



**WAGENINGEN UR**  
*For quality of life*

---

# Richtinggevende beelden voor energiezuinig telen in semigesloten kassen

Eric Poot, Feije de Zwart, Sjaak Bakker, Gerard Bot, Anja Dieleman, Arie de Gelder, Leo Marcelis<sup>1</sup> & Daan Kuiper<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Wageningen UR Glastuinbouw

<sup>2</sup> CropEye

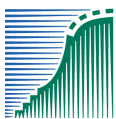
Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk  
Oktober 2008

Nota 568

---

© 2008 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

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



landbouw, natuur en  
voedselkwaliteit



## Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk  
: Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk  
Tel. : 0317 - 48 56 06  
Fax : 010 - 522 51 93  
E-mail : [glastuinbouw@wur.nl](mailto:glastuinbouw@wur.nl)  
Internet : [www.glastuinbouw.wur.nl](http://www.glastuinbouw.wur.nl)

# Inhoudsopgave

	pagina
Abstract	1
1 Samenvatting	3
Gewasfysiologie	3
Teeltconcept tomaat: techniek	4
Teeltconcept tomaat: teelt	5
2 Inleiding	7
2.1 Aanleiding	7
2.2 Probleemstelling	7
2.3 Doelstelling	7
3 Aanpak	9
3.1 Omgevingsanalyse	9
3.2 Onderzoekservaringen geconditioneerd telen	9
3.3 Generieke kennis gewasfysiologie	10
3.4 Inventarisatie gereedschappen	10
3.5 Ontwerp en uitwerking teeltconcept	10
4 Omgevingsanalyse	13
4.1 Potentiële en reële besparingen (in %) per transitiepad	14
4.2 Warmtepomp met Aquifer	15
4.3 Aardwarmte	15
4.4 Warmtekrachtkoppeling	15
4.4.1 WKK installaties op glastuinbouwbedrijven	16
4.4.2 Elektriciteitsbalans op sectorniveau	16
4.5 Prijzen van gas en Electra	16
4.5.1 Knelpunten WKK	17
4.6 Rentabiliteitsontwikkeling	17
4.7 Gewasgroepen	18
5 Plantenfysiologie	21
5.1 Performance indicatoren	21
5.2 Potenties gewas	21
5.3 Huidmondjes	21
5.4 Temperatuur en fotosynthese	22
5.5 Source – sink relaties	22
5.6 Luchtverplaatsing	23
5.7 Bovengronds – ondergronds	23
5.8 Blad	23
5.9 Dynamiek	24
5.10 Openstaande vragen	24

6	Gereedschappen	25
6.1	Techniek voor de semigesloten teelt	25
6.1.1	Warmtewisselaars	26
6.1.2	Warmtepomp	27
6.1.3	Buffer/Aquifer	28
6.1.4	CO <sub>2</sub> -bron	28
6.1.5	Nevelinstallatie	28
6.1.6	Schermen	28
6.1.7	Belichting	29
6.2	Operationele besturing van de semigesloten teelt	29
6.3	Teeltkeuzes in de semigesloten teelt	30
6.3.1	Planttijdstop	30
6.3.2	Gewasstructuur	30
6.3.3	Raskeuze	30
7	Teeltconcept tomaat	31
7.1	Teeltsysteem en plantdatum	31
7.2	Kasuitrusting en klimaatbeheersing	31
7.2.1	Temperatuurbeheersing	33
7.2.2	Schermen	33
7.2.3	CO <sub>2</sub> dosering	34
7.2.4	Energievoorziening	34
7.3	Teelt en klimaatstrategie per seizoen	35
7.3.1	Winter	35
7.3.2	Voorjaar	36
7.3.3	Zomer	36
7.3.4	Najaar	37
7.4	Samenvatting energiezuinig teeltconcept Tomaat	38
7.4.1	Technische uitrusting	38
7.4.2	Belangrijkste aanpassingen teelt en klimaatregime ten opzichte van referentieteelt	38
7.5	Effecten op energiegebruik en productie	38
7.5.1	Uitgestelde plantdatum	38
7.5.2	Aangepaste temperaturen	39
7.5.3	Ventilatie en CO <sub>2</sub>	40
7.5.4	Schermgebruik	42
7.5.5	Lichtverlies	42
7.5.6	Luchtvochtigheid	43
7.5.7	Totaal Energieverbruik	45
8	Conclusies en aanbevelingen	47
8.1	Productie	47
8.2	Energiebesparing	48
8.3	Effecten op het gewas	48
8.4	Opties voor verdere verbetering/ optimalisatie	49
8.5	Stapsgewijze toepassing in traditionele systemen	50
	Literatuur	51
	Bijlage I. Setpoint beschrijving	2 pp.
	Bijlage II. Workshops	2 pp.
	Bijlage III. Uitkomsten workshops	3 pp.

## Abstract

In het kader van het 'Versnellingsprogramma implementatie semigesloten kas' hebben LNV en PT aan Wageningen UR en CropEye gevraagd een beeld te schetsen van de richting waarop energiezuinig telen in semigesloten kassen zich kan ontwikkelen. Dit is uitgewerkt in een teeltconcept voor tomaat, waarin met de helft van de hoeveelheid energie dezelfde productie wordt behaald als in een gangbare (onbelichte) teelt. Uitgangspunt was beschikbare technologie en kennis, die liefst modulair door de praktijk is in te passen. Het concept is middels workshops, expert consultancy, deskstudy en simulatiemodellen ontworpen en doorgerekend. Het teeltconcept kent een andere periode van teeltwisseling, instraling gekoppelde meerdaagse temperatuurintegratie, scherpere vochtregeling, dubbel scherm met temperatuur én straling afhankelijke regeling, luchtbevochtiging, luchtcirculatie, luchtbehandeling met buitenluchtaanzuiging en verwarming; en koeling, WKK, warmtepomp en aquifer. Met het totale systeem moet een productie van ca 60 kg per m<sup>2</sup> per jaar mogelijk zijn bij een input van minder dan 20 m<sup>3</sup> gas per m<sup>2</sup> per jaar. Behalve aan technische en teelttechnische aspecten is in het project veel plantfysiologische kennis verzameld.



# 1 Samenvatting

Bij start van het 'Versnellingsprogramma implementatie semigesloten kas' bleek er behoefte te bestaan aan een richtinggevend beeld voor energiezuinig telen in semigesloten kassen. Een dergelijk beeld beschrijft de mogelijkheden om, ten opzichte van een in praktijk gangbare referentieteel, fors op fossiele energie te besparen bij minmaal gelijkblijvende productie. In het project is gekozen om een beeld te schetsen dat praktisch is: telers zouden in staat moeten zijn om het volgende teeltseizoen al gebruik te kunnen maken van de opgedane inzichten. Deze korte termijn horizon maakt het mogelijk om het beeld scherp neer te zetten. Ook de keuze voor één voorbeeldgewas, tomaat, is om deze reden gemaakt.

In de studie is een analyse gemaakt van de omstandigheden, het 'landschap', waarin de energietransitie in de glastuinbouw zich momenteel bevindt. De huidige aandacht voor semigesloten telen is logisch, omdat fossiele energie wordt vervangen door (duurzame) zonne-energie. Hiervoor zijn systemen nodig met warmtepomp en seizoensopslag van warmte (en koude). Deze en andere technieken en methoden, die in het kader van deze studie op een rij zijn gezet, maken een betere conditionering van het gewas mogelijk. Daardoor kunnen in potentie hogere producties, betere productkwaliteit en strakkere teeltplanningen worden behaald.

Uit de analyse van kwantitatieve informatie van een aantal verschillende glastuinbouw teelten is gebleken, dat semigesloten telen energetisch gezien vooral gunstig is voor (onbelichte) vruchtgroenten, tropische potplanten en teelten waar zowel warmte als koude nodig is. Bij dergelijke teelten gaat relatief veel energie zitten in het invullen van de vraag naar thermische energie ten opzichte van de krachtvraag. Bij teelten met een relatief hoge vraag naar elektriciteit (voor assimilatiebelichting) zal een systeem met een warmtepomp slechts een kleine verbetering leveren.

## Gewasfysiologie

Voor een optimale teelt is een goed begrip van de plant noodzakelijk. In het kader van dit project zijn twee workshops georganiseerd, waarin met deskundigen op het gebied van semigesloten telen en experts op het gebied van plantenfysiologie een overzicht gemaakt is van de bestaande kennis op dit gebied, en de vragen die nog open staan. In een semigesloten kas kunnen immers klimaatcondities worden aangebracht, die tot op heden in traditionele kassen nog niet konden worden gemaakt, en waarvan de consequenties voor het gewas ook nog niet helemaal bekend zijn.

Als over-all conclusie uit de workshops is gesteld, dat planten in potentie genoeg mogelijkheden hebben om meer te produceren met een lagere input van fossiele energie. Dit komt neer op een efficiëntere benutting van het zonlicht, door meer gebruik te maken van de mogelijkheden van een plant om in te spelen op wisselende omstandigheden. Het handhaven van strakke setpoints waarmee schommelingen in straling, temperatuur en vocht worden gecorrigeerd, kost immers energie. (Overigens zijn schommelingen in temperatuur en vocht vooral ook een gevolg van de schommelingen in straling.) Door meer 'met het buitenklimaat mee te telen' kan hierop bespaard worden. Door het vergroten van variatie wordt het wel complexer om bepaalde teeltdoelen te behalen. Dynamische optimalisatie, waarbij rekening gehouden wordt met de huidige stand van het gewas, korte en langere termijn weersverwachting en kennis over de reacties van het gewas, zal hiervoor een oplossing kunnen bieden.

Er staan nog kennisvragen open op de volgende onderwerpen:

- gedrag van huidmondjes in relatie tot vochthuishouding, energiebalans en groei en ontwikkeling;
- assimilaten verdeling in de plant en de wijze waarop dat via temperatuur (gradiënt) beïnvloed kan worden;
- integratie- c.q. compensatiemogelijkheden van een plant van licht en temperatuur;
- kritische processen die de absolute onder- en bovengrenzen van temperatuur, vocht, licht en CO<sub>2</sub> bepalen.

## Teeltconcept tomaat: techniek

Vanuit de inventarisatie van technieken, methoden voor operationele besturing van een semigesloten kas en relevante teeltkeuzes, is een ontwerp gemaakt voor een teeltconcept voor tomaat. Dit teeltconcept is vergeleken met een referentieteel: een teelt van tomaat zoals die nu door vooraanstaande bedrijven (in traditionele kassen) wordt behaald. Als doel voor het teeltconcept is gesteld, dat er een halvering van het gebruik van fossiele energie moet worden gehaald, bij minimaal gelijkblijvende productie. Voor tomaat is dit vertaald in een productie van 60 kg per m<sup>2</sup> bij een (fossiel) energiegebruik van 20 m<sup>3</sup> aardgas equivalenten per m<sup>2</sup>.

Als uitgangspunt gelden de mogelijkheden van geconditioneerd telen, waarbij geldt dat de energiebalans van de hele teelt neutraal moet zijn. Er wordt dus niet meer warmte geoogst en opgeslagen dan in koudere periodes nodig is voor de eigen teelt.

De energievoorziening is gebaseerd op een optimale samenwerking tussen WKK, warmtepomp, hoog temperatuur etmaalbuffer, laag temperatuur etmaalbuffer en het warmte/koude opslagsysteem voor seizoensbuffering. De elektrisch aangedreven warmtepomp heeft een asvermogen van 200 kWe. De dagbuffer heeft een capaciteit van 800 m<sup>3</sup>/ha en het pompdebiet naar de aquifer bedraagt 70 m<sup>3</sup> per ha per uur.

De WKK heeft een relatief beperkt vermogen van 130 kWe per ha, omdat ook hier naar een neutrale situatie wordt gestreefd: er wordt op jaarbasis net zoveel elektriciteit gemaakt (en verkocht aan het net als het economisch interessant dus duur is) als dat er voor de teelt nodig is (inkoop als elektra goedkoop is). Bijkomend voordeel is dat de WKK rookgas CO<sub>2</sub> levert: ongeveer 65 kg/ha/uur. Dit is wel flink lager dan dat momenteel in de praktijk wordt gegeven. Uit additionele bronnen (bijvoorbeeld OCAP) kan CO<sub>2</sub> worden bijgeleverd, bij een prijs van ongeveer 15 cent per kg zal dit rond de 150 kg per ha per uur liggen.

De kas heeft buisrail verwarming en een groeibuis. Daarnaast zijn er luchtbehandelingkasten met een warmtewisselaar voor verwarming en koeling. Ze kunnen binnen- en buitenlucht aanzuigen en na verwarming of koeling via slurven in de kas verdelen. Met buitenlucht kan op deze wijze de RV worden gecontroleerd. Met het systeem kan luchtbeweging tussen het gewas worden gerealiseerd, met een debiet van 10 m<sup>3</sup> per m<sup>2</sup> per uur. Koeling vindt plaats via warmtewisselaars onder en bovenin de kas, het vermogen is 150 W/m<sup>2</sup> (100 bovenin de kas, 50 onderin). Er is luchtbevochtiging geïnstalleerd met een capaciteit van 150 gram per m<sup>2</sup> per uur. Deze zorgt ervoor dat de warmte die per m<sup>3</sup> lucht kan worden afgevoerd, gemaximaliseerd kan worden. Bij koeling via de ramen kan daardoor de ventilatie beperkt worden en de CO<sub>2</sub> concentratie hoog. Bij actieve koeling zorgt de luchtbevochtiging voor een lager benodigd ventilatorvermogen. (Overigens heeft luchtbevochtiging ook een teeltkundig voordeel bij het voorkomen van droogtestress.)

Zowel het temperatuurverloop over de dag als de etmaaltemperatuur wordt bepaald door de instraling. Dit wordt gerealiseerd door een (1 graad) lagere basisstooklijn maar een (2,5 graden) hogere lichtafhankelijkheid van de stooklijn. Om zoveel mogelijk zonne-energie te benutten en om zoveel mogelijk CO<sub>2</sub> in de kas te houden, wordt minder fel op temperatuur gelucht. Afkoeling van de kas, nodig voor een goede assimilatenbalans, gebeurt in principe met natuurlijke middelen (ventilatie, later dichttrekken schermen) en niet met mechanische koeling.

De kas is voorzien van twee schermdoeken. De lichtintensiteit waarbij het scherm wordt open getrokken, is afhankelijk gemaakt van de buitentemperatuur: bij lage buitentemperaturen zal de extra productie van open schermen niet opwegen tegen het extra gasverbruik en blijven de schermen dicht. In een gemiddeld (SEL) jaar wordt er ca 400 uur meer geschermd.



## Teeltconcept tomaat: teelt

Er wordt geteeld op hangende goten in een V-systeem met een rijafstand van 1,60 m. Er wordt later geplant dan in de referentie: in week 1. Wel worden er grotere planten geplant. De teeltwisseling twee weken duurt langer, zodat in de lichtarme en koude decembermaand nagenoeg geen energie wordt gebruikt. Tijdens de start van de teelt wordt via het ondernet en warmtewisselaar verwarmd, als er vruchten komen komt de groeibuis erbij. Er wordt in de winter frequent geschermd.

In het voorjaar wordt een ruime afstand aangehouden tussen stooktemperatuur en ventilatietemperatuur: op zonnige dagen mag het warm worden en op sombere dagen blijft het relatief koel. Als het gewas in productie is, wordt een gemiddelde etmaaltemperatuur van 19°C nagestreefd. Door de sterke koppeling van temperatuur aan de lichtsom krijgt de regeling het karakter van meerdaagse temperatuurintegratie, maar dus wel gekoppeld aan de straling. Als het toch te warm wordt, kan met weinig buitenlucht worden gekoeld, zodat de CO<sub>2</sub> concentratie hoog blijft. Met de luchtbehandeling en schermen kan de vochtigheid worden beheerst. Via gewashandelingen als het aanhouden van extra stengels, wordt een gewas gerealiseerd met een goede balans tussen assimilaten aanmaak en verdeling over de sinks.

In de zomer wordt een koelstrategie aangehouden met luchtbevochtiging, ventileren en toepassing van de koelinstallatie. De koeling gaat aan als de ventilatiebehoefte een bepaalde grens overschrijdt, namelijk die waarbij de CO<sub>2</sub> concentratie te laag zou worden. De warmte die met de koelinstallatie wordt verzameld, komt in eerste instantie in de etmaalbuffer. Een deel gaat naar de aquifer voor de winter. Koeling wordt in principe niet ingezet om een snelle temperatuurverlaging (in de voornacht) te krijgen, tenzij uit onderzoek zou blijken dat dit teeltkundig grotere voordelen zou opleveren dan het nadeel van de benodigde energie-inzet.

In de herfst wordt door gecontroleerde invoer van buitenlucht de RV in de kas beheerst. Door de luchtverdeling tussen het gewas zou de RV op kasniveau hoger op kunnen lopen dan nu gebruikelijk, omdat er nauwelijks lokale vochtophoping plaats vindt (gevaarlijk in verband met botrytis).

Gedurende de hele teelt wordt pas op vocht ingegrepen als de RV boven de 85% komt. Wel wordt er feller ingegrepen, zodat er zelfs minder extreme situaties voorkomen dan in de referentieteelt.

Door het toepassen van de genoemde maatregelen kan de warmtevraag van de teelt naar 27 m<sup>3</sup> aardgas equivalenten per m<sup>2</sup> worden gebracht. De totale energievraag wordt door toepassing van de warmtepomp en seizoensbuffer voor een deel door zonne-energie worden ingevuld. Voor het totale concept is dan nog 16 m<sup>3</sup> a.e. per m<sup>2</sup> aan fossiele energie nodig.

De elementen uit het teeltconcept hoeven niet integraal toegepast te worden, maar kunnen stapsgewijs ingevoerd worden:

- Later planten: kan direct in een traditioneel teeltsysteem. Besparing ca 2,5 m<sup>3</sup> per m<sup>2</sup> per jaar.
- Aanpassen schermregeling (enkel scherm): besparing ca 1 m<sup>3</sup> per m<sup>2</sup> per jaar.
- Als een 2<sup>e</sup> scherm wordt geïnstalleerd, loopt de besparing op met 3,7 m<sup>3</sup> naar 4,7 m<sup>3</sup>.
- Andere temperatuurregeling: besparing ca 3,2 m<sup>3</sup> per m<sup>2</sup> per jaar.
- Andere vochtregeling: hogere RV toestaan: ca 2,5 m<sup>3</sup> per m<sup>2</sup> per jaar.
- Bevochtiging installeren: levert niet zozeer energiebesparing op (alleen als er mechanische koeling mee wordt voorkomen, maar dat zit niet in de referentieteelt), maar wel productieverhoging door hogere CO<sub>2</sub> concentraties in de kas.
- Luchtcirculatiesysteem installeren: levert ten opzichte van de referentie geen energiebesparing op, in een systeem met warmtepomp kan het wel de COP verbeteren. Ook zal lokale ophoping van vocht worden voorkomen, waardoor met minder risico hogere RV's kunnen worden aangehouden.
- De laatste stap die de hoogste investering vraagt, is de installatie van warmtewisselaars, koelsystemen, WKK, Warmtepomp en aquifer. Hiermee kan de inzet van fossiele energie voor een aanzienlijk deel worden vervangen door zonne-energie. In totaal is er dan nog maar 16 m<sup>3</sup> a.e. per m<sup>2</sup> per jaar nodig.

In het concept lijkt een productie van 60 kg/m<sup>2</sup> haalbaar. Er treedt wel lichtverlies op als gevolg van een extra scherm en bovenkoelers van circa 3,7%. Dit zou een productieverlies van 2,5% betekenen. Ook is er sprake van een langere teeltwisseling, waardoor de teelt ongeveer twee weken korter duurt. Dit verlies wordt gecompenseerd door gemiddeld hogere CO<sub>2</sub> concentraties van de kas door minder ventilatie. Daarnaast zorgt de beschreven RV regeling voor een kleiner risico op botrytis, dit kan naar schatting 1 kg per m<sup>2</sup> schelen. Daarbij helpt ook de luchtbeweging tussen het gewas, die lokale ophoping van vocht tegengaat. Het kwantificeren van deze effecten is lastig, de positieve en de negatieve effecten zullen elkaar naar verwachting zo ongeveer compenseren.

Daarbij zijn er nog een aantal opties die het concept mogelijk verder kunnen verbeteren, maar waarvan de gevolgen nog niet goed bekend zijn dan wel kwantificeerbaar zijn. Dit zijn onder meer aanpassingen aan de gewasstructuur (andere afstanden tussen rijen en in de rij, beweegbare gewasdraden), optimalisatie van het wortelmilieu in relatie tot het bovengrondse klimaat, toepassen van diffuus glas en NIR schermen, het toepassen van negatieve DIF, dynamische optimalisatie, en verhogen van de isolatie van de kas zonder negatieve gevolgen voor de lichttransmissie.

## 2 Inleiding

### 2.1 Aanleiding

Eind 2007 is in opdracht van PT en LNV het 'Versnellingsprogramma implementatie semigesloten kas' gestart (Poot en Bakker, 2007). Bij de start van het programma was behoefte aan een toekomstbeeld voor semigesloten telen, dat richting geeft aan de programmering van het Versnellingsprogramma. Als tijdshorizon is de zeer nabije toekomst gekozen: het gaat om bestaande technieken die bij wijze van spreken nog dit jaar besteld kunnen worden, waardoor ze het volgend teeltseizoen kunnen worden toegepast (voor vruchtgroenten: seizoen 2008-2009). De achtergrond voor deze keuze voor de zeer nabije toekomst is mede ingegeven door de ongunstige economische situatie in de glastuinbouw (in 2008), die in belangrijke mate toe te schrijven is aan de zeer sterk gestegen prijzen voor fossiele energie de afgelopen maanden. De urgentie om de energiekosten te drukken is daarom zeer groot.

### 2.2 Probleemstelling

Sinds het voorbereidend onderzoek aan de Gesloten Kas, dat in 2004 bij Themato in de praktijk werd gebracht, is er veel kennis over telen in (semi) gesloten kassen opgedaan. De ervaringen met de gesloten kassen heeft geleid tot aanpassingen van de technische en teelttechnische systemen, zodat er inmiddels sprake is kassen die semigesloten worden genoemd. Met deze semigesloten kassen worden de verwachtingen over productieverbetering enerzijds en besparing van fossiele energie c.q. reductie CO<sub>2</sub> emissie anderzijds, nog niet waargemaakt. Dit is wel nodig, willen semigesloten kassen breed geïmplementeerd worden in de praktijk.

Uit de gesprekken met ondernemers en andere deskundigen met ervaring met semigesloten telen, onder meer in het platform SynErgie, is opgetekend dat er 'opnieuw geleerd moet worden om te telen'. Doordat met de technieken uit de semigesloten kas klimaatomstandigheden gecreëerd worden, die voorheen niet gecreëerd werden, treden niet verwachte gewasreacties op, die vanuit het oogpunt van productie en energie suboptimaal lijken te zijn.

Welke klimaatomstandigheden, combinaties van temperatuur, vocht, CO<sub>2</sub> en licht integraal in de tijd, nu precies tot optimale gewasreacties leiden, is dus onbekend. Het Versnellingsprogramma biedt de mogelijkheid om hier kennis voor te ontwikkelen. Een zekere gerichtheid is hierbij geboden; het is evident dat de schaarse middelen efficiënt ingezet moeten worden. Deze gerichtheid kan verkregen worden door goed naar basiskennis uit de plant- en gewasfysiologie te kijken, en dit te spiegelen aan de onderzoeks- en praktijkervaringen.

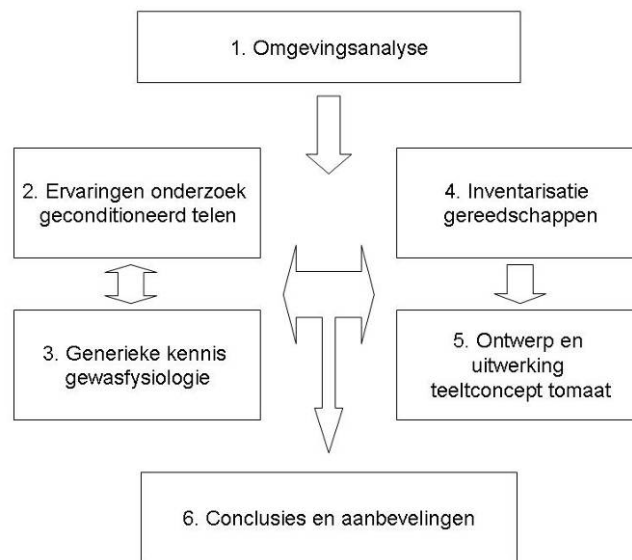
### 2.3 Doelstelling

De projectdoelstelling is het ontwikkelen van een teeltconcept voor energiezuinig telen in een semigesloten kas-systeem. Uit analyse van het teeltconcept zal blijken waar energiebesparing behaald kan worden. Uit een confrontatie met de beschikbare kennis over gewasfysiologie in geconditioneerde omstandigheden zal duidelijk worden, welke kennislacunes er zijn betreffende gewasreacties en consequenties voor groei, ontwikkeling en productie. Het teeltconcept wordt opgesteld voor één bepaald gewas, met relatief grote potentie voor energiebesparing. Het wordt gebaseerd op beschikbare kennis en technologie als de eerste haalbaar geachte stap bij de verdere doorontwikkeling van de semigesloten teeltsystemen. Om het concept scherp te krijgen, is de ambitie geformuleerd om een teelt te ontwerpen, die een vergelijkbare productie oplevert als in de praktijk, met een fossiele energie input die de helft minder is dan in de praktijk.



## 3 Aanpak

In het project zijn een aantal stappen doorlopen: er is een kader geschetst waarin de glastuinbouw zich qua energie-ontwikkelingen bevindt, er zijn workshops gehouden waarin het gewas en de plant centraal stond, er is een teelt-concept voor tomaat opgesteld en tenslotte zijn conclusies en aanbevelingen geformuleerd. Schematisch:



*Figuur 1. Schematische weergave gevolgde aanpak.*

### 3.1 Omgevingsanalyse

Door deskstudy en input van experts is een analyse van de omgeving gemaakt, waarin de ontwikkelingen qua energie in een kader zijn geplaatst. Het ging hier voornamelijk om technisch energetische ontwikkelingen in het economisch perspectief van de glastuinbouwsector. Hiervoor zijn een aantal bronnen gebruikt, waaronder de tekst van het Versnellingsprogramma implementatie semigesloten kassen (Poot en Bakker, 2007), Energiemonitor Glastuinbouw (Van der Velden en Smit, 2008) en Kwantitatieve Informatie voor de Glastuinbouw ('KWIN': Vermeulen, 2008). Ook hebben experts van Wageningen UR Glastuinbouw informatie aangeleverd.

Het zogenaamde 'landschap' dat op deze wijze is getekend, is tevens gebruikt voor het aanbrengen van focus in het later opgestelde teeltconcept.

### 3.2 Onderzoekservaringen geconditioneerd telen

Er is een workshop gehouden met onderzoekers die projectleider waren dan wel nauw betrokken bij onderzoeksprojecten aan (semi) gesloten kassen sinds 2002. Het doel van deze workshop was het streven naar een gemeenschappelijk standpunt over het functioneren van het gewas in semigesloten kassen. Het beoogde resultaat was een opsomming van belangrijke ervaringen en leerpunten, openstaande vragen en discussiepunten.

Het draaiboek voor deze bijeenkomst bestond uit drie onderdelen:

- a. Terugblik op onderzoek (inleidingen door projectleiders)
- b. Confrontatie met bestaande kennis (reflectie door domeinexperts)
- c. Kritische beschouwing van feiten & opinies (discussie)

De terugblik op uitgevoerd onderzoek was sectoraal ingestoken (groenten, bloemen en planten), en bestond uit terugblik op starthypothesen, leerervaringen en verbeterpunten. Experts reflecteerden hierop vanuit hun eigen expertisegebied (koeling, fotosynthese, vocht bovengronds, root zone, microklimaat en integratie op plant- en gewasniveau).

Voor een overzicht van de deelnemers en het programma, zie Bijlage II.

### 3.3 Generieke kennis gewasfysiologie

In een vervolgworkshop zijn de resultaten van de vorige workshop voorgelegd aan een groep plantenfysiologen. Deze zijn werkzaam bij diverse universiteiten, instellingen en bedrijven in zowel Nederland als daarbuiten (Denemarken, België), en doen van fundamenteel tot toepassingsgericht onderzoek. Voor de consistentie waren ook drie deelnemers aan de 1<sup>e</sup> workshop aanwezig.

Na inleidingen over de energietransitie in de glastuinbouw en een terugblik op het onderzoek aan semigesloten teelt van de afgelopen jaren, is in een inleiding ingegaan op de potenties van een glastuinbouwgewas (i.c. tomaat) en de randvoorwaarden om deze maximaal te kunnen gebruiken (een soort kwalitatieve 'yield-gap' analyse). De resultaten van de eerdere workshop zijn gepresenteerd en geclusterd, waarna subgroepen deze aan de hand van stellingen hebben bediscussieerd.

Voor een overzicht van de deelnemers en het programma, zie Bijlage II.

### 3.4 Inventarisatie gereedschappen

Door consultatie van experts is de 'state-of-the-art' van de beschikbare methoden en technieken voor het telen in semigesloten kassen geïnventariseerd. Het gaat hierbij zowel om commercieel verkrijgbare zaken als om gereedschappen die in een ver stadium van ontwikkeling zijn (pilots van praktijktoepassing). Er is hierbij onderscheid gemaakt tussen ('harde') techniek, middelen voor de operationele besturing van de geconditioneerde kas en relevante keuzes in de teelt.

### 3.5 Ontwerp en uitwerking teeltconcept

Voor het opstellen van het teeltconcept zijn een aantal keuzes gemaakt en uitgangspunten geformuleerd.

De keuze van de teelt is aan de hand van een aantal criteria gemaakt:

- Economisch belangrijke teelt (met een groot areaal).
- Min of meer representatief voor een grotere groep teelten.
- Relatief energie intensieve teelt.
- Verhouding in de warmte – kracht vraag van de teelt ligt sterk op warmte, in verband met de mogelijkheden om fossiele energie door duurzame zonne-energie te vervangen.

Als eerste is in samenspraak met de gewasspecialisten van het gekozen gewas een referentieteelt opgesteld: de teelt zoals nu in praktijk volgens 'best practices' wordt uitgevoerd. De beschrijving van de referentieteelt omvat onder meer de toegepaste installaties en technieken, (kasklimaat) regelingen en teeltkeuzes.

Er is gekozen om een energiezuinig teeltconcept te beschrijven op basis van methoden en technieken die al praktijk zijn of in een ver gevorderd stadium van ontwikkeling zitten (pilot fase). Het moet voor telers in principe mogelijk zijn om het komend teeltseizoen de beschreven methoden en technieken toe te passen. De inzet van de methoden en technieken moet bij voorkeur modulair zijn: het is dan niet persé noodzakelijk om alle elementen geïntegreerd toe te passen, maar kan stapsgewijs worden geïntroduceerd. Het teeltconcept bevat het gehele kalenderjaar en besteed aandacht aan dag en nacht.

Als ambitie is gesteld dat het teeltconcept een vergelijkbare productie moet opleveren als nu volgens 'good practices' wordt behaald. De netto input van fossiele energie (dus gecorrigeerd voor aan- en verkoop van elektriciteit en eventuele verkoop van warmte) moet, uitgerukt in aardgas equivalenten, de helft worden van wat momenteel volgens 'good practice' wordt gebruikt. Productiecijfers en energie-input worden uitgedrukt per m<sup>2</sup>.

Belangrijke consequentie van deze keuze om op fossiele energie input en productie (output) te sturen, is dat er niet persé op economisch rendement wordt gestuurd. Momenteel is het voor bedrijven met een WKK immers veelal gunstiger om meer fossiele energie in de vorm van aardgas te gebruiken dan strikt noodzakelijk voor de teelt (op jaarbasis), vanwege de hoge prijs die voor de elektriciteit ontvangen wordt ten opzichte van de inkoopprijs van aardgas ('sparkspread'). Hierdoor is er veel 'restwarmte' beschikbaar, meer dan voor de teelt zelf eigenlijk nodig zou zijn. In het teeltconcept is een WKK niet uitgesloten, maar deze wordt dan zo gedimensioneerd dat er op jaarbasis per saldo elektriciteitsneutraal geopereerd wordt: er wordt net zoveel elektriciteit ingekocht als verkocht.

Met behulp van het simulatiemodel KASPRO (De Zwart, 1989) is de energiebehoefte van de referentieteelt berekend. KASPRO is het meest uitgebreide en best gevalideerde kasklimaat/energie model dat ter beschikking is. Vervolgens zijn de effecten van de geïnventariseerde gereedschappen op het energieverbruik doorgerekend. Daar waar effecten van gecombineerde maatregelen op het energiegebruik zijn gevonden, is met factoranalyse bepaald wat welke factoren bijdragen.





## 4 Omgevingsanalyse

In 2002 hebben sector (Productschap Tuinbouw) en overheid (ministerie van LNV) de beleidsvisie energietransitie vastgesteld met de ambitie dat nieuw te bouwen kassen in 2020 energieneutraal zijn en nagenoeg onafhankelijk van fossiele energie. Daarna is een transitieprogramma opgesteld om deze ambitie te kunnen verwezenlijken. In het transitieprogramma worden een aantal transitiepaden benoemd, te weten zonne-energie, aardwarmte, biobrandstoffen, energiearme rassen en energiebesparende teeltstrategieën, licht (benutting natuurlijk licht en ontwikkeling energie efficiëntere lampen), duurzame elektriciteit en duurzame CO<sub>2</sub>. Op basis van verkenningen zijn streefbeelden voor 2010 en 2020 opgesteld. Voor bijvoorbeeld zonne-energie is het streefbeeld geformuleerd dat er in 2010 700 ha (semi) gesloten kas moet zijn en in 2020 2500 ha, voor aardwarmte zijn deze arealen op resp. 50 en 500 gesteld, voor biobrandstoffen 25 ha en 300 ha.

Semigesloten telen is een uitdagende mogelijkheid om energietransitie en rendabel telen met elkaar te verenigen. Van semigesloten kassen wordt verwacht dat zij een belangrijke bijdrage aan de vermindering van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen en vermindering van CO<sub>2</sub>-emissie door energiebesparing kunnen leveren. De ontwikkeling van deze systemen moet echter gezien worden tegen de doorontwikkeling van de meer traditionele teeltsystemen en in het kader van de nationale en internationale ontwikkelingen op de energiemarkt. Zo hebben de ervaringen met de gesloten kassen al geleid tot aanpassingen van de meer traditionele teeltsystemen.

In de jaren die achter ons liggen zijn een aantal particuliere en onderzoeksprojecten uitgevoerd waarin getracht is het fossiele energieverbruik te verlagen en de productiewaarde te vergroten. Hoewel de meeste projecten rond semigesloten telen resultaten in de beoogde richting laten zien, is de mate waarin op energiekosten wordt bespaard en de productiewaarde oploopt bij veel gewasgroepen nog te klein om als breed gedragen ontwikkelingsrichting te kunnen worden aangemerkt. Alleen bij enkele echt gekoelde teelten (zoals phalaenopsis en fresia) lijkt de expliciete benutting van zomerse warmteoverschotten voor de verwarming draagvlak te krijgen.

Ondanks het feit dat de resultaten in de groenteteelt en de teelt van tropische potplanten tot nu toe niet tot een overtuigend antwoord hebben geleid, is de verwachting dat bij een betere afstemming van de toe te passen techniek en de besturing daarvan de perspectieven zodanig verbeteren dat er wel vruchten voor de sector van geplukt kunnen worden. Immers, een uitgekiend design zal het rendement van de investering kunnen verbeteren, maar vooral de doelgerichte besturing van het klimaat zal ertoe kunnen leiden dat de productie(waarde) per ingezette hoeveelheid primaire energie toeneemt en het verbruik per m<sup>2</sup> afneemt.

## 4.1 Potentiële en reële besparingen (in %) per transitiepad

In het programma Kas als Energiebron zijn een aantal transitiepaden gedefinieerd, die tot energiebesparing in de glastuinbouwsector leiden. In het kader van het Versnellingsprogramma implementatie semigesloten kassen (Poot en Bakker, 2007) zijn de potenties van de verschillende transitiepaden op een rij gezet, zie Tabel 1.

Tabel 1. Potentiële bijdrage van transitiepaden aan energietransitie glastuinbouw.

Transitiepad	Optie	Max. haalbare besparing (%)	Besparing op basis van verwachting (%)	Opmerking
Zonne-energie	(Semi)gesloten kassen	15	10	Resultaat uit Synergie (Ruijs, 2007): 25% geconditioneerd op bedrijfsniveau geeft ca 10% energiebesparing op bedrijfsniveau, d.w.z. 2500 ha op 10000 resulteert in 10% besparing op sectorniveau.
Aardwarmte	Aardwarmte	5	2,5	Bakker (2007): Maximaal haalbaar op basis individuele bedrijven: ca 1000 ha. Meer realistisch is de helft of minder.
Bio brandstoffen	Toepassing biobrandstoffen in verwarmingsketels Bio-WKK	3 5	3	Eerste generatie biobrandstoffen zijn maatschappelijk zeer omstreven, vanwege de concurrentie met voedselproductie. Zo is voor 5 ha glastuinbouw 400 ha energiemaïs nodig.
Rassen en teeltstrategieën	Diverse opties, teelt en rassen	10		Zoeken naar rassen met hogere tolerantie voor hoge RV, grote temperatuur fluctuaties en hogere temperaturen, waardoor o.a. TI meer benut kan worden. Teeltstrategie mede afhankelijk van techniek.
Licht	Clustering	0,45	0,45	Stel clustering bespaart 15%, 3% areaal betekent 0,45% totale besparing.
	Nieuw kasdek, kasisolatie	10 – 15	10 – 15	Referentie: enkel dek + scherm. Door dubbel dek + scherm of drielaags met lage emissie nog 25 – 30% besparing op 50% van areaal. Verwachting experts: het duurt nog 5 jaar voordat efficiency gelijk is aan huidige lampen.
Duurzamere elektriciteit	LED's WKK	5	5	Besparing alleen als er gestuurd wordt op warmtevraag. Staat haaks op warmtebalans (semi) gesloten kassen + feit dat vermeden CO <sub>2</sub> emissie in centrale niet meetelt voor sector.
Duurzamere CO <sub>2</sub>	Betere rookgasreiniging Brandstofcellen Inkoop rest-CO <sub>2</sub> OCAP CO <sub>2</sub> in combi met restwarmte			Voorwaarde voor implementatie aardwarmte, onduidelijk wat besparing is door vermeden gasverbruik voor eigen CO <sub>2</sub> opwekking.

## 4.2 Warmtepomp met Aquifer

Het principe waarop de energiewinst van (semi) gesloten kassen berust, is dat 's zomers zonnewarmte wordt geoogst en opgeslagen in een seizoensbuffer (aquifer). Deze warmte wordt 's winters gebruikt voor het verwarmen van de kas. Om de temperatuur op een bruikbaar niveau te krijgen is een door kracht (elektriciteit) aangedreven warmtepomp nodig. Hierbij wordt koude gemaakt die een welkome koeling in de zomer kan leveren. Een belangrijk nadeel van het verwarmen met een warmtepomp is dat er dit proces geen CO<sub>2</sub> vrijkomt. Dit probleem kan gedeeltelijk worden ondervangen door ook bij gebruik van een Warmtepomp een WKK unit in het concept te betrekken. Indien hiervoor een machine met een vermogen ergens tussen de 100 en 200 kWe wordt gebruikt kan de kas op jaarbasis elektriciteitsneutraal worden gemaakt (dus in de winter en/of 's nachts elektriciteit inkopen en overdag, vooral in de zomer elektriciteit leveren, waarbij de vrijkomende CO<sub>2</sub> wordt gebruikt voor de CO<sub>2</sub> dosering. Er wordt in dit systeem goedkope stroom ingekocht en dure stroom verkocht, maar de totale hoeveelheid verkochte stroom is veel kleiner dan bij de hedendaagse WKK toepassingen.

De combinatie van de geringere verdiensten uit elektriciteitsverkoop, de hoge investeringskosten voor luchtbehandelingsystemen en aquifer en de tot nog toe tegenvallende meerproductie die met de koeling kan worden gehaald, maakt dat de investeringen in semigesloten kassen minder interessant lijken dan in het main-stream WKK concept. Verderop worden echter ook knelpunten rond dit WKK concept genoemd zodat het van strategisch belang is om ook andere concepten dan dit WKK concept te blijven ontwikkelen. Het perspectief van de semigesloten teelt, namelijk dat de verwarming in hoge mate op duurzame energie kan worden gebaseerd, is de belangrijkste verantwoording voor deze zoekrichting.

## 4.3 Aardwarmte

Het eerste en tot nu toe enige aardwarmteproject in de glastuinbouw in Nederland is gerealiseerd door tomatenkwekerij Van den Bosch uit Bleiswijk. De terugverdientijd van het systeem bij Van den Bosch was begroot op acht jaar. Doordat het warmteaanbod groter is dan verwacht, kan er een groter oppervlak worden verwarmd en daalt de terugverdientijd naar vijf jaar. Inmiddels zijn er nog zes glastuinbouwbedrijven met plannen voor aardwarmte<sup>1</sup>. Inmiddels zijn er ook plannen waarin een aardwarmtebron in een 'energiegrid' met zowel glastuinbouw als niet glastuinbouw wordt opgenomen.

Het grote risico van individuele aardwarmteprojecten is het risico op misboren, met de hoge kosten van het boren (bij Van den Bosch heeft het 6 miljoen euro gekost, waarvan 5 miljoen voor het boren). Ook bij aardwarmte is er het nadeel dat er geen CO<sub>2</sub> vrijkomt. Een relatief kleine WKK die mede als CO<sub>2</sub> bron dient, kan in dergelijke situaties snel rendabel zijn.

Afhankelijk van het temperatuurniveau van de warmte die uit de aarde gehaald kan worden, is in principe opwekking van elektriciteit mogelijk. Algemeen kan echter worden gesteld dat dit qua rendement interessant zou kunnen worden als de brontemperatuur rond de 300 °C ligt. Deze temperaturen zijn in Nederland echter op praktisch onbereikbare diepten te vinden.

## 4.4 Warmtekrachtkoppeling<sup>2</sup>

Bij WKK installaties (warmtekracht installaties) van de glastuinbouwbedrijven is de exploitatie in handen van de tuinders. Voor deze installaties wordt aardgas ingekocht en de geproduceerde elektriciteit wordt deels gebruikt op de glastuinbouwbedrijven en deels verkocht op de elektriciteitsmarkt. De vrijkomende warmte wordt grotendeels aangewend op de glastuinbouwbedrijven. Ook de rookgassen uit de WKK installaties worden voor een deel nuttig aangewend als CO<sub>2</sub>-bemesting voor de gewassen. Vanuit het oogpunt van efficiënte energiebenutting is WKK duurzaam mits alle restwarmte wordt benut en daardoor ketelwarmte met de daarvoor benodigde energie-input vervangt. De besparing van gecombineerde opwekking van elektriciteit en warmte ten opzichte van gescheiden opwekking is ca 30% zodat dit ook de reductie is van de CO<sub>2</sub>-emissie.

<sup>1</sup> B. Vegter, 2008. Voor- en nadelen aardwarmte tekenen zich af. Groenten & Fruit 25, p.20-21.

<sup>2</sup> Deze paragraaf is ontleend aan de Energiemonitor Glastuinbouw (Van der Velden en Smit, 2008).

#### 4.4.1 WKK installaties op glastuinbouwbedrijven

Het vermogen aan WKK installaties van de tuinders neemt zeer sterk toe. Per begin 2008 staat er ongeveer 2.200 tot 2.300 MWe. Dit betekent een toename van ongeveer 1.600 MWe in 3 jaar tijd. De toename komt grofweg overeen met drie grote elektriciteitscentrales. Dit betekent dat zowel het aardgasverbruik als de hoeveelheid elektriciteit die wordt verkocht toenemen en de elektriciteitinkoop afneemt.

De WKK installaties van de glastuinbouwbedrijven worden niet alleen gebruikt op bedrijven met belichting en de daarmee samenhangende hoge elektriciteitsvraag. Ook op bedrijven zonder belichting worden steeds meer WKK installaties geïnstalleerd waarvan de geproduceerde elektriciteit grotendeels wordt verkocht.

#### 4.4.2 Elektriciteitsbalans op sectorniveau

Door het intensiveringproces (belichting, mechanisatie, automatisering, enzovoort) en de exploitatie van WKK installaties door van de glastuinbouwbedrijven verandert de elektriciteitsbalans van de glastuinbouw. Werd in 2000 bijna 1,5 miljard kWh ingekocht en een kleine 0,3 miljard kWh verkocht; het jaar 2006 wordt gekenmerkt door circa 2,3 miljard kWh inkoop en 2,5 miljard kWh verkoop. Het netto elektriciteitsgebruik (saldo inkoop minus verkoop) daalt van plus 1,2 naar minus 0,2 miljard kWh. Per saldo is de hoeveelheid elektriciteit die in 2006 is verkocht groter dan de hoeveelheid die is ingekocht. Daarmee is de glastuinbouw in 2006 netto leverancier van elektriciteit geworden.

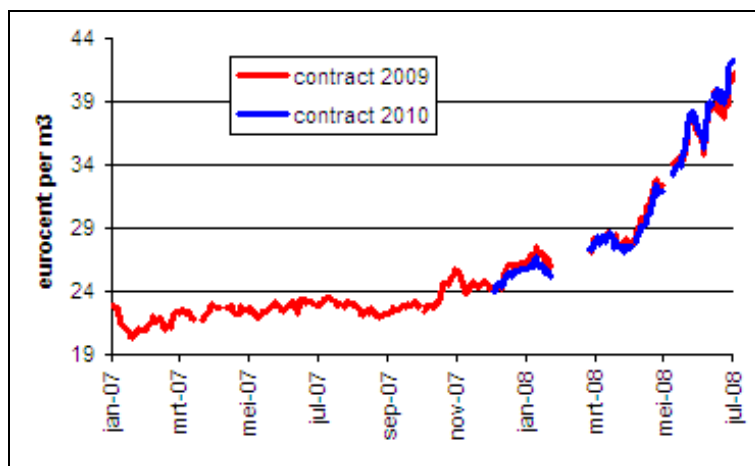
Uit de voorlopige cijfers van 2007 blijkt dat de netto levering ongeveer één miljard kWh bedraagt. Dit komt overeen met gemiddeld ongeveer 10 kWh per m<sup>2</sup> kas en met het elektriciteitsgebruik van ruim 300.000 huishoudens.

Uitgaande van de bruto verkoop van circa 3,5 miljard kWh zijn dit zelfs meer dan één miljoen huishoudens.

Uitgedrukt in het totaal aantal huishoudens in Nederland is dit respectievelijk 4 en 14%.

### 4.5 Prijzen van gas en Electra

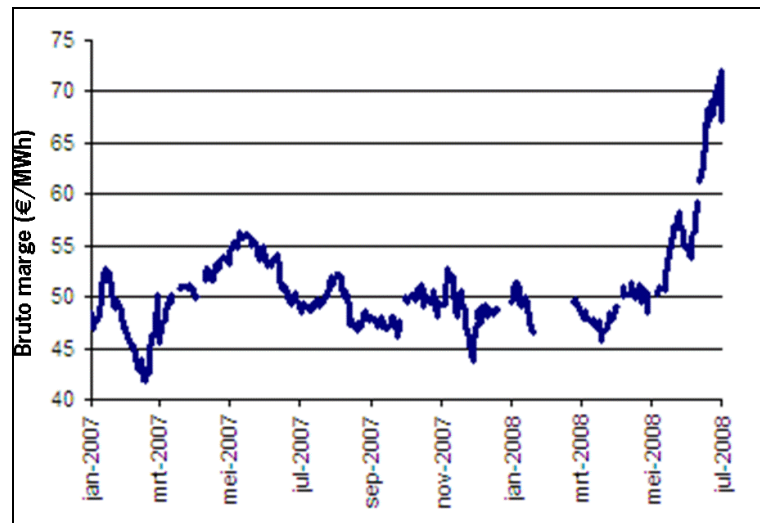
De contractprijs van aardgas is sinds eind 2007 sterk gestegen, zie Figuur 2.



Figuur 2. Contractprijs gas Agro Energy (bron: [www.vakbladvoordebloemisterij.nl](http://www.vakbladvoordebloemisterij.nl)).

Zoals gezegd leveren telers met een WKK elektriciteit terug aan het net. Met de opbrengst van de ook steeds stijgende elektriciteitsprijzen, houden telers hun energiekosten in de hand. Een maat voor hoe interessant dit is, is de sparksread. De sparksread is een vaste bruto marge, uitgedrukt in € per geproduceerde MWh, die tot stand komt als op hetzelfde moment een gascontract en een elektriciteitscontract voor teruglevering wordt afgesloten.

Vooralsnog laat de voor een standaard glastuinbouw situatie berekende sparkspread een grillig verloop zien. Recent is er eerder een positieve dan een negatieve ontwikkeling gaande (zie Figuur 3), waardoor de (decentrale) WKK dus nog aantrekkelijker wordt.



Figuur 3. Ontwikkeling voor glastuinbouw relevante sparkspread (bron: [www.vakbladvoordebloemisterij.nl](http://www.vakbladvoordebloemisterij.nl)).

#### 4.5.1 Knelpunten WKK

Op grond van de 'spark spread' ontwikkeling zou men kunnen concluderen dat WKK een rooskleurige toekomst tegemoet kan zien. Er zijn echter ook knelpunten: methaanslip en  $\text{NO}_x$  blijven belangrijke knelpunten. Ook de kwaliteit van rookgassen blijft een permanent punt van zorg. Tenslotte blijkt dat het overvloedige aanbod van restwarmte uit de WKK geen stimulans vormt voor zuinig omgaan met warmte, en het rendementsvoordeel van het gebruik van die restwarmte voor een deel dus een schijnvoordeel is. Er wordt meer warmte naar de kas gebruikt dan strikt nodig dus niet al die warmtelevering kan als benutting van restwarmte worden bestempeld.

Hierbij kan ook nog worden gesteld dat de mogelijke bouw vijf nieuwe kolencentrales een donkere wolk boven de WKK toepassing vormt. Het aanbod van elektriciteit op het openbare net zal dan veel groter worden, met een druk op de sparkspread als zeer waarschijnlijk gevolg. Een en ander is afhankelijk van kolenprijzen en  $\text{CO}_2$  emissieprijsen.

### 4.6 Rentabiliteitsontwikkeling

Aangezien voor de kostprijs van fossiele energie verwacht mag worden dat deze de komende jaren gestaag zal stijgen (zie voorgaande figuren) wordt het steeds relevanter om de warmtevraag (en krachtvraag) te beperken, zelfs wanneer het aandeel fossiele energie in de warmtevraag kleiner wordt (zoals bij warmtepomp toepassingen).

Tegelijk kan worden geconcludeerd dat bij toenemende kosten voor de energievoorziening, hetzij door de variabele kosten voor de ingekochte energie, hetzij door de investeringen die gemoeid zijn met energiebesparende maatregelen, de inkomsten moeten stijgen om de teelt rendabel te houden. Dit betekent dat elk energiebesparend concept zicht moet bieden op verbetering aan de inkomstenkant.

## 4.7 Gewasgroepen

De inzet van energie voor de teelt van glastuinbouwproducten gebeurt op verschillende wijzen:

- 1) Warmte
  - a) Warmte voor het verwarmen van de kas (ketelwarmte, restwarmte uit eigen WKK, restwarmte van derden)
  - b) Warmte voor ontvochtiging (waaronder minimumbuis)
- 2) CO<sub>2</sub> voor 'bemesting'
- 3) Kracht:
  - a) Belichting, aandrijving machines apparaten pompen verneveling etc.
  - b) Koude voor koeling van (onderdelen van) de kas (mechanische koeling)

Op basis van gegevens uit KWIN (Vermeulen, 2008) is voor een viertal referentieteelten berekend, wat de inzet van energie is. Dit is berekend op basis van de vraag naar warmte en CO<sub>2</sub> van de betreffende teelt. Helaas zijn er geen aparte cijfers bekend over de energie-inzet ten behoeve van het ontvochtigen (volgens inschattingen van experts zou dit op kunnen lopen tot 25% van de totale energie-inzet). De referentie teelten zijn trostomaat, belichte roos ('passion'), spathiphyllum en phalaenopsis. Voor de duidelijkheid: dit zijn geen teelten in (semi) gesloten kassen. Zie KWIN voor de uitgangspunten bij de berekening.

Tabel 2. Energie inzet bij vier referentieteelten.

	gas warmte m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	gas CO <sub>2</sub> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	extra gas elektriciteit opwekking m <sup>3</sup>	gas totaal m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	elektriciteit inkoop belichting kWh/m <sup>2</sup>	elektriciteit inkoop koeling kWh/m <sup>2</sup>	elektriciteit niet belichting kWh/m <sup>2</sup>	teruglevering elektriciteit kWh/m <sup>2</sup>	netto energie input mJ/m <sup>2</sup>
trostomaat	34.6	3.4	26.7	64.7			10	-178	
idem mJ/m <sup>2</sup> glami*	1095	109	843	2048	0	0	86	-641	1493
roos 'passion' belicht	9.3	17.7	74.6	101.5	288		10	0	
idem mJ/m <sup>2</sup> glami*	293	559	2361	3213	2469	0	86	0	5767
potanthurium 17 cm	28.3	3.5	0	31.8			10		
idem mJ/m <sup>2</sup> glami*	895	111	0	1006	0	0	86	0	1092
Phalaenopsis	45.20	1.40		46.6		200	10		
idem mJ/m <sup>2</sup> glami*	1431	44	0	1475	0	1717	86	0	3277

\* Glami: bij het berekenen van de energiegegevens volgens de glami berekeningswijze, wordt er gecorrigeerd voor het opwekkingsrendement van een energiecentrale (42%).

De verhouding tussen warmte, CO<sub>2</sub> en kracht kan uit Tabel 3 worden berekend:

*Tabel 3. Verhouding warmte-CO<sub>2</sub>-kracht bij vier referentieteelten.*

	warmte	CO <sub>2</sub>	kracht
trostomaat	73	7	19
roos 'passion' belicht	5	10	85
potanthurium	82	10	8
phalaenopsis	44	1	55

Energiebesparing door inzet van aquifer met warmtepomp heeft vooral effect in die teelten, waarin een hoog percentage van de energie-inzet wordt gebruikt voor het maken van warmte. Voor die warmte kan immers een deel duurzame zonnewarmte gebruikt worden. De aquifer plus warmtepomp levert geen kracht, bij teelten waarvoor relatief veel kracht wordt ingezet levert deze vorm van warmtelevering dus relatief weinig besparing op. Daar is echter een uitzondering op te maken: voor teelten waar de kracht wordt ingezet om koude te maken, zoals phalaenopsis, is de aquifer plus warmtepomp juist wel interessant.

Zoals uit Tabel 1 blijkt, hebben de onbelichte vruchtgroentegewassen en tropische potplanten een relatief hoge warmtevraag. De phalaenopsis heeft een relatief hoge energievraag ten behoeve van koude. Voor dergelijke teelten levert de inzet van thermische zonne-energie een fors energiebesparingpotentieel op. Bij intensief belichte gewassen, zoals rozen, kan een systeem met warmtepomp slechts een relatief kleine verbetering leveren.





## 5 Plantenfysiologie

In het voorjaar van 2008 zijn twee workshops georganiseerd. In de eerste workshop, gehouden op 20 maart, is met projectleiders van onderzoeksprojecten over (semi) gesloten kassen terug gekeken op het onderzoek in de afgelopen zes jaar. De bevindingen van deze workshop zijn in een 2<sup>e</sup> workshop, gehouden op 2 april, voorgelegd aan een groep gewasfysiologen met minder tot geen betrokkenheid bij het onderzoek naar (semi) gesloten telen.

In de twee workshops zijn een aantal conclusies geformuleerd. De over-all conclusie luidt dat planten in staat zijn om meer te produceren met een lagere input van fossiele energie. Dit komt overeen met een efficiëntere benutting van het zonlicht. Deze potentie is te benutten door meer gebruik te maken van de mogelijkheden van een plant om met wisselende en extremere omstandigheden om te kunnen gaan dan nu in kassen gebruikelijk is. Om de tolerantiegrenzen van de plant te kunnen bepalen, en daarmee nieuwe settings voor de omgevingsfactoren, moet goed naar een aantal kritische plantprocessen en plant-omgeving processen gekeken worden. Verder is een integrale in plaats van een momentane benadering van belang, om gegeven teeltdoel, de huidige gewasstatus en de weersverwachtingen, tot optimale efficiëntie over een heel teeltseizoen heen te komen. De deskundigen zijn het erover eens, dat met veredeling nog belangrijke slagen te maken zijn.

### 5.1 Performance indicatoren

In het algemeen geldt dat er in een semigesloten kas veel meer stuurmogelijkheden zijn dan in een traditionele kas. Er zijn meer mogelijkheden om te sturen op productie, productkwaliteit, timing en duurzaamheid (waaronder energieverbruik). Veel discussies over semigesloten telen gaan over opbrengstverbetering in % per m<sup>2</sup> en energiebesparing in % per m<sup>2</sup>. Doordat referenties niet altijd helder zijn en zelfs verschuiven, zijn deze indicatoren eigenlijk niet geschikt. Vooral bij bloemisterijgewassen zijn kwaliteit en timing minstens zo belangrijk. Relatieve performance indicatoren lijken niet goed geschikt om de prestaties van semigesloten kassen te kunnen beoordelen, onder meer omdat de referentie opschuift. Het verdient aanbeveling om absolute performance indicatoren op te stellen, bijvoorbeeld voor een netto energiecijfer en marge per eenheid product. Daarnaast zijn indicatoren gewenst, waarmee het effect van bepaalde behandelingen snel inzichtelijk gemaakt kunnen worden, zoals een indicator voor groei versgewicht.

### 5.2 Potenties gewas

Tomaat moet in potentie 110 kg / m<sup>2</sup> kunnen produceren, bij omstandigheden met hoog CO<sub>2</sub> (1000 ppm), veel licht (belichten met 188 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> gedurende 5348 uur), hoge temperatuur (28°C), optimale RV (65-85%) en optimale ruimtebenutting (maximale lichtonderschepping in de teeltwisselingfase). In theorie, als elke dag een lichtniveau gehaald wordt zoals op de lichtste dag in Nederland, kan een gewas dat jaarrond volgroeid is (LAI van minstens 3), een productie halen van 183 kg/m<sup>2</sup>.

Een optimale productie zal alleen worden behaald als de groeifactoren in balans zijn. Wat de absolute waarden en de onderlinge verhoudingen over de verschillende plantorganen precies moeten zijn, is veelal niet bekend. Deze zijn ook afhankelijk van de teeltfasen en de (dynamische) teeltdoelen.

### 5.3 Huidmondjes

Voor de fotosynthese mag de beschikbaarheid van CO<sub>2</sub> geen belemmering zijn. Daarvoor dienen de huidmondjes (voldoende) geopend te zijn. Nu is het de vraag of er omstandigheden optreden, waardoor de huidmondjes sluiten. Licht, CO<sub>2</sub>, temperatuur en vocht: allen hebben ze invloed op het openen en sluiten van huidmondjes. De vraag is welke factor wanneer van invloed is, of dit te meten is en of dit te sturen is.

Indien de CO<sub>2</sub> concentratie stijgt van 300 ppm naar 1000 ppm, dan sluiten de huidmondjes deels. Voor de fotosynthese zijn deze wat meer gesloten huidmondjes echter geen probleem: de CO<sub>2</sub> toevoer wordt niet beperkend. Er is een groter effect op de verdamping: die zal moeilijker verlopen. De planttemperatuur kan hierdoor oplopen, wat in theorie tot kritische situaties zou kunnen leiden. Een blad zal echter niet gauw te warm worden: fysische processen richting dampvorming voorkomen dat.

De grenslaagweerstand is niet beperkend op de fotosynthese.

Afhankelijk van de VPD gaan kunnen door vernevelen de stomata's (verder) open gaan. Als er een effect is van vernevelen op de fotosynthese, dan is deze positief. Vernevelen beïnvloedt de netto assimilatie verder via de bladtemperatuur.

De werking van huidmondjes is complex, en nog niet helemaal begrepen. Er is een theorie die zegt dat een verandering in huidmondjesopening vooral een gevolg is omstandigheden, in het bijzonder van een verandering in energiebalans.

Concluderend is in ieder geval gesteld dat klimaatregeling op huidmondjesopening niet zinvol lijkt. Een sterk afwijkend huidmondjesgedrag kan wel een signaal zijn voor stress, vooral watertekort.

Er is eveneens discussie over het nut van hoge CO<sub>2</sub> doseringen in omstandigheden van weinig licht, bijvoorbeeld in de winter. De plant kan grote hoeveelheden CO<sub>2</sub> niet omzetten in assimilaten. Een plant die het CO<sub>2</sub> overschot niet kan verwerken, weert zich door de huidmondjes te sluiten. Daarmee wordt de verdamping beperkt, en dat kan nadelig zijn. Daarbij geeft een hoge dosering van CO<sub>2</sub> uit verbrandingsgassen een hoger risico op schadelijke gassen (ethyleen, NO<sub>x</sub> etc.), zeker in dichte kassen.

## 5.4 Temperatuur en fotosynthese

Het temperatuur optimum voor fotosynthese ligt hoger bij een hogere CO<sub>2</sub> concentratie. In een gesloten kas met meer CO<sub>2</sub> kan een hogere temperatuur aangehouden worden om meer fotosynthese te krijgen.

Temperatuursettings voor fotosynthese behoeven nader onderzoek. Het gaat daarbij niet alleen om respons op momentane dosis, maar ook om integralen. Dosis respons curven zijn niet gekwantificeerd. Geeft bijvoorbeeld 30°C gedurende 5 dagen schade? En 14 dagen? Hoe werken compensaties met lagere temperaturen door, op 24 uur basis (DIF), meerdaags?

Voor tomaat lijkt het kritische proces het 'loskomen van stuifmeel' te zijn. Dit zou bij 30°C minder goed gaan. Het is de vraag of dit alleen een temperatuurkwestie is, of dat bijvoorbeeld de vochtigheid hier ook nog een rol bij speelt. Er worden mogelijkheden gezien om via veredeling de toleranties voor hoge temperaturen te vergroten.

Bij 40°C worden eiwitten beschadigd. Hoewel de duur van blootstelling aan dergelijke temperaturen ongetwijfeld meespeelt, lijkt dit in ieder geval een bovengrens.

## 5.5 Source – sink relaties

Een gesloten kas verhoogt primair de source (meer fotosynthese door hogere CO<sub>2</sub> concentraties). De sink activiteit zal in vergelijkbare mate moeten toenemen. Dit kan op twee manieren: door het aanhouden van meer sinks (meer stengels, minder vruchtdunning) en met behulp van temperatuur.

Ook de distributie van assimilaten naar de diverse plant onderdelen is een belangrijk punt van aandacht. Er moet gestreefd worden naar een optimale verdeling van assimilaten over de kop van de plant, de generatieve delen (bloemen, vruchten) de diverse bladlagen op verschillende hoogtes in een plant en de wortels. Wat optimaal is, is niet precies bekend. Dat hangt ook af van de teeltfase, en de mogelijkheden om gebruikmakend van de regelmechanismen in een plant de groei en ontwikkeling in de loop van de tijd naar het gewenste doel te sturen.

Temperatuur is een belangrijke omgevingsfactor die de relatieve sink sterkte van de verschillende organen beïnvloedt. De grotere conditioneringmogelijkheden van semigesloten kassen bieden de teler mogelijkheden om hierin te

sturen. Ook in gangbare teeltsystemen zijn telers continu bezig om via temperatuurverschillen door de dag heen (DIF) te sturen op een goede balans in assimilatenverdeling tussen vegetatieve en generatieve delen.

Een ander belangrijk punt is dat de aangemaakte assimilaten ook daadwerkelijk afgevoerd moeten worden. Anders ontstaan niet-structurele carbonhydraten (zetmeelophoping in het blad), die een negatieve feedback geven op de fotosynthese. In kassen is er over het algemeen sprake van voldoende sinks, en zal dit verschijnsel dus niet snel optreden.

## 5.6 Luchtverplaatsing

Bewegende lucht heeft op zich geen invloed op de fotosynthese. Het heeft wel invloed op de verdamping. Luchtbeweging kan een negatief effect hebben als het de verdamping stimuleert in een periode met schaars aanbod van water. Dit kan onder meer tot bladafwijking leiden.

Met behulp van luchtverplaatsing is de temperatuurverdeling in een kas te beïnvloeden. Luchtbehandelingsystemen met ventilatoren en gerichte uitblaasrichting en snelheid kunnen een instrument zijn om gewenste (verticale) temperatuurverdeling te bewerkstelligen. Hier liggen nog opgaven om juiste richting en intensiteit te bepalen. Het gewas in de kas maakt fysische modellering complex.

Daarnaast kan door luchtverplaatsing lokale ophopingen van vocht worden tegen gegaan, waardoor het risico op schimmelaantasting zoals botrytis kan worden tegengegaan. Ook kan luchtverplaatsing lokale ophoping van schadelijke gassen tegengaan.

Het is bekend dat bepaalde gassen bij zeer lage concentraties schade kunnen veroorzaken. Bij een aantal gassen ligt deze kritische grens bij waarden die rond of zelfs onder de detectiemogelijkheden liggen. Een ander fenomeen is dat er interactie tussen gassen kan optreden, bijvoorbeeld tussen CO<sub>2</sub> en ethyleen. Een plant 'ziet' schijnbaar geen verschil tussen de moleculen van deze twee gassen. Hoe combinaties precies uitpakken, in welke concentraties ze bijvoorbeeld een versterkte reactie bij de plant kunnen teweegbrengen, is nog onbekend.

## 5.7 Bovengronds – ondergronds

In de eerste experimenten met tomaat in gesloten kassen in Nederland en België bleek dat het blad te kort bleef. Hierdoor is mogelijk ingeleverd op fotosynthese capaciteit en daarmee op productie. De verklaring van deze resultaten is gelegd bij te koude wortels. Op een kritisch moment is er onvoldoende bladstrekking geweest, dat door te lage wortelactiviteit verklaard wordt. In dit proces speelt waarschijnlijk cytokinine een rol. Uit experimenten met onderstammen, die invloed hebben op de cytokinine activiteit, bleek dat het probleem met te kort blad kon worden tegengegaan. Een andere oplossing is het aanhouden van een voldoende hoge worteltemperatuur. Ook hierbij zal een goede verhouding met de temperatuur van de bovengrondse delen gevonden moeten worden.

Mits met het aanbieden rekening gehouden wordt met ander verdampingsgedrag dan in traditionele kassen, hoeft de watervoorziening geen probleem te geven. Ook zijn de huidige voedingsschema's bruikbaar in een breed spectrum van plantengroei en -ontwikkeling. Het is daarom niet te verwachten dat voor de teelt in semigesloten kassen andere voedingsschema's ontwikkeld hoeven te worden.

## 5.8 Blad

De omstandigheden, vooral de lichtkleur, waaronder een blad gevormd wordt, bepalen of een blad uiteindelijk een zonneblad of een schaduwblad zal worden. En dit bepaalt de fotosynthesecapaciteit van het blad. Er kan qua bladeigenschappen gestuurd worden op cuticula, chlorophyl, het aantal stomata en de fysiologie van stomata.

## 5.9 Dynamiek

Er is veel kennis over hoe processen lopen binnen beperkte grenzen. Als een traject smal genoeg is, kunnen er veelal lineaire verbanden worden gelegd. Dat geldt bijvoorbeeld voor graaddagen, SLA etc. Semigesloten kassen geven meer mogelijkheden, daarmee wordt het domein breder en zullen lineaire verbanden minder snel geldig zijn. In een breder domein zal er ook eerder sprake zijn van interacties, die de processen een stuk complexer maken. Er is een verdiepingsslag nodig om de processen in interactie te kunnen begrijpen, beschrijven en beheersen. Daardoor zal het ook mogelijk worden om gewassen meer dynamisch te sturen op doelen als kwaliteit en timing.

'Meebewegen' met het buitenklimaat, bijvoorbeeld hogere temperaturen aanhouden bij veel instraling, heeft een aantal voordelen. Een belangrijk voordeel is dat er minder (fossiele) energie hoeft te worden ingezet, met de bijbehorende lagere kosten. Een ander voordeel is dat de interne regelmechanismen van een plant worden aangesproken (fysiologische sturing). Een plant functioneert bijvoorbeeld beter bij lichtwisselingen doordat de structuur van het blad wordt aangepast en fotosynthese I en II anders gaan functioneren. Overigens zijn te snelle veranderingen meestal niet gewenst.

Een voordeel van het zo constant mogelijk houden van de omstandigheden is dat de teelt waarschijnlijk beter te plannen is. Als er meer variatie in de groeifactoren wordt toegestaan, wordt planning complexer en zal er met behulp van dynamische optimalisatie, waarin huidige en toekomstige omstandigheden met de huidige gewastoeestand gecombineerd moeten worden, naar de teeltdoelen gestuurd moeten worden.

## 5.10 Openstaande vragen

Samenvattend zijn na de twee workshops de volgende openstaande vragen te formuleren:

- Het gedrag van huidmondjes: hoe werkt het, welke factoren hebben invloed, hoe kan er gestuurd worden?
- Wat is de optimale temperatuurgradiënt vanwege de source – sink relaties tussen de kop van de plant, de vegetatieve plantendelen, de generatieve plantendelen, de ondergrondse plantendelen?
- Hoe kan het aanpassingsvermogen van de plant zo goed mogelijk benut worden? Kunnen effecten van omstandigheden over langere perioden geïntegreerd worden, welke compensatiemogelijkheden zijn er?
- Welke kritische plantprocessen bepalen de absolute boven- en ondergrenzen voor temperatuur, vocht, licht (o.a. bij schaduwplanten) en CO<sub>2</sub>? Wat zijn de waarden voor die grenzen?
- Gebruik makend van de interne regelmechanismen van de plant: hoe kom je tot dynamische optimalisering gegeven de teeltdoelen?

De vervolgvraag is welke technieken ingezet kunnen worden om zo goed mogelijk te telen, gebruikmakend van de plantfysiologische kennis.

## 6 Gereedschappen

Verlaging van het primaire energieverbruik kan worden gerealiseerd langs twee wegen die elkaar versterken. In de eerste plaats kan de warmtevraag worden verminderd. In de tweede plaats kan het primaire energieverbruik dat wordt ingezet om de (resterende) warmtevraag te dekken, in meer of mindere mate worden vervangen door duurzame energie.

In dit hoofdstuk zullen de gereedschappen die de tuinder hiertoe ter beschikking staan worden benoemd. Al deze gereedschappen worden al gebruikt. Voor sommige gereedschappen geldt dat een verhoogde toepassingsgraad alleen een kwestie van tijd en aandacht is; men moet er aan wennen en er mee leren omgaan. Voor andere gereedschappen geldt dat de basis veelbelovend is, maar dat er in de uitwerking nog veel lacunes en witte vlekken zitten. De behandelde gereedschappen worden onderverdeeld in de hoofdcategorieën; 'techniek', 'besturing' en 'teelkeuzes'.

### 6.1 Techniek voor de semigesloten teelt

In dit document wordt de term semigesloten kas gereserveerd voor kassen waarin de kaslucht actief wordt gekoeld. Het warmteoverschot vanuit het zonlicht wordt daarbij overgedragen op water dat hierdoor in temperatuur oploopt. Dit warme water zou direct kunnen worden teruggekoeld door middel van koelmachines (wat veelvuldig gebeurt in de phalaenopsis, fresia en alstroemeriатеelt) maar dit kan ook in een later stadium, samenvallend met een periode waarin de kas warmte nodig heeft. Wanneer in dit laatste geval een warmtepomp in de plaats van een koelmachine wordt gebruikt, kan de warmte die eerst als overtollige zonnewarmte uit de kas is weggekoeld, ingezet worden als duurzame warmtebron voor de warmtevraag van de kas. Het is dus alleen in dit laatste geval dat de semigesloten teelt een energiebesparingpotentie biedt. Sterker nog, zonder het gebruik van de warmtepomp zal het primaire energieverbruik van een semigesloten (lees: gekoelde) kas hoger zijn dan dat van een vergelijkbare niet-gekoelde kas.

Essentieel voor de hardware in een energiebesparende semigesloten kas is dus de aanwezigheid van warmtewisselaars, een warmtepomp en een warmtebuffer. Vanwege het enorme watervolume dat nodig is om het warmteoverschot te kunnen bufferen, zal het opslagsysteem ondergronds moeten worden aangebracht in de vorm van de benutting van een aquifer.

Ook dient er een CO<sub>2</sub>-bron aanwezig te zijn. Zeker in een semigesloten kas zal de CO<sub>2</sub> concentratie anders al gauw tot ver beneden de buitenconcentratie dalen (er is immers minder luchtuitwisseling).

Niet essentieel, maar zeker aanbevelenswaardig voor de semigesloten kas is het gebruik van een nevelinstallatie. Vooral bij gewassen die weinig verdampen kan een dergelijke nevelinstallatie de effectiviteit van de koelinstallatie belangrijk verbeteren.

Tenslotte moet in het kader van de hardware in semigesloten kassen nog de scherminstallatie worden genoemd. De verbeterde mogelijkheid van vochtafvoer (zie verderop) baant het pad voor intensiever schermgebruik en er kunnen ook beter isolerende schermtypen worden gebruikt. Indien (één van) deze schermen NIR-reflecterend wordt uitgevoerd kunnen additionele teeltvoordelen worden behaald (minder warmtebelasting en dus minder ongewenste ventilatie). In dit kader kan ook diffuserend glas worden genoemd. Ook hierbij geldt echter dat dit vooral ten goede kan komen aan het teeltresultaat en nauwelijks aan absolute energiebesparing.

Over alle bovengenoemde onderdelen is in de afgelopen jaren veel kennis verworven. Deze kennis en ervaring kunnen worden gebruikt voor de formulering van inzichten voor de toekomst. In onderstaande tekst worden de belangrijkste ervaringen met deze verschillende componenten genoemd er worden aandachtspunten bij de verdere ontwikkeling aangestipt.

## 6.1.1 Warmtewisselaars

De warmtewisselaar is voor een semigesloten kas essentieel omdat deze het warmteoverschot (in de vorm van warme kaslucht) overdraagt op een medium dat deze warmte kan afvoeren (in de tuinbouw praktisch altijd water). De warmtewisselaar tref je in allerlei soorten en maten die als gezamenlijk kenmerk hebben dat de kaslucht er door middel van een ventilator doorheen gezogen kan worden, waarbij de lucht kan worden gekoeld, ontvochtigd of verwarmd. De warmtewisselaars zijn gemonteerd in een luchtbehandelingkast. Als een dergelijke kast één warmtewisselaar heeft, kan zo'n kast of koelen of verwarmen. Vaak vindt bij het koelen tegelijk ontvochtiging plaats, namelijk als de temperatuur van het koude water onder het dauwpunt van de kaslucht ligt.

Andersom geldt ook dat je als je met een luchtbehandelingkast wilt ontvochtigen je de lucht zal afkoelen (er zijn wel andere droogprincipes maar die worden in de Nederlandse tuinbouw niet toegepast). Een luchtbehandelingkast die moet kunnen ontvochtigen zonder te koelen zal twee warmtewisselende blokken moeten hebben. Het eerste blok kan dan koud gemaakt worden om water te laten condenseren en het tweede moet de ongewenste afkoeling van de lucht weer compenseren door het te verwarmen.

Uit de verschillende installaties met luchtbehandelingkasten die de afgelopen jaren zijn geplaatst kunnen een aantal grote lijnen getrokken worden.

1. Uitblaasttemperatuur. Een bepaald koelvermogen kan worden bereikt met weinig lucht van een lage temperatuur of met veel lucht van een minder lage temperatuur. Het rondblazen van veel lucht zal meer elektriciteit en volumineuzere systemen vragen. Toch is het alternatief (weinig en koudere lucht) vanuit het oogpunt van een goede temperatuurverdeling ongunstiger. Vooral bij systemen waarin koude van onderuit wordt gegeven leiden te lage temperaturen tot een onverantwoord lange afrijpingsduur (bij hoogopgaande groentegewassen).
2. Verticale opmenging. Als de koude onderin de kas wordt ingebracht zal er bij hoogopgaande gewassen een sterke temperatuurgradiënt in het gewas optreden (onderin 2 tot 3 graden kouder dan bovenin). Dit lijkt tot problemen in de afrijping te leiden en deze sterke gradiënt is mogelijk ook de achtergrond van de afwijkende (en als minder gunstig beoordeelde) bladvorm.  
Een ander punt van aandacht bij de inbreng van koude onderin de kas is dat er voor moet worden gezorgd dat de lucht van bovenuit de kas wordt aangezogen. Als dit niet gebeurt blijft de koude als een soort 'koude plak' lucht onderin de kas liggen.
3. Horizontale verdeling. In het bijzonder bij de plaatsing van koelers met een vrije uitworp bovenin de kas kan de verdeling van de koude lucht gemakkelijk zeer onregelmatig worden. Met betrekking tot de optimalisatie van de uitblaaspunten en de uitblaasworp is nog geen vergelijkende studie gedaan.
4. Actief ontvochtigen met naverwarmen. Actief ontvochtigen met naverwarmen is energie-intensief. Sommige uitvoeringsvormen van luchtbehandelingkasten bieden de mogelijkheid om actief te ontvochtigen. Hierbij wordt het eerste blok in de luchtbehandelingkast koud gemaakt en het tweede warm gemaakt ter compensatie. Dit leidt onmiskenbaar tot een verminderde warmtebehoefte van de kas (er wordt geen warme en vochtige lucht naar buiten geblazen), maar er worden relatief grote hoeveelheden voelbare warmte via de warmtepomp rondgepompt. Dit leidt tot een aanzienlijk elektriciteitsverbruik (ordegrootte 50 tot 100 kW per ha, resulterend in ongeveer 15 kWh per m<sup>2</sup> per jaar). Gezien het feit dat semigesloten kassen gekenmerkt kunnen worden door een overschot aan warmte en een tekort aan koude zal het lang niet altijd verstandig zijn kou te spenderen aan de ontvochtiging en warmte te besparen. Er zijn geen doortimmerde analyses hierover gepubliceerd, maar intuïtief worden er om bovengenoemde redenen op dit moment geen luchtbehandelingkasten met een dubbele aansluiting meer geïnstalleerd.
5. Groot aantal parallelle apparaten. Anders dan bij luchtramen (2 stuurmotoren per kasafdeling) of bij een standaard verwarmingssysteem (1 pomp en mengklep per kasafdeling) bestaat het koelsysteem in een (semi) gesloten kas uit een groot aantal units die parallel moeten werken. Wanneer een aantal units niet goed functioneert, heeft dit grote gevolgen voor de horizontale temperatuurverdeling in de kas. Omdat er veel minder meetboxen zijn dan luchtbehandelingunits zullen problemen niet zo gauw opvallen. Ter verlichting van deze problemen kan waarschuwingsoftware ontwikkeld worden die met een minimum aan benodigde sensoren alarmeert voor onverwachte responsies (bijvoorbeeld koelwater dat minder opwarmt dan verwacht mag worden; detectie van een afwijkend elektriciteitsverbruik, afwijkende luchtdruk, etc.).

6. Afweging: elektraverbruik per eenheid koelvermogen. Er zijn veel verschillende typen luchtbehandelingsystemen in de markt. Er zijn relatief goedkope apparaten en veel duurdere. Vaak hebben de wat goedkopere apparaten een wat slechtere warmte overdracht of een wat hoger drukverlies, wat gecompenseerd wordt door het water of de lucht wat harder te laten circuleren. Al met al betekent dit dat een te goedkope warmtewisselaar gemakkelijk tot beduidend hogere variabele kosten (elektriciteit) leidt. Om inzicht in deze materie te kunnen verkrijgen kunnen koelsystemen met het computerprogramma 'Synergie' worden ge-benchmarked. Dit programma is te downloaden vanaf de website [www.synergieplaza.nl](http://www.synergieplaza.nl). In Figuur 4 is een screendump van de invoer van (een deel van) dit programma te zien.

Benchmark punten van de gebruikte koeler		
Fabrikanten beschrijven de specificaties van de koeler aan de hand van een aantal benchmark punten		
(1) Koelcapaciteit	30 kW	
geldend voor de onderstaande bedrijfscondities		
(2) Ingaande luchttemperatuur	30.0 °C	(7) Elektrisch verm. ventilator bij 2500 m <sup>3</sup> /uur 200 Watt
(3) Luchtvochtigheid van de ingaande lucht	85.0 %	(8) en bij 5000 m <sup>3</sup> /uur 500 Watt
(4) Ingaande koelwater temperatuur	12.0 °C	
(5) Uitgaande water temperatuur	20.0 °C	(9) Drukval waterzijdig circuit bij 3.2 m <sup>3</sup> /uur 0.4 bar
(6) Luchtdebiet door de koeler	5000 m <sup>3</sup> /uur	
Koelwaterdebiet	3.2 m <sup>3</sup> /uur	
Data t. b. v. de berekening van het elektriciteitsverbruik		

Figuur 4. Invoerscherm benchmark programma koelsystemen 'Synergie'.

In het voorbeeld uit Figuur 4 zijn de (fictieve maar reële) fabrieksspecificaties van een apparaat verondersteld dat 30 kW koelvermogen levert als er lucht van 30 °C met een luchtvochtigheid van 85% met een debiet van 5000 m<sup>3</sup> per uur doorheen wordt geblazen. Het apparaat verwarmt de koelwater temperatuur daarbij van 12 naar 20 °C en gebruikt daarbij 500 Watt elektriciteit voor de ventilator.

De COP van deze koeler (exclusief de elektriciteit voor het produceren van koud water) is 30000 W koelvermogen gedeeld door 500 W voor de ventilator en 80 W voor de overwinning van de 0.4 bar drukverlies en is dus 55.

Er komen in de kas echter regelmatig andere omstandigheden voor. Gebruikt men bijvoorbeeld deze zelfde koeler om niet lucht van 30 °C, maar lucht van 20 °C te koelen dan is het geleverde koelvermogen slechts 12 kW. Omdat ook in dat geval de ventilator en de watercirculatie 580 W blijven zakt de COP van de koeling naar 21. Koelen in een kas van 20 °C kost dus per eenheid koelvermogen (en dus per eenheid onttrokken energie) meer dan 2 keer zoveel elektriciteit als het koelen in een kas van 30 °C.

Het synergieprogramma maakt het mogelijk om niet alleen de effecten van de kasluchttemperatuur te bestuderen, maar ook het effect van luchtvochtigheid, koelwater temperaturen, luchtdebieten en regelstrategie te bestuderen.

Ook kan door de benchmark punten van verschillende fabrikanten in te vullen de prestaties van verschillende koelers, toegesneden op ieders specifieke kasomstandigheden bestudeerd worden. Het programma berekent niet alleen de statische prestatiekenmerken maar rekent ook de jaarrond perspectieven door.

## 6.1.2 Warmtepomp

De warmtepomp voor de tuinbouw kan worden gekarakteriseerd als 'Off the shelf' technologie. Afhankelijk van de situatie wordt gekozen voor een zuiger- of een schroefcompressor en in een enkel geval waar de betreffende tuinder veel WKK warmte over heeft wordt nog wel eens een absorptiewarmtepomp gebruikt.

Er zijn momenteel initiatieven om organische koudemiddelen in de machines te gebruiken in plaats van de synthetische middelen (zoals R-134a). Er wordt verwacht dat zo'n verandering van koudemiddel de overall performance van de koelmachine zal verbeteren en de uitstoot van broeikasgassen verlaagt (R-134a is ozonvriendelijk maar een sterk broeikasgas). Overigens moet hierbij worden opgemerkt dat R-134a pas bijdraagt aan het broeikas effect als het uit de koelmachine weglekt. In principe is de lekkage nul, maar er gebeuren natuurlijk af en toe calamiteiten waarbij enige of substantiële lek optreedt.

### 6.1.3 Buffer/Aquifer

De toepassing van ondergrondse watervoerende lagen voor de opslag van warmte en koude is een steeds gebruikelijker wordende techniek, hoewel de capaciteiten die in de tuinbouw noodzakelijk zijn bovengemiddeld zijn. Het aanboren van een watervoerend pakket is kostbaar en tijdrovend zodat deze hardware component in het (semi) gesloten kasconcept relatief de zwaarste investeringskosten oplevert. Recent zijn de alternatieven voor seizoensbuffering op een rij gezet, en daaruit blijkt de aquifer het beste te scoren (Brand et al, 2008).

### 6.1.4 CO<sub>2</sub>-bron

Bij gebruik van de warmtepomp als belangrijkste warmtebron komt geen CO<sub>2</sub> vrij. Als de warmtepomp wordt aangedreven door een gasmotor komt er een klein beetje CO<sub>2</sub> beschikbaar, maar deze valt niet gelijktijdig met de CO<sub>2</sub> behoefte: de meeste warmtebehoefte is 's nachts en CO<sub>2</sub> is uitsluitend bij -daglicht nodig. Het gebruik van een buffer zoals bij ketel en WKK gebruikelijk biedt bij een warmtepomp nauwelijks soelaas omdat het temperatuurniveau van een warmtepomp laag gehouden moet worden.

Dit leidt tot een concept waarin een (kleine) WKK installatie wordt gebruikt die overdag op vollast draait. De CO<sub>2</sub>-productie daarvan ligt dan rond de 150 kg/ha/uur. Veel tuinders zullen dit te weinig vinden. In die gevallen kan, daar waar bedrijfseconomisch winstgevend, gebruik gemaakt worden van alternatieve CO<sub>2</sub> bronnen (OCAP, zuivere CO<sub>2</sub>).

### 6.1.5 Nevelinstallatie

De verzameling van warmte uit de kaslucht via een warmtewisselend oppervlak wordt voorafgegaan door het transport van die warmte middels de kaslucht. De hoeveelheid energie die met lucht kan worden verplaatst kan zeer sterk worden vergroot wanneer er gebruik wordt gemaakt van de latente warmte van waterdamp. Het laten verdampen van vloeibaar water accumuleert energie in de kaslucht. De condensatie van deze waterdamp op de warmtewisselaar geeft de verdampingswarmte weer terug. Met dit mechanisme kan de energiehoeveelheid die per m<sup>3</sup> lucht wordt getransporteerd twee tot drie keer worden vergroot in vergelijking met droge kaslucht. De toename van de transportcapaciteit loopt sterk op met de temperatuur van de lucht. Verneveling heeft dus vooral een groot effect wanneer de kaslucht mag oplopen naar bijvoorbeeld 28 °C. Omgekeerd, als de teelteisen een kasluchttemperatuur van bijvoorbeeld 18 °C voorschrijven zal het effect van verneveling klein zijn.

Voor de verzameling van warmte uit de kas (bijvoorbeeld voor het regenereren van een aquifer t.b.v. de verwarming in de winter) leidt de toepassing van verneveling vooral tot investeringsbesparingen op het aan te brengen warmtewisselend oppervlak in de warmtewisselaars en het elektriciteitsverbruik voor het rondblazen van lucht.

De ervaringen van de afgelopen jaren hebben echter ook laten zien dat verneveling duidelijke voordelen kan opleveren in kassen waar het warmteoverschot niet verzameld wordt. In die situaties leidt verneveling tot een welkome vermindering van het ventilatiedebiet in kassen (waardoor de CO<sub>2</sub>-concentratie gemakkelijker hoog gehouden kan worden). Bij weinig verdampende gewassen draagt verneveling vooral ook bij aan het voorkomen van een ongunstige combinatie van hoge temperatuur en lage luchtvochtigheid.

Bij aanleg van deze systemen worden capaciteiten tussen de 50 en 300 gram/(m<sup>2</sup> uur) geïnstalleerd. De keus wordt voornamelijk op grond van recente ervaringen gemaakt.

### 6.1.6 Schermen

Het gebruik van schermen voor de verlaging van de warmtevraag is wijdverbreid, maar de potentie ervan wordt meestal niet volledig benut. De belangrijkste reden hiervoor is dat tuinders de luchtvochtigheid onder een scherm al gauw onaanvaardbaar hoog vinden of grote horizontale temperatuurverschillen onder het scherm waarnemen zodra deze iets moeten kieren om vocht af te voeren. Als remedie wordt dan al gauw voor de veilige weg gekozen door de schermen alleen te sluiten als het vocht via lek voldoende wordt afgevoerd.

Bij het gebruik van het semigesloten kasconcept kan er in sommige systemen mechanisch worden ontvochtigd en kan er in andere systemen buitenlucht worden ingezogen. De overdruk die daardoor ontstaat maakt dat de vochtige



lucht door kleine kieren ontsnapt. De homogene inbreng van de droge lucht (die zowel met interne circulatie als met inblazen van buitenlucht gerealiseerd kan worden) neemt het risico van lokale vochtproblemen weg zodat de tuinder veel intensiever kan gaan schermen en/of dichtere schermdoeken kan gebruiken.

De nieuwe mogelijkheden van schermen in (semi-)gesloten kassen maken dat het keuzeproces voor de te gebruiken schermdoeken met andere uitgangspunten moet worden doorlopen.

### 6.1.7 Belichting

Het semigesloten kasconcept sluit belichting niet uit, maar zoals in het hoofdstuk Omgevingsanalyse is gesteld, zal het besparingspotentieel snel afnemen naarmate de belichtingsintensiteit en/of duur toeneemt.

## 6.2 Operationele besturing van de semigesloten teelt

Alle faciliteiten (hardware) in de semigesloten kas moeten op een efficiënte en doelgerichte wijze worden bestuurd om hun maximale effect te bewerkstelligen. Afgaand op de ervaringen van tuinders die de afgelopen jaren met verschillende uitvoeringsvormen van semigesloten kassen hebben geëxperimenteerd, is er op verschillende niveaus een groot gebrek aan kennis over de optimale besturingswijze. De software is nog niet uitgekristalliseerd en installateurs zijn nog niet vertrouwd met de details ten behoeve van de fine-tuning van de besturing.

Op het laagste niveau (de besturing van de apparaten) vindt de besturing van waterdebiet, watertemperatuur en luchtdebiet in het algemeen niet op een onderbouwde manier plaats waardoor het resulterende elektriciteitsverbruik van de installatie onnodig hoog zal zijn.

Belangrijker is nog de besturingsstrategie voor het klimaat op een hoger niveau. Het gebruik van ruime marges voor temperatuurintegratie en het laten meebewegen van de (etmaal) temperatuur met het lichtaanbod kunnen, vooral in de (semi-)gesloten teelt de operationele energiekosten beduidend verlagen.

Waar het eerste probleem (de besturing van de apparaten) vooral een technisch probleem is, is het tweede probleem een veel complexere vraag. Om bij de keus van het optimale klimaat de juiste beslissingen te kunnen nemen, moet zowel gebruik gemaakt worden de actuele stand van zaken (stand van het gewas, actuele weersituatie) als van toekomstige verwachtingen ten aanzien van buitenklimaat en gewasreacties. Dit alles gericht op de doelen uit de teeltstrategie van de tuinder. In het project 'Energiezuinig sturen bij paprika' (Buwalda et al., 2008,) is de potentie van deze vorm van dynamische optimalisatie aangetoond. Het gedachtegoed wordt momenteel doorontwikkeld in een iets eenvoudiger vorm, zonder de optimalisatie module maar met scenarioberekeningen over de gevolgen van bepaalde ingrepen in de teeltstrategie, waaruit de teler zelf zijn keuze moet maken. Ook 'Kijk in de kas' ([www.energiek2020.nu](http://www.energiek2020.nu)) maakt in een wat eenvoudige vorm gebruik van voorspellende modellen.

Er is nog veel onderzoeks- en ontwikkelingswerk nodig om gewasmodellen te krijgen, die eenvoudig genoeg zijn om in de klimaatregeling ingebouwd te kunnen worden, maar compleet genoeg zijn om de essentie van de teelt te kunnen beschrijven. Dit heeft de tuinder nodig om beslissingen op het scherpst van de snede doch onderbouwde manier te kunnen nemen.

## 6.3 Teeltkeuzes in de semigesloten teelt

### 6.3.1 Planttijdstip

De vruchtgroentegewassen worden meestal in december gestart. Door het planttijdstip enigszins te verlaten kan energie bespaard worden, zoals uit de studie van Dieleman et al. (2007) blijkt. Overigens staat deze overweging geheel los van de vraag of er nou wel of niet semigesloten wordt geteeld.

Tabel 4. *Effecten van alternatieve teeltplanning op energieverbruik en economisch resultaat (bron: Dieleman et al, 2007).*

	referentie		alternatief		
	teeltperiode	gasverbruik [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /jaar]	teeltperiode	gasverbruik t.o.v. referentie [%]	saldo t.o.v. referentie [€/m <sup>2</sup> ]
tomaat	10dec - 15nov	44,4	22jan - 30nov	-14	1,92
paprika	20nov - 6nov	41,2	18dec - 30okt	-13	1,35
komkommer	14dec - 18nov	40,2	25jan - 15nov	-17	-1,05

### 6.3.2 Gewasstructuur

In het begin van een teelt valt veel licht onbenut op de grond. Als vervolgens het gewas een groter bladpakket heeft opgebouwd, krijgen de bovenste bladeren veel licht, waardoor de fotosynthese-efficiëntie van dit licht relatief laag is. Dit terwijl de onderste bladeren weinig licht ontvangen. Een betere verdeling van licht in het gewas, geeft naar verwachting een betere groei. Deze betere lichtverdeling kan bereikt worden door het licht diffuus te maken, maar ook aanpassing van gewasstructuur kan hier aan bijdragen. De opbouw van de gewasstructuur kan deels gestuurd worden door te variëren in aantal rijen, rij afstand, afstand tussen planten in de rij en aantal stengels per plant. Naast effecten op lichtbenutting, kan dichtheid van het gewas een belangrijke rol spelen in de vochtigheid van het microklimaat en daarmee op schimmelaantastingen zoals Botrytis.

Ook hierbij geldt dat deze overweging los van de vraag of er nu wel of niet semigesloten wordt geteeld.

### 6.3.3 Raskeuze

Raskeuze wordt vaak bepaald vanuit marktoverwegingen. Keuze van rassen en onderstam moeten meegewogen worden in het totale teeltconcept. Momenteel zijn de veredelingsbedrijven voor de groenteteelt actief bezig rassen te ontwikkelen die goed aansluiten bij de klimaatomstandigheden in de semigesloten teelt.

## 7 Teeltconcept tomaat

In dit hoofdstuk wordt het toekomstbeeld geschetst voor een energiezuinige (onbelichte) tomatenteelt. Dit beeld is gebaseerd op de in voorgaande hoofdstukken beschreven technieken en inzichten die nu beschikbaar zijn. Centraal hierin staat het gewas: wat heeft het gewas gedurende het hele jaar nodig om zich goed te ontwikkelen, goed te groeien en een goede productie ( $60 \text{ kg m}^{-2}$ ) te leveren. Op basis daarvan is beschreven welke bedrijfsinrichting er nodig is om dit te realiseren.

Als uitgangspunt gelden de mogelijkheden van geconditioneerd telen, waarbij geldt dat de energiebalans van de hele teelt neutraal moet zijn. Er wordt dus niet meer warmte geogst en opgeslagen dan in de koudere periodes nodig is voor de eigen teelt, levering van overschotten van warmte aan derden vindt dus niet plaats. Hiermee wordt vermeden dat de installatie wordt over gedimensioneerd. Na de meer algemene beschrijving waarin globaal de teelt vanaf de start (de eerste week van januari) tot de teeltwisseling (eind november) wordt gevolgd, is een korte samenvatting gegeven van de kasuitrusting en de gevolgde teelt/klimaatstrategie. De voorgestelde klimaatstrategie en gehanteerde setpoints worden in Bijlage I weergegeven.

### 7.1 Teeltsysteem en plantdatum

De teelt start in de eerste week van januari met een iets grotere plant dan nu gebruikelijk is. De teelt loopt tot week 48. De teelt is daarmee met twee weken bekort ten opzicht van de gangbare praktijk. Dit om in de relatief donkere decembermaand niet te hoeven stoken.

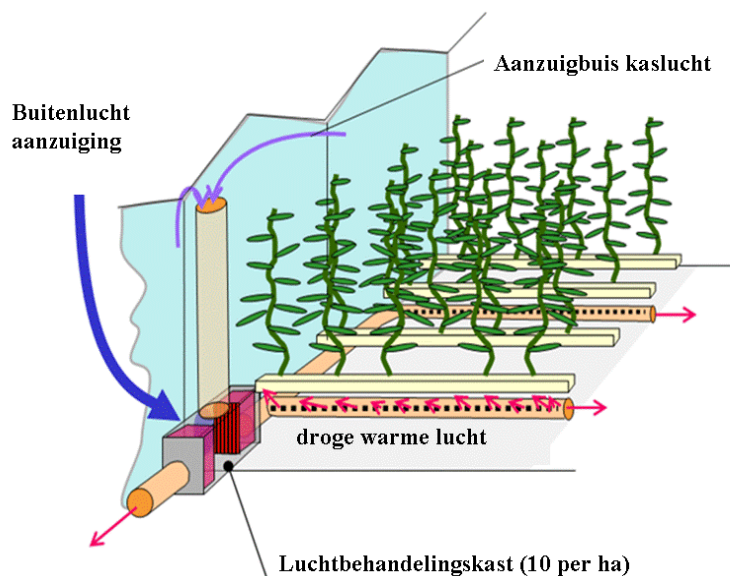
Uitgangspunt is een hangende teeltgoot, met V-systeem en een rijafstand van 1.60 m zoals nu gebruikelijk is, of als mogelijke optimalisatieoptie een rijafstand van 1.92 m. Voordeel van deze laatste rijafstand is mogelijk dat er een diepere lichtdoordringing in het gewas is, waardoor dieper gelegen bladlagen naar verhouding meer bijdragen aan de fotosynthese dan in een rijafstand van 1.60 m. Beweegbare rijen en/of gewasdraden maken het mogelijk om bij verschillende omstandigheden van instraling, LAI en andere belangrijke zaken uit de plantstatus, de plantdichtheid te optimaliseren. Hoe groot het effect op de productie is, moet nog blijken.

Er wordt geteeld op steenwol met een druppelsysteem. De EC wordt lichtafhankelijk aangepast. De watergift is ook stralingsafhankelijk en kan worden aangepast door het drainpercentage. Vooralsnog is er geen wortelverwarming of koeling. De substraattemperatuur zal daardoor na-ijlen op de ruimtetemperatuur.

### 7.2 Kasuitrusting en klimaatbeheersing

De teelt wordt uitgevoerd in een kas met een oriëntatie die geoptimaliseerd is voor een maximale lichttransmissie in de winter. De kas heeft normaal glas. Een optie voor verdere toekomstige optimalisatie is mogelijk toepassing van diffuus glas maar omdat de definitieve resultaten daarvan nog niet beschikbaar zijn, is deze optie vooralsnog buiten beschouwing gelaten.

De kas heeft een buisrail verwarming en een groeibuis bij de vruchten. Daarnaast wordt uitgegaan van het gebruik van luchtbehandelingskasten met een warmtewisselaar voor verwarming en koeling. Deze luchtbehandelingskasten kunnen een willekeurige verhouding van binnen- en buitenlucht aanzuigen en na verwarming of koeling via slurven in de kas verdelen. Het aanzuigen van buitenlucht is bedoeld voor de realisatie van een goed gecontroleerde ontvochtiging op momenten dat de luchtvochtigheid ontoelaatbaar hoog is. Figuur 5 toont een schets van een dergelijke luchtbehandelingskast.



Figuur 5. Luchtbehandelingskast.

Via de aanzuiging van buitenlucht kan de kas op een goed gecontroleerde wijze worden ontvochtigd. De buitenlucht is immers bijna altijd droger (in absolute luchtvochtigheid) dan de kaslucht. De warmtewisselaar in de luchtbehandelingskast kan de buitenlucht zo nodig opwarmen. Het slurvensysteem zorgt voor een evenwichtige verdeling van deze droge, warme lucht zodat horizontale temperatuurverschillen, met name rond de ziektegevoelige onderste delen van het gewas zoveel mogelijk voorkomen kan worden.

Als er niet ontvochtigd, maar alleen verwarmd hoeft te worden wordt de lucht intern gecirculeerd en zorgt de resulterende luchtbeweging voor een goede homogeniteit. De te kiezen luchtcirculatie zal niet groot zijn, ergens tussen de 10 en 20 m<sup>3</sup> per m<sup>2</sup> per uur. Dat betekent gemiddelde opstijgende luchtsnelheden van minder dan een cm per seconde. Het uiteindelijke te kiezen debiet zal moeten worden gebaseerd op een optimalisatie van de elektriciteitskosten die met de luchtcirculatie gemoeid zijn, afgezet tegen de verbetering van de COP van de verwarmingsinstallatie die behaald wordt bij de verschuiving van buisverwarming naar luchtverwarming. Soortgelijke optimalisaties hebben bijvoorbeeld in de Energieproducerende kas van Stef Huisman ertoe geleid dat gaandeweg het experiment gekozen is voor het beperken van het ventilatiedebiet en het verhogen van de verwarmingstemperatuur. In die installatie was de resulterende besparing op ventilatorenergie groter dan de toename van het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp.

In warme perioden kan de warmtewisselaar worden gebruikt ter ondersteuning van de koeling. Zo wordt de investering in warmtewisselaars zo goed mogelijk uitgenut.

De ervaring met actieve koelssystemen in kassen levert tot nu toe het beeld op dat koeling van onderuit slechts zeer terughoudend kan worden ingezet omdat dit, in de vruchtgroenteteelt, tot een onacceptabele vertraging van de afrijpingsnelheid lijkt te leiden. Daarom worden ook boven in de kas koelers geïnstalleerd.

De kas is ook uitgerust met een luchtbevochtiginginstallatie. Deze zorgt ervoor dat de warmte die per m<sup>3</sup> lucht kan worden afgevoerd gemaximaliseerd kan worden. Bij koeling via de ramen betekent dit dat het ventilatiedebiet klein blijft en daar de CO<sub>2</sub> concentratie gemakkelijk hoog gehouden kan worden. Bij actieve koeling zorgt de luchtbevochtiging voor een minimalisatie van het benodigde ventilatorvermogen tijdens koelen.

Er wordt gebruik gemaakt van een standaard CO<sub>2</sub> verdeelsysteem. Immers, CO<sub>2</sub> loopt niet helemaal parallel met koeling en verwarming en de duurste component van het verdeelsysteem, namelijk de hoofdverdeelleiding en CO<sub>2</sub>-ventilator zullen sowieso moeten worden aangelegd. Wellicht blijkt later dat de CO<sub>2</sub> toch via de luchtbehandelingskasten meegestuurd zou kunnen worden, maar dit levert dan alleen een vermindering van de kosten voor de dunne CO<sub>2</sub> darmen. De aansluiting van de CO<sub>2</sub>-leiding op de luchtbehandelingskasten of de slurven levert weliswaar een kleiner aantal aansluitingen op, maar de aansluitpunten zullen per stuk duurder zijn.

## 7.2.1 Temperatuurbeheersing

Gedurende de hele teelt wordt niet alleen het temperatuurverloop over de dag, maar ook de etmaaltemperatuur sterk bepaald door de instraling om zoveel mogelijk gebruik te maken van de 'gratis' zonne-energie. Dit wordt gerealiseerd door de basisstooktemperatuur met 1 graad te verlagen, maar de lichtafhankelijkheid van de stooklijn (en parallel daaraan de ventilatielijn) met 2.5 graden te verhogen. De precieze beschrijving van het setpoint verloop staat vermeld in de bijlage.

Over het jaar heen levert de gewijzigde strategie een vrijwel gelijke temperatuursom aan een traditionele strategie, maar deze wordt relatief meer door zonne-energie gerealiseerd. Op sombere dagen is de kas hierdoor kouder dan gebruikelijk en op lichte dagen is de kas warmer dan gebruikelijk. Teneinde de zonne-energie zo gunstig mogelijk te benutten en de CO<sub>2</sub>-concentratie gemakkelijker hoog te kunnen houden wordt er minder fel op temperatuur gelucht. Dit wordt gerealiseerd door een uitgestelde ventilatie, waarmee wordt voorkomen dat de gratis zonnewarmte onnodig wordt afgelucht.

Aan het einde van de dag wordt de temperatuur verlaagd naar de gewenste voornachttemperatuur. Het verlagen van de temperatuur vindt vooral plaats via ventilatie, en ook door de schermen niet te vroeg dicht te laten lopen. Door deze acties vindt het afkoelen van de kas, nodig om de assimilatenbalans van het gewas goed te houden, zoveel mogelijk met natuurlijke middelen plaats. Mechanische koeling in deze periode van de dag kost relatief veel aandrijf-energie per eenheid onttrokken warmte. Alleen als een snelle afkoeling in de voornacht overduidelijke teeltkundige voordelen biedt kan dit worden overwogen.

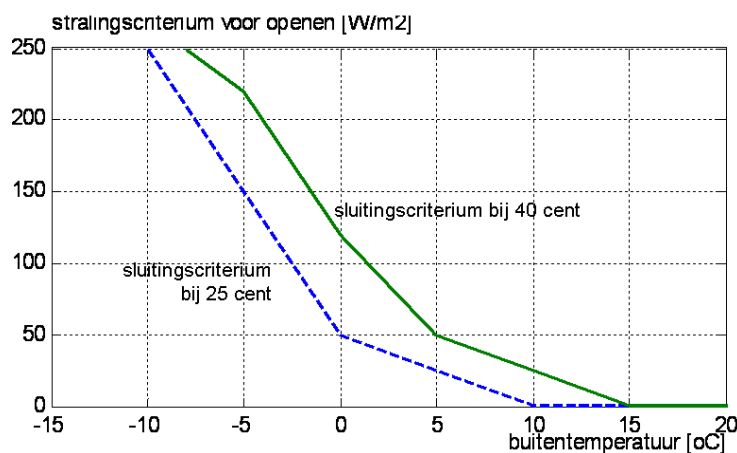
Vooralsnog realiseert de gekozen regelstrategie dus in een klimaat dat in de voornacht qua temperatuur nauwelijks anders is dan gebruikelijk.

## 7.2.2 Schermen

De kas is voorzien van twee schermdoeken waarvan de bovenste een scherm van gealuminiseerde bandjes is gemaakt voor een maximale isolatiegraad en het onderste een transparant bandjesschermbandje is dat op koude dagen met een beperkt verlies van licht in de kas kan worden dichtgetrokken. Het gebruik van bandjesschermen draagt 's nachts bij aan de natuurlijke vochtafvoer.

De lichtintensiteit waarbij het scherm 's ochtends wordt opengetrokken is afhankelijk gesteld van de gemiddelde buitentemperatuur rond het tijdstip van openen. Is de buitentemperatuur laag dan zal de extra productie niet opwegen tegen het extra gasverbruik en kan het scherm beter dicht blijven.

Figuur 6 toont grafieken met twee curven voor de relatie tussen buitentemperatuur en stralingscriterium. De groene, doorgetrokken lijn is een geoptimaliseerde lijn voor een gasprijs van 40 cent per m<sup>3</sup>. De blauwe, onderbroken lijn dient ter vergelijking van een relatie die veelvuldig gebruikt werd in tijden dat de gasprijs rond de 25 cent lag.



Figuur 6. Gebruikte relatie tussen het stralingscriterium waarboven het scherm 's ochtends open loopt en de op dat moment geldende buitentemperatuur. De doorgetrokken lijn is het resultaat van optimalisaties bij een gasprijs van 40 cent per  $\text{m}^3$ . De blauwe, onderbroken lijn is een curve die is geoptimaliseerd bij een gasprijs van 25 cent per  $\text{m}^3$ .

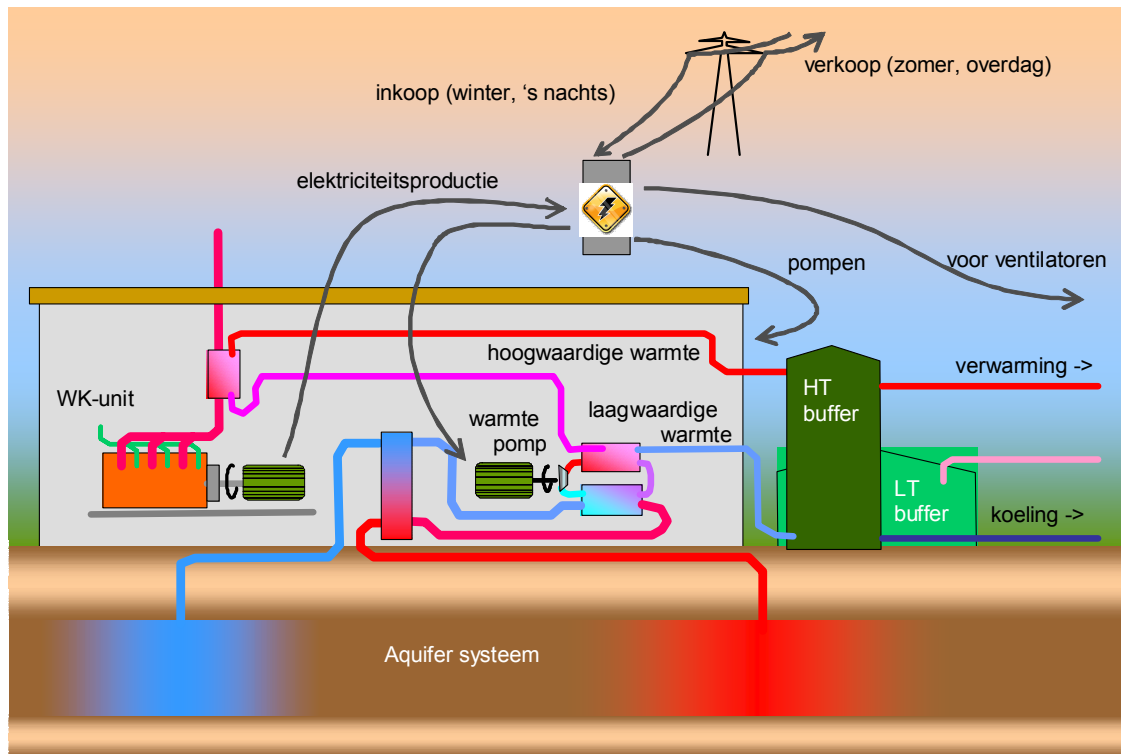
De verschuiving van de curve van de onderbroken lijn naar de doorgetrokken lijn leidt in een gemiddeld (SEL-)jaar tot 400 extra schermen per jaar en een gasbesparing van  $1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ .

### 7.2.3 $\text{CO}_2$ dosering

Er wordt uitgegaan van een rookgas  $\text{CO}_2$  doseercapaciteit van  $65 \text{ kg/ha/uur}$  die verkregen wordt uit een kleine WKK installatie van  $130 \text{ kWe}$  per ha. Om bij deze beperkte doseercapaciteit toch op het beoogde productieniveau te komen van  $60 \text{ kg/m}^2/\text{jaar}$  zal hier additionele  $\text{CO}_2$  uit andere bronnen bij moeten worden ingezet (OCAP, zuivere  $\text{CO}_2$ ). De capaciteit van de additionele  $\text{CO}_2$  bron zal sterk afhangen van de vaste en variabele kosten van de geleverde  $\text{CO}_2$ . Bij een prijs rond de 15 cent per kg zal de economisch verantwoorde capaciteit in de buurt van de  $150 \text{ kg/ha/uur}$  liggen.

### 7.2.4 Energievoorziening

De energievoorziening van de kas is gebaseerd op een optimale samenwerking tussen WK, warmtepomp, hoog temperatuur etmaalbuffer, laag temperatuur etmaalbuffer en het warmte/koude opslagsysteem (WKO).



Figuur 7. Schematisch overzicht van het energievoorzieningsconcept.

De WKK unit is gekoppeld aan het net. De capaciteit van de WK is zodanig gekozen dat de jaarlijkse hoeveelheid elektriciteit die aan het net geleverd wordt gelijk is aan de hoeveelheid elektriciteit die vanuit het net wordt ingekocht. Het bedrijf is daarmee op jaarbasis elektriciteitsinkoop neutraal.

## 7.3 Teelt en klimaatstrategie per seizoen

### 7.3.1 Winter

In het begin van de teelt wordt de warmte eerst ingebracht via het ondernet en de warmtewisselaar in de luchtbehandelingkast. Als er vruchten aan de plant hangen wordt er in eerste instantie verwarmd via de groeibuis en komt daarna pas het ondernet en luchtbehandelingkast erbij. Door in dit geval de luchtbehandelingkast in serie met het bovennet te plaatsen kan het verwarmingswater diep worden uitgekoeld waardoor de warmtepomp bij een hoge COP kan werken. De temperatuur wordt overdag hoger aangehouden dan 's nachts. Op bijna 60% van de dagen (berekeningen gemaakt in het kader van voorliggend project) zal het echter energetisch interessant zijn om een hogere nachttemperatuur aan te houden dan overdag om daarbij 's nachts maximaal te kunnen profiteren van het dubbele scherm, terwijl overdag de schermen open moeten om het gewas het licht te laten gebruiken. Het toepassen van deze negatieve DIF remt de stekking van stengel en bladeren wat leidt dit tot een langzamere toename van LAI, waarvan de gevolgen doorwerken in periode daarna. Er zijn echter nog te weinig gegevens over effecten van DIF bij tomaat en nog minder gegevens over de mogelijkheden om de eventuele negatieve effecten te voorkomen (zoals kortdurende belichting met lage intensiteit verrood licht aan het begin van de nacht of midden in de nacht) zodat deze optie nog niet is meegenomen. Door de gehanteerde schermcriteria wordt echter frequent geschermd.

### 7.3.2 Voorjaar

De teeltstrategie is gebaseerd op het laten meelopen van de temperatuur met het licht (met de natuur mee telen). Er wordt een ruime afstand aangehouden tussen stooktemperatuur en ventilatietemperatuur. Dat betekent dat als er voldoende instraling is de kas opgewarmd wordt, maar op donkere dagen de temperatuur lager blijft. Op moment dat het gewas in productie is wordt gestreefd naar een gemiddelde etmaaltemperatuur van 19 °C of lager (afhankelijk van het ras). Het gebruik van een sterke lichtafhankelijke setpointverhoging (4 °C over een traject van 100 tot 400 W/m<sup>2</sup>) leidt tot een sterke koppeling van de etmaaltemperatuur aan de lichtsom. Het temperatuurregime zal het karakter krijgen van een meerdaagse temperatuurintegratie regeling maar het belangrijkste verschil is dat de klassieke temperatuurintegratie regelingen toewerken naar een vastgestelde etmaaltemperatuur die nauwelijks afhankelijk is van de lichtsom terwijl in de nu gehanteerde strategie juist een sterke koppeling ligt tussen lichtsom en etmaaltemperatuur. Ondanks de lichtafhankelijke setpointverhoging en de uitgestelde ventilatie zullen er voorjaarsdagen zijn waarin de kas te warm zal worden. De combinatie van de beschikbaarheid van koeling en de dan nog lage buitentemperaturen zal er echter voor zorgen dat hierbij met maar weinig buitenlucht gekoeld zal hoeven worden. De CO<sub>2</sub> concentratie kan dan dus makkelijk hoog gehouden worden.

In het voorjaar wordt er nog steeds veel geschermd. Omdat het gewas zo groot is dat er veel verdamping plaatsvindt, zal er meer moeten worden geregeld op vocht. Door het bovenste en onderste scherm tegen elkaar in te laten openen kan de luchtuitwisseling tussen de vochtige kaslucht en de veel drogere (maar koude) lucht boven het scherm-pakket goed gecontroleerd plaatsvinden. Kouval wordt op deze manier voorkomen.

Doordat de kas is uitgerust met luchtbehandelingskasten die buitenlucht kunnen aanzuigen en deze lucht via slurven door de kas te verdelen kan de luchtvochtigheid nauwkeurig worden beheerst.

De toegepaste luchtvochtigheidsregeling kan worden gekarakteriseerd als een uitgestelde, maar feller ingrijpende regeling. Er wordt pas buitenlucht aangevoerd wanneer de RV boven de 85% komt (in de referentieteel worden de ramen al bij 80% RV geopend), maar er wordt dan sterk gereageerd. Als het nodig is gaan de ramen volledig open om de luchtvochtigheid in de hand te houden.

In het voorjaar, wanneer de hoeveelheid licht toeneemt en daarmee ook de aanmaak van assimilaten, worden extra stengels aangehouden om voldoende assimilatenvraag te hebben. Via het aanhouden van extra stengels en bladplukken wordt het gewas gerealiseerd dat de teler wil hebben. Aandachtspunt hierbij is dat het 'ideaalbeeld' dat een teler heeft van het optimale tomatengewas in de nieuwe situatie niet altijd de hoogste productie zal opleveren. Het gewas in een geconditioneerde kas met een energiezuinig klimaat zal er anders uit zien (andere bladvorm, andere plantopbouw etc.). Daarbij gelden per cultivar nog specifieke kenmerken.

### 7.3.3 Zomer

In de zomer zullen er veel dagen voorkomen waarbij de temperatuur in de kas structureel hoger op zal lopen dan gewenst. Er zal dan moeten worden geventileerd en/of moeten worden gekoeld met de koelinstallatie. Zowel voor ventileren met buitenlucht als voor koelen met een koelinstallatie geldt dat dit efficiënter verloopt met vochtige lucht dan met drogere lucht. Bij warmteafvoer via de ramen zit de winst in de grotere hoeveelheid afgevoerde warmte door vochtiger lucht<sup>3</sup> en bij gebruik van een koelinstallatie leidt vochtiger lucht tot een beperking van het noodzakelijke koeloppervlak per eenheid koelvermogen.

De kas wordt daarom uitgerust met een vernevelingsinstallatie met een capaciteit van 150 gram/(m<sup>2</sup> uur). Deze capaciteit hoeft niet groter omdat een gewas als tomaat zelf al een hoge verdampingscapaciteit heeft. In kassen waarin minder verdampende gewassen zoals tropische potplanten of bijv. fnesia, anthurium of kalanchoë worden geteeld zullen hogere vernevelingscapaciteiten nodig zijn.

De doseringsstrategie van de rookgas-CO<sub>2</sub> is een constante basisdosering vanuit de WKK, aangevuld met een geoptimaliseerd profiel met zuivere CO<sub>2</sub>. De dosering is gebaseerd op het (carbonomic-)algoritme dat van moment

<sup>3</sup> Ter illustratie kan hiervoor het de onderstaande rekenvoorbeeld worden gebruikt. Stel dat de buitenlucht 20 °C is bij een luchtvochtigheid van 80% RV. Als deze lucht wordt uitgewisseld met kaslucht van 25 °C en 70% RV dan wordt er 12.3 kJ per m<sup>3</sup> afgevoerd. Heeft de kaslucht evenwel een luchtvochtigheid van 85% RV dan wordt er 21 kJ per m<sup>3</sup> luchtuitwisseling afgevoerd, dus bijna 2 keer zoveel.



tot moment een afweging maakt tussen de kosten van de zuivere CO<sub>2</sub> en de opbrengsten daarvan. Het algoritme houdt onder meer rekening met de instraling, het ventilatiedebiet en gewastemperatuur.

Met de aanwezige koelinstallatie zal op het moment dat de ventilatiebehoefte boven een bepaalde drempelwaarde komt (10 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> uur<sup>-1</sup>) actief gekoeld worden. Deze drempelwaarde van 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> uur) is gekozen omdat onder dit ventilatiedebiet de beschikbare CO<sub>2</sub> uit de rookgassen van de WK voldoende is om de concentratie in de kas hoog te houden. Het meer gesloten houden van de kas levert in deze situatie dus geen CO<sub>2</sub> voordeel (het zou zelfs betekenen dat een deel van de rookgassen via de schoorsteen zouden moeten worden afgevoerd om te hoge concentraties van CO<sub>2</sub> en andere gassen te voorkomen). De koude lucht wordt voornamelijk boven in de kas ingebracht met een goed ruimtelijk verdeeld systeem. Gecombineerd met het gebruik van de luchtverdeelslurven onderin zullen er daardoor naar verwachting nauwelijks horizontale temperatuurverschillen zijn. Door de koude boven in de kas in te brengen worden verticale temperatuurgradiënten voorkomen.

De warmte die op deze manier verzameld wordt komt in eerste instantie in een bovengrondse etmaalbuffer terecht. In het voorjaar en najaar zal een deel van deze warmte alweer binnen het etmaal gebruikt worden. Het grootste deel van de warmte die 's zomers geoogst wordt moet echter worden opgeslagen in een aquifer, om in de winter gebruikt te worden om de kas te verwarmen. Deze lange termijn warmteopslag wordt des te noodzakelijker naarmate de warmte- en koude vraag over korte perioden (etmalen of een paar dagen) meer worden opgevangen door meerdaagse temperatuurintegratie met opgerekte grenzen.

Omdat het verzamelen en opslaan en eventueel vernietigen van warmte elektriciteit vraagt wordt er niet meer warmte verzameld dan dat er 's winters door de warmtepomp wordt gebruikt. Levering van laagwaardige warmte aan derden vindt dus niet plaats. Door de hierboven beschreven randvoorwaarden wordt de benodigde aquifer capaciteit beperkt tot een debiet van 70 m<sup>3</sup> per ha per uur.

De koeling wordt vooral ingezet bij hoge kasluchttemperaturen omdat onder deze omstandigheden relatief weinig elektriciteit per eenheid verzamelde warmte nodig is. Uit energiebesparing oogpunt wordt de koeling dus in de regel niet ingezet om snel naar de nachttemperatuur te gaan. Bij sommige gewassen (roos, aardbei) zou dit vanuit (gewas)kwaliteitsoverwegingen echter wel aantrekkelijk kunnen zijn. De optimale koelstrategie is nog niet eenduidig te bepalen, ook omdat de operationele kosten en vooral de additionele gewasopbrengsten als gevolg van koeling nog niet goed bekend zijn. Hier ligt nog een duidelijk kennishiaat.

### 7.3.4 Najaar

In het najaar zijn over het algemeen de nachttemperaturen nog hoog en is de gewasverdamping hoog. De luchtvochtigheid in de kas kan hierdoor sterk oplopen. Door vocht af te voeren via gecontroleerde inbreng van buitenlucht, kan de luchtvochtigheid in de kas teruggebracht worden tot acceptabele niveaus. Overigens zouden deze niveaus hoger kunnen liggen dan nu gedacht wordt, en kunnen bijvoorbeeld de risico's op schimmelaantasting door goed doordachte, geringe luchtbeweging beheerst worden. Het is om deze reden dat er verwacht wordt dat de mogelijkheid om de lucht actief te ontvochtigen (door twee warmtewisselaars achter elkaar te plaatsen, zie paragraaf 3.1.1) niet voldoende rendeert. Actieve ontvochtiging kost relatief veel elektriciteit per kg afgevoerd vocht (minstens 0.4 kWh per kg) en de installatie met een dubbele waterzijdige aansluiting is significant duurder dan een installatie met een enkele waterzijdige aansluiting.

Niet alleen in het najaar, maar door de hele teelt wordt daarom pas op vocht gereageerd als de RV boven de 85% komt en niet als deze boven de 80% komt, zoals gebruikelijk. De actie die de klimaatregelaar neemt als de RV te hoog wordt (ventileren) is echter in de energiezuinige teelt feller dan gebruikelijk. Hierdoor wordt de gemiddelde RV in kas hoger, maar is het aantal extreme situaties zelfs minder dan in de gangbare teelt.

Het gebruik van het gealuminiseerde bovenste scherm zal in het najaar beperkt zijn omdat de nachtelijke afkoeling van de kas in die periode een belangrijk zorgpunt is. Als de nachttemperaturen echter onder de 8 °C zakken zal het bovenste scherm weer gebruikt kunnen gaan worden.

De teelt wordt in week 48 beëindigd. Tegen de afloop van de teelt worden hoge luchtvochtigheden toegestaan en gaat de temperatuur ca. 1 °C naar beneden. Zo wordt de laatste productie energiezuinig gerealiseerd. De teeltwisseling duurt tenminste 1 maand, waarbij in de relatief donkere decembermaand de kas leeg staat en alleen vorstvrij gehouden wordt.

## 7.4 Samenvatting energiezuinig teeltconcept Tomaat

### 7.4.1 Technische uitrusting

- Hangende goten, rijafstand 1.60, V systeem.
- WK met 130 kW el per ha.
- Een elektrisch aangedreven warmtepomp met een asvermogen van 200 kWe.
- Koeling met warmtewisselaars onder en bovenin in de kas. Het koelvermogen bedraagt 150 W/m<sup>2</sup>, waarvan 100 W/m<sup>2</sup> in de bovenkoelers en 50 W/m<sup>2</sup> in de luchtbehandelingskasten die de lucht via de slurven door de kas verdeelt.
- Warmteopslag in dagbuffer en lange termijn warmte opslag in een aquifer. De dagbuffer heeft een capaciteit van 800 m<sup>3</sup>/ha en het pompdebiet naar de aquifer bedraagt 70 m<sup>3</sup>/(ha uur).
- Gecontroleerde inlaat van buitenlucht via slurven onder de goten ingebracht in de kas met een capaciteit van 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> uur).
- Twee onafhankelijke schermdoeken: bovenste van gealuminiseerde bandjes, onderste een transparant scherm, worden tegen elkaar in geopend.
- Bevochtiginginstallatie met capaciteit van 150 gram/m<sup>2</sup>/uur.
- CO<sub>2</sub> doseercapaciteit van 65 kg/(ha uur) uit WKK rookgas, aangevuld met 150 kg/(ha uur) uit andere bronnen.

### 7.4.2 Belangrijkste aanpassingen teelt en klimaatregime ten opzichte van referentieteelt

De belangrijkste aanpassingen aan de teelt en het kasklimaat regime in het energiezuinige teeltconcept zijn vergeleken met de referentieteelt:

1. Uitgestelde plantdatum: planten in week 1
2. 1 °C lagere stooktemperatuur en sterkere lichtverhoging van zowel stook als ventilatietemperatuur (+2.5 °C in een range van 100-400 Wm<sup>2</sup>)
3. Actieve koeling wanneer de ventilatiebehoefte (op temperatuur) boven de 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> uur) uitkomt.
4. Eerste (folie)scherm blijft bij lage buitentemperatuur gesloten tot 250 W/m<sup>2</sup>
5. Tweede (energie) scherm dicht bij T buiten < 8 °C
6. Setpoints voor ingrijpen in luchtvochtigheid via luchting vanaf 85% RV

Voor nadere details: zie bijlage.

## 7.5 Effecten op energiegebruik en productie

### 7.5.1 Uitgestelde plantdatum

Omdat door het verschuiven van de plantdatum naar de eerste week van januari de koude en donkere decembermaand wordt vermeden, kan energie worden bespaard met een zeer geringe afname van de productie. De achtergrond van deze wijziging in teeltstrategie is uitgebreid beschreven in het rapport: 'Wanneer planten, wanneer een teelt beëindigen?' (Dieleman et al., 2007).

In het gekozen teeltconcept is de plantdatum echter niet verder verschoven dan naar week 1 om niet al te zeer uit de pas te lopen met de gangbare teeltstrategieën. Verdere verschuiving naar achteren en een start met nog grotere planten heeft consequenties voor het in evenwicht krijgen van het gewas. Om het juiste evenwicht in generatieve/

vegetatieve groei te krijgen, moeten bij de stijgende lichtevoelheden (veel) hogere temperaturen worden aangehouden waardoor het energiebesparingeffect weer teniet gedaan wordt.

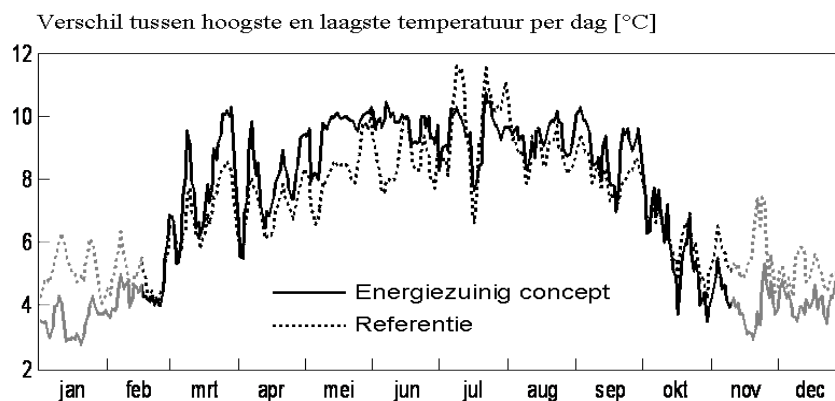
Een factor analyse op het effect van de verschuiving van de plantweek met 3 weken (naar week 1) en een verkorting van de totale teeltduur met 2 weken (dus ruimen in week 48 in plaats van week 47) levert in het gemiddelde (SEL)-jaar een energiebesparing van 2.6 m<sup>3</sup> per m<sup>2</sup> per jaar. Er is dus zeker sprake van een substantiële daling van het energiegebruik door uitstel van de plantdatum te bereiken.

Overigens wordt hiermee een deel van het energiegebruik verschoven naar de planten opkweek bedrijven. Maar door de hogere plantdichtheid bij de plantenkweker wordt er op ketenniveau toch energiewinst behaald.

## 7.5.2 Aangepaste temperaturen

Om meer gebruik te maken van zonnewarmte voor het verwarmen van de kas zijn de instellingen voor de kasklimaat regelmatig zodanig veranderd dat er een sterkere koppeling is tussen de straling en de temperatuur. Ook is de afstand tussen stook en ventilatielijn vergroot zodat warmte meer binnengehouden wordt. In zonnige perioden resulteert dit bij de energiezuinige instellingen tot grotere verschillen tussen de hoogste en laagste temperaturen per dag dan in de referentiesituatie.

In Figuur 8 (getrokken lijn: energiezuinig concept) is dit duidelijk te zien bij een aantal dagen in maart, mei en juni en een aantal dagen eind september. In de zomer profiteert de energiezuinige kas van het feit dat er in de kas koelcapaciteit aanwezig is. Hierdoor kan de kastemperatuur midden in de zomer in de energiezuinige kas beter beheerst worden en zijn de verschillen tussen de maximum en minimum waarden juist kleiner dan in de normale teelt.



Figuur 8. Verschillen hoogste en laagste temperatuur per dag.

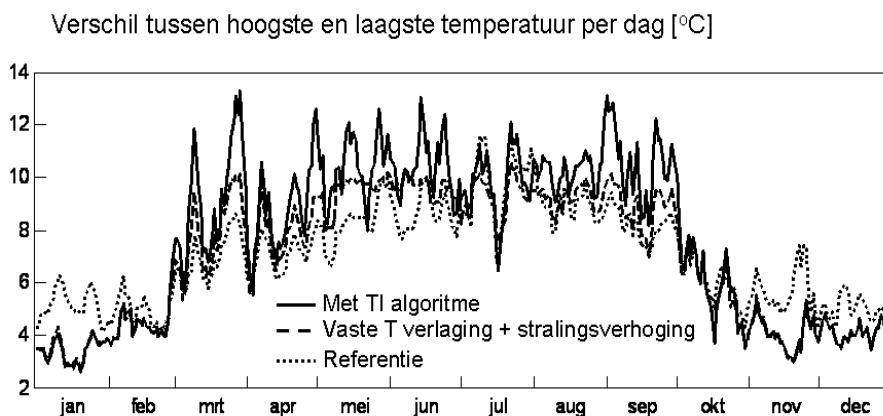
De data vanaf half november zijn in deze figuur veel minder relevant omdat deze sterk beïnvloed worden door het verschil in plant- en ruimdatum tussen de energiezuinige teelt en de referentieteelt. De verschillen in januari en februari zijn eveneens niet het gevolg van de gewijzigde temperatuurinstellingen, maar vooral van de andere gewasomvang (plantdatum effect) en het intensieve schermgebruik, waardoor de nachttemperaturen in de energiezuinige teelt minder diep wegzakken.

Factoranalyse op het effect van het nieuwe temperatuurregime geeft aan dat deze temperatuurstrategie verantwoordelijk is voor een vermindering van de warmtevraag van 3.2 m<sup>3</sup> aardgas equivalenten. Dit is een kwart van de totale vermindering van de warmtevraag.

In het algemeen liggen de verschillen tussen de hoogste en de laagste temperatuur voor de energiezuinige en traditionele teeltstrategie in dezelfde orde van grootte. De totale bandbreedte verschilt niet. De op een aantal momenten (iets) grotere delta T tussen minimum en maximum temperatuur bij het energiezuinige regime heeft naar verwachting geen consequenties voor de teelt omdat overall de gemiddelde etmaaltemperatuur op hoofdlijnen gelijk blijft.

Ter oriëntatie is ook nog een berekening gemaakt van het effect van de toevoeging van een temperatuurintegratie regeling bovenop de verlaagde stooklijn in combinatie met de verhoogde lichtafhankelijke setpointverhoging. Deze temperatuurintegratie regeling staat het toe dat de temperatuur overdag oploopt indien deze 's nachts kan worden gecompenseerd door een lagere temperatuur. Dit is dus een dynamischer aanpak dan de hierboven beschreven verlaging van de stooklijn, die lang niet op elke dag gecompenseerd wordt door de lichtafhankelijke setpointverhoging. (Dat is mogelijk niet problematisch, vanwege een veronderstelde verminderde noodzaak van een hoge etmaaltemperatuur op sombere dagen).

De toevoeging van een enkelzijdige bandbreedte van 3 °C in een 3 daagse temperatuurintegratie met een maximale temperatuuropbouw van 5 graaddagen doet de warmtevraag met nog eens een m<sup>3</sup> aardgas equivalenten afnemen. De consequentie is echter dat de verschillen tussen dag en nachttemperaturen aanzienlijk groter worden dan in de referentieteel, zie Figuur 9.

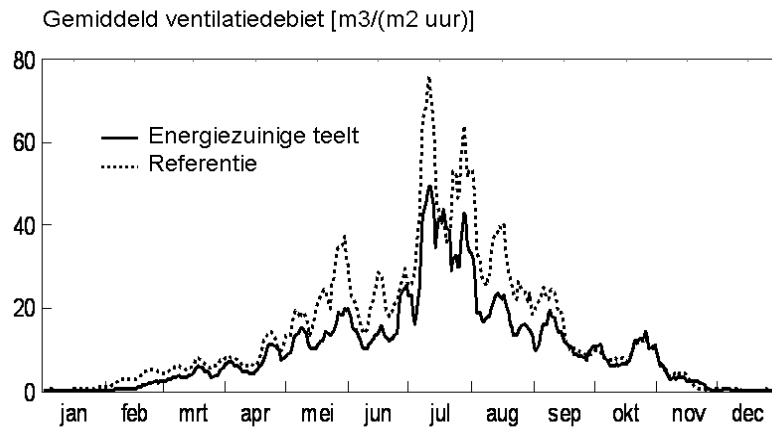


Figuur 9. *Verschil tussen hoogste en laagste temperatuur per dag, inclusief TI regeling.*

Om ondernemers te motiveren een meer lichtgekoppelde temperatuurstrategie en mogelijk daar nog bovenop een temperatuurintegratie marge, zal moeten worden aangetoond dat dit geen nadelige effecten heeft op het gewas. In de praktijk wordt de temperatuur voornamelijk gebruikt om de verhouding vegetatieve en generatieve groei te sturen en bij afwijkingen van het traditionele regime is de angst groot de grip op het gewas te verliezen. Een nog beter inzicht in de koppeling tussen lichtsom/gewasstatus en temperatuursom is dus een noodzakelijke voorwaarde voor de toepassing van dit soort strategieën. Het belang van toepassing van bredere grenzen voor de temperatuurbeheersing voor te behalen energiebesparing is echter groot: globaal een kwart van de besparing met het energiezuinige teeltregime is het gevolg van deze aangepaste temperatuurstrategie.

### 7.5.3 Ventilatie en CO<sub>2</sub>

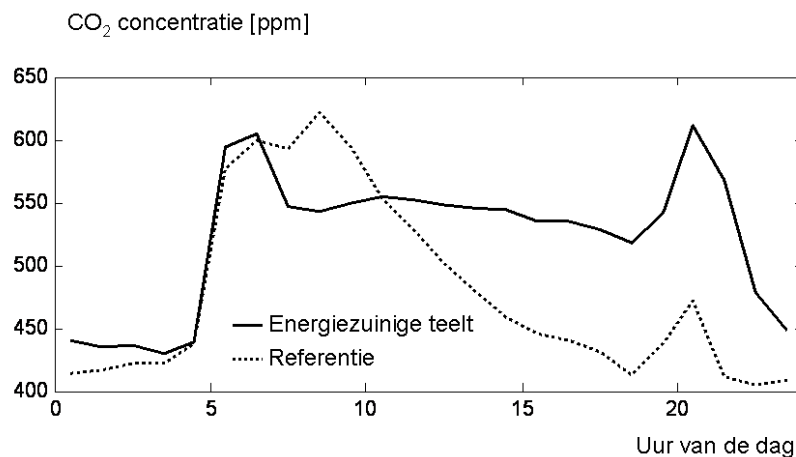
Door het gebruik van koeling, het uitgesteld ventileren, het accepteren van een hogere luchtvochtigheid en de toepassing van verneveling is het ventilatiedebiet in de energiezuinige teelt kleiner dan in de referentieteel. Figuur 10 laat dit zien.



Figuur 10. Ventilatie-debiten.

Het gevolg van de lagere ventilatie is dat de CO<sub>2</sub> concentratie gemakkelijker op een hoog niveau gehouden kan worden zodat er bij een relatief beperkte dosering toch meer opgenomen kan worden. De fractie van de gedoseerde CO<sub>2</sub> die door het gewas wordt opgenomen is dan ook in de energiezuinige teelt substantieel hoger dan in de referentieteelt (24% in plaats van 19%).

De totale CO<sub>2</sub>-gift in de referentieteelt is 40 kg per m<sup>2</sup> per jaar en in de energiezuinige teelt is deze 33 kg per m<sup>2</sup> per jaar. Doordat in de energiezuinige teelt slechts een kleine WKK beschikbaar is wordt wel een belangrijker deel van de CO<sub>2</sub> door zuivere CO<sub>2</sub> geleverd. Uitgaande van een CO<sub>2</sub>-prijs van 15 cent per kg is de extra dosering (berekend via de carbonomic) in de energiezuinige teelt 7.2 kg per m<sup>2</sup> per jaar waar die in de referentieteelt 3.1 kg per m<sup>2</sup> per jaar bedraagt. Door de verlaagde ventilatie in de zomerperiode wordt juist daar een aanzienlijke verhoging van de CO<sub>2</sub> concentratie bereikt wat leidt tot een hogere benuttingefficiëntie van CO<sub>2</sub>. De uitgestelde en verminderde ventilatie en de inzet van de koelcapaciteit leiden tot substantieel hogere CO<sub>2</sub> concentraties vooral in de middaguren van de dag. Figuur 11 toont het gemiddelde etmaalverloop van de CO<sub>2</sub>-concentratie in de periode mei t/m juli.

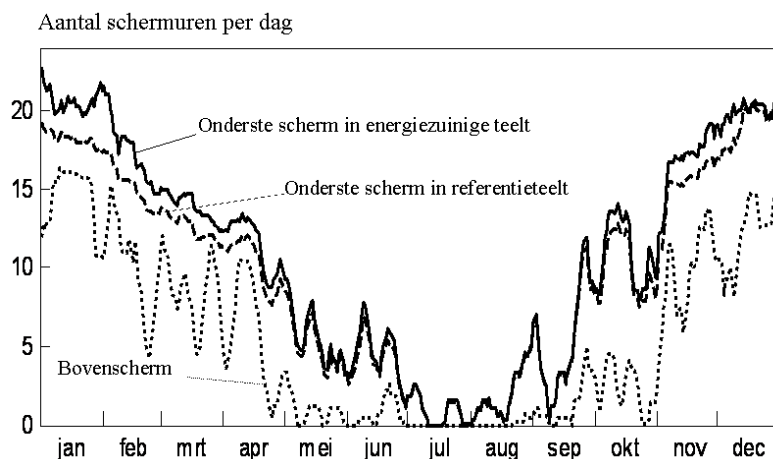


Figuur 11. Gemiddeld etmaalverloop van de CO<sub>2</sub> concentratie periode mei t/m juli.

De hogere efficiëntie van de gedoseerde CO<sub>2</sub> maakt dat de totale productie in het hier voorgestelde teeltsysteem, ondanks de iets lagere lichttransmissie (als gevolg van de twee scherminstallaties en de bovenkoelers), op basis van de berekende fotosynthese, naar verwachting niet lager is dan in de referentie.

## 7.5.4 Schermgebruik

In de energiezuinige teelt wordt het scherm 's ochtends langer dichtgehouden als het buiten koud is en wordt er een tweede scherm gebruikt. Dit tweede sterk isolerende (boven)schermb laat erg weinig licht door zodat dit bij de eerste lichtstralen geopend wordt. Ook geldt dat dit tweede scherm pas wordt gesloten als het buiten kouder is dan 8 °C. Hierdoor wordt het tweede (isolerende) scherm in de warmere periode van het jaar nauwelijks gebruikt, zodat gebruik wordt gemaakt van natuurlijke koeling via ventilatie op dagen dat het voornaamste probleem in de klimaatregeling een ongewenst hoge etmaaltemperatuur zou zijn. Figuur 12 toont het aantal schermuren per dag in de energiezuinige teelt en in de referentieteelt.



Figuur 12. Aantal schermuren per dag.

Het totaal aantal schermuren in de energiezuinige teelt bedraagt 3900 uur voor het onderste (transparante) scherm en 2000 uur voor het bovenscherm. In de referentieteelt waar alleen het transparante energieschermb wordt gebruikt bedraagt het aantal schermuren 3500.

De gewijzigde scherminstallatie en regelstrategie zijn verantwoordelijk voor 4.7 m<sup>3</sup> aardgas besparing. Dit vormt daarmee de belangrijkste factor in de daling van de warmtevraag. Factoranalyse op de twee componenten van het gewijzigde schermgebruik laat zien dat 80% van deze besparing wordt gerealiseerd door de toevoeging van het bovenscherm en 20% (dat is dus bijna 1 m<sup>3</sup> aardgas) voortkomt uit de 400 extra schermuren door de gewijzigde openingstrategie.

## 7.5.5 Lichtverlies

Het gebruik van een tweede scherm en het intensievere gebruik van het transparante scherm en de plaatsing van koelunits bovenin de kas geven een zeker lichtverlies. Voor het extra schermmechaniek wordt een standaard lichtonderschepping van 3% gehanteerd en voor de koelers bovenin de kas wordt 2% aangehouden (gebaseerd op lichttransmissie metingen in de ZoWaKas).

Het gezamenlijk effect van de veranderde plantdatum, de extra constructie-elementen in de kas en het intensievere schermverbruik is een afname van de totale hoeveelheid licht die door het gewas wordt geabsorbeerd met 3.9%. Hiervan wordt het overgrote deel (3.7%) veroorzaakt door de structurele componenten (plantdatum en extra onderscheppende delen) en slechts 0.2% door het intensievere schermgebruik.

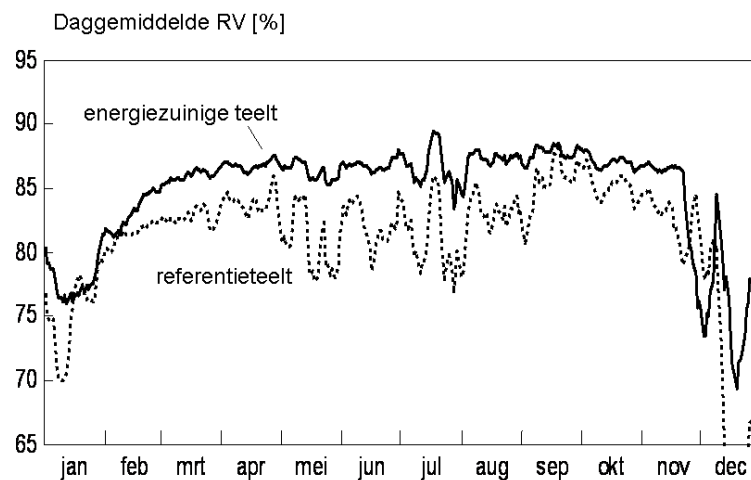
Het hanteren van twee schermen en bovenkoelers is niet gebruikelijk en levert enerzijds enkele procenten extra lichtverlies wat, volgens de bekende licht-productie relaties (1% licht = ca 0.8% productie; Marcelis et al., 2005), zal leiden tot ca 2.5% productieverlies. Het effect van dit lichtverlies wordt naar verwachting goedge maakt door de

eerder beschreven hogere CO<sub>2</sub> waarden in het energiezuinige concept. Deze compensatie is ook minimaal noodzakelijk om de additionele investeringen te kunnen compenseren. De toepassing van het extra scherm in het energiezuinige concept is echter van groot belang voor het halen van de gewenste energiebesparing: meer dan een derde van de totale daling van de warmtevraag hangt hier mee samen.

Naast dit effect van het scherm levert de toepassing ook structureel hogere luchtvochtigheden op.

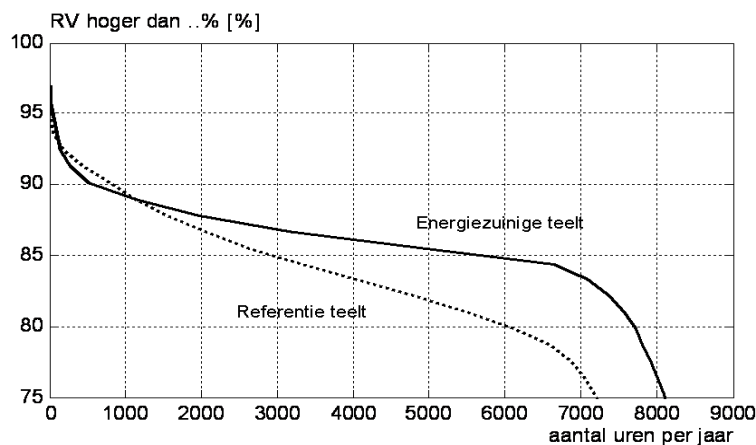
## 7.5.6 Luchtvochtigheid

Het uitgesteld ventileren op vocht, het intensieve gebruik van schermen en het gebruik van verneveling in de zomer leidt tot een gemiddeld hogere RV. Dit komt duidelijk tot uitdrukking in de Figuur 13 waar de daggemiddelde RV is getekend.



Figuur 13. Daggemiddelde RV.

Belangrijker dan de daggemiddelde RV zijn de extreme waarden want RV-beheersing is bedoeld om natslaan te voorkomen en dit is bij uitstek een niet-lineair proces. Een te hoge luchtvochtigheid 's nachts kan dus nauwelijks gecompenseerd worden door een lage luchtvochtigheid overdag. Een zeer geschikte representatie voor de bestudering van de extremen is de jaarbelastingduurkromme.

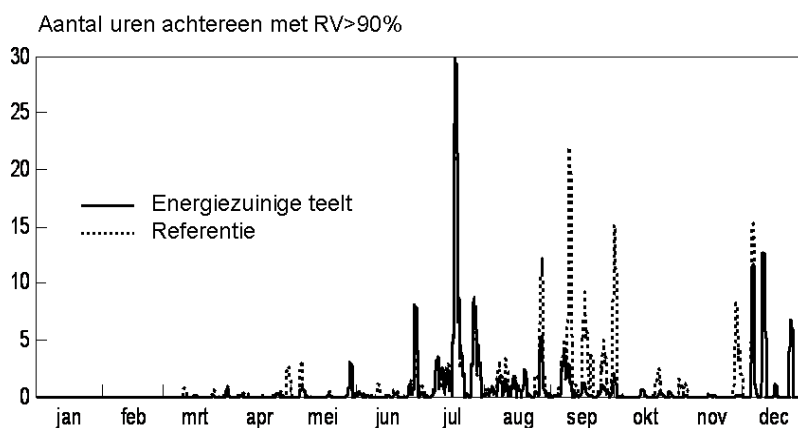


Figuur 14. Aantal uur per jaar met dat RV grens wordt overschreden.

Figuur 14 toont het aantal uren per jaar dat de RV een bepaalde grens overschrijdt. De hogere ligging van de curve voor de energiezuinige teelt laat zien dat de energiezuinige klimaatinstellingen tot een (structureel) hogere luchtvochtigheid leiden. Zo kan uit de grafiek worden afgelezen dat het in de referentiekas 3000 uur vochtiger is dan 85%, terwijl het in de energiezuinige teelt 5500 uur vochtiger is dan 85%.

Extreme omstandigheden met luchtvochtigheden van 90% of hoger komen in de nieuw voorgestelde regeling echter minder vaak voor (500 uur in plaats van 800 uur). De verwachting is dat dit het risico op kwaliteitsproblemen en productiederving door mogelijke schimmelinfecties zal verlagen.

Voor wat betreft de respons van gewassen ten opzichte van luchtvochtigheid is niet allen het extreme niveau van belang bij de beoordeling of er risico's te verwachten zijn, maar ook de tijdsduur van blootstelling aan deze extreme waarden. Om hierover een beeld te vormen is het aantal uren geanalyseerd waarbij de RV continu boven de 90% blijft. Dit staat in Figuur 15 weergegeven.



Figuur 15. Aantal uren  $RV > 90\%$ .

Hieruit blijkt dat het energiezuinige concept, waarin weliswaar een hogere luchtvochtigheid wordt geaccepteerd, maar waarbij er vervolgens feller wordt gelucht, over het gehele jaar genomen tot een vermindering leidt van aaneengesloten periodes waarbij de RV boven de 90% ligt. In het najaar (augustus en september) is het aantal uren achtereenvolgens met een hoge RV systematisch lager dan in de traditionele teeltwijze waarbij minder actief ontvochtigd kan worden. Dit zou mogelijk een positief productie en kwaliteit effect kunnen hebben door de juist in die periode vaak prominent aanwezige problematiek met schimmelinfecties. Een eerste voorzichtige inschatting is dat dit mogelijk tot 1 kg extra productie zou kunnen opleveren. Alleen in begin juli leidt de energiezuinige aanpak tot duidelijk langere aaneengesloten periodes met hoge luchtvochtigheid. Over het integrale productie effect van deze twee verschillende veranderingen is echter onvoldoende kwantitatieve informatie om hierover voldoende onderbouwd uitspraken te kunnen doen.

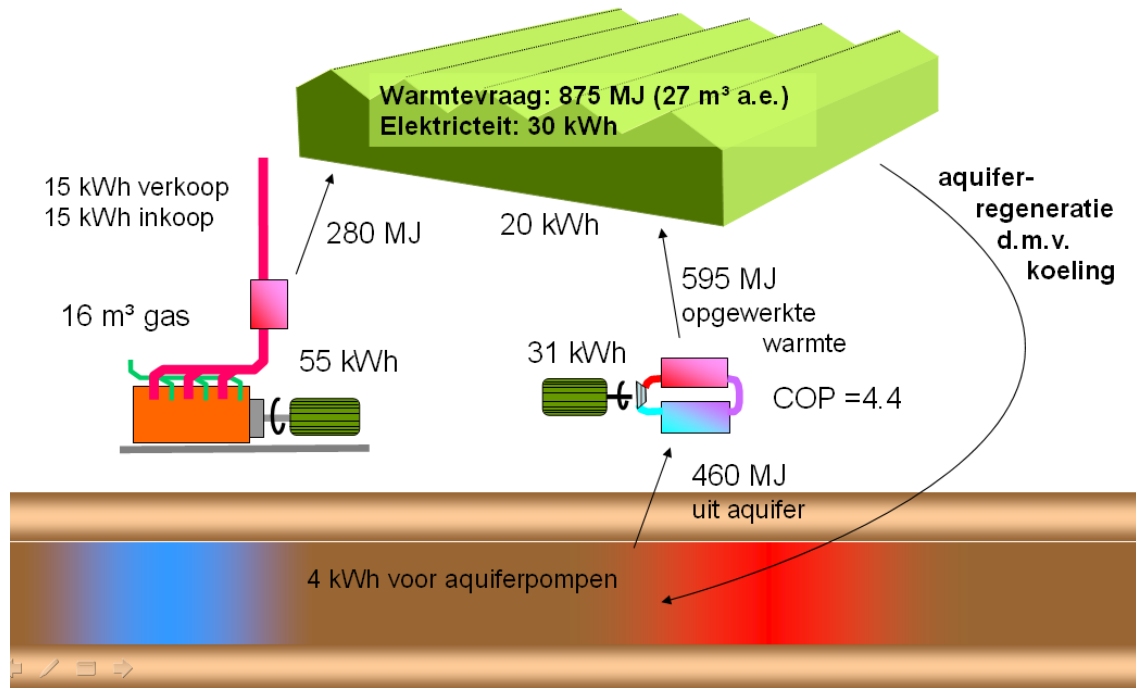
Een factoranalyse op de impact van de acceptatie van een hogere luchtvochtigheid laat zien dat deze goed is voor een verlaging van de warmtevraag met  $2.5 \text{ m}^3$  per  $\text{m}^2$  per jaar.



## 7.5.7 Totaal Energieverbruik

Door het gebruik van de WK en de warmtepomp is in het energiezuinige concept de warmtevraag niet synoniem met het primaire energiegebruik, zoals dat in de ketelgestookte referentie wel het geval is.

Figuur 16 toont de warmte, elektriciteit en gasstromen.



Figuur 16. Energiestromen.

De figuur laat zien dat een groot deel van de warmtevraag van de kas (460 van de 875 MJ) afkomstig is van de zomerse warmteoverschotten die in de aquifer (of in de etmaalbuffer, maar dat niveau van detail is in de figuur weggelaten) waren opgeslagen. Daarmee blijft de aquifer beperkt tot een maximum van ongeveer  $15 \text{ m}^3 \text{ a.e. per m}^2$ . De afvalwarmte van de WKK unit speelt een schijnbaar kleine rol, maar in de winterperiode is het feit dat dit hoogtemperatuur warmte is een belangrijk gegeven. Inkoop en verkoop van elektriciteit is gelijk zodat de kas elektriciteitneutraal is. Het elektriciteitsverbruik van de energiezuinige kas is met 20 kWh behoorlijk groter dan de 5 tot 8 kWh die voor de klimaatbeheersing in de referentie kas nodig is. Dit komt door het substantiële verbruik van ventilatoren voor de warmtewisselaars, koelers en luchtbeweging, en de pompen die de regeneratie van de aquifer mogelijk maken en zorg dragen voor het kunnen verwarmen van de kas met laagwaardige warmte.

De referentiekas heeft een berekende warmtebehoefte van bijna 1300 MJ (dus 48% meer dan de energiezuinige teeltwijze) en heeft voor de invulling van deze warmtevraag een gasverbruik van  $40 \text{ m}^3 \text{ per m}^2 \text{ per jaar}$ .



## 8 Conclusies en aanbevelingen

### 8.1 Productie

In de beschreven geconditioneerde teelt lijkt een productie van 60 kg/m<sup>2</sup> haalbaar bij een inzet van zelfs iets minder dan 20 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> aardas (equivalenten). In het energiezuinige teeltconcept treedt ca. 3.7% lichtverlies op als gevolg van een extra scherminstallatie en bovenkoelers, wat zou kunnen leiden tot ca. 2.5% productieverlies. Dit verlies wordt echter gecompenseerd door de gemiddeld hogere CO<sub>2</sub> concentraties die gerealiseerd worden omdat minder geventileerd wordt. Het feit dat de luchtvochtigheid in het najaar (september) in het energiezuinige concept lager is dan in het traditionele systeem, zou nog positieve effecten kunnen hebben op de productie aan het einde van de teelt.

- **Temperatuur:** De (iets) grotere delta T tussen minimum en maximum temperatuur bij het energiezuinige regime heeft naar verwachting geen consequenties omdat de gemiddelde etmaaltemperatuur op hoofdlijnen gelijk blijft. Om de ondernemers te motiveren voor het hanteren van deze bredere grenzen zal dit echter nader moeten worden aangetoond. In de praktijk wordt de temperatuur voornamelijk gebruikt om de verhouding vegetatieve en generatieve groei te sturen en bij afwijkingen van het traditionele regime is men bang de grip op het gewas te verliezen. Het belang van toepassing van bredere grenzen is echter groot: globaal een kwart van de besparing met het energiezuinige teeltregime is het gevolg van deze aangepaste temperatuurstrategie.
- **Teeltsysteem:** In de teeltbeschrijving worden een aantal veronderstellingen gedaan over mogelijke voordelen van andere plant- en rijafstanden. Hierover bestaat echter nog geen duidelijkheid.
- **Extra scherm:** Het hanteren van twee schermen is in de tomatenteelt niet gebruikelijk en levert enerzijds (in combinatie met de bovenkoelers) enkele procenten extra lichtverlies wat, volgens de bekende licht-productie relaties, zal leiden tot ca 2.5% productieverlies. Het effect van dit lichtverlies wordt naar verwachting goedgemaakt door de hogere CO<sub>2</sub> concentraties in het energiezuinige concept. Deze compensatie is ook minimaal noodzakelijk om de additionele investeringen te kunnen compenseren. De toepassing van het extra scherm in het energiezuinige concept is echter van groot belang voor het halen van de gewenste energiebesparing, meer dan een derde van de totale daling van de warmtevraag hangt hier mee samen. Naast dit effect van het scherm levert de toepassing ook structureel hogere luchtvochtigheden op.
- **Luchtvochtigheid en luchtbeweging:** De toepassing van het extra scherm, de verminderde ventilatie en de luchtbevochtigingen leiden tot structureel hogere luchtvochtigheden. Het hanteren van de hogere luchtvochtigheden draagt substantieel bij aan de verlaging van de energiebehoefte en er is verondersteld dat de extra luchtbeweging in het toegepaste concept het hanteren van hogere gemiddelde RV's zonder extra problemen en gewasrisico's mogelijk maakt. Voor deze veronderstelling zijn echter nog geen kwantitatieve bewijzen. Er blijkt bij ondernemers veel behoefte aan kennis over de effecten van luchtbeweging op ontwikkeling van het gewas, verdamping en hoe watergift hieraan aangepast moet worden. Het effect van luchtbeweging wordt sterk beïnvloed door de temperatuur en luchtvochtigheid van de uitgeblazen lucht en hoe en waar de lucht wordt ingeblazen. Hierover begint het inzicht zich te ontwikkelen, verder inzicht is van groot belang voor het optimaal toepassen van geconditioneerd telen.
- **Luchtvochtigheid:** Het aantal uren achtereenvolgend met een hoge luchtvochtigheid blijft in het energiezuinige concept redelijk beperkt. In de herfst is er zelfs sprake van een daling van de periodes met langdurig hoge RV doordat de koeling en ontvochtiging in staat zijn het vocht effectief af te voeren en te benutten voor de energiewinning. Het minder aantal uren met extreme RV's (vooral in de herfst) zou mogelijk zelfs een positief productie en kwaliteit effect kunnen hebben wat de implementatie van het energiezuinige concept extra aantrekkelijk zou kunnen maken.
- **CO<sub>2</sub>:** Het voordeel van het energiezuinige concept is dat door de verlaagde ventilatie CO<sub>2</sub> concentraties in de kas op niveau gehouden kunnen worden, ook als de hoeveelheid gedoseerd CO<sub>2</sub> afneemt. De productiestijging die gerealiseerd moet worden om de productie op peil te houden en te verhogen en zo geconditioneerd telen economisch interessant te maken, moet voor een groot deel gehaald worden uit een efficiënt gebruik van CO<sub>2</sub>. Rondom CO<sub>2</sub> leven bij telers een aantal denkbeelden, bijvoorbeeld dat de CO<sub>2</sub> concentratie in de kas 's ochtends eerst laag moet zijn, anders doen de planten hun huidmondjes niet open, die mogelijk niet terecht zijn.

Deze hebben echter wel een grote invloed op de wijze waarop zij CO<sub>2</sub> inzetten gedurende de dag. Optimale inzet van 'eigen' CO<sub>2</sub> en zuivere of OCAP CO<sub>2</sub> is in geconditioneerd telen van groot belang.

- **Alternatieve CO<sub>2</sub>** is een essentiële voorwaarde om de hoge productieniveaus te kunnen realiseren bij een sterk verminderde inzet van fossiele brandstoffen. In sommige gebieden is deze door OCAP-CO<sub>2</sub> aanwezig maar in andere gebieden vormt de CO<sub>2</sub>-levering een groot potentieel knelpunt.

## 8.2 Energiebesparing

De bereikte energiebesparing is het gevolg van de combinatie van verminderde warmtevraag in combinatie met een efficiënte opwekking en opslag. Uit de uitgevoerde factoranalyse blijkt dat de grootste dalingen voor wat betreft de warmtevraag het gevolg zijn van de toepassing en besturing van het additionele scherm, gevolgd door de aangepaste temperatuurstrategie, de luchtvochtigheid en de latere start van de teelt.

Door de gedaalde warmtevraag daalt de fossiele energiebehoefte van de verwarmingsketel in totaal van 40 m<sup>3</sup> naar ca 28 m<sup>3</sup> per m<sup>2</sup> en door de inzet van WK/WP en opslag is een daling van de hiervoor benodigde hoeveelheid fossiele brandstof tot 16 m<sup>3</sup> haalbaar. Daarmee wordt dus een totaal besparing gerealiseerd van 60%.

## 8.3 Effecten op het gewas

Het teeltconcept tomaat is doorgenomen op de consequenties van het energiezuinige telen op het gewas. Als achtergrond is de informatie uit de workshops gebruikt, zoals die in een vorig hoofdstuk is beschreven.

Ten opzichte van de praktijk zijn er in het teeltconcept zaken genoemd die tot een lagere productiviteit zullen leiden:

- Langere teeltwisseling (teelt 2 weken korter). Dit zal een iets lagere productie opleveren, is echter niet gekwantificeerd in het rapport.
- Lichtverlies 3,7%, wat overeenkomt met ca 2,5% productieverlies.

Daar tegenover staan zaken die de productie zullen verhogen:

- Minder ventileren met als gevolg hogere CO<sub>2</sub> concentraties. Schatting: compenseert het productieverlies door de 3,7% lichtverlies.
- Lagere RV in najaar waardoor minder uitval door ziekten (botrytis). Voorzichtige schatting: + 1kg.

Daarnaast worden er een aantal instellingen en regelingen genoemd, waarvan de consequenties voor gewasgroei en -productie nog onbekend zijn:

- Gewasstructuur: grotere rijafstanden, beweegbare rijen en gewasdraaien: effecten op LAI, lichtdoordringing, gewasfotosynthese.
- Diffuus glas: effecten op lichtdoordringing in het gewas en gewasfotosynthese.
- NIR folie / scherm: effecten door andere spectrale samenstelling invallend licht.
- Wortelmilieu: worteltemperatuur (in relatie tot temperatuur overige plantdelen), effect door andere voedingsopname?
- Luchtbeweging: effect op horizontale kasklimaat (T en RV) en risico op botrytis onder in het gewas.
- Balans assimilaten aanmaak assimilaten verdeling.
- Verticale temperatuurgradiënt in relatie tot assimilatenverdeling, vrucht afrijping, etc.
- 'Met het licht mee telen': koppeling temperatuursom aan lichtsom.
  - Meer concreet: verlagen stooktemperatuur met 1°C en lichtafhankelijke setpointverhoging van 4°C tussen 100 – 400 W/m<sup>2</sup>.
- Effect snelle afkoeling in de voornacht op assimilaten verdeling en/ of productkwaliteit.
- Plantbelasting strategie in relatie tot assimilaten aanbod (stengels aanhouden; vruchtdunning).
- CO<sub>2</sub> dosering: optimale strategie; wanneer (en waar?) neemt de plant CO<sub>2</sub> op? (Huidmondjes en factoren die de opening ervan beïnvloeden.)
- Consequenties zwaarder schermen op fotosynthese (en groei en productie) op koude sombere dagen.

- Effecten van negatieve DIF in verschillende teeltfasen (voorjaar met lage LAI, volproductieve fase en afbouw-fase in najaar/winter).
- Wat zijn de absolute maxima en minima qua temperatuur, RV en [CO<sub>2</sub>], om welke kritische processen gaat het daarbij?
- In relatie tot CO<sub>2</sub> dosering: risico op gevaarlijke gassen zoals ethyleen en Nox.
- Effect hogere RV (>85%).
  - op gewasmorfologie
  - op gewasverdamping, -groei en -productie?
  - op risico ziekte aantasting? (gevaar natslaan)
  - absoluut nivo
  - gemiddeld nivo (etmaal)
  - totaal aantal uren > 85 / 90%
  - aantal aaneengesloten uren > 85 / 90%
- Andere oorzaak ziekte aantasting: 'natte wonden' (na blad snijden): strategie ten behoeve van wonddroging.
- Langere termijn effecten van momentane (stuur) acties: dynamische simulatie aan de hand van gewasstatus, weersverwachting, verwachte gewasontwikkeling en teeltdoelen.

## 8.4 Opties voor verdere verbetering/ optimalisatie

- Ten aanzien van nog verdere verlaging van de warmtevraag biedt de toepassing van negatieve DIF (hogere nachttemperatuur dan dagtemperatuur) nog perspectieven. Het toepassen van negatieve DIF is energetisch aantrekkelijk wanneer de dagen koud en somber zijn en binnen het project Kijk in de Kas is gebleken dat toepassen van negatieve DIF in 30% van de etmalen een extra energiebesparingpotentie op zal leveren. Een negatieve DIF remt de strekking van stengel en bladeren. Bij een gewas in opbouw leidt dit tot een langzamere toename van LAI, waarvan de gevolgen doorwerken in de periode daarna. Daar moet dus voorzichtig mee omgegaan worden, maar vanaf het moment dat de LAI ca. 3 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> is, biedt DIF mogelijkheden tot energiebesparing. Er zijn echter weinig gegevens over effecten van (negatieve) DIF bij tomaat en nog minder gegevens over de mogelijkheden om de eventuele negatieve effecten te voorkomen (zoals kortdurende belichting met lage intensiteit verrood licht aan het begin van de nacht of midden in de nacht).
- Uitgaande van een mindere besparing van 50% besparing (of 20m<sup>3</sup>) als target en het bereikbare niveau van 16 m<sup>3</sup>, ontstaat in dat geval ruimte voor de inzet van energie voor een verdere optimalisatie van de klimaatbeheersing, additionele CO<sub>2</sub> dosering en daarmee verdere verbetering van de productie en de kwaliteit.
- Een andere optie voor verdere optimalisatie ten aanzien van de productie is de toepassing van diffuus glas waarmee momenteel gunstige resultaten worden geboekt. De verwachte productieverbetering geldt echter ook voor de meer traditionele systemen.
- De energiezuinige en productieoptimale wijze van telen betekent dat er meer op het scherpst van de snede wordt geteeld waarbij directe feedback vanuit het gewas naar de klimaatbesturing nodig is wat zich niet laat vangen in het telen volgens een van te voren vastgelegde blauwdruk. De dynamische optimalisatie vraagt continue beslissingen op basis van weersverwachtingen, de actuele gewasstoestand en de gewasontwikkeling die verwacht mag worden op de korte en langere termijn. Met name de modelbeschrijving en implementatie van gewasprocessen en sensoren die eenvoudig genoeg zijn om in de klimaatregeling ingebouwd te kunnen worden en gelijktijdig compleet genoeg zijn om de diverse aspecten van de teelt te kunnen beschrijven is een essentiële ontbrekende schakel.
- Onderdeel van de hiervoor genoemde besturing is een verdere optimalisatie van de inzet van mechanische koeling in relatie tot de gewasrespons. Mechanische koeling vraagt relatief veel aandrijfenergie per eenheid onttrokken warmte. Als bv als een snelle afkoeling in de voornacht overduidelijke voordelen biedt voor de teelt kan dit nog een additioneel energetisch en teeltkundig voordeel bieden.
- Nog verdere reductie van het energiegebruik vereist in de eerste plaats een nog hogere isolatiegraad van de kas waarbij het dilemma energiebesparing ten opzichte van lichtvermindering nog prominenter wordt. De combinatie van hoge isolatiegraad en hoge lichttransmissie is een materiaaleigenschap die redelijk specifiek is voor de glastuinbouw en uitermate belangrijk om verdere stappen te zetten in verlaging van de warmtevraag en in combinatie met optimale klimaatsturing en efficiënte aandrijving in verdere verlaging van het energiegebruik.

- Bij het ontwerp van semigesloten kassen moeten keuzes worden gemaakt over de capaciteiten van alle gereedschappen zoals die in hoofdstuk 3 worden beschreven in samenhang met het doel dat de ondernemer voor ogen heeft. Deze keuzes worden tot nu nog teveel intuïtief gemaakt terwijl zij zowel de investeringskosten als de efficiency (zowel operationele kosten als opbrengsten) van het gehele systeem bepalen.

## 8.5 Stapsgewijze toepassing in traditionele systemen

Het beschreven teeltconcept vereist diverse investeringen in de hardware van de kas zoals de aanleg van diverse warmtewisselaars, koelers en een extra scherm. Bij de diverse in de praktijk aanwezige (semi) gesloten systemen zijn niet alle componenten in de hier, als toekomstbeeld geschetste, configuratie, aanwezig. Veel ondernemers hebben vooralsnog helemaal geen vergelijkbare configuratie maar een meer traditioneel systeem met al dan niet een WKK voor de warmte en CO<sub>2</sub> voorziening.

Een aantal elementen (modules) uit het beschreven concept kunnen echter ook al (stapsgewijs) worden geïmplementeerd in de meer traditionele systemen om te komen tot energiebesparing. Als meest logische volgorde voor deze maatregelen kan worden uitgegaan van:

### *Later planten*

De belangrijkste mogelijkheid die direct voor traditionele kassen toepasbaar is de verschuiving van de plantdatum en verkorting van het teeltseizoen. Deze maatregel levert een energiebesparing van ongeveer 2.5 m<sup>3</sup> per m<sup>2</sup> per jaar en nauwelijks vermindering van de productie.

### *Temperatuur regeling aanpassen*

Ook het veranderen van het temperatuurcriterium waarboven het scherm mag openlopen zal in de gangbare teelt tot besparingen in de orde van 1 m<sup>3</sup> per m<sup>2</sup> per jaar kunnen leiden, waarbij het productieverlies eveneens zeer beperkt blijft (ongeveer 0.2%).

### *Hogere vochtigheden toestaan*

De acceptatie van hogere luchtvochtigheden is voor traditionele systemen mogelijk, maar moet in kassen met een beperkte grip op de horizontale temperatuurverdeling wel als risicovol worden bestempeld, combinatie met lucht-circulatie.

### *Bevochtiging installeren*

Deze relatief geringe investering vragende toevoeging biedt goede perspectieven om de ventilatiebehoefte te verminderen en daarmee via de hogere CO<sub>2</sub> niveaus op productiewinst.

Luchtcirculatiesysteem installeren (in geval van slurven later uit te breiden met wisselaars).

Het verbeteren van de luchtbeweging zal naar verwachting het aanhouden van (nog) hogere luchtvochtigheden mogelijk maken.

### *Extra scherm*

Het plaatsen van een tweede scherm, waarmee de grootste besparing kan worden gerealiseerd is eveneens een maatregel met relatief beperkte investeringen (vooral bij nieuwbouw), maar toegepast zonder de productievoordelen van de semigesloten kas kan het extra lichtverlies tot een productiedaling van ongeveer 2% leiden. Bij de aanwezigheid van een bestaand scherm is uiteraard winst te boeken door de criteria voor openen en sluiten aan te passen conform de instellingen zoals gehanteerd in het beschreven energiezuinige concept. Het aantal schermuren zal daarmee toenemen.

### *Wisselaars/ koelers bovenin en WKK+WP/ aquifer*

De laatste en meeste investering vereisende stap is de installatie van de volledige warmtewisselaars, koelsystemen en de WKK/WP in combinatie met de aquifer. Daarmee wordt uiteindelijk de grootste stap gezet waarmee ook de uiteindelijk gewenste energiebesparing gehaald kan worden.

# Literatuur

- Brand, R.A. et al., 2008.  
Alternatieven voor seizoensopslag in de glastuinbouw. Rapport 2008-A-R0745/B. TNO Bouw en ondergrond, Apeldoorn.
- Buwalda, F. et al., 2008.  
Energiezuinig sturen bij paprika. Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen. In voorbereiding.
- Dieleman, A. et al., 2007.  
Wanneer planten, wanneer een teelt beëindigen? : effecten van start- en eindtijdstip van de teelt van komkommer, paprika en tomaat op productie en energiegebruik. Nota 464. Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen.
- Poot, E.H. & J.C. Bakker, 2007.  
Versnellingsprogramma stimulering implementatie semigesloten kas. Inclusief bijlagen. Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk.
- Vegter, B., 2008.  
Voor- en nadelen aardwarmte tekenen zich af. Groenten&Fruit 25, p.20-21.
- Velden, N. & P. Smit, 2008.  
Tussenrapportage Energiemonitor Glastuinbouw 2008. LEI, Den Haag.
- Vermeulen, P. (red), 2008.  
Kwantitatieve Informatie voor de Glastuinbouw 2008. Rapport 185. Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk.
- Zwart, H.F. de, 1996.  
Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. PhD Thesis. Wageningen.





# Bijlage I.

## Setpoint beschrijving

**Plantdatum:**

Week 50 in referentieteelt en week 1 in energiezuinige teelt.

**Ruimdatum:**

Week 47 in referentieteelt en week 48 in energiezuinige teelt.

**Bedrijfsoppervlak:**

4 ha.

**Maatvoering:**

Kapmaat: 5 meter, vakmaat: 9.6 meter.

**Dekmateriaal:**

Enkel glas.

**Verwarmingssysteem:**

Een ondernet van 12 51-ers per 9.60 meter kap en 6 buizen van 28 mm per 9.60 in het bovennet.

**Verwarmingsvermogen:**

120 W/m<sup>2</sup> in de referentie, 100 W/m<sup>2</sup> in energiezuinige teelt.

**Kasklimaat setpoints:**

In de referentieteelt wordt vanaf de plantdatum wordt 20 °C overdag, 16 °C in de voornacht en 18 °C in de nanacht (dat is vanaf 23:00) aangehouden. In de energiezuinige teelt zijn de temperaturen 's nachts gelijk, maar is de basis stooktemperatuur overdag naar 18.5 °C teruggebracht. Deze basis stooktemperatuur overdag wordt in de energiezuinige teelt echter met 4 °C verhoogd (over een traject van 100 tot 400 W/m<sup>2</sup> buitenstraling), waar deze in de referentieteelt slechts 1.5 °C wordt verhoogd. Op een sombere dag ligt de stooklijn overdag dus 1.5 °C lager, maar op een heldere dag ligt die een graad hoger.

Vanaf maart wordt in de referentie gestookt met 19 °C overdag, 15 °C voornacht en 17 °C nanacht. In de energiezuinige teelt zijn deze temperatuurniveaus respectievelijk 17 °C, 14.5 °C en 16.5 °C.

Aangezien de bovenbeschreven setpoints voor de energiezuinige teelt in het najaar in een te lage etmaaltemperatuur ten opzichte van de referentieteelt resulteren worden vanaf 1 september alle drie de temperatuurniveaus weer een halve graad verhoogd.

De ventilatielijn staat in de referentie en in de energiezuinige teelt in de winter 3 °C boven de stooklijn. In de referentieteelt wordt deze half maart teruggebracht naar 0.5 °C, maar in de energiezuinige teelt wordt vanaf half maart 2 °C aangehouden. Dit om onverhoeds afluchten van gratis zonnewarmte te voorkomen en CO<sub>2</sub> verlies te beperken.

**Minimumbuis:**

Er wordt in beide teelten spaarzaam gebruik gemaakt van minimumbuis. Rond zonsopkomst wordt 40 °C aangehouden en overdag wordt 50 °C aangehouden die echter al in het traject van 100 naar 250 W/m<sup>2</sup> wordt afgebouwd. Vanaf zonsondergang tot de volgende ochtend is de minimumbuit 30 °C.

**Dode Zone ventilatie:**

De ramen worden in de winter pas geopend als de kasluchttemperatuur 3 °C boven de stooktemperatuur ligt. Vanaf februari wordt de ventilatielijn dicht op de stooklijn gelegd, namelijk 1 °C erboven. Vanaf maart wordt nog intensiever gelucht met een ventilatielijn die 0.5 °C boven de stooklijn ligt. De ramen lopen dan open met 20% per graad overschrijding.

**Luchtvochtigheid:**

De referentiekas ventileert op vocht bij een luchtvochtigheid groter dan 80%. Bij buitentemperaturen onder de 5 °C worden de ramen bij vochtoverschrijding 2% per procent geopend. Is het buiten warmer dan 12 °C dan is de versterkingsfactor voor de raamopening op vocht 4% per procent RV overschrijding. Bij tussenliggende buitentemperaturen wordt deze versterkingsfactor lineair aangepast.

In de energiezuinige kas wordt pas geventileerd bij 85%, maar de regelactie is 3 maal zo sterk.

**CO<sub>2</sub>:**

Overdag wordt het beschikbare rookgas CO<sub>2</sub> gedoseerd tot een maximum concentratie van 900 ppm. Onder lichtrijke omstandigheden zal deze concentratie in de regel bij lange na niet gerealiseerd kunnen worden. In dat geval wordt door middel van het carbonomic algoritme berekend of het winstgevend is om zuivere CO<sub>2</sub> in te zetten. Blijkt dat het geval dan wordt er maximaal 150 kg per ha per uur additioneel gedoseerd. Overigens is het bij een kostprijs van 15 cent per kg niet meer dan 1000 uur per jaar economisch verantwoord om (enige) zuivere te doseren en de maximale capaciteit wordt slechts 100 uur per jaar ingezet.

**Schermb:**

Er wordt gebruik gemaakt van een transparant scherm (SLS10-ultra-plus). Het scherm wordt gesloten als het buiten kouder is dan 12 °C. Het opencriterium voor dit transparante scherm verschilt in de energiezuinige teelt ten opzichte van de referentieteelt (zie hoofdstuk 4).

Naast dit transparante scherm is de energiezuinige kas uitgerust met een tweede scherm (80% aluminium bandjes, 20% transparant bandje). Dit tweede scherm wordt gesloten als het buiten kouder is dan 8 °C. Een schermkier regeling regelt de luchtvochtigheid onder het scherm.

# Bijlage II.

## Workshops

### Workshop 1

Born Zuid Wageningen, 20 maart 2008

#### Deelnemers

Arie de Gelder

Jan Janse

Peter van Weel

Marcel Raaphorst

Feije de Zwart

Filip van Noort

Anja Dieleman

Chris Blok

Jouke Campen

Leo Marcelis

Ep Heuvelink

Eric Poot (organisatie)

Daan Kuiper \* (organisatie)

*(Allen vertegenwoordigers van Wageningen UR Glastuinbouw, m.u.v. \* CropEye)*

#### Programma

08.00	Welkom & inleiding	Eric Poot
	Presentatie ervaringen uit uitgevoerd onderzoek	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Glasgroenten</li> <li>• Potplanten</li> <li>• Snijbloemen</li> </ul>	Arie de Gelder & Jan Janse Feije de Zwart & Filip van Noort Peter van Weel & Marcel Raaphorst
	Reflectie op inleidingen vanuit expertisevelden:	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Koeling en kasklimaat</li> <li>• Fotosynthese en droge stof allocatie</li> <li>• Verdamping, verneveling en adiabatische koeling</li> <li>• Wortels en nutriënten</li> <li>• Microklimaat</li> <li>• Integratie op plant- en gewasniveau</li> </ul>	Arie de Gelder Anja Dieleman Peter van Weel Chris Blok Jouke Campen Ep Heuvelink & Leo Marcelis
	Plenaire discussie:	o.l.v. Daan Kuiper
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beeld over functioneren van het gewas in (semi) gesloten kassystemen</li> <li>• Identificatie van kennisvragen</li> </ul>	
12.30	Afsluiting	

## Workshop 2

Forumgebouw Wageningen, 2 april 2008

### Deelnemers

Luit de Kok - University of Groningen  
Rens Voesenek - Utrecht University  
Ronald Pierik - Utrecht University  
Hendrik Poorter - Utrecht University  
Carl-Otto Ottosen - Danish Institute for Agricultural Science  
Kris Goen - Proefcentrum Hoogstraten, België  
Frank Millenaar - De Ruiter Seeds  
Ad de koning - Hortimax  
Olaf van Kooten - Wageningen University  
Dick Vreugdenhil - Wageningen University  
Leo Marcelis - Wageningen UR Greenhouse Horticulture  
Anja Dieleman - Wageningen UR Greenhouse Horticulture  
Arie de Gelder - Wageningen UR Greenhouse Horticulture  
Fokke Buwalda - Wageningen UR Greenhouse Horticulture  
Theo Gieling - Wageningen UR Greenhouse Horticulture  
Eric Poot - Wageningen UR Greenhouse Horticulture, organisatie  
Daan Kuiper - CropEye, organisatie

### Programma

09.30	Welcome & introduction	Eric Poot
	Climate in semi-closed greenhouses: monitoring&control	Theo Gieling
	Research on growth in (semi) closed greenhouses	Arie de Gelder
	<i>Discussion</i>	
	Focus on the plant: state-of-the-art & research topics	Daan Kuiper
	<i>Discussion</i>	
	Potential yield & gap analysis	Leo Marcelis
	<i>Discussion</i>	
12.30	Lunch	
13.10	Intermezzo: Energy transition in the greenhouse industry	Sjaak Bakker
	<i>Discussion in groups</i>	
	Pause	
	<i>Feedback &amp; discussion</i>	
	<i>Synthesis: scenario building</i>	
17.00	Closing	Eric Poot en Daan Kuiper

## Bijlage III.

### Uitkomsten workshops

Uitkomsten workshops

Richtinggevend beeld energiezuinig telen


Eric Poot & Daan Kuiper



WAGENINGEN 


Uitgevoerd onderzoek (Bron: A. de Gelder)

2002	Tomaat PPO-Naaldwijk	Floriade Kas van de Toekomst			
2003					
2004	Tomaat Themato		Luchtcirculatie deel 1 - Literatuur en Klimaatkamer		
2005	Tomaat Themato	Tomaat msbenwarming Themato	Luchtcirculatie deel 2 - Tomaat kasexperiment PPO-Naaldwijk		
2006	Paprika Themato				
2007	Paprika IC	Komkommer WUR	Chrysant-bloei vertraging	Tomaat Bio-Optimaal Van Schie	Potplanten Energie producerende kas-Bergerden
2008	Paprika WUR IC	Tomaat WUR	Komkommer IC		

WAGENINGEN 


Aandacht voor semigesloten telen legitiem

- Meer stuurmogelijkheden, gericht sturen op:
  - Productie
  - Productkwaliteit
  - Timing
  - Duurzaamheid
- Bloemisterij: kwaliteit & timing
- Groente: (te) veel focus op productie
- Kennisontwikkeling ten dienste van deze doelen

WAGENINGEN 


Transitiemanagement

- Het energietransitie management in de glastuinbouw is sterk gericht op communicatie en subsidiëring van dure technieken zoals aquifers
- Techniek moet volgend zijn op de mogelijkheden van het gewas
- Co-innovatie tussen teeltmanagers, fysiologen, veredelaars en technuten
- Benut brede know-how plantfysiologie in NL vaker

WAGENINGEN 


Teeltdoelen

- Energiebesparing in % en productieverhoging in % zijn beperkte en lastige begrippen
  - Referentie verschuift!
  - Absolute indicatoren voor E-verbruik en productiewinst: netto energiecijfer en marge per unit product
- Meer dan 75 kg tomaten kan in NL kan wel, maar alleen met kunstmatige belichting
  - Staat dus op gespannen voet met E-besparing

WAGENINGEN 

Potenties gewas

- Tomaat: 110 kg / m<sup>2</sup> moet haalbaar zijn
- Veel CO<sub>2</sub> (1000 ppm), veel licht, hoge temperatuur (28°C) en optimale RV (65-85%) / VPD
- Optimale temperatuurverhouding sources – sinks verschillende plantorganen
- Optimale temperatuurverhouding wortelzone – bovengronds
- Luchtkwaliteit: voorkom negatieve invloed schadelijke gassen; interacties tussen gassen (bv CO<sub>2</sub> en ethyleen)

WAGENINGEN 

### Huidmondjes & fotosynthese: vocht & temperatuur

- Fotosynthesesnelheid wordt niet bepaald door de openingstoestand van huidmondjes (in normale situaties: bij licht en geen waterstress)
- Grenslaagweerstand is niet beperkend
- Vernevelen: stomata's gaan (verder) open (VPD afhankelijk). Als er al een effect is op de assimilatie, dan is het positief
- Vernevelen beïnvloedt netto assimilatie via bladtemperatuur

### Temperatuur en fotosynthese

- Temperatuursettings voor fotosynthese behoeven nader onderzoek dosis-respons curves
  - Vb: is 30°C gedurende 5 dagen ok? En bij 14 dagen? Afhankelijk van compensaties e.d.
- Temperatuur gelimiteerd door conditie stuifmeelcellen (30°C)
- Aandachtspunten voor veredeling!

### CO<sub>2</sub>

- Indien de [CO<sub>2</sub>] stijgt van 330 naar 1000 ppm, dan sluiten de huidmondjes deels
  - Geen consequenties voor beschikbaarheid CO<sub>2</sub> t.b.v. fotosynthese! [CO<sub>2</sub>] is niet beperkend
  - Wel invloed op de verdamping
  - Risico's op stress situaties
  - Huidmondjesopening meten zinnig om stress te signaleren
  - Regeling op huidmondjesopening als er geen stress is lijkt niet zinvol

### Teveel CO<sub>2</sub>

- Aanbod van veel CO<sub>2</sub> in de winter (weinig licht) is onzin en kan nadelig zijn voor het gewas
  - Huidmondjes meer dicht: in de regel minder verdamping
  - Groter risico op schadelijke stoffen in de lucht (Ethyleen, NO<sub>x</sub>, etc.)

### Source - sink

- Veel licht & veel CO<sub>2</sub> > hogere fotosynthese > meer droge stof
- Nuttig gebruiken, anders niet structurele carbohydraten en negatieve feed-back op fotosynthese
- Vergroting sink capaciteit door meer stengels = meer vruchten en verhoging sink activiteit door hogere T
- Verhouding T sink (vrucht) en T source (blad) van belang
  - Bepalen optima: experiment temperatuurgradient (+waterrelaties)

### Luchtcirculatie

- Luchtcirculatie op zich geen invloed op fotosynthese
- Wel invloed op verdamping:
  - bij schaars wateraanbod mogelijk problemen, o.a. risico op bladafwijking
- Invloed op temperatuur verdeling
- Ophoping schadelijke gassen tegengaan
- Uitvinden juiste richting en intensiteit

### Bovengronds - Ondergronds

- Kleiner blad -> minder fotosynthese capaciteit
- Morfologische afwijking, onvoldoende strekking op kritisch moment in celontwikkeling
- Aannemelijk: onvoldoende waterpotentiaal
- Mogelijk door onvoldoende wortelactiviteit door lage wortel temperatuur-> minder cytokinine activiteit
- Algemeen: zeer weinig bekend over invloed wortelfysiologie

### Morfologie

- Zonneblad of schaduwblad: bepaalt capaciteit
  - Dunnere bladeren bepalen doordringdiepte van licht in gewas
  - Kleur zou kunnen sturen aan vorming blad
  - Temperatuur effecten zijn te manipuleren
- Wat kan er worden aangepast
  - Cuticula, chlorophyl, aantal stomata, fysiologie stomata
- Plant functioneert beter bij lichtwisselingen
  - Structuur blad, PS I, PS II, antenna

### Dynamiek

- Instellingen (bijv. naar hogere T) afhankelijk stellen van E-bron
- Te snelle veranderingen zijn niet **gewenst**
- Fluctueren met buitenklimaat
  - Voordeel: energie efficiënter
  - Voordeel: fysiologische sturing
  - Timing / planning moeilijker
  - Kennis van integralen van T, licht etc. moet preciezer
- Voor- en najaar: minder licht
  - Seizoensafhankelijke LAI (wanneer wordt bladlaag van source sink)
- Voor of na de kortste dag
  - Verschil in fotosynthese capaciteit blad (beïnvloed door lichtniveau tijdens aanleg)

