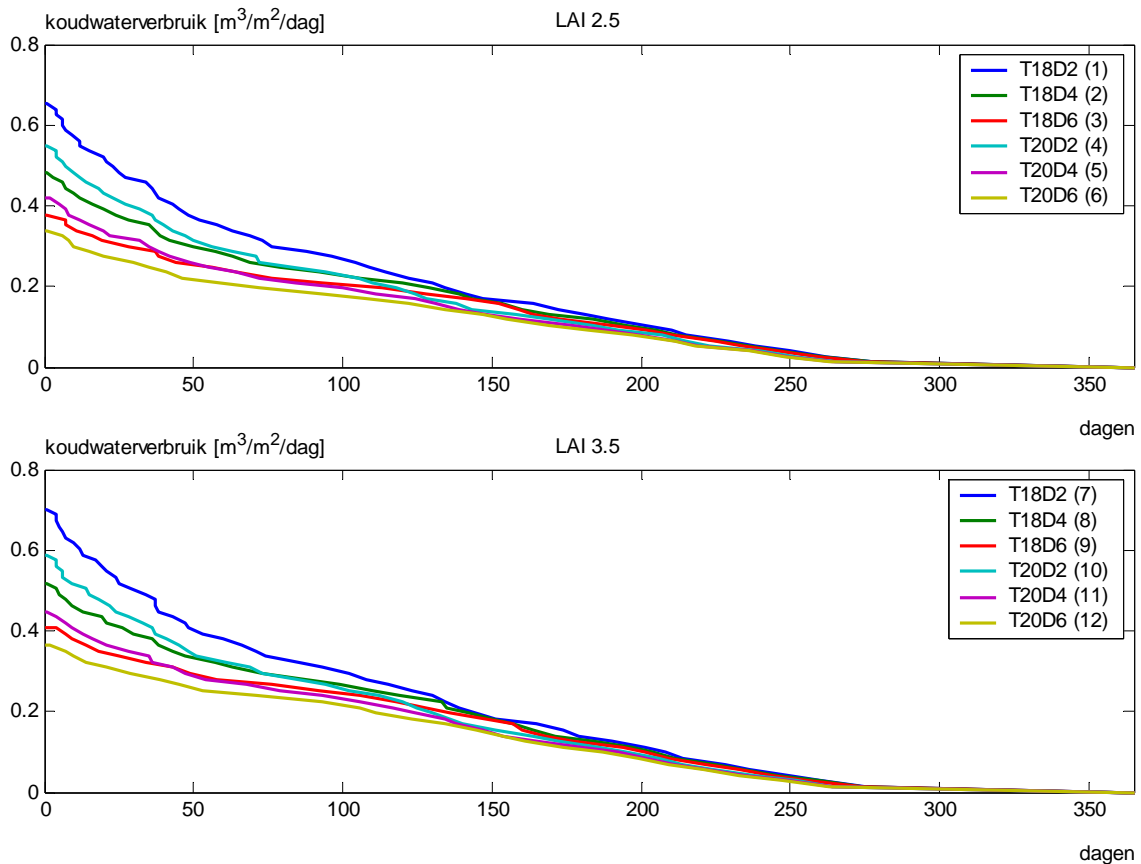
De beperkende factor is de echte piek afname van koude. Om hier inzicht in te verkrijgen is in Figuur 15 een jaarbelastingduurkromme weergegeven. Hierbij zijn de 1000 uren met de grootste koudwater vraag gegeven.



**Figuur 15** Jaarbelasting duurkromme; 1000 uren met het hoogste koudwaterverbruik.

Uit Figuur 15 blijkt dat de piek in het koudwaterverbruik lang niet het gehele jaar nodig is. Als zelfs bij case T20D6 bij een LAI van 3,5 het maximale debiet van koudwater met 25% wordt verkleind van 437 m³/ha.uur naar 325 m³/ha.uur dat dit hooguit tijdens 100 uren tot een koudetekort leidt.

Ook blijkt uit Figuur 15 dat tijdens de echte piekmomenten het koudwaterverbruik met meer dan een factor 2 verschilde tussen de cases. In de eerste plaats heeft het setpoint verwarmen (18 of 20 °C) een grote invloed echter, de dode zone neemt daarnaast ook nog eens ca. 35% van de verschillen in piekbelasting voor zijn rekening. Omdat het water uit putten wordt opgepompt en niet de gehele dag een even grote koudevraag aanwezig is, kan, indien met een tussenopslag gewerkt wordt, op de capaciteit van de putten bespaard worden. Daarvoor is in Figuur 16 een jaarbelastingduurkromme gemaakt met de dagsom aan koudwaterverbruik. Uit de figuur blijkt dat de case met het hoogste koudwaterverbruik (0,76 m³/m²/dag) in absolute zin ca 65 dagen meer water gebruikt dan de case met het kleinste maximale waterverbruik (0,39 m³/m²/dag).



**Figuur 16** Jaarbelasting duerkromme met dagsom van koudwaterverbruik.

## 3.5 Economische evaluatie

De economische evaluatie bepaalt welke case het beste resultaat geeft, door voor iedere case te berekenen hoe groot de benodigde investering is, hoeveel energie verbruikt wordt, hoeveel warmte kan worden geleverd aan open kassen en hoeveel extra marge de verhoogde productie oplevert. Ten slotte wordt bepaald wanneer de koelcapaciteit niet voluit zou moeten worden gebruikt.

### 3.5.1 Bepaling van de grootte van de investering, de verbruiken en opbrengsten

Uitgaande van het verloop in het koudwaterverbruik, en de warmtevraag, zoals berekend met KASPRO voor de cases uit paragraaf 3.2, is bepaald wat voor alle cases de meest optimale dimensionering is van de benodigde apparatuur.

- de warmtepompen voor het aanmaken van koud water en warm water (WP)
- de gasmotor voor het leveren van elektriciteit aan de warmtepomp en het leveren van CO<sub>2</sub> aan de kassen met behulp van een rookgasreiniger (WKK)
- pompen en aansluiting met de warme en koude put of aquifer (doubletten)
- de warmtewisselaars of tegenstroom-scheidings-apparaten (TSA), tussen het doublet en het bovengrondse circuit
- de koudebuffer voor het ontlasten van de capaciteit van de doubletten op de warmste en zonnigste periode.
- de warme buffer voor het ontlasten van de capaciteit van de warmtepomp gedurende de koudste periode.
- de luchtbehandelingskasten (LBK).

Bij alle cases is uitgegaan van de aannamen die in Bijlage 5 zijn gesteld en voor een fictieve case zijn uitgewerkt. In Bijlage 6 zijn de berekeningen weergegeven voor de dimensionering van benodigde apparatuur. De resultaten hieruit zijn weergegeven in Tabel 9.

Tabel 9 laat zien hoe groot de investeringen, verbruiken en warmteopbrengsten per case zouden moeten zijn. Aangezien de warmtepompen en de warmtebuffers zijn gedimensioneerd op de piek in de warmtebehoefte verschillen de grootten hiervan per case niet veel. Zo heeft case 7 een warmtepomp van 432 kW per hectare nodig en case 6 een warmtepomp van 400 kW per hectare. De doubletten, de koudebuffers en de luchtbehandelingskasten zijn gedimensioneerd op de piek in de koudevraag. Deze piek in de koudevraag verschilt per case veel meer.

**Tabel 9** Grootte van de investeringen, de verbruiken en de warmteopbrengst (eenheden per hectare gesloten kas).

Case	LAI 2,5						LAI 3,5						
	1 T18D2	2 T18D4	3 T18D6	4 T20D2	5 T20D4	6 T20D6	7 T18D2	8 T18D4	9 T18D6	10 T20D2	11 T20D4	12 T20D6	
<b>Investerings</b>													
Doubletten	m <sup>3</sup> /uur	161	137	120	150	131	115	168	141	123	156	135	119
WP+WKK+TSA	kW <sub>e</sub>	419	402	386	437	418	400	432	418	405	454	439	424
Koudebuffers	m <sup>3</sup>	3280	2209	1608	2757	1943	1456	3506	2242	1627	2912	2004	1463
Warmtebuffers	m <sup>3</sup>	356	342	329	336	334	320	368	356	344	364	351	339
LBK	m <sup>3</sup> /uur	907	605	460	760	541	401	978	653	489	815	573	437
<b>Verbruiken</b>													
CO <sub>2</sub>	ton	276	258	240	186	168	151	291	276	261	197	182	168
Aardgas	1000 m <sup>3</sup>	761	728	696	726	693	661	795	767	740	769	741	716
Gascapaciteit	m <sup>3</sup> /uur	119	114	110	124	119	114	123	119	115	129	125	121
<b>Opbrengsten</b>													
Warmte intern	TJ	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Warmte extern	TJ	28	26	24	23	22	20	29	28	26	25	24	22
Gascapaciteit	m <sup>3</sup> /uur	298	286	275	268	256	245	307	297	288	279	269	260

Door de cases in Tabel 9 te groeperen in basissetpoint (T18 of T20), dode zone (D2, D4 of D6) of LAI (2,5 of 3,5) worden de volgende stellingen onttrokken:

#### *Vergelijking van de cases met een basissetpoint van 18°C (T18) en 20°C (T20)*

Bij de cases met T18 is het areaal waaraan warmte moet worden geleverd gemiddeld 18% hoger dan bij de cases met T20. Dit wordt veroorzaakt door de grotere koudevraag in de zomer en de lagere warmtevraag in de winter. Door de lage piek in de warmtevraag kan worden volstaan met een 4% kleinere warmtepomp. Doordat met deze kleinere warmtepomp een groter areaal van CO<sub>2</sub> worden voorzien, is de benodigde CO<sub>2</sub>-inkoop bij T18 gemiddeld 50% hoger dan bij T20. Door de hoge piek in de koudevraag bij T18 moeten de doubletten 5% meer capaciteit hebben en de koudebuffers en de luchtbehandelingskasten ±15% groter zijn.

#### *Vergelijking van de cases met een dode zone van 2 (D2), 4 (D4) en 6 (D6)*

De verhoging van de dode zone met 2°C veroorzaakt gemiddeld 13% minder behoefte aan doublet-capaciteit en 30% minder behoefte aan capaciteit van de koudwaterbuffers en de luchtbehandelingskasten. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de lagere piekvraag voor koud water.

#### *Vergelijking van de cases met een LAI van 2,5 en 3,5*

Een verhoging van de LAI van 2,5 naar 3,5 levert een hogere koudevraag doordat meer moet worden ontvochtigd en een hogere warmtevraag omdat meer ontvochtiging moet worden herverwarmd en aan een groter areaal warmte moet worden geleverd. Hierdoor wordt de investeringsbehoefte ±5% hoger.

### 3.5.2 Bepaling van de case met de laagste energie- en investeringskosten

Gebruik makend van dezelfde uitgangspunten als in de paragraaf 0 is voor alle cases een vergelijking gemaakt van de energiekosten in Tabel 10. Hierbij zijn de investeringskosten, de verbruikskosten en de

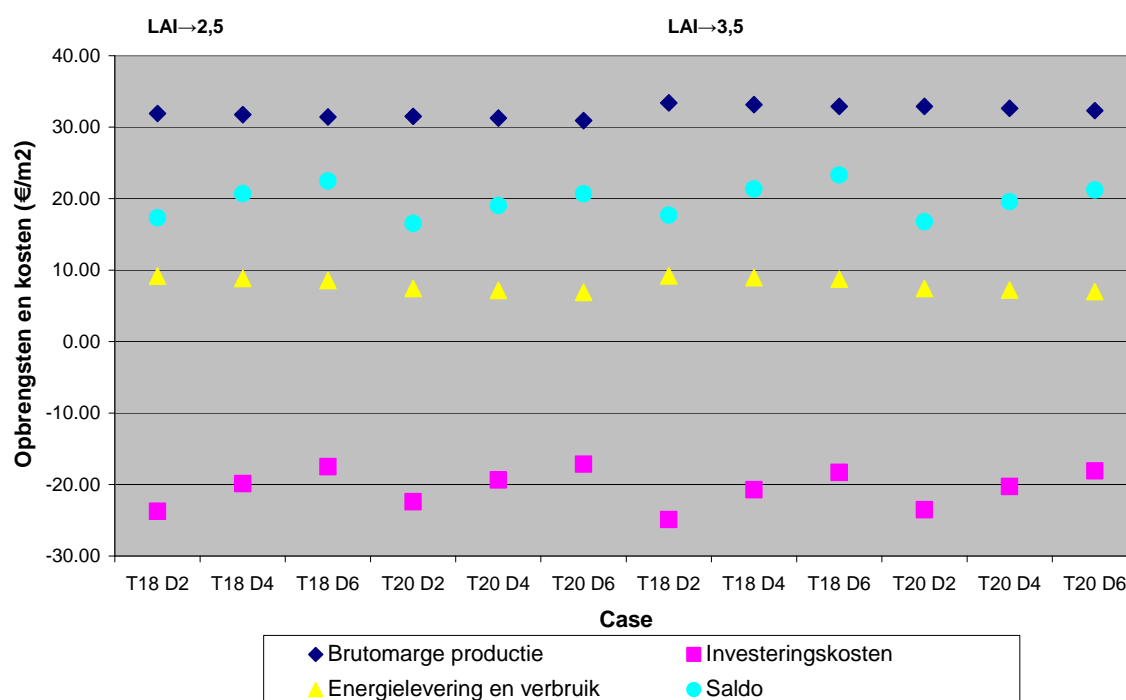
opbrengsten van de geleverde warmte en vermeden gaspieken gesommeerd. Hieruit blijken vooral de investeringskosten (afschrijving, rente en onderhoud) de grootste invloed te hebben op de totale energiekosten.

**Tabel 10** Kosten, opbrengsten en totale energiegerelateerde kosten (eenheden in € per m<sup>2</sup> gesloten kas per jaar)

Case	LAI 2,5						LAI 3,5					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	T18D2	T18D4	T18D6	T20D2	T20D4	T20D6	T18D2	T18D4	T18D6	T20D2	T20D4	T20D6
Afschrijving, rente en onderhoud	24	20	18	22	19	17	25	21	18	24	20	18
Inkoop CO <sub>2</sub>	3	3	2	2	2	2	3	3	3	2	2	2
Inkoop aardgas	17	17	16	17	16	15	18	18	17	18	17	16
Gascapaciteit	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Hulpenergie	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Besparing warmte intern	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10
Verkoop warmte open kas	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-20	-19	-18	-17	-16	-15
Besparing gascapaciteit	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-5	-4	-4	-4	-4	-4
Totale energiekosten	15	11	9	15	12	10	16	12	10	16	13	11

### 3.5.3 Bepaling van de economisch meest optimale case

Gebruik makend van de uitgangspunten in paragraaf 0, de drogestofproductie per case uit Tabel 5 en de energiekosten uit Tabel 10 is Figuur 17 samengesteld. Hieruit blijkt dat case 9 (T18D6 met een LAI van 3,5) met het hoogste saldo uit de bus komt. Ook is goed te zien dat een hoge dode zone leidt tot een hoger saldo. Dit komt voornamelijk doordat de invloed van de toegestane dode zone op de investeringskosten veel hoger is dan op de productie en het saldo van het energieverbruik en warmtelevering. Dat een hogere setpointtemperatuur (T20 in plaats van T18) leidt tot een lager saldo, is vooral te wijten aan de het grotere vermogen dat de warmtepomp nodig heeft om ook op het koudste moment voldoende warmte te leveren. Een hogere LAI behoeft hogere investeringskosten, maar door de hogere productie is het saldo voor een hogere LAI beter.



**Figuur 17** Bepaling van de economisch meest optimale case door vergelijking van de investeringskosten met de productie.

Mogelijk leidt een nog hogere dode zone dan T18D6 (bijvoorbeeld T18D8, of zelfs T18D10 bij een LAI van 3,5) tot een nog hoger saldo. Om hiervoor een indruk te krijgen van de benodigde kosten voor investering en energie zijn de resultaten van T18D2, T18D4 en T18D6 met behulp van een tweedegraads-polynoom-extrapolatie doorgetrokken naar de cases T18D8 en T18D10. Hierbij is berekend dat bij deze geëxtrapoleerde cases het verlies aan productie respectievelijk 4 en 8% op jaarbasis mag zijn om een gelijk saldo te krijgen als case T18D6. Hoewel het gevaarlijk is om uitspraken te doen op basis van een extrapolatie, pleit dit voor een beperkte koelcapaciteit. Gezien de literatuurstudie betreffende de invloed van temperatuur op productie (Bijlage 3) is namelijk onwaarschijnlijk dat een hogere temperatuur (setpoint tot 28°C) leidt tot een productieverlies van 8% op jaarbasis. Als in plaats van een hogere kasttemperatuur wordt gekozen voor het ventileren met de ramen dan zal het lager CO<sub>2</sub>-niveau (400 ppm ipv 1000 ppm) alleen op de piekmomenten tot 25% productieverlaging leiden. Uit Figuur 15 blijkt dat bij de cases met het hoogste koudwaterverbruik (bijv. case 12: T18D6) gedurende 100 uren boven de 300 m<sup>3</sup>/ha.uur ligt, terwijl het piekverbruik op 437 m<sup>3</sup>/ha.uur ligt. Als wordt uitgegaan deze 100 uren de lichtste uren van het jaar zijn dan ligt de globale straling dan gemiddeld op de 800 Watt/m<sup>2</sup>. In deze 100 uren is de globale straling dan voor  $100 \cdot 800 \cdot 3600 / 10000 = 28800 \text{ J/cm}^2$ , ofwel 7,5% van de jaarlijkse globale straling. Het productieverlies bij het openen van de ramen op piekmomenten zou dan maximaal  $25\% \cdot 7,5\% = 1,9\%$  zijn, uitgaande van een productie die evenredig is aan de globale straling. Als de luchtbehandelingskosten en luchtverdeling  $(437-300) / 437 = 31\%$  kleiner gedimensioneerd zijn, bespaart dit ongeveer 0,80 €/m<sup>2</sup>.jaar. Dit is meer dan de brutomarge van 1,9% van de productie ofwel  $0,45 \text{ €/kg} \cdot 1,9\% \cdot 72 \text{ kg/m}^2 = 0,61 \text{ €/m}^2$ .jaar. Een beperkte koelcapaciteit blijkt interessanter te zijn dan een volledige koelcapaciteit.

### 3.5.4 De prijs van koude

Bij de economische evaluatie is vooral ingegaan op de optimale dimensionering van een configuratie voor koeling. Of bij een gestelde configuratie de maximale koelcapaciteit te allen tijde moet worden ingezet is een andere vraag. De prijs die voor een m<sup>3</sup> koud water moet worden betaald is afhankelijk van de prijs van de elektriciteit, de COP van de warmtepomp en het rendement van de buffers en de warmtewisselaars, de waarde van de warmte-oogst en de temperatuur van het koude water. In Tabel 11 is hiervan een schatting gemaakt.

- Zo blijkt dat als de warmtepomp draait tijdens het koelen en de warmte-oogst volledig kan worden benut na opslag in de aquifer (rendement van 70%), de prijs van koud water met € 0,03 €/m<sup>3</sup> bijzonder laag is.
- Als de waarde van de warmte-oogst echter nihil is, dan wordt de prijs van koud water met 0,29 €/m<sup>3</sup> veel hoger.
- Bij ontvochtigen blijkt de prijs van koud water zelfs negatief te zijn doordat de warmte-oogst beter kan worden benut dankzij de directe toepassing ervan. Overigens betekent dit niet dat ontvochtigen winstgevend is ten opzichte van ventileren, want bij actief ontvochtigen kan meer warmte nodig zijn voor het herverwarmen dan bij ventileren via de luchtramen.
- Tijdens verwarmen met een hoge temperatuur is de COP laag en kan uit een kWh elektriciteit minder warm water worden gemaakt. Hierdoor drukken de elektriciteitskosten zwaarder op de prijs van het koude water (0,21 €/m<sup>3</sup>).

N.B. De rendementen van de buffers en de warmtewisselaars zijn niet eenduidig bekend en zijn afhankelijk van de capaciteit van de warmtewisselaars. Verder betreffen de schattingen alleen de prijs van koud water. De aandrijfkosten van de pompen en de ventilatoren zijn niet meegeteld. Ook moet worden aangetekend dat de resultaten sterk afhankelijk zijn van de prijs van elektriciteit. Bij goedkopere elektriciteit (bijv. van de WKK) is koude ook voordeliger.

**Tabel 11** Schatting van de prijs van koud water

		koelen	geen warmte	ontvochtigen	verwarmen
Elektriciteitsprijs	€/kWh	0,09	0,09	0,09	0,09
COPkoude		4	4	4	2,6
Rendement buffer en TSA koude	%	90%	90%	90%	70%
Rendement buffer en TSA warmte	%	70%	0%	90%	90%
Waarde warmteogst	€/GJ	7	0	7	7
Temperatuur koudwater	°C	8,0	8,0	8,0	8,0
Prijs koudwater	€/m <sup>3</sup>	0,03	0,29	-0,04	0,21

Om op de piekmomenten de temperatuur in een geconditioneerde kas terug te brengen van 28°C naar 26°C is ongeveer 130 m<sup>3</sup> meer koud water per hectare per uur nodig. Indien de geogste warmte kan worden benut dan kost dit slechts  $0,03 \cdot 130 = 3,90$  €/ha.uur. Als de geogste warmte niet kan worden benut dan kost het laten draaien van de warmtepomp  $0,29 \cdot 130 = 37,70$  €/ha.uur. Dit is ongeveer gelijk aan de waarde van 377 kg CO<sub>2</sub>/ha.uur. Dit is voldoende om bij een luchtuitwisseling van 34 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.uur een CO<sub>2</sub>-concentratie van 1000 ppm in de kas te handhaven. Het gebruik van de warmtepomp voor de productie van koude zonder dat de warmte kan worden benut, lijkt dan minder rendabel dan het doseren van extra CO<sub>2</sub>.

## 4 Conclusies en aanbevelingen

### 4.1 Discussie

Uit dit onderzoek komt naar voren dat lichtafhankelijk verhogen van de temperatuur geen voordeel oplevert voor de productie. Omdat de optimale temperatuur voor de bruto gewasfotosynthese onder hoog CO<sub>2</sub> (Figuur 11) nauwelijks lichtafhankelijk is, viel dit ook te verwachten. Dit lijkt in tegenspraak te zijn met het project 'Meerdaagse Temperatuurinstelling op basis van de assimilatenbalans (MTI)', waarbij het sturen op een zo gelijkmatig mogelijke sink:source verhouding voor komkommer enige productieverhoging (versgewicht vruchten) gaf.

Deze ogenschijnlijke tegenstrijdigheid kan als volgt worden verklaard: ook in het project MTI kwam men tot de conclusie dat de optimale temperatuur voor bruto gewasfotosynthese nauwelijks lichtafhankelijk is. Dat een iets lagere temperatuur volgens project MTI gunstig is komt overeen met onze conclusies. Het sturen op een regelmatige plantbalans gaf nauwelijks een andere totale biomassa-productie. Toch werd een geringe vruchtproductieverhoging (drooggewicht) gerealiseerd, namelijk door een betere zetting. Sturen op regelmatige assimilatenbalans gaf een iets verbeterde vruchtzetting (regelmatiger) en daardoor een iets hogere verdeling van assimilaten naar de vruchten. Dat in ons project dit niet naar voren komt, wordt veroorzaakt doordat vruchtzetting niet gesimuleerd wordt, maar het aantal vruchten per tros wordt opgelegd aan het model. Dit komt overeen met een teelt van trostomaten, waarbij het aantal vruchten per tros ook niet door de teeltomstandigheden bepaald wordt, maar opgelegd door snoei. Vooral doordat in het project MTI sturen op een regelmatiger assimilatenbalans een lager vruchtdrogestofgehalte gaf, nam de vruchtversgewichtproductie toe. Het vruchtdrogestofgehalte is echter constant gehouden in onze berekeningen, zodat zo'n effect niet naar voren kan komen. Bovendien geldt voor tomaat, in tegenstelling tot komkommer, dat het vruchtdrogestofgehalte toeneemt met de temperatuur (De Koning, 1994).

Als de resultaten van de cases onderling worden vergeleken dan blijken de verschillen gering te zijn op het gebied van de productie, het aardgasverbruik en de benodigde investering in de warmtepompen en de warmtebuffers. Door de dode zone met 2°C te verhogen blijken bij de behandelde cases de investeringskosten van de doubletten gemiddeld 13% lager en de investeringskosten van de koudwaterbuffer en de luchtbehandelingskasten gemiddeld 30% lager te worden door een verminderde piekvraag van het koudwaterverbruik. De meest gunstige case in dit onderzoek was T18D6 waarbij gestreefd is naar een hoge LAI. In deze case is jaarrond een stooktemperatuur aangehouden van 16°C in de nacht en 18°C overdag. De stooktemperatuur werd verhoogd met 3°C in een lichttraject van 100 tot 400 Watt/m<sup>2</sup> globale straling. De koellijn lag 6°C boven de stooklijn (dode zone van 6°C). Als bij deze meest gunstige case een 2°C hogere dode zone zou worden gehanteerd, dalen volgens een extrapolatie de totale investeringskosten met 8%, daalt het areaal waaraan warmte moet worden geleverd met 5% en daalt het aardgasverbruik met 3%. De totale energiekosten (investering + verbruik +/- levering) dalen dan met 13%. Hier zou volgens een schatting een productieverlaging van 4% tegenover mogen staan om tot hetzelfde eindresultaat te komen. Deze schatting is echter sterk afhankelijk van de prijzen die zijn gesteld voor vooral de aan derden te leveren warmte (6,9 €/GJ), de doubletten (3300 €/m<sup>3</sup>/h), de luchtbehandelingskasten (400 €/m<sup>3</sup>/h) en de brutomarge van de extra geproduceerde tomaten (0,45 €/kg).

Voor de cases met een hogere LAI wordt een hogere productie berekend dan voor de cases met een lage LAI. Bij een voldoende hoge LAI kan het toch interessant zijn om jonge bladeren weg te nemen en zodoende relatief meer assimilaten naar de vruchten te sturen (Heuvelink et al., 2005).

Het effect van een veranderde verticale temperatuurgradiënt bij koeling onder het gewas in een (semi)gesloten kas is in dit onderzoek niet beschouwd omdat hier onvoldoende over bekend is. Een mogelijk positief effect van een hoge temperatuur op de bladeren bovenin het gewas, die het meeste licht opvangen, is meer bladfotosynthese. Andere mogelijke effecten zijn een snellere afsplitsing van nieuwe trossen en bladeren bovenin het gewas en de tragere afrijping aan de relatief koelere onderkant van het gewas.

## 4.2 Conclusies

Binnen een range van 17 tot 24 °C geeft een hoge teelttemperatuur bij tomaat:

- snelle gewasontwikkeling
- vroege productie
- nauwelijks meer bruto gewasfotosynthese
- dunner blad en meer bladstrekking
- een hogere LAI in het jonge gewas door de snellere gewasontwikkeling en een lagere LAI in het volgroeide gewas door kortere uitgroei duur van de trossen en dus kortere levensduur van de bladeren
- een lichter gewas met meer onderhoudsademhaling per eenheid gewas
- nauwelijks invloed op de totale productie
- meer en kleinere vruchten
- hoger drogestofgehalte van de vruchten

Bij veel licht heeft temperatuur (15-30 °C) grote invloed op de bladfotosynthese. Hiervan is echter op gewasniveau nauwelijks iets terug te vinden, doordat het lichtniveau op de lager hangende bladeren veel lager is.

Een hogere kasttemperatuur leidt tot meer onderhoudsademhaling. In vergelijking met de bruto gewasfotosynthese is de onderhoudsademhaling echter gering. Bij veel licht en 1000 ppm CO<sub>2</sub> wordt de hoogste bruto gewasfotosynthese gevonden bij een temperatuur die enkele graden hoger ligt dan bij 350 ppm CO<sub>2</sub>. Pas als de etmaaltemperatuur langdurig boven de 25°C blijft kan binnen de range van 26°C en 29°C een productieverlies optreden van 5-25%. Geen van de in dit onderzoek behandelde cases komt langdurig boven een etmaaltemperatuur van 25°C. In een moderne Nederlandse (open) kas komt een gemiddelde etmaaltemperatuur van meer dan 26°C zelden of nooit langdurig voor.

Hoe hoog de temperatuur in de zomer in een (semi)gesloten kas mag oplopen heeft grote invloed op de investeringsbehoefte voor koeling. Bij case T18D2 met een maximaal temperatuursetpoint van (18 stooktemperatuur+3 lichtverhoging +2 dode zone=) 23°C is de piekbehoefte per uur aan koudwater 150% groter dan bij case T20D6 met een maximaal temperatuursetpoint van (20 stooktemperatuur+2 lichtverhoging+6 dode zone =) 28°C. Doordat de piekbehoefte met koudwateropslag tanks over het etmaal kan worden verdeeld, is de benodigde capaciteit van de doubletten 40% groter.

Het beste economische resultaat is berekend voor de case met een laag temperatuursetpoint, een hoge dode zone en een hoge LAI (T18D6 bij een LAI van 3,5). Het maximum temperatuursetpoint bij deze case is 27°C. De kleinste configuratie waarbij dit teeltconcept in een gesloten kas zonder verwarmingsketel kan worden uitgevoerd bestaat onder andere uit een warmtepomp van 41 W<sub>e</sub>/m<sup>2</sup> gesloten kas, een capaciteit van het doublet van 123 m<sup>3</sup>/uur.ha en 1627 m<sup>3</sup>/ha koudebuffer. Hierbij moet warmte worden geleverd aan 1,9 hectare open kas per hectare gesloten kas.

De investeringskosten (afschrijving, rente en onderhoud) van de conditionering zijn bij alle cases hoog ten opzichte van verbruikskosten (aardgasverbruik +/- warmtelevering), zelfs als een maximum kasttemperatuur van 27 of 28°C wordt nagestreefd. Aangezien de temperatuur relatief weinig invloed heeft op de productie zolang de etmaaltemperatuur niet hoger komt dan 25°C, zal een kas met een kleinere koelcapaciteit tot een nog beter economisch resultaat leiden. Bij deze lagere koelcapaciteit moet dan wel een hogere maximum kasttemperatuur worden geaccepteerd. Te denken valt aan een maximum koelwaterdebiet door de luchtbehandelingskasten van minder dan 400 m<sup>3</sup>/ha.uur. Hierbij moet gedurende hooguit 100 uren een kasttemperatuur van 31°C worden getolereerd, maar kan de lange termijn etmaaltemperatuur nog steeds lager dan 25°C worden gehouden.

Langdurig hogere etmaaltemperaturen dan 25°C kunnen leiden tot een productieverlies van enkele procenten. Over de invloed van een tijdelijk hoge kasttemperatuur op de productie in het gebied boven de 28°C is echter geen onderzoek bekend. In plaats van een hogere kasttemperatuur te accepteren kunnen de luchtramen op piekmomenten ook worden geopend. Dit heeft weer gevolgen voor de CO<sub>2</sub>-concentratie en de luchtvochtigheid en zodoende ook op de productie.



Indien de capaciteit van de duurzame productiemiddelen voor een geconditioneerde kas al bepaald zijn, dan wordt het al of niet gebruiken van een warmtepomp bepaald door de waarde van de hierbij geogste warmte. Op de momenten dat de geogste warmte niet kan worden benut of nuttig kan worden opgeslagen, is het gebruik van de warmtepomp duurder dan het ventileren en het doseren van extra CO<sub>2</sub>.

## 4.3 Aanbevelingen

Als een teler investeert in een geconditioneerde kas voor tomaat, is een beperkte capaciteit aan te bevelen boven een capaciteit die te allen tijde temperaturen lager dan 28°C kan garanderen.

Er zijn twee redenen om de kas niet 100% te koelen.

1. De vaste koelkosten worden beperkt door te besparen op de koelcapaciteit.
2. De variabele koelkosten worden beperkt omdat de kosten bij een lage tomatenprijs niet worden gecompenseerd door een voldoende hoge extra opbrengst.

Om te bepalen of de pieken in de koudevraag beter kunnen worden opgevangen door (nood)ventilatie in plaats van door een hogere dode zone, moet de volgende afweging worden gemaakt:

1. Bij een hoge dode zone kan productieverlies worden geleden door een tijdelijk te hoge kasttemperatuur.
2. Bij (nood)ventilatie kan productieverlies optreden door een lagere CO<sub>2</sub>-concentratie of moeten kosten worden gemaakt voor extra te doseren CO<sub>2</sub>. Verder is het mogelijk dat een plotselinge verlaging van de RV leidt tot een lagere productie. Bovendien kan minder warmte worden geogst doordat warmte via de luchtramen verdwijnt.

Aangezien nog niet bekend is wat de lange-termijneffecten zijn van een tijdelijk te hoge temperatuur, is experimenteel onderzoek naar deze effecten nodig om hierover een juiste afweging te kunnen maken.

Door de warme zijde van de warmtepomp (condensor) tijdens het koelen aan te sluiten op het retourwater uit de luchtbehandelingskast ( $\pm 18^\circ\text{C}$ ) kan de warmtepomp een veel hogere COP behalen dan als deze wordt aangesloten op het retourwater van de open kas ( $\pm 40^\circ\text{C}$ ). Het verdient aanbeveling om te onderzoeken hoe een dergelijke aansluiting in de praktijk kan worden uitgevoerd.

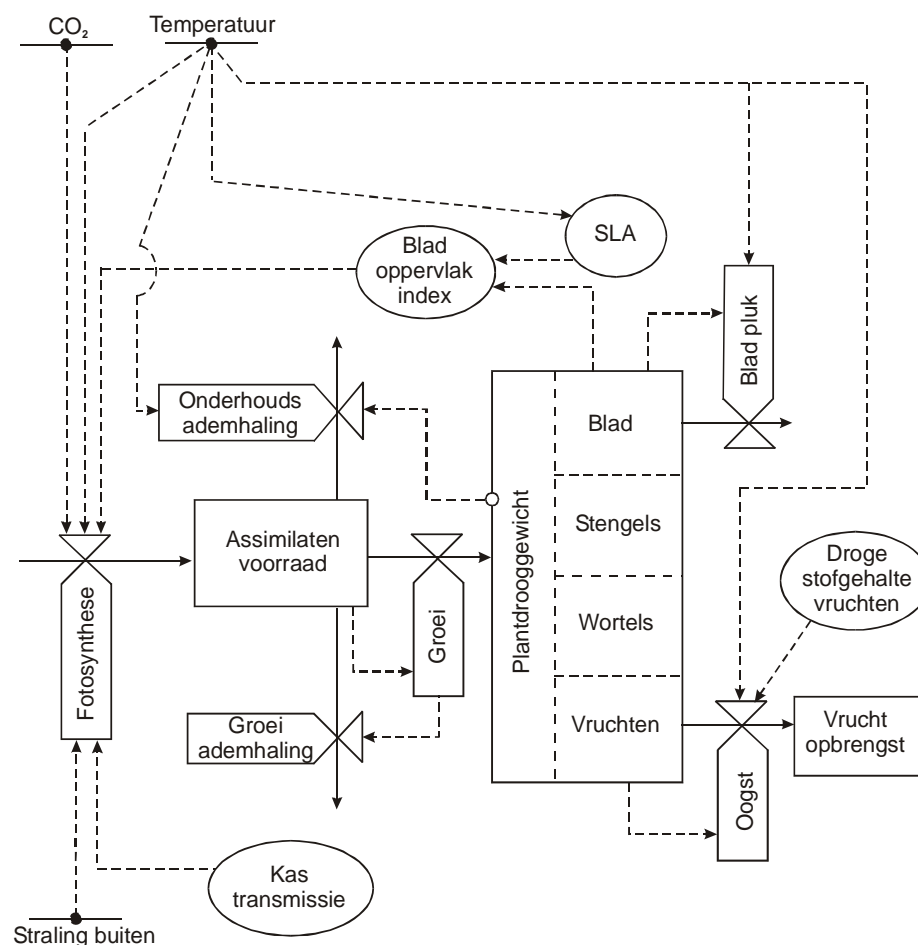
Uit de analyse van de data uit 2002 met INTKAM in plaats van TOMSIM komt naar voren dat beide modellen niet dezelfde respons op CO<sub>2</sub> te zien geven. Het valt moeilijk aan te geven welke respons zeker juist is omdat niet veel gedetailleerde proefgegevens (als b.v. fotosynthese en gewasgroeisnelheid) bekend zijn onder zowel hoog licht als hoge CO<sub>2</sub>-concentratie. Hoewel het INTKAM model de uiteindelijke productie in een geconditioneerde kas goed kan voorspellen, kunnen extra proefgegevens een beter inzicht bieden in de plantprocessen (w.o. fotosynthese) bij een hoge CO<sub>2</sub>-concentratie in de zomer in een gesloten kas.

# Literatuur

- Breuer, J.J.G. en N.J. van de Braak (1989) Reference year for Dutch greenhouses, *Acta Horticulturae* 248.
- Challa, H. (1990). Crop growth models for greenhouse climate control. In: *Theoretical production ecology: reflections and prospects*, R. Rabbinge, J. Goudriaan, H. van Keulen, F.W.T. Penning de Vries, H.H. van Laar (eds.). Pudoc, Wageningen. *Simulation monographs* 34: 125-145.
- De Gelder, A, J. Campen, A. Elings en C. Stanghellini (2006) *Luchtcirculatie en productie (concept)*. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Wageningen.
- De Koning, A.N.M., (1989) The effect of temperature on fruit growth and fruit load of tomato. *Acta Horticulturae* 248: 329-336.
- De Koning, A. N. M. (1994). Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: a quantitative approach. PhD dissertation Wageningen Agricultural University, Wageningen, 240pp
- Dieleman J.A. en H.F. de Zwart (2004). Optimaal besturen van temperatuur en CO<sub>2</sub> op basis van fotosynthese en energie. *Plant Research International*, Wageningen.
- Dieleman, J.A. (2003). Effecten van langdurig hoog CO<sub>2</sub> op groei en fotosynthese bij paprika : eindrapport van het project 'Efficiënt gebruik van CO<sub>2</sub>'. Nota 274, *Plant Research International*, Wageningen, 32pp.
- Dieleman J.A. en E. Heuvelink (2005). Gebruik van onderstammen bij vruchtgroenten : inventarisatie van de mogelijkheden voor energiebesparing. Nota 367, *Plant Research International* Wageningen, 36pp.
- Dueck, T, A. Elings, F. Kempkes, P. Knies, N. van de Braak, N. Garcia, G. Heij, J. Janse, R. Kaarsemaker, P. Korsten, R. Maaswinkel, M. Ruijs, C. Reijnders en R. van der Meer (2005) *Energie in kengetallen, zoek naar een nieuwe balans*. Nota 313, *Plant Research International* Wageningen.
- Heuvelink, E. (1989). Influence of day and night temperature on the growth of young tomato plants. *Scientia Horticulturae*, 38, 11-22.
- Heuvelink, E., M.J. Bakker, A. Elings, R. Kaarsemaker, L.F.M. Marcelis, (2005). Effect of leaf area on tomato yield. *Acta Horticulturae* 691:43-50
- Goudriaan, J, Van Laar, H.H., Van Keulen, H., Louwerse, W. (1985) Photosynthesis, CO<sub>2</sub> and plant production. In: Day, D., Atkin, R.K., eds. *Wheat growth and modeling*. NATO ASI Series, Serie A: Life Sciences, 86, pp. 107-122.
- Khayat, E., Ravad, D. & Zieslin, N. (1985). The effect of various night-temperature regimes on the vegetative growth and fruit production of tomato plants. *Scientia Horticulturae*, 27, 9-13.
- Nederhoff E.M. (1994). Effects of CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops. Proefschrift.
- Picken, A. J. F. (1984). A review of pollination and fruit set in the tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Horticultural Science*, 59, 1-13.
- Smeets, L. & Garretsen, F. (1986). Growth analyses of tomato genotypes grown under low night temperatures and low light intensity. *Euphytica*, 35, 701-715
- Venema, J. H., Posthumus, F. & van Hasselt, P. R. (1999). Impact of suboptimal temperature on growth, photosynthesis, leaf pigments and carbohydrates of domestic and high-altitude wild *Lycopersicon* species. *Journal of Plant Physiology*, 155, 711-718.

## Bijlage 1 De processen in een tomatenplant

In het kader van deze studie is het van belang eerst een goed beeld te hebben van de invloed van de gemiddelde temperatuur op gewasgroei en productie bij tomaat: welke processen worden sterk door de temperatuur beïnvloed en welke processen zijn juist veel minder van de temperatuur afhankelijk? Dit overzicht is grotendeels afkomstig uit de onlangs verschenen literatuurstudie omtrent de mogelijkheden van het gebruik van onderstammen om energie te besparen (Dieleman en Heuvelink, 2005). Om gewasgroei en opbrengst te analyseren is Figuur 1 behulpzaam:



Figuur 1. Vereenvoudigd relatiediagram dat de groei van een vruchtgroentegewas in de kas weergeeft. Rechthoeken zijn toestandsgrootheden, cirkels en ellipsen zijn parameters en kranen geven snelheden weer. Doorgetrokken lijnen geven stroom van koolstof weer, onderbroken lijnen geven informatiestroom weer. SLA = specifiek bladoppervlak.

### Opbouw bladoppervlak en plantlengte

Een verlaging van de temperatuur geeft vertraging in de gewasontwikkeling. Het gaat hierbij om de afsplitsing van nieuwe bladeren, die vaak in een ruim temperatuurstraject (bijvoorbeeld 17-27 °C) lineair of vrijwel lineair toeneemt met de temperatuur. Als vuistgetal geldt dat ongeveer 1 tros per week (dus 3 bladeren) gevormd wordt bij 20 °C; bij 16 °C is dat 0,8 trossen/week en bij 24 °C is dat 1,2 trossen/week. Voor tomaat is gevonden dat, hoewel de bladafplitsingssnelheid verschillend is voor verschillende cultivars, de reactie op temperatuur voor alle cultivars hetzelfde is (De Koning, 1994).

Een lagere temperatuur leidt vaak tot minder bladstrekking en dikkere bladeren (Heuvelink, 1989; Venema *et al.*, 1999). Dit is met name voor een jong gewas ongunstig. Als we aannemen dat per dag een bepaalde

hoeveelheid assimilaten voor bladgroei beschikbaar is, dan is het gunstiger om dat te besteden aan meer bladoppervlakte dan (deels) aan dikkere bladeren. Maakt de plant dikkere bladeren, dan komt de opbouw van "volledige" lichtonderschepping langzamer op gang. Het verlies ten gevolge van alle licht dat in deze fase op de grond valt in plaats van op het gewas is niet meer in te halen.

Wanneer rassen vergeleken worden voor wat betreft de groei van jonge planten wordt altijd dezelfde reactie op temperatuur gevonden (bijv. Smeets en Garretsen, 1986), dat wil zeggen minder groei, deels als gevolg van dikkere bladeren die ontstaan bij lagere temperatuur.

Door de vertraagde gewasontwikkeling bij lagere temperatuur zullen de planten ook korter zijn. Dit komt door het geringere aantal bladeren en dus internodiën (stengeldeel tussen twee bladeren). De internodiënlengthe wordt niet anders bij een lagere gemiddelde etmaaltemperatuur omdat deze vooral door het verschil tussen dag- en nachttemperatuur (DIF) bepaald wordt. Een hogere DIF geeft langere internodiën (Heuvelink, 1989).

### Fotosynthese en ademhaling

Over het algemeen is de bladfotosynthesesnelheid weinig gevoelig voor de momentane temperatuur in een vrij breed traject (bijvoorbeeld 17-24 °C). Komen we hierbuiten dan zal verlaging van de fotosynthese optreden. Ademhaling hangt voor een deel, namelijk de onderhoudsademhaling, sterk af van de temperatuur. Hierbij is het echter zo dat een suboptimale temperatuur tot minder onderhoudsademhaling leidt, in principe een positief effect. Echter, bij lagere etmaaltemperaturen ontstaat in het algemeen een zwaarder gewas (dikkere stengels, dikker blad, grotere vruchten) en dat zal dan per m<sup>2</sup> tot een verhoging van de onderhoudsademhaling leiden. Dit omdat deze onderhoudsademhaling proportioneel is met de totale biomassa die per m<sup>2</sup> aanwezig is. Combinatie van beide effecten, minder ademhaling per eenheid van biomassa, gecombineerd met een zwaarder gewas, leidt over langere termijn tot veel minder invloed van temperatuur op de ademhaling dan verwacht omdat beide effecten elkaar (deels) compenseren.

### Assimilatenverdeling en vruchtgroei

Bij de vruchtgroenten zijn de vruchten de belangrijkste sinks aan de plant en zij zijn vooral bepalend voor de assimilatenverdeling. Temperaturen buiten de range 10-30°C (exacte grenzen hangen af van de cultivar) zijn nadelig voor één of meerdere processen die nodig zijn voor een goede vruchtzetting (Picken, 1984). Een verminderde vruchtzetting bij suboptimale temperatuur is niet het gevolg van effecten op de stigma of eicel, maar is het gevolg van de vorming van pollenkorrels van een verminderde kwaliteit. Door hoge temperaturen worden diverse processen die van belang zijn voor een goede vruchtzetting nadelig beïnvloed. Onder lage lichtomstandigheden in de winter in kassen zijn temperaturen boven een etmaalgemiddelde van 20°C al nadelig voor de vruchtzetting, terwijl deze temperaturen de vegetatieve groei juist stimuleren.

Een lagere temperatuur geeft vertraging in de bladafplitsing en daarmee ook in de snelheid waarmee nieuwe bloemen/trossen gevormd worden. Een lagere temperatuur bij jonge planten betekent een vertraging in de bloem- en trossaanleg. Dat kan betekenen dat de vroege productie geringer is. De uitgroeiduur (van bloei tot oogstrijp) van een vrucht neemt toe bij lagere temperatuur, omdat de ontwikkelingssnelheid van de vrucht negatief beïnvloed wordt, net als de gewasontwikkelingssnelheid die hiervoor genoemd is. Zo heeft een tomatenvrucht bij 20 °C ongeveer een uitgroeiduur van 8 weken, terwijl dit bij 17 °C 10 weken bedraagt (De Koning, 1994). Door de langere uitgroeiduur bij lagere temperatuur neemt het gemiddeld vruchtgewicht toe, er vanuit gaande dat het aantal vruchten dat zet niet verandert. Zou dit ongewenst zijn dan kan dit in het algemeen eenvoudig worden tegengegaan door een hogere stengeldichtheid (door een hogere plantdichtheid of meer stengels per plant) aan te houden.

### Drogestofgehalte in de vruchten

Het drogestofgehalte van de tomatenvruchten neemt af met lagere temperatuur. Dat betekent dat met eenzelfde hoeveelheid assimilaten meer vruchtversgewicht wordt gemaakt. Een lagere temperatuur zal daardoor de productie dus positief beïnvloeden. Volgens De Koning (1994) neemt het drogestofgehalte van tomatenvruchten met 0,07 (g/g \* 100%) af voor iedere graad beneden 23 °C (range 17-23 °C). Bij een vruchtdrogestofgehalte van 5,5% zou een temperatuurverlaging van 3 graden bij gelijkblijvende groei een productieverhoging in versgewicht van 4% betekenen. In z'n algemeenheid is een lager drogestofgehalte echter ongunstig voor de smaak. Cultivars kunnen verschillen in vruchtdrogestofgehalte bij gelijke condities.

### Vruchtopbrengst

Hoewel de opbrengst van tomaat primair bepaald wordt door de cumulatieve lichtonderschepping en door de assimilatenverdeling (harvest-index), heeft temperatuur wel degelijk invloed op de opbrengst. Zoals hiervoor al opgemerkt, geeft een lagere temperatuur vertraging in de gewasontwikkeling en een vertraagde opbouw van lichtonderschepping door de bladeren. Door de vertraagde gewasontwikkeling wordt de verdeling van assimilaten naar de vruchten vertraagd met als gevolg een geringere vroege productie. Door de vertraagde opbouw van lichtonderschepping wordt de totale biomassa-productie en daarmee ook de vruchtproductie negatief beïnvloed. Door de langere vruchttuitgroeiduur bij lagere temperaturen (zie hiervoor) worden de vruchten zwaarder zodat de totale productie bij lage temperatuur, ondanks een geringer aantal vruchten, toch gelijk, of zelfs hoger kan zijn dan bij de hogere temperatuur (Khayat *et al.*, 1985).

### Samenvattend

Voor tomaat geldt dat temperatuur vooral invloed uitoefent op de gewas- en vruchtontwikkeling en veel minder op de gewasgroei, behalve in het jonge gewas, waar ook de groei door de temperatuur beïnvloed wordt. Een hogere temperatuur werkt positief op de opbouw van lichtonderschepping in de beginfase van het gewas, er worden per tijdseenheid meer vruchten gevormd met als gevolg een lager gemiddeld vruchtgewicht. Een hogere temperatuur geeft een vroegere productie, maar gewasfotosynthese en totale productie zijn relatief weinig gevoelig voor temperatuur, althans binnen een brede range (17-23 °C).



## Bijlage 2 Gewasgroei- en productiesimulaties gesloten kas 2002, 2004 en 2005

### Inleiding

Er bestaat nog onduidelijkheid over hoe goed de bestaande gewasgroeimodellen de situatie van een gesloten kas kunnen nasimuleren. Het gaat dan vooral over aspecten als de combinatie van hoog licht en hoge CO<sub>2</sub> in de zomer, zomerse omstandigheden met toch een optimale kasluchttemperatuur, de hogere luchtbeweging in een gesloten kas en de grote (inverse) verticale temperatuurgradiënt.

### 2002

In 2002 heeft in Naaldwijk een praktijkexperiment 'telen in een gesloten tuinbouwkas' plaatsgevonden. Hierbij was er alleen een gesloten kas, geen conventionele kas als controle. Het gewasgroeiemodel TOMSIM is destijds gebruikt om de proefresultaten na te simuleren en tot uitspraken te komen over de mogelijke productieverbodiging als gevolg van het jaarrond gesloten houden van de kas. Omdat voor 2004 en 2005 gebruik wordt gemaakt van het model INTKAM, is voor 2002 opnieuw gesimuleerd, maar nu ook met het model INTKAM. De kasdektransmissie is gesteld op 70% op basis van metingen.

De gewasontwikkelingssnelheid (trosafsplittingsnelheid) is in het model uitsluitend afhankelijk van de gemiddelde etmaaltemperatuur.

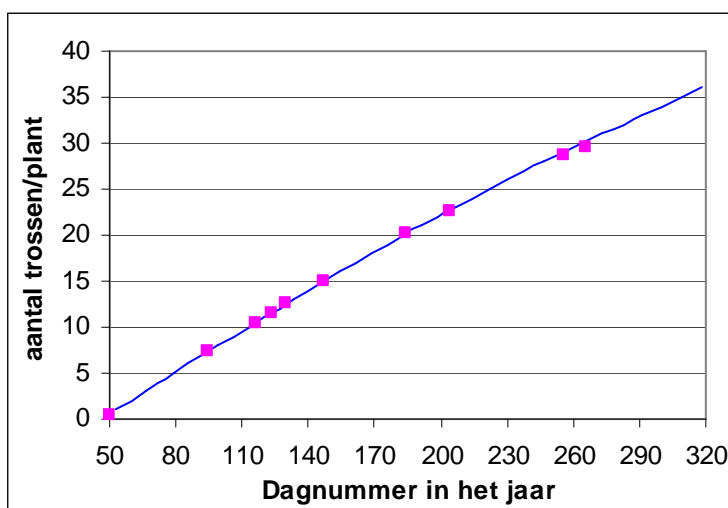


Fig.1 Gemeten (symbolen) en op basis van uitsluitend etmaaltemperatuur gesimuleerde (lijn) aantal aangelegde trossen. Laatste meting vond plaats op 23 september (dag 266). Experiment 'telen in een gesloten tuinbouwkas' Naaldwijk 2002.

Voor biomassa productie is de bladoppervlakte-index (LAI) van groot belang. De gemeten LAI op basis van destructieve metingen, en tussentijdse schommelingen die berekend zijn op basis van bladplukgegevens (versgewicht op basis van gemiddeld specifiek bladoppervlak omgerekend naar geplukt bladoppervlak) leidt tot een gemeten LAI-patroon in de tijd. Met de standaardinstellingen van het model werd een specifiek bladoppervlak (SLA) gesimuleerd dat veel hoger was dan de gemeten waarden. Hierdoor liep ook de simulatie van de LAI fout. In het model is de maximale SLA vervolgens omlaag bijgesteld. SLA is o.a. een raseigenschap maar wordt ook beïnvloed door licht, CO<sub>2</sub> en temperatuur. Na aanpassing van de SLA op basis van de gemeten waarden (Fig. 2), stemde ook de gesimuleerde LAI goed overeen met de gemeten LAI (Fig.3).

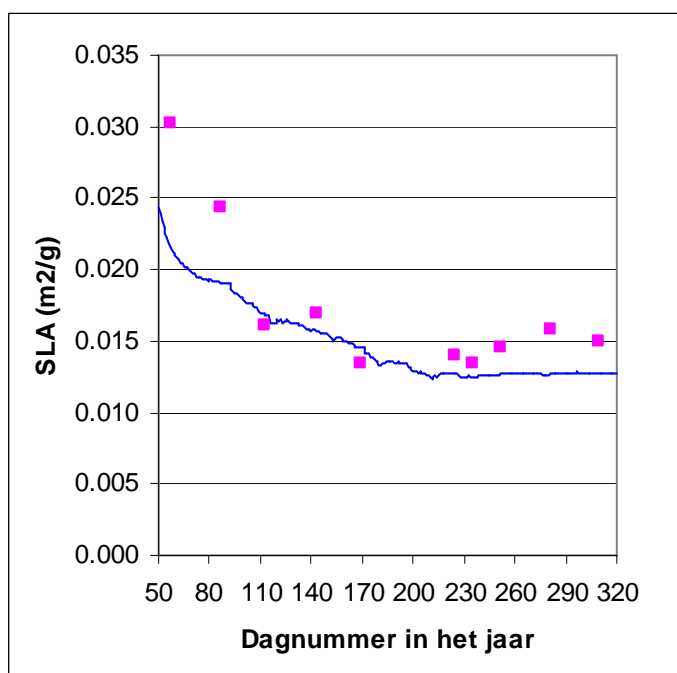


Fig.2 Gemeten (symbolen) en gesimuleerd (lijn) specifiek bladoppervlak (SLA, m<sup>2</sup>/g) in de gesloten kas in 2002

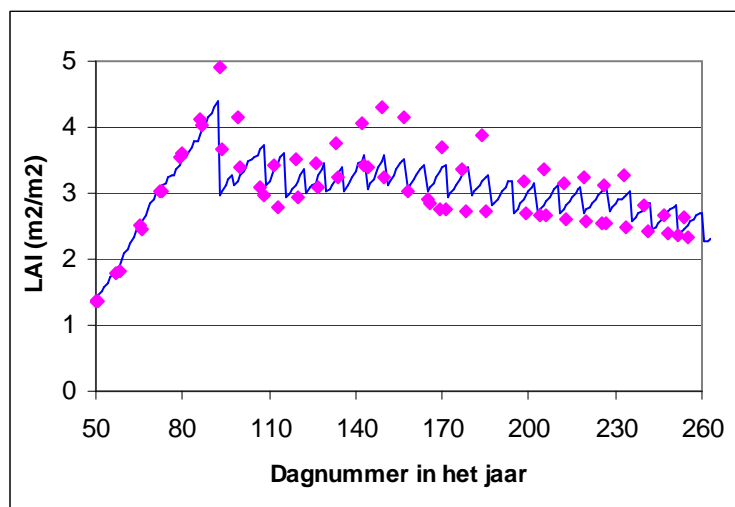


Fig.3 Gemeten (symbolen, maandelijkse destructieve metingen aangevuld met bladplukgegevens) en gesimuleerde (lijn) LAI in de gesloten kas in 2002.

De totale productie in de gesloten kas ( 52,8 kg/m<sup>2</sup> tot dag 303) wordt door INTKAM iets overschat ( 54,8 kg/m<sup>2</sup> tot dag 303) . Er is gerekend met een drogestofgehalte in de rijpe vruchten van 5,7%, dit op basis van de metingen. De gesimuleerde productie in de conventionele kas begint later, omdat in 2002 (plantdatum 24 januari) in de gesloten kas in het begin van de teelt erg hoge etmaaltemperaturen zijn aangehouden, waardoor de ontwikkeling van vruchten veel sneller verloopt. Tot ongeveer dag 170 lopen de gesimuleerde producties in conventionele en gesloten kas vrijwel parallel, daarna is de productiesnelheid in de gesloten kas hoger dan in de conventionele kas.

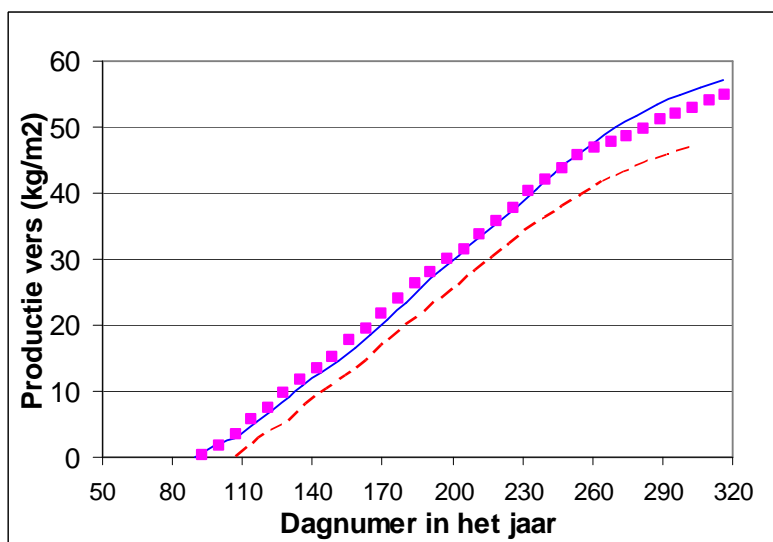


Fig.4 Gemeten (symbolen, alleen gesloten kas) en gesimuleerde (— gesloten kas, - - - open kas) productie in 2002. Versgewicht berekend op basis van drogestofgehalte van 5.7%.

Op basis van klimaatgegevens van een teler voor 2002 is uitgerekend dat de productie in een conventionele kas tot



dag 303 op 46,9 kg/m<sup>2</sup> zou zijn uitgekomen. Derhalve geeft volgens de simulaties met INTKAM de gesloten kas een productieverhoging van 17%. Dit komt door de, vergeleken met conventionele kas, hoge CO<sub>2</sub>, die ook maakt dat er een wat hogere LAI in de gesloten kas is door het seizoen heen. Door de hoge CO<sub>2</sub> is er namelijk meer fotosynthese en dus zijn er ook meer assimilaten voor bladuitgroei beschikbaar. Dat eventueel kort blad op kan treden onder hoog CO<sub>2</sub>, wordt niet in het model meegenomen. Dit heeft hier in ieder geval geen grote rol gespeeld, omdat de LAI naar behoren gesimuleerd wordt (Fig. 3).

Op basis van het model TOMSIM werd een productieverhoging door de gesloten kas met 10% voorspeld. Het feit dat TOMSIM en INTKAM niet precies overeenkomen is waarschijnlijk het gevolg van kleine verschillen in de bladfotosynthesemodule. In INTKAM is het standaard bladfotosynthesemodel van Farquhar en Von Cammerer gebruikt, terwijl de bladfotosynthesemodule in TOMSIM een samenvatting (Goudriaan et.al. 1985) van dit model is.

## 2004

Deze gegevens betreffen de Themato-kas in het eerste jaar. Naast de gesloten kas zijn er nu ook klimaat- en productiegegevens van een conventionele kas bij dezelfde teler. In tegenstelling tot eerdere simulaties (mei 2005) is nu uitgegaan van een kasdektransmissie van 73% in plaats van 70%, omdat is geschat dat 73% dichter ligt bij de realiteit. Ook is gepoogd het model beter het gemeten LAI-verloop te laten volgen. Van de Themato-teelten is de trosafsplitsing niet bekend en ook het aantal vruchten per tros is niet waargenomen, zodat het model hierop niet specifiek gemaakt kon worden.

De klimaatdata waren onvolledig. Voor de eerste 55 dagen is het klimaat in de gesloten kas gelijk gesteld aan dat in de open kas, omdat voor de gesloten kas metingen ontbraken. Schermgegevens zijn ook niet beschikbaar. De simulaties starten op 1 januari, dat is later dan de daadwerkelijke start van de teelt, maar van voor 1 januari zijn geen klimaatgegevens beschikbaar. Het aantal stengels per m<sup>2</sup> en het aantal vruchten per tros is ingevoerd volgens het vooraf opgestelde teeltplan (metingen zijn niet bekend).

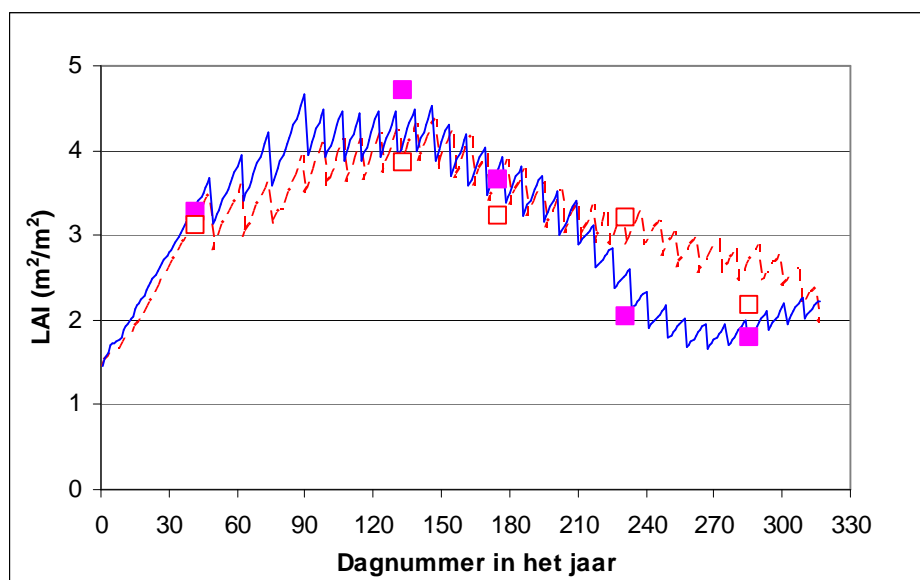


Fig.5 Gemeten en gesimuleerde LAI voor conventionele (□, - - -) en gesloten (■, —) kas THEMATO 2004

De LAI voor beide kassen is slechts vijf maal door het hele seizoen gemeten. Het model INTKAM is goed in staat om het gemeten patroon te simuleren (Fig.5). Zowel metingen als simulatie laten zien dat LAI in laatste deel van de teelt in de gesloten kas te laag komen (slechts 2, terwijl een LAI van 3 vrijwel volledige lichtonderschepping zou geven).

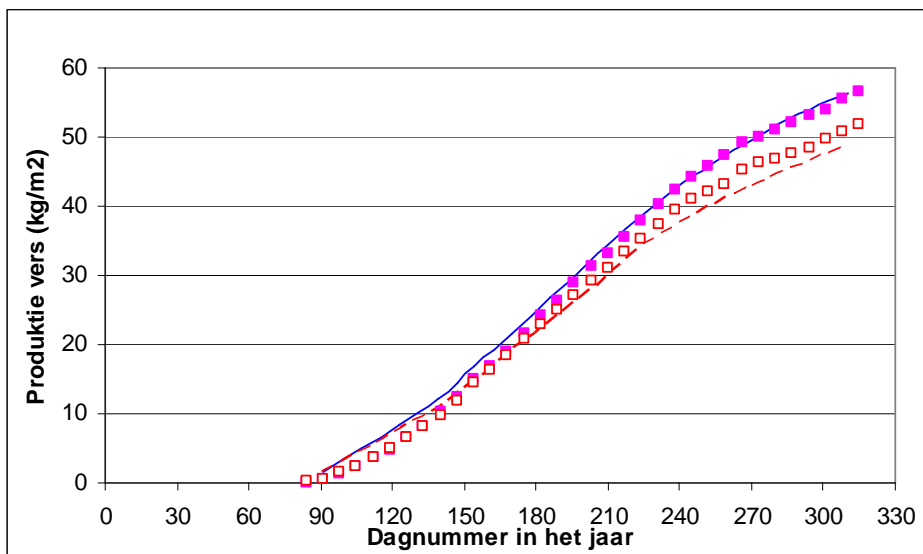


Fig.6 Gemeten en gesimuleerde productie voor conventionele (□, - - -) en gesloten (■, —) kas THEMATO 2004

Voor de productiesimulatie is uitgegaan van een drogestofgehalte van 6,5%, gebaseerd op de gemeten drogestofgehaltenes voor onrijpe vruchten zoals weergegeven in Fig. 7. 6,5% drogestofgehalte is hoog te noemen en deels bepaald door de onrijpheid van de vruchten en deels bepaald door het ras.

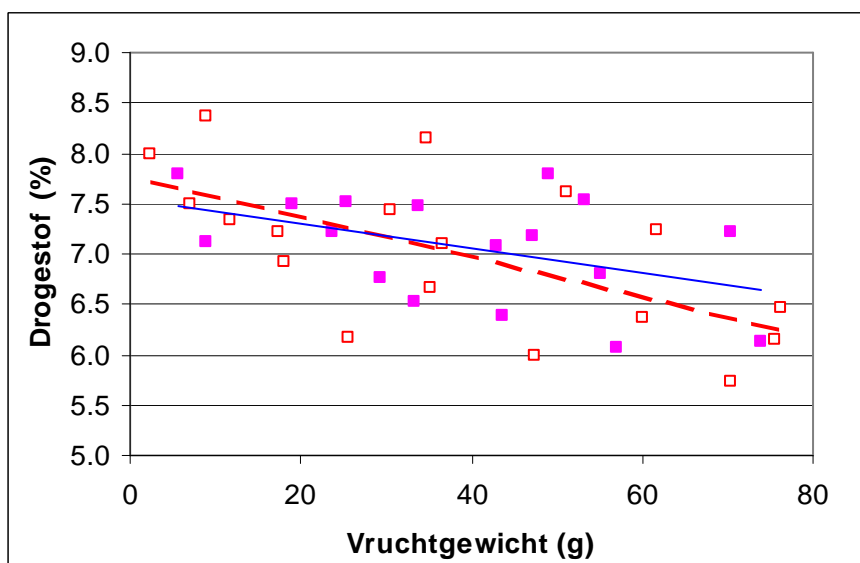


Fig.7 Gemeten drogestof gehaltenes in de vrucht voor conventionele (□, - - -) en gesloten (■, —) kas THEMATO 2004

INTKAM geeft een lichte onderschatting van de productie voor de conventionele kas, terwijl de simulatie van de productie in de gesloten kas samenvalt met de metingen (Fig.6). Op basis van de gemeten productie levert de gesloten kas 9% productieverhoging, terwijl INTKAM een productieverhoging van 18% geeft. Hiervoor zijn diverse verklaringen mogelijk, o.a. de forse Botrytis aantasting (ca. 10% van de planten) in het gewas waar het model geen rekening mee houdt. In ieder geval heeft de lagere LAI in de gesloten kas aan het einde van de teelt de opbrengst ook geen goed gedaan. Die lagere LAI zit echter ook in de simulatie (Fig.5) dus is geen verklaring voor het verschil tussen 18% en 9% productieverhoging.

## 2005

Het zelfde ras als in 2004 is ook nu weer geteeld: in de gesloten kas geënt op een onderstam, in de open kas op eigen wortel. Er zijn geen temperatuur en CO<sub>2</sub> gegevens voor de eerste 2 maanden beschikbaar. In plaats hiervan zijn voor deze periode, afzonderlijk voor conventionele en voor gesloten kas, de gemiddelde waarden gehanteerd van de eerstvolgende 30 dagen (dag 60-89), waarvan de gegevens wel beschikbaar waren. Daarmee dus ook verondersteld dat in die eerste 2 maanden het klimaat reeds niet identiek was in beide kassen. De gewasmetingen gaven daartoe duidelijk aanleiding.

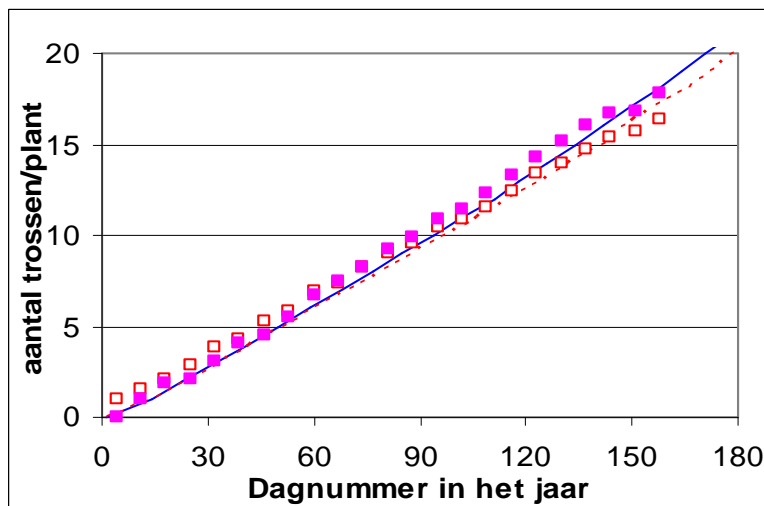


Fig.8 Gemeten en op basis van uitsluitend etmaaltemperatuur gesimuleerde aantal aangelegde trossen aan de hoofdstengel voor conventionele (ongeënte planten, □, - - -) en gesloten (ongeënte planten, ■, —) kas THEMATO 2005

Het verloop van de trosafplitsingssnelheid wordt redelijk gesimuleerd (fig. 8), maar niet zo goed als in 2002. Oorzaken hiervoor kunnen zijn dat volgens de metingen in de conventionele kas er al 1 tros meer aanwezig was dan in de gesloten kas. In het model is van eenzelfde startsituatie uitgegaan. Verder kan het zijn dat geënte en ongeënte planten niet precies hetzelfde reageren op temperatuur of andere teeltfactoren, maar daar zijn geen nadere aanwijzingen voor.

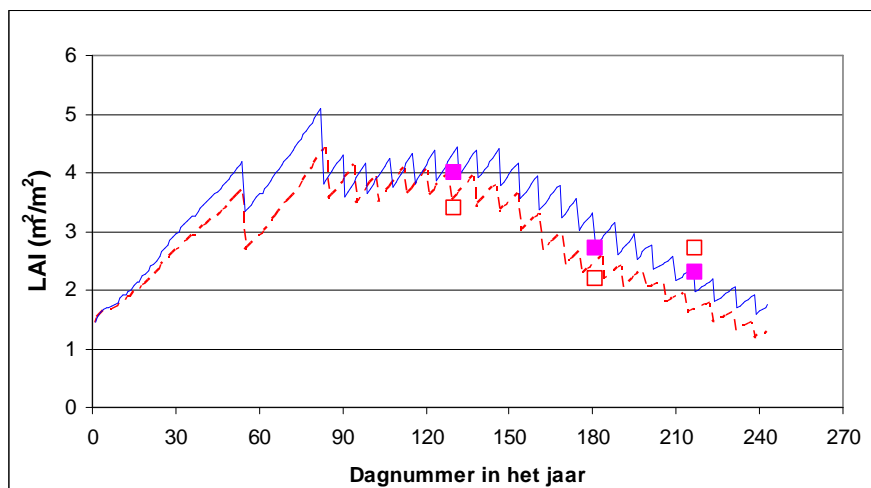


Fig.9 Gemeten en gesimuleerde LAI voor conventionele (ongeënte planten, □, - - -) en gesloten (ongeënte planten, ■, —) kas THEMATO 2005

Voor de bladoppervlakte-index (fig. 9) zijn er slechts 3 metingen (eerste meting pas in mei) dus daar valt nauwelijks van validatie te spreken. Het gesimuleerde patroon past redelijk bij de metingen, alleen aan het eind blijft de LAI in de metingen op peil, terwijl in de simulatie de LAI verder wegzakt.

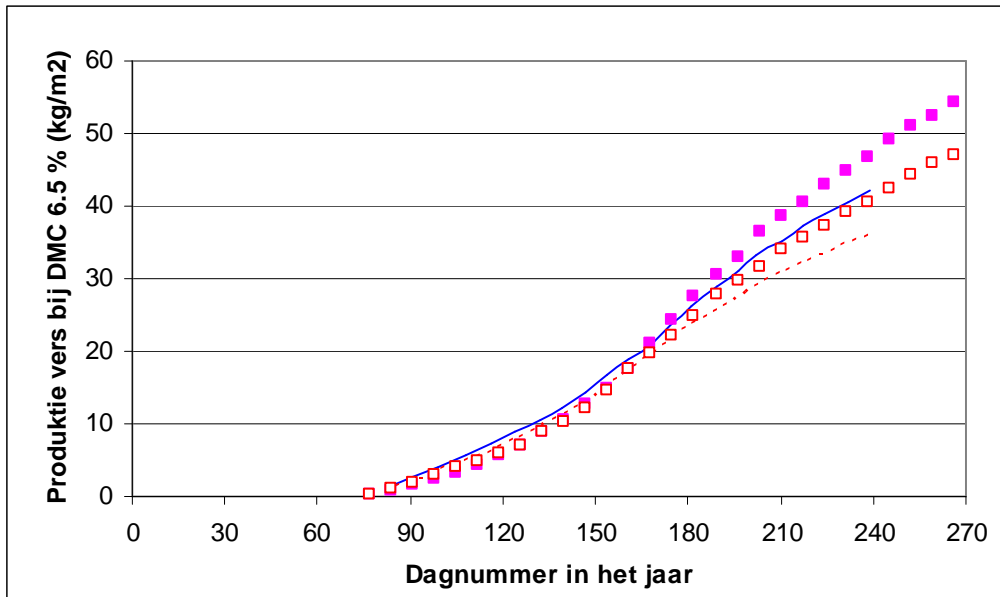


Fig.10 Gemeten en gesimuleerde productie bij drogestof gehalte van 6.5 % voor conventionele (□, - - -) en gesloten (■, —) kas THEMATO 2005

Er zijn geen drogestofgehalten van vruchten gemeten in 2005. Als we in de simulatie uitgaan van dezelfde waarde als in 2004 wordt de productie aan het eind behoorlijk onderschat in beide kassen. Gaan we echter uit van een drogestofgehalte van 6%, hetgeen op basis van Fig. 7 (zelfde ras) heel goed mogelijk is, dan klopt het een stuk beter. Dit is natuurlijk discutabel, maar zolang geen drogestofgehalten bekend zijn, zit daar in ieder geval enige speelruimte.

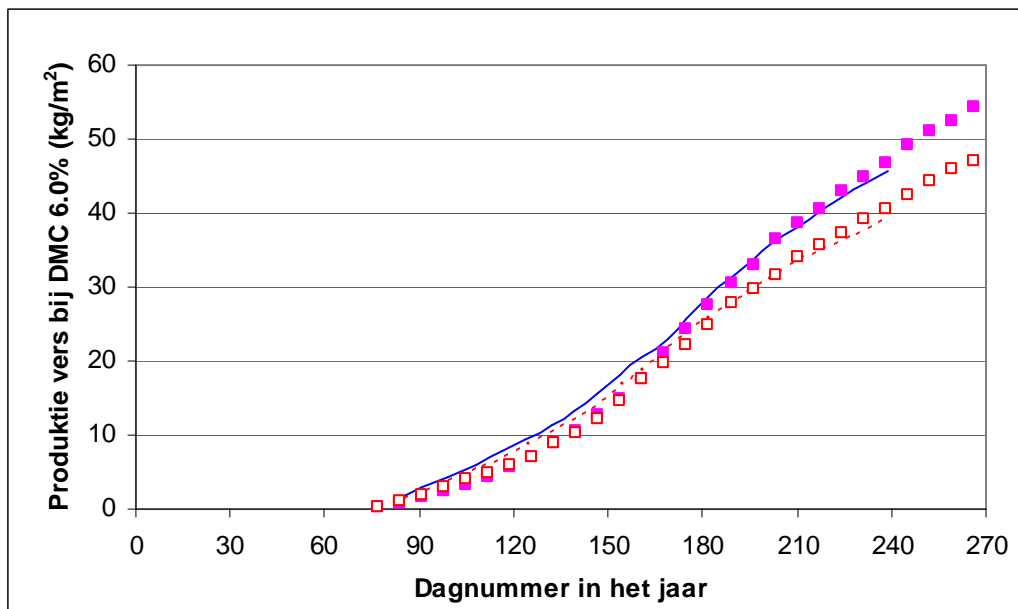


Fig.10 Gemeten en gesimuleerde productie bij drogestof gehalte van 6.5 % voor conventionele (□, - - -) en gesloten (■, —) kas THEMATO 2005

In beide simulaties (drogestofgehalten 6,0% of 6,5%) geldt dat INTKAM een 16,6% hogere productie voorspelt voor de gesloten kas ten opzichte van de conventionele kas. De gemeten productie tot dag 243 (dag van einde van simulaties want er waren geen verdere klimaatdata meer) is in de gesloten kas 15,8% hoger dan in de conventionele kas, hetgeen dus goed overeenkomt met wat volgens het model te verwachten zou zijn

### Conclusie

Voor alle drie jaren voorspelt het model INTKAM een productieverhoging van ca. 17% bij gebruik van een gesloten kas. In 2002 was er geen conventionele kas om mee te vergelijken, in 2004 werd bij Themato deze voorspelde productieverhoging niet gehaald, vermoedelijk door suboptimale teelt (o.a. Botrytis). In 2005 is de gemeten meerproductie tot nog toe vrijwel identiek aan de voorspelde meerproductie met INTKAM.

Deze analyse over 3 jaren geeft geen aanwijzingen om te veronderstellen dat INTKAM de situatie van een gesloten kas niet goed zou kunnen simuleren. INTKAM kan derhalve gebruikt worden in vervolgstudies om het klimaat en de teelttechniek in de gesloten kas te optimaliseren.

### Discussie

Het INTKAM model is niet gevalideerd voor teelten bij constant hoge temperaturen (>25°C etmaaltemperatuur). INTKAM bestaat uit diverse submodellen van onderliggende fysiologische processen en is geen simpele regressiecurve die de relatie tussen temperatuur en opbrengst weergeeft. Daarom is het aannemelijk dat (hoewel de onzekerheid toeneemt) ook boven 25°C realistische voorspellingen verkregen worden, althans totdat daadwerkelijk stress optreedt zoals verminderde vruchtzetting. Voor de fotosyntheserespons in INTKAM is het heel aannemelijk dat die ook boven 25°C overeenkomt met de realiteit. Körner (2003) en Körner e.a. (2006a, 2006b) hebben gewasfotosynthese-metingen bij zowel chrysant als tomaat verricht bij constante etmaaltemperaturen tot 32°C. Hieruit bleek dat gemeten en gesimuleerde fotosynthese goed overeenkwamen. Het goed kunnen voorspellen van de huidmondjesweerstand speelt hierbij wel een belangrijke rol. Ook in het project 'luchtcirculatie en productie' (De Gelder et al., 2006) konden groei en productie goed nagesimuleerd worden met INTKAM.

### Nader onderzoek

Er moet opgemerkt worden dat de Themato-data niet doelgericht werden verzameld voor modelvalidatie en daar dus ook eigenlijk niet geschikt voor zijn. Er zijn veel onbekenden, zoals aantal vruchten per tros en trosafsplitsingssnelheid voor 2004 en drogestofgehalte van de vruchten voor 2005. Uit de analyse van de data uit 2002 met INTKAM in plaats van TOMSIM komt naar voren dat beide modellen niet dezelfde respons op CO<sub>2</sub> te zien geven. Het valt moeilijk aan te geven welke respons zeker juist is omdat niet veel gedetailleerde proefgegevens (als b.v. fotosynthese en gewasgroeisnelheid) bekend zijn onder zowel hoog licht als hoge CO<sub>2</sub>-concentratie. Dit is wel erg belangrijk om preciezer aan te kunnen geven welke productiestijging verwacht mag worden ten gevolge van de hoge CO<sub>2</sub> in de zomer in een gesloten kas



## Bijlage 3 Hoge temperatuurstress bij tomaat

### Een literatuuroverzicht

Om een gesloten kas optimaal te kunnen dimensioneren en regelen, zou eigenlijk bekend moeten zijn wat de korte en lange termijn gevolgen zijn van bijvoorbeeld 1 uur 35°C, of 4 uur 32°C, etc. etc. Zover reikt momenteel de wetenschappelijke kennis niet. Als door 1 uur 35°C alleen de momentane fotosynthese nadelig beïnvloed zou worden is dat veel gemakkelijker te accepteren, dan wanneer in dat ene uur de zetting nadelig beïnvloed wordt (naeffect). Wat bekend is over de gevolgen van hoge temperatuur bij tomaat, wordt hieronder kort samengevat. Recent wordt daar regelmatig over gepubliceerd, namelijk vanuit het oogpunt van de gevolgen van opwarming van de aarde (o.a. Sato en Peet, 2005).

Voor opengrondsteelt van tomaten is gevonden dat 21-24°C voor tomatenproductie de optimale etmaaltemperatuur is, afhankelijk van het gewas stadium (Geisenberg en Stewart, 1986). Tomatenplanten die 6 uur lang bij 42°C staan vertonen een sterk geremde fotosynthese, omdat het PSII elektrontransport gereduceerd wordt (Heckathorn e.a., 1998). Hittestress kan enzymactiviteit belemmeren doordat bij hoge temperaturen (> 42°C) eiwitten denatureren en doordat hoge temperaturen de aanmaak van eiwitten tegengaan. Bij zulke hoge temperaturen treden ook indirecte effecten op via oxidatieve stress en dehydratatie. Een voorzichtige conclusie kan zijn dat temperaturen boven de 42°C de dood van de plant tot gevolg hebben, maar hittestress treedt al bij veel lagere temperaturen op.

Zoals bij veel gewassen is ook bij tomaat de generatieve groei en -ontwikkeling gevoeliger voor hoge temperaturen dan de vegetatieve groei. Temperaturen buiten de range 10-30°C (exacte grenzen hangen af van de cultivar) zijn nadelig voor één of meerdere processen die nodig zijn voor een goede vruchtzetting (Picken, 1984). Een verminderde vruchtzetting bij suboptimale temperatuur is niet het gevolg van effecten op stempel, stijlkanaal of eicel, maar is het gevolg van de vorming van pollenkorrels van een verminderde kwaliteit. Door hoge temperaturen worden diverse processen die van belang zijn voor een goede vruchtzetting nadelig beïnvloed. Onder lage lichtomstandigheden in de winter in kassen zijn temperaturen boven een etmaalgemiddelde van 20°C al nadelig voor de vruchtzetting, terwijl deze temperaturen de vegetatieve groei juist stimuleren.

Het percentage kieming van pollenkorrels wordt pas sterk verlaagd bij temperaturen buiten de zeer brede range van 5-37°C (Ho en Hewitt, 1986). Echter, uit diverse studies komt naar voren dat de aanmaak en ontwikkeling van pollenkorrels erg temperatuurgevoelig is, veel meer dan de ontwikkeling van de vrouwelijke reproductie-organen. Peet e.a. (1998) vonden in klimaatkamers (lichtintensiteit 550  $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  gedurende 12 uur; dit is een lichtsom vergelijkbaar met begin mei of half augustus in Nederlandse kassen), dat temperaturen van 30/24 en 32/26°C (D/N) de ontwikkeling van pollen negatief beïnvloedden. Deze temperatuurregimes gaven gemiddelde etmaaltemperaturen van 27 en 29°C. Zowel Peet et al. (1998) als Pressman e.a. (2002) vonden dat een gemiddelde temperatuur van 29°C de vitaliteit van pollen negatief beïnvloedt, dwz pollenkorrels ontwikkeld bij die temperatuur waren niet in staat om eicellen, ontstaan bij optimale temperatuur, te bevruchten. Sato en Peet (2005) vergeleken een voor hoge temperatuur gevoelige en een tolerante cultivar bij 32/26 en 28/22°C. Voor beide cultivars gold dat het vrijkomen van stuifmeelkorrels en de kiemkracht van de stuifmeelkorrels minder was bij de hoge temperatuur (etmaalgemiddelde 29°C). Deze effecten waren echter veel groter bij de gevoelige cultivar. Dit onderzoek laat duidelijk zien dat er rasverschillen zijn ten aanzien van gevoeligheid voor hoge temperatuur.

Afhankelijk van het ras en de andere klimaatsomstandigheden, zoals luchtvochtigheid en vochtgehalte in het wortelmedium, leidden temperaturen boven 34/20°C (D/N) of een periode van 4 uur 40°C tot bloemval. Een ander proces dat de tomatenproductie onder hogere temperaturen nadelig kan beïnvloeden is strekking van het stijlkanaal. De stempel steekt dan boven de helmhokken uit, waardoor normale bestuiving tegengegaan wordt.

Onderstaande Tabel laat zien, dat hittestress zich begint voor te doen vanaf een gemiddelde etmaaltemperatuur van 25°C. Peet e.a. (1997) vonden bij een etmaalgemiddelde van 26°C een lager vruchtgewicht, een lager aantal vruchten en minder zaden in de vruchten, dan bij 25°C. Deze auteurs vonden ook dat de gemiddelde etmaaltemperatuur hierbij belangrijker is dan alleen de nacht- of

dagtemperatuur. Dat duidt op enige compensatiemogelijkheden. Bij een gemiddelde etmaaltemperatuur van 29°C waren pollenkieming, pollenvitaliteit, aantal vruchten, vruchtgewicht per plant en het aantal zaden per vrucht beduidend lager dan bij 25°C (Pressman e.a., 2002).

De reducties en grenzen in Tabel 1 geven een goede indicatie, maar nogmaals, er zijn onvoldoende onderzoeksresultaten om gedetailleerde informatie over temperatuurgrenzen te verstrekken, en deze detailgrenzen zullen bovendien cultivarafhankelijk zijn. Dit onderzoek wijst er ook op dat van parthenocarpe cultivars, die vruchtzetting en uitgroei geven zonder bestuiving en bevruchting, verwacht mag worden dat deze tolerant zijn tegen hogere temperaturen. De kwaliteit van de stuifmeelkorrels, dat wil zeggen het vrijkomen ervan en de kieming van de stuifmeelkorrels is namelijk het proces dat als eerste nadelig beïnvloed wordt door hogere temperaturen en dat speelt bij parthenocarpe rassen geen rol.

Tabel 1: grenzen voor hittestress bij tomaat (Loaiza Mejia, 2005)

Temperatuur	Tijdsduur	Geschat productieverlies	Bron
42 °C	6 uur	-100%	Heckathorn e.a. 1998
40 °C	4 uur gedurende 9 dagen	- 100%	Klueva e.a., 2001; Iwahori, 1965; Sugiyama e.a., 1966; Sato e.a., 2000; Peet e.a., 1998
35° C	Etmaalgem. gedurende 30 dagen	- 40%	Rivero e.a., 2004
32/26°C	33 dagen	- 25%	Sato e.a. 2000, 2001, 2002
27°C	Etmaalgem. <sup>1</sup>	- 15 %	Peet en Willits, 1992
26°C	Etmaalgem. <sup>1</sup>	- 5%	Peet e.a., 1998

<sup>1</sup>Langdurig etmaalgemiddelde

#### Literatuur:

- Geisenberg C., Stewart K. 1986. Field crop management. In: The Tomato Crop (eds J.G. Atherton and J. Rudich), Chapman and Hall, London, pp. 511-557.
- Heckathorn SA, Downs CA, Sharkey TD, and Coleman JS (1998). The small methionine-rich chloroplast heat shock protein protects photosystem II electron transport during heat stress. *Plant Physiology* 116: 439-444
- Iwahori S. (1965) High temperature injuries in tomato IV. Development of normal flower buds and morphological abnormalities of flower buds treated with high temperature. *Journal of the Japanese Society of Horticultural Science* 34: 33-41
- Klueva, N.Y.; E. Maestri, N. Marmioli, and H.T. Nguyen (2001) Mechanisms of Thermotolerance in Crops. *Crop Responses and Adaptations to Temperature Stress* : Amarijt S. Basra Editor Food Products Press. 177-181
- Körner, O. 2003. Crop based climate regimes for energy saving in greenhouse cultivation. Proefschrift Wageningen Universiteit, 240pp.
- Körner, O., Q. Niu, en E. Heuvelink (2006a). Quantification of temperature and CO<sub>2</sub> effects on crop photosynthesis. *Annals of Botany* (nog niet gepubliceerd).
- Körner, O., Q. Niu, and R.J.C. Van Ooteghem (2006b). Simulations of high temperature and CO<sub>2</sub> effects on greenhouse crop photosynthesis. *Annals of Botany* (nog niet gepubliceerd).
- Peet, MM, Willits, D.H., (1992). High Night Temperature Effects On Tomato: Interactions with Developmental Stage And Season. Symp. on 'Stress in the Tropical Environment'. 19-25 September, Kona, Hawaii, pp. 2-206
- Peet MM, Willits DH, Gardner R, 1997. Response of ovule development and post-pollen production processes in male-sterile tomatoes to chronic, sub-acute high temperature stress. *Journal of Experimental Botany* 48: 101-111.
- Peet MM, Sato S, Gardner RG, 1998. Comparing heat stress effects on male-fertile and male-sterile tomatoes. *Plant, Cell & Environment* 21: 225-231.
- Picken, A. J. F., 1984. A review of pollination and fruit set in the tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.).



- Journal of Horticultural Science, 59, 1-13.
- Pressman E, M.M. Peet, & D.Mason Pharr (2002). The effect of heat stress on tomato pollen characteristics is associated with changes in carbohydrate concentration in the developing anthers. *Annals of Botany* 90: 631-636
- Rivero, R.M., Ruiz, J.M.,Romero, L.M (2004) Importance of N source on heat stress tolerance due to the accumulation of proline and quaternary ammonium compounds in tomato plants. *Plant Biology* 6: 702-707
- Sato S, M.M. Peet & F.F. Thomas (2000). Physiological factors limit fruit set of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under chronic, mild heat stress. *Plant, Cell and Environment* 23: 719-726
- Sato,S, M.M. Peet, & Randolph G. Gardner (2001). Formation of parthenocarpic fruit, undeveloped flowers and aborted flowers in tomato under moderately elevated temperatures. *Scientia Horticulturae* 90: 243-254
- Sato S, M.M. Peet, & J.F. Thomas (2002). Determining critical pre- and post- anthesis periods and physiological processes in *Lycopersicum esculentum* Mill. Exposed to moderately elevated temperatures. *Journal of Experimental Botany* 53, No. 371, pp. 1187-1195
- Sato S, M.M. Peet (2005). Effects of moderately elevated temperatures stress on the timing of pollen release and its germination in tomato (*Lyopersicon esculentum* Mill.) *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 80 (1) Pp. 23-28
- Sugiyama T, Iwahori S, and Takahashi K (1966). Effect of high temperature on fruit setting of tomato under cover. *Acta Horticulturae* 4: 63-69
- Ho, L. C., and J. D. Hewitt. 1986. Fruit development. p. 201–239. In: J. G. Atherton and J.Rudich (eds.), *The Tomato Crop: a Scientific Basis for Improvement*. Chapman & Hall, New York
- Loaiza Mejia, V, 2005. Prevent crop growth reduction because of heat stress: design and evaluation of cooling methods. MSc Thesis, Tuinbouwproductieketens, Wageningen Universiteit, 99 pp.



## Bijlage 4 Gebruikte basissetpoints en kaseigenschappen

---

Kasconstructie	
Totale vloeroppervlak (inclusief pad) [m <sup>2</sup> ]:	40000
Padbreedte [m] (padlengte is gelijk aan kopgevellenlengte):	2,5
Goothoogte [m]:	4,5
Dakhelling [graden]:	22,5
Breedte van een kap [m]:	4
Vakmaat [m]:	4,5
Type kasbedekkingsmateriaal:	enk_Venlo_400x450
Warmteverlies door gevel wordt al dan niet meegenomen:	Ja
Lekventilatie [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /s per m/s windsnelh):	0,6e-4
Lengte van een luchtraam in gootrichting [m]:	2,25
Hoogte van een luchtraam [m]:	1,32
Aantal ramen per kas / kasoppervlak:	0,0556
Breedtegraad:	52
Verwarmingsnetten	
Primaire net:	Low
Buisdikte ondernet (51-er = 51 mm):	51-er
Aantal buizen per kap ondernet:	6
Buisdikte bovennet:	28-er
Aantal buizen per kap bovennet:	3
Heeft de kas een (verwarmde) betonvloer:	nee
Verwarmingsunits	
Nominaal ketelvermogen [W/m <sup>2</sup> ]:	150
Ketelverlies [W/m <sup>2</sup> ]:	1
Rookgastemperatuur de ketel (voor de condensor) [°C]:	125
Vultemperatuur [°C]:	95
Heeft de ketel een condensor?:	ja
Warmteopslag	
Buffervolume [m <sup>3</sup> /ha]:	100
Strategie bij volle buffer:	stoppen
Gewas	
Type gewas:	tomaat
Datum waarop gewas geplant wordt:	10-12
Datum waarop gewas geruimd wordt:	30-11

## Setpoints

---

Stooktemperatuur [°C]:	18 16
Stooktemperatuur tijdstippen [dec. uur]:	op on
Dode zone tussen stooklijn en ventilatielijn [°C]:	0 0
Dode zone tijdstippen [dec. uur]:	op+2 on+2
Begin stralingstraject voor temp. setp. verhoging [W/m²]:	100
Einde stralingstraject voor temp. setp. verhoging [W/m²]:	400
Lichtafhankelijke setpointverhoging [°C]:	3
Setpointverlaging als functie van buitentemp [°C stooktemp / °C buitentemp]:	0
Luchtvochtigheidssetpoint [RV %] [dX gr/m³] [dTcan °C]:	90
luchtvochtigheid tijdstippen [dec.uur]:	0
Versterkingsfactor voor vocht op RV [% raam / % RV]:	3
Verhoging buistemperatuur als functie van RV:	nee
Setpoint CO <sub>2</sub> -dosering overdag [ppm]:	1000
Setpoint CO <sub>2</sub> -dosering tijdstippen [dec uren]:	0
CO <sub>2</sub> bron:	ketel
CO <sub>2</sub> doseerflux afhankelijk van lichtintensiteit [kg/ha/uur]:	160
Buientemperatuur waaronder ramen dicht blijven [°C]:	1,5
Raamstand lijkzijde waarbij loefzijde meeloopt [%]:	50
Minimale raamstand lijkzijde [%]:	0
Minimale raamstand loefzijde [%]:	0
Maximale raamstand lijkzijde [%]:	100
Maximale raamstand loefzijde [%]:	100
Maximale raamopening [graden]:	45
Versterkingsfactor raamopening als functie van buitentemp [%/°C]:	2
Minimum buistemperatuur op het ondernet:	38
Ingangstijdstippen voor de temperatuur niveaus in het ondernet:	0
Minimum buistemperatuur op het bovennet:	0
Ingangstijdstippen voor de temperatuurniveaus in het bovennet:	0
Begin stralingstraject minimumbuis afbouw [W/m²]:	20
Einde stralingstraject minimumbuis afbouw [W/m²]:	200
Maximumbuis temperatuur op het ondernet [°C]:	70
Ingangstijdstippen voor maximum buistemperaturen:	0
Maximumbuis temperaturen op het bovennet [°C]:	50
Ingangstijdstippen voor maximumbuis temperaturen:	0
Temperatuur ondernet waarboven bovennet bijkomt [°C]:	45

## Belichting

---

Keuze belichting: Nee

## Schermb

---

Indien beweegbaar loopt Gevelschermb mee met het onderste scherm:  
Keuze scherm in gebruik: beweegbaar  
van 15/10 tot 01/05: Ja  
van 01/05 tot 15/10: Nee  
SLS10UltraPlus

Type scherm:  
Zonstr. open crit. , optioneel 2e argument voor sluiten van (schaduw)schermb:  
Buitentemperatuur waarboven niet geschermd wordt [°C]:  
van 15/11 tot 01/03: 8  
van 01/03 tot 15/11: 6

Dode zone tussen kasluchttemperatuur en kier temp [°C]: 1,5  
Voorloop kierregeling in %raamstand equivalenten : 2  
Tweede scherm in gebruik?: nee

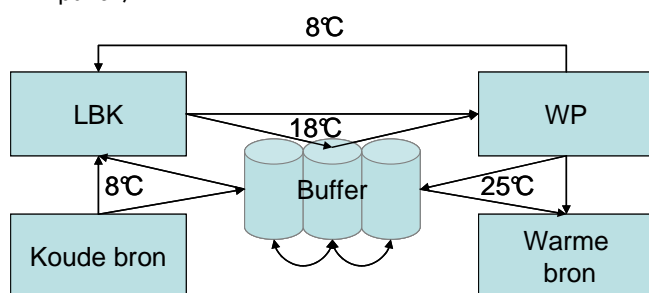
## Bijlage 5 Uitgangspunten en werkwijze economische berekeningen

thermisch rendement WKK	50%
elektrisch rendement WKK	40%
Carnotrendement WP	45%
Temperatuur condensor WP bij verwarmen	55 °C
Temperatuur verdamer WP bij verwarmen	6 °C
COPwarmte WP bij verwarmen	3,6
Temperatuur naar warme bron bij koelen	25 °C
Temperatuur condensor WP bij koelen	40 °C
Temperatuur verdamer WP bij koelen	8 °C
COPkoude WP bij koelen	4,0
Jaargemiddelde COPkoude WP	2,9
Rendement buffers en warmtewisselaars	75%
dT warmtebuffer	30 °C
Temperatuur bronwater uit warme bron	18 °C
CO <sub>2</sub> -vraag open kas	40 kg/m <sup>2</sup> .jaar
Percentage nuttig te gebruiken CO <sub>2</sub>	50%

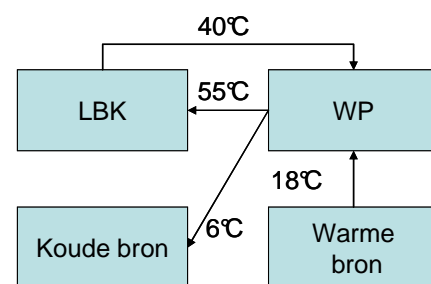
### Werkwijze berekening capaciteiten

- Schatting van het areaal per hectare gesloten kas waaraan warmte kan worden geleverd aan de hand van de warmtevraag, de koudevraag en het rendement van de WKK en de warmtepomp. Voorbeeld:
  - de warmtevraag in de gesloten kas wordt berekend op 1400 MJ/m<sup>2</sup>
  - de warmtevraag in een standaard open kas wordt ook gesteld op 1400 MJ/m<sup>2</sup>
  - de koudevraag in de gesloten kas wordt berekend op 2000 MJ/m<sup>2</sup>
  - de gemiddelde COP voor koude via warmtepomp en koude-opslag wordt gesteld op 2,9
  - het gemiddelde rendement van de buffers en de warmtewisselaars wordt gesteld op 75%.
  - het thermisch en elektrisch rendement van de WKK zijn gesteld op respectievelijk 50% en 40%
  - het open areaal waaraan geleverd wordt is dan  $(2000 * ((2,9 + 1) * 0,75 + 5/4) / 2,9 * 0,75 - 1400) / 1400 = 1,74$  ha.
- Bepaling van het vermogen van de warmtepomp. De warmtepomp moet in staat zijn om voldoende warmte te leveren in het koudste etmaal. Voorbeeld:
  - De maximale warmtevraag afgevlakt over drie etmalen wordt berekend op 80 W/m<sup>2</sup>.
  - Het areaal (open en gesloten) waaraan wordt geleverd is dan (zie punt 1.g) 1,74 + 1 = 2,74 ha.
  - De COP voor warmte van de warmtepomp is bij levering van 55°C warmte en 6°C koude gesteld op 3,6.
  - Per m<sup>2</sup> gesloten kas is het thermisch vermogen van de warmtepomp en de WKK samen  $2,74 * 80 = 219$  Watt
  - Het benodigd elektrisch vermogen van de warmtepomp is dan  $219 / (3,6 + 5/4) = 46$  Watt/m<sup>2</sup> gesloten kas. (5/4 is in verband met punt 1.f voor de levering van warmte door de WKK).
  - Het gemiddelde vermogen (zie punt 1.d) van koudelevering door de warmtepomp via de warmtewisselaars en de buffers is  $2,9 * 46 * 0,75 = 99$  Watt/m<sup>2</sup>.
  - De bedrijfstijd van de warmtepomp is dan  $2000 * 10^6 / (99 * 3600) = 5593$  uur.
- Bepaling van de capaciteit van de warmtebuffer. De warmtebuffer moet in staat zijn om voldoende warmte op te slaan om tijdens het koudste etmaal de warmtevraagpiek op te vangen. Voorbeeld:
  - De maximale warmtevraag per etmaal is berekend op 80 W/m<sup>2</sup> (zie punt 2.a)
  - Het aantal Wh/m<sup>2</sup> dat gedurende dat etmaal boven de 80 W/m<sup>2</sup> ligt wordt berekend op 300.
  - De warmtebuffer moet dan  $300 \text{ Wh/m}^2 * 2,74 \text{ ha} * 10.000 \text{ m}^2/\text{ha} = 8220 \text{ kWh}$  of  $\pm 30 \text{ GJ}$  kunnen opslaan.

- d. De maximum en minimum temperatuur van de buffer worden voor het koudste etmaal gesteld op 90°C en 60°C.
- e. De warmtecapaciteit van water is 4,18 MJ/m<sup>3</sup>.
- f. De inhoud van de warmtebuffer is dan  $30000 / (4,18 * 30) = 236 \text{ m}^3$ .
4. Bepaling van de capaciteit van de doubletten (pompen en aansluiting met de warme en koude put) op basis van de maximale koudevraag (zie Figuur 18). De doubletten moeten samen met de warmtepomp in staat zijn om voldoende koude te leveren tijdens het etmaal met de grootste koudevraag. Op de warmste dag levert de WKK de warmte aan de warmtebuffer en levert de warmtepomp de warmte direct aan de aquifer of de warme dagbuffer (25°C). Aangezien het bij de bestaande WP-installatie van Themato nog niet mogelijk is om bij de WP-condensor een temperatuur te realiseren lager dan 40°C is hier ook uitgegaan van 40°C. Als de condensor bij een temperatuur van 25°C kan worden gehouden zou een COP van 7,9 kunnen worden gerealiseerd.
- a. De COP voor koude van de warmtepomp is bij levering van 40°C warmte en 8°C koude gesteld op 4,0.
- b. Het koelvermogen van de warmtepomp is dan  $46 * 4,0 = 180 \text{ Watt/m}^2$ .
- c. De temperatuur van het water uit de luchtbehandelingskasten is gesteld op 18°C, 1 à 2 graden onder de gemiddelde kasttemperatuur tijdens het koelen.
- d. Het aantal m<sup>3</sup> water dat wordt afgekoeld van 18°C naar 8°C is dan  $180 * 3600 * 10000 / (1000000 * 4,18 * (18-8)) = 155 \text{ m}^3/\text{ha.uur}$ .
- e. Het maximaal aantal m<sup>3</sup> water per hectare per etmaal dat nodig is voor de koeling is berekend op 7000, ofwel 290 m<sup>3</sup>/ha.uur. De warmtepomp kan dus in principe voldoende koeling leveren voor het warmste etmaal.
- f. Het aantal draaiuren wordt naast de benodigde hoeveelheid koud water beperkt door de hoeveelheid af te voeren lauw water naar de aquifer. Het aantal draaiuren van de warmtepomp moet zodanig worden ingesteld dat het aantal m<sup>3</sup> dat aan warm water naar de warme bron wordt gepompt gelijk is aan het aantal m<sup>3</sup> koud water dat uit de koude bron wordt gehaald. Geschat wordt dat voor deze case de warmtepomp voor koeling maximaal 16,1 uur per etmaal kan draaien. De gemiddelde hoeveelheid koudwater uit de warmtepomp is dan  $155 * 16,1 / 24 = 104 \text{ m}^3/\text{ha.uur}$ . Dan is nog  $290 - 104 = 186 \text{ m}^3$  uit de aquifer nodig om in de koelbehoefte te voorzien.
- g. Het gemiddelde vermogen aan warmte dat de warmtepomp produceert is  $46 * (4,0 + 1) * 16,1 / 24 = 151 \text{ Watt/m}^2$ .
- h. Het aantal m<sup>3</sup> water per uur per hectare dat van de warmtepomp naar de aquifer wordt verpompt is dan bij een opwarming van 18°C naar 25°C is dan  $151 * 3600 * 10000 / (1000000 * 4,18 * (25-18)) = 186 \text{ m}^3$ . Dit is dan gelijk aan de hoeveelheid water die uit de aquifer moet worden opgepompt (zie punt f).



**Figuur 18 Koelen warmste etmaal**



**Figuur 19 Verwarmen koudste etmaal.**

5. Bepaling van de capaciteit van de doubletten op basis van de maximale warmtevraag (zie Figuur 19). Tijdens het draaien van de warmtepomp moet het water uit de warme bron worden gepompt om hierbij als warmtevoorziening te dienen. De WP vult de koude bron met koud water van 6°C. Bij maximale warmtevraag draait de warmtepomp continu.
- a. De COP voor koude van de warmtepomp is bij levering van 55°C warmte en 6°C koude gesteld op  $3,6 - 1 = 2,6$ . (zie ook punt 2.c)
- b. De thermische energie die uit het bronwater wordt gehaald is gelijk aan het koelvermogen  $46 * 2,6 * 10000 = 1,37 \text{ MW/ha}$  ofwel  $4198 \text{ MJ/ha.uur}$ .

- c. Gesteld dat het bronwater uit de warme bron een temperatuur heeft van 18°C dan is de hoeveelheid benodigd bronwater dat afgekoeld kan worden door de warmtepomp  $4198 / (4,18 \cdot (18-6)) = 84 \text{ m}^3/\text{ha.uur}$ . Dit is veel minder dan de benodigde pompcapaciteit op basis van de koudevraag (zie punt 4.h)
6. Bepaling van de capaciteit van de koudebuffer (zie Figuur 18). De koudebuffer is nodig wanneer de capaciteit van de doubletten onvoldoende is om de piekbelasting van de koeling op te vangen. Op de momenten met weinig of geen koudevraag wordt de koudebuffer gevuld met koud water uit de koude bron en wordt lauw water (18-25°C) uit de buffer naar de warme bron gepompt (zie Figuur 18).
- a. Het aantal  $\text{m}^3$  dat op de dag met de hoogste koudevraag boven de  $290 \text{ m}^3/\text{ha.uur}$  ligt (zie 4.e) is berekend op  $3200 \text{ m}^3$ .
7. Bepaling van de benodigde hoeveelheid  $\text{CO}_2$ . Doordat warmte wordt geleverd aan een open kas moet ook  $\text{CO}_2$  worden geleverd. De WKK met rookgasreiniger is te klein om in de  $\text{CO}_2$ -vraag te voorzien.
- a. De  $\text{CO}_2$ -vraag van de gesloten kas is ca.  $15 \text{ a } 16 \text{ kg}/\text{m}^2/\text{jaar}$ . De open kas heeft ongeveer  $40 \text{ kg}/\text{m}^2/\text{jaar}$  nodig.  $(1,74 \cdot 40 + 15) \cdot 10000 = 855.000 \text{ kg}/\text{ha.jaar}$
- b. Het elektrisch vermogen van de WKK is afgerond  $46 \text{ Watt}/\text{m}^2$ , ofwel  $455 \text{ kW}/\text{hectare}$ .
- c. Het gasverbruik van de WKK is  $455 \cdot 3,6 / (40\% \cdot 31,65) = 129 \text{ m}^3/\text{uur}$ . De WKK kan dus maximaal  $1,8 \cdot 129 = 233 \text{ kg}/\text{uur}$  leveren.
- d. De bedrijfstijd van de WKK is berekend op  $5593 \text{ uur}$  (zie punt 2.g). De WKK kan dus  $233 \cdot 5593 / 1000 = 1303 \text{ ton}$  leveren. Geschat wordt dat ongeveer de helft hiervan nuttig kan worden gebruikt, ofwel  $651 \text{ ton}$ . De overige  $\text{CO}_2$  ( $855-651 = 204 \text{ ton}/\text{jaar}$ ) zal moeten worden ingekocht.

### Berekening investeringskosten per $\text{m}^2$ gesloten kas

- Het aanleggen van doubletten naar de aquifer kost € 3300,- per  $\text{m}^3/\text{uur}$ , ofwel  $3300 \cdot 186 / 10000 = € 61,-$  per  $\text{m}^2$  gesloten kas.
- De aanschafkosten van warmtepompen inclusief warmtewisselaar (TSA) en WKK bedragen € 1,40 per Watt elektrisch vermogen, ofwel  $1,40 \cdot 455.000 / 10000 = € 64,-$  per  $\text{m}^2$  gesloten kas.
- De aanschafkosten van koudebuffers zijn gemiddeld € 30,- per  $\text{m}^3$ , ofwel  $30 \cdot 3200 = € 10,-$  per  $\text{m}^2$  gesloten kas. Hierbij is uitgegaan van een eenvoudige geïsoleerde watersilo
- De aanschafkosten voor de warmtebuffer zijn gemiddeld € 150,- per  $\text{m}^3$ , ofwel  $236 \cdot 150 / 10000 = € 4,-$  per  $\text{m}^2$  gesloten kas. Hierbij is uitgegaan van een hoogwaardige warmte-opslagtank
- De luchtbehandelingskasten kosten € 400,- per maximaal te verwerken  $\text{m}^3$  koudwater, ofwel  $400 \cdot 800 / 10000 = € 32,-$  per  $\text{m}^2$  gesloten kas.
- Omdat voor iedere case uit is gegaan van volledige warmtedekking door de warmtepomp en de WKK hoeft geen verwarmingsketel te worden aangeschaft. Dit bespaart € 5,- per  $\text{m}^2$  investering uit, ofwel  $(1 + 1,74) \cdot 5 = € 14,-$  per  $\text{m}^2$  gesloten kas.
- Om een volledige warmtedekking vanuit de warmtepomp ook in de open kas te kunnen garanderen is een vergroot verwarmend oppervlak nodig in de open kas. Dit kost € 5,- per  $\text{m}^2$  open kas, ofwel  $1,74 \cdot 5 = € 8,-$  per  $\text{m}^2$  gesloten kas.
- De som van de (vermeden en uit te voeren) investeringen is:  $61+64+10+4+32-14+8 = € 165,-$  per  $\text{m}^2$  gesloten kas.

### Berekening van de kosten en opbrengsten per $\text{m}^2$ gesloten kas

- De kosten van  $\text{CO}_2$  zijn gesteld op € 0,10 per kg ofwel,  $204.000 \cdot 0,10 / 10000 = € 2,-$  per  $\text{m}^2$  gesloten kas per jaar
- De gaskosten zijn gesteld op 0,23 per  $\text{m}^3$ , ofwel  $129 \cdot 5593 \cdot 0,23 / 10000 = € 17,-$  per  $\text{m}^2$  gesloten kas per jaar.
- De kosten van de van aardgas zijn gesteld op € 150,- per  $\text{m}^3/\text{uur}$ , ofwel  $129 \cdot 150 / 10000 = 2,-$  per  $\text{m}^2$  gesloten kas per jaar.
- Ten opzichte van een standaard kas worden de kosten van de aansluitcapaciteit uitgespaard. Uitgaande van een gemiddelde capaciteit in een standaard kas van  $100 \text{ m}^3/\text{uur.ha}$  zijn de uitgespaarde kosten  $2,74 \cdot 100 \cdot 150 / 10000 = € 4$  per  $\text{m}^2$  gesloten kas per jaar.
- De kosten van elektriciteit voor de hulpenergie van pompen en ventilatoren zijn voor elke case

gesteld op € 2,- per m<sup>2</sup> gesloten kas per jaar.

- De warmte-opbrengsten hebben een waarde die te vergelijken is met de warmte-inhoud van aardgas, omdat ook voldoende CO<sub>2</sub> kan worden geleverd en de warmtepieken ook in de open kas met laagwaardige warmte kunnen worden opgevangen door het vergrote verwarmend oppervlak. Hierbij is vergeleken met een rendement van 95% op de verbrandingswaarde van aardgas (35,17 MJ/m<sup>3</sup>), ofwel  $0,23 * 1000 / (35,17 * 0,95) = € 6,88$  per GJ. De interne besparing brengt dan  $1,4 * 6,88 = € 10,-$  en de externe levering  $1,74 * 1,4 * 6,88 = € 17,-$  per m<sup>2</sup> gesloten kas per jaar op.
- De totale energieverbruikskosten komen neer op:  $2+17+2+2-10-17-4 = -8$  €/jaar.m<sup>2</sup> gesloten kas (negatief).
- De investeringskosten rente (3,5%), afschrijving (10%) en onderhoud (1,5%) zijn samen gemiddeld 15%. De totale investering bedraagt € 165,- per m<sup>2</sup>, zodat de investeringskosten uitkomen op  $15\% * 165 = € 25,-$  per m<sup>2</sup> per jaar.
- De productie wordt berekend op basis van de berekend drogestofproductie voor de vruchten en een drogestofpercentage van 5,5%. Bij een drogestofproductie voor de vruchten van 4 kg per m<sup>2</sup> komt de vruchtproductie uit op 73 kg/m<sup>2</sup>. Ten opzichte van een open kas zal de meerproductie vooral in de zomer plaatsvinden. De prijs is dan gemiddeld 0,65 €/kg. Als de kosten voor arbeid en de afzetkosten zijn gesteld op 0,20 €/kg, resteert een brutomarge van 0,45 €/kg. De brutomarge is dan  $73 * 0,45 = € 33,-$  per m<sup>2</sup> gesloten kas
- Ter vergelijking: bij een standaard open kas met 60 kg productie, komt de brutomarge uit op  $60 * 0,45 = € 27,-$  per m<sup>2</sup>.
- In vergelijking met een standaard open kas brengt deze case per saldo op:  $33+8-27-25 = -11$  €/jaar.m<sup>2</sup> (negatief).



## Bijlage 6 Berekeningen dimensionering per case

Cases	Cases Nummer	LAI 2,5						LAI 3,5					
		T18 D2 1	T18 D4 2	T18 D6 3	T20 D2 4	T20 D4 5	T20 D6 6	T18 D2 7	T18 D4 8	T18 D6 9	T20 D2 10	T20 D4 11	T20 D6 12
Warmtevraag kassen	MJ/m <sup>2</sup> .jaar	1258	1247	1238	1494	1480	1469	1304	1294	1286	1575	1562	1552
Koudevraag gesloten kas	MJ/m <sup>2</sup> .jaar	2102	2011	1923	2005	1914	1827	2195	2118	2045	2126	2048	1978
Maximale warmtevraag afgevlakt over 3 etmalen	W/m <sup>2</sup>	68	68	68	79	79	79	68	68	68	79	79	79
Te bufferen warmte	Wh/m <sup>2</sup>	417	417	416	437	454	454	417	417	416	455	454	454
Max koudwaterdebiet	m <sup>3</sup> /uur	907	605	460	760	541	401	978	653	489	815	573	437
Max koudwaterdebiet (afgevlakt over 3 etmalen)	m <sup>3</sup> /uur	253	191	154	214	168	138	272	205	168	230	181	150
Benodigde hoeveelheid koudwater in buffer	m <sup>3</sup>	3280	2209	1608	2757	1943	1456	3506	2242	1627	2912	2004	1463
CO <sub>2</sub> vraag gesloten kas	kg/m <sup>2</sup> .jaar	17	17	17	17	17	16	18	18	17	18	17	17
open areaal per ha gesloten kas	ha	2,0	1,9	1,7	1,7	1,6	1,5	2,1	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6
<b>Bepaling capaciteit WP, aquifer en warmtebuffer op koudste etmaal</b>													
Max. warmtevraag per m2 gesloten kas	W/m <sup>2</sup>	202	194	186	210	201	192	208	201	195	219	211	204
Elektrisch vermogen WP per m2 gesloten kas	W/m <sup>2</sup>	42	40	39	44	42	40	43	42	41	45	44	42
Gemiddeld verm. koudelevering systeem	W/m <sup>2</sup>	91	88	84	95	91	87	94	91	88	99	96	93
Bedrijfstijd WP	uur	6389	6362	6335	5843	5828	5815	6467	6446	6427	5955	5946	5938
Warmte-inhoud warmtebuffer	GJ	44,7	42,9	41,2	42,1	41,9	40,1	46,1	44,6	43,2	45,6	44,0	42,5
Volume warmtebuffer	m <sup>3</sup>	356	342	329	336	334	320	368	356	344	364	351	339
Energie uit aquifer voor voeding WP	MJ/ha.uur	3863	3711	3564	4029	3855	3689	3986	3857	3736	4191	4045	3910
Debiet water uit warme bron	m <sup>3</sup> /uur	77	74	71	80	77	74	79	77	74	84	81	78
<b>Bepaling capaciteit aquifer warmste etmaal</b>													
Temperatuur retourwater LBK warmste etmaal	°C	18	19	20	19	21	22	18	19	20	19	20	21
Max aantal draaiuren WP warmste etmaal	uur	15,3	10,8	7,9	11,5	7,9	5,4	16,3	11,7	9,1	12,2	8,8	6,6
Warmte uit WP (afgevlakt over etmaal)	W/m <sup>2</sup>	133	89	63	103	68	45	145	101	76	115	80	58
Max. koelvermogen WP	W/m <sup>2</sup>	165	159	153	173	165	158	171	165	160	180	173	168
Max koudwaterdebiet uit WP	m <sup>3</sup> /uur	144	120	105	135	114	100	154	131	118	145	125	113
Afgevlakt koudwaterdebiet uit WP	m <sup>3</sup> /uur	92	54	34	64	37	23	104	64	45	74	46	31
Berekende capaciteit doublet	m <sup>3</sup> /uur	161	137	120	150	131	115	168	141	123	156	135	119
<b>Bepaling aanvulling CO<sub>2</sub></b>													
Totale vraag CO <sub>2</sub>	ton/jaar	960	913	866	839	791	746	1006	966	927	890	850	812
Gasverbruik WKK	m <sup>3</sup> /uur	119	114	110	124	119	114	123	119	115	129	125	121
CO <sub>2</sub> levering	kg/uur	214	206	198	224	214	205	221	214	207	233	224	217
CO <sub>2</sub> levering	ton/jaar	1369	1310	1253	1306	1247	1190	1430	1380	1332	1385	1335	1289
Aan te vullen CO <sub>2</sub>	ton/jaar	276	258	240	186	168	151	291	276	261	197	182	168

<b>Investerings</b>	Casnr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Doubletten	m <sup>3</sup> /uur	161	137	120	150	131	115	168	141	123	156	135	119
Warmtepomp+WKK+TSA	kWe	419	402	386	437	418	400	432	418	405	454	439	424
Koudebuffers	m <sup>3</sup>	3280	2209	1608	2757	1943	1456	3506	2242	1627	2912	2004	1463
Warmtebuffers	m <sup>3</sup>	356	342	329	336	334	320	368	356	344	364	351	339
Luchtbehandelingskasten en verdeling	m <sup>3</sup> /uur	907	605	460	760	541	401	978	653	489	815	573	437
<b>Verbruiken</b>													
CO <sub>2</sub>	ton	276	258	240	186	168	151	291	276	261	197	182	168
Aardgas	1000 m <sup>3</sup>	761	728	696	726	693	661	795	767	740	769	741	716
Gascapaciteit	m <sup>3</sup> /uur	119	114	110	124	119	114	123	119	115	129	125	121
Besparing warmte intern	1000 GJ	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Externe warmtelevering	1000 GJ	28	26	24	23	22	20	29	28	26	25	24	22
Besparing contractcapaciteit	m <sup>3</sup> /uur	298	286	275	268	256	245	307	297	288	279	269	260
<b>Prijs per eenheid en kosten per m2 (€) prijs</b>													
Doubletten	3300	53	45	39	49	43	38	55	47	41	51	45	39
Warmtepomp+WKK+TSA	1400	59	56	54	61	59	56	60	59	57	64	61	59
Koudebuffers	30	10	7	5	8	6	4	11	7	5	9	6	4
Warmtebuffers	150	5	5	5	5	5	5	6	5	5	5	5	5
Luchtbehandelingskasten en verdeling	400	36	24	18	30	22	16	39	26	20	33	23	17
Verdubbelen VO in open kas	50000/ha	10	9	9	8	8	7	10	10	9	9	8	8
Minderinvestering verwarmingsketel	-50000/ha	-15	-14	-14	-13	-13	-12	-15	-15	-14	-14	-13	-13
Totale investering	€/m <sup>2</sup>	158	132	117	149	129	114	166	138	122	157	135	121
afschr, rente en onderhoud	15%	24	20	18	22	19	17	25	21	18	24	20	18
CO <sub>2</sub>	100	3	3	2	2	2	2	3	3	3	2	2	2
Aardgas	230	17	17	16	17	16	15	18	18	17	18	17	16
Gascapaciteit	150	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
hulpenergie		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Besparing warmte intern	6884	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10
Externe warmtelevering	6884	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-20	-19	-18	-17	-16	-15
Besparing contractcapaciteit	150	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-5	-4	-4	-4	-4	-4
<b>Berekening resultaat</b>													
drogestofproductie vruchten	kg/m <sup>2</sup>	3,9	3,88	3,84	3,85	3,82	3,78	4,08	4,05	4,02	4,02	3,99	3,95
productie bij 5,5% drogestof vruchten	kg/m <sup>2</sup>	70,91	70,55	69,82	70,00	69,45	68,73	74,18	73,64	73,09	73,09	72,55	71,82
Brutomarge productie	€/m <sup>2</sup>	31,91	31,75	31,42	31,50	31,25	30,93	33,38	33,14	32,89	32,89	32,65	32,32
Investeringskosten	€/m <sup>2</sup>	-23,74	-19,87	-17,50	-22,38	-19,36	-17,14	-24,90	-20,74	-18,31	-23,53	-20,28	-18,09
Energielevering en verbruik	€/m <sup>2</sup>	9,13	8,84	8,55	7,41	7,14	6,88	9,21	8,96	8,73	7,41	7,19	6,99
Saldo	€/m <sup>2</sup>	17,30	20,71	22,47	16,53	19,03	20,67	17,69	21,36	23,31	16,77	19,56	21,22