

59762332-TOS/MEC 07-9022

Ingrediënten voor een energieneutrale belichte glastuinbouw in 2020

Position Paper Licht

Arnhem, 27 maart 2007

Auteurs :

J.A.F de Ruijter, KEMA Technical & Operational Services

L.F.M. Marcelis, Wageningen UR Glastuinbouw

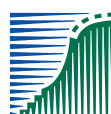
M. Schreurs, KEMA Technical & Operational Services



In opdracht van Productschap Tuinbouw



en Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit



**landbouw, natuur en
voedselkwaliteit**

auteur : J.A.F. de Ruijter

07-03-

beoordeeld : C.A.M. van den Ende 07-03-

B 110 blz.

6 bijl.

GvW

goedgekeurd : A.G.L. Zeijseink 07-03-



© KEMA Nederland B.V., Arnhem, Nederland. Alle rechten voorbehouden.

Het is verboden om dit document op enige manier te wijzigen, het opsplitsen in delen daarbij inbegrepen. In geval van afwijkingen tussen een elektronische versie (bijv. een PDF bestand) en de originele door KEMA verstrekte papieren versie, prevaleert laatstgenoemde.

KEMA Nederland B.V. en/of de met haar gelieerde maatschappijen zijn niet aansprakelijk voor enige directe, indirecte, bijkomstige of gevolgschade ontstaan door of bij het gebruik van de informatie of gegevens uit dit document, of door de onmogelijkheid die informatie of gegevens te gebruiken.

De inhoud van dit rapport mag slechts als één geheel aan derden kenbaar worden gemaakt, voorzien van bovengenoemde aanduidingen met betrekking tot auteursrechten, aansprakelijkheid, aanpassingen en rechtsgeldigheid.

INHOUD

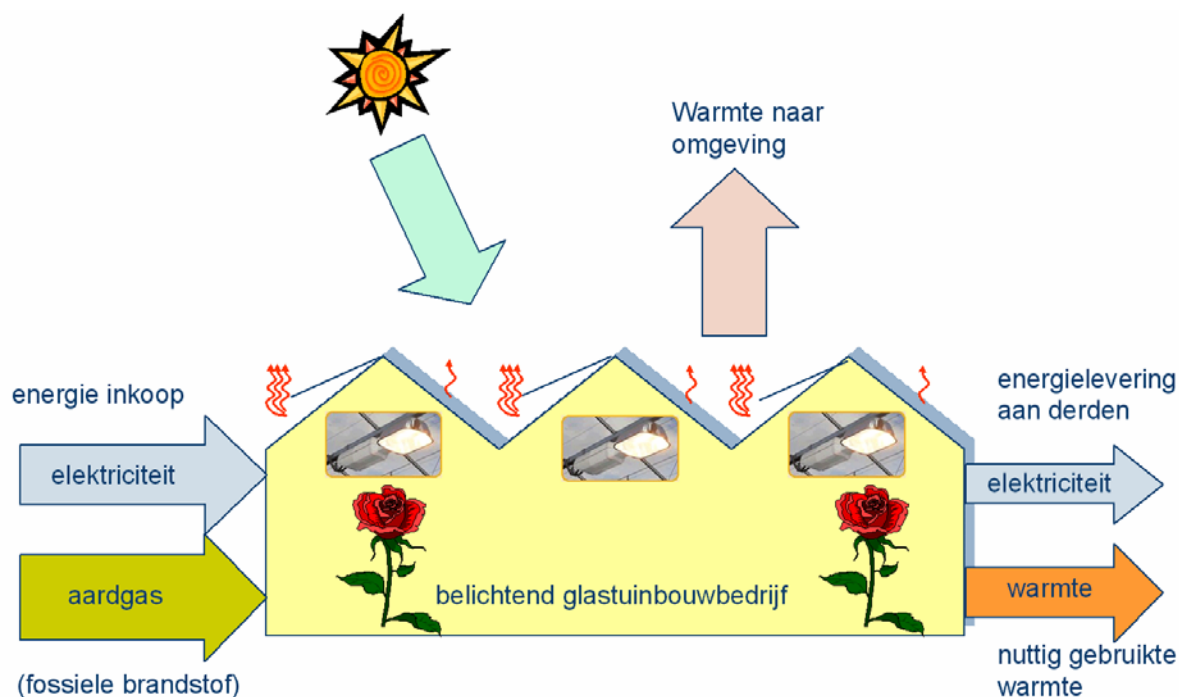
	blz.
SAMENVATTING	5
VERKLARENDE LIJST VAN AFKORTINGEN	9
1 Inleiding	10
1.1 Energieneutraliteit.....	11
1.2 Areaal 2020	13
1.3 Oplossingsrichtingen energieneutraliteit.....	17
2 Status 2006.....	18
2.1 Technisch	18
2.2 Teelttechnisch.....	27
3 Energiehuishouding	28
3.1 Simulatieberekeningen ter verkenning van perspectief technische ontwikkelingen c.q. maatregelen in 2020	28
3.2 Energetisch effect maatregelen / ontwikkelingen	32
3.3 Conclusies energiehuishouding versus energieneutraal	46
4 Ontwikkelingen van 2006 tot 2020.....	48
4.1 Technisch	48
4.2 Teelttechnisch.....	52
4.3 Overbruggen gat tussen 2006 en 2020	60
5 Transitiepaden	63
5.1 Lichtbenutting	64
5.2 Lichtopwekking	64
5.3 Elektriciteitsopwekking.....	68
5.4 Warmtelevering.....	70
5.5 Biobrandstoffen.....	72
6 Conclusies & aanbevelingen	73
6.1 Conclusies	73
6.2 Aanbevelingen	77
LITERATUUR.....	79

blz.

Bijlage A	Specificatie energieneutraal	82
Bijlage B	Uitgangspunten energieberekeningen	88
Bijlage C	Kasklimaat modelteelten.....	96
Bijlage D	Aandachtspunten brandstofcel-warmtekrachtenheden	100
Bijlage E	Klimaatreferentiejaar.....	101
Bijlage F	Resultaten modelberekeningen	105

SAMENVATTING

De belichte glastuinbouw in Nederland staat bekend als een grootverbruiker van energie. De glastuinbouwsector heeft echter de ambitie geformuleerd dat in 2020, in nieuw te bouwen kassen, vrijwel energieneutraal geteeld kan worden. Die ambitie geldt ook voor de belichte glastuinbouw. Een kas (of glastuinbouwbedrijf) is energieneutraal als er op jaarbasis netto geen fossiele primaire energie wordt verbruikt. Dat wil zeggen dat de kas (minimaal) evenveel benutbare energie exporteert als deze aan primaire (fossiele) energie importeert.



Figuur S.1 Schematische voorstelling van een belichtend glastuinbouwbedrijf met de belangrijkste intredende en uitredende energiestromen

Aangezien iedere teelt zijn eigen belichtingstrategie heeft, maar het behandelen van alle teelten veel te complex is, worden de gewassen verdeeld in drie gewasgroepen op basis van lichtsom:

- 130 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bij 4000 uur (zoals roos)
- 160 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bij 2500 uur (zoals tomaat)
- 75 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bij 2500 uur (zoals chrysant, gerbera, potplanten).

Om in 2020 daadwerkelijk een energieneutrale belichte glastuinbouw te bewerkstelligen zijn de volgende oplossingsroutes mogelijk:

- reduceren van de energievraag (bijvoorbeeld door efficiëntere belichting)
- inkopen van 100% duurzame energie (bijvoorbeeld bio-olie, biogas en/of duurzame elektriciteit)
- zelf duurzame energie produceren (bijvoorbeeld duurzame zonnewarmte oogsten) en deze zelf of bij derden gebruiken
- overtollige, nuttige warmte leveren aan derden
- efficiëntere opwekking van elektriciteit.

De status van verschillende ontwikkelingen die aan een energieneutrale belichte glastuinbouw kunnen bijdragen zijn verkend en een schatting van de status van deze ontwikkelingen in 2020 is gemaakt. De verschillende ontwikkelingen die in beschouwing zijn genomen zijn:

- benutting van licht door plant
- opwekking van groeilicht
- opwekking van elektriciteit
- warmtelevering
- biobrandstoffen.

Een *betere benutting van licht* kan potentieel leiden tot de volgende reducties in het energieverbruik:

- 10-15% door betere timing van belichting
- 10-15% door betere plaatsing van belichting en lichtonderschepping door het gewas
- 10-15% door aanpassingen in de lichtkleur
- 10% door onderlinge afstemming van de belichting met andere teeltfactoren.

De effecten van de (energie)technische ontwikkelingen op de energiehuishouding voor de drie gewasgroepen zijn bepaald middels rekenmodellen. Uit de analyses volgt dat **energie neutrale belichte glastuinbouw in 2020 mogelijk** is.

Efficiëntere belichtingssystemen (met een systeemrendement van 44,4%) leiden tot een reductie op het netto primair energieverbruik van circa:

- 38 tot 26% bij de belichte tomaat (bij $\eta_{WK}=70\%$)
- 4 tot 10% bij de belichte roos (bij $\eta_{WK}=70\%$)
- 20 à 21% bij de belichte roos (bij $\eta_{WK}=42,5\%$)

bij een gemiddeld centrale rendement van 45% respectievelijk 70%.

Warmtekrachtinstallaties met een hoger elektrisch rendement (doel 2020: 70%) leiden tot een reductie van het netto primaire energieverbruik van circa:

- 47-39% bij de belichte roos (bij centralerendementen van 45 -70%)
- 20-13% bij de belichte tomaat (bij centralerendementen van 45 -70%).

Levering van overtollige warmte aan derden is ook een goede maatregel om het primaire energieverbruik van het belichtende bedrijf te reduceren. Leveren van warmte van 1 ha belichte teelt aan 1 ha onbelichte (tomaten)teelt bespaart circa:

- 25-20% bij belichte roos (bij centralerendementen van 45-70%)
- 21-11% bij belichte tomaat (bij centralerendementen van 45-70%).

De overtollige warmte kan in principe ook buiten de sector worden geleverd, bijvoorbeeld aan utiliteitsbouw, gezondheidsinstellingen of woningbouw. Met het warmteoverschot van één ha belichte tomatenteelt met circa 2500 belichtingsuren met $160 \mu\text{mol/s/m}^2$ en een eigen WK-installatie (met een elektrisch rendement van 42,5%) kunnen in beginsel circa 250 vrijstaande nieuwbouwwoningen worden verwarmd.

Extra elektriciteit produceren met een 'grotere' WK (warmtekracht installatie) dan nodig voor de elektriciteitsvraag voor belichting *en terugleveren van het overschot aan het net samen met de levering van de overtollige warmte* aan derden, kan – afhankelijk van het gemiddelde centralerendement - een forse reductie van het primaire energieverbruik opleveren (bij een WK-installatie met een rendement van 70% tussen 200% en 20% bij een centralerendement tussen 45% en 70%).

De meest robuuste en effectieve oplossing voor een reductie van het netto primaire energieverbruik is de *toepassing van warmtekrachtinstallaties met een hoger elektrisch omzettingsrendement*, gevolgd door *warmtelevering* aan een niet-belichtend bedrijf en *efficiëntere belichtingssystemen*.

Uitgaande van een belichtend rozen- respectievelijk tomatenbedrijf met een eigen WK-installatie, (deels) op biobrandstof, met een elektrisch rendement van 70%, een belichtingssysteemrendement van 44,4%, met gebruikmaking van de WK-rookgassen voor CO₂-bemesting en met elektriciteitsteruglevering (gedurende circa 2600 respectievelijk 3000 uur), maar zonder externe warmtelevering, is op jaarbasis circa 415 respectievelijk 335 ton/ha vloeibare biobrandstof (≈ 11 tot 9 tankauto's van 40 m³) nodig, om het bedrijf energieneutraal te maken (dit correspondeert met circa 61% respectievelijk 46% van het totaal benodigde brandstofverbruik). In deze situatie is er op het bedrijf (nagenoeg) geen warmteoverschot meer. Bij doorzetting van de historische groei van het areaal belichte teelt en grootschalige

implementatie van de genoemde systemen is in dit scenario naar verwachting import van biobrandstof noodzakelijk.

Kortom energieneutrale belichte glastuinbouw is mogelijk, maar hiervoor zijn wel investeringen noodzakelijk in zowel onderzoek, implementatie van technologieën en infrastructurele aspecten. Een aantal ontwikkelingen verlopen autonoom (bijvoorbeeld verbetering van WK-installaties, betere lichtbronnen) en vergen beperkte additionele inspanning van de sector. Bepaalde ontwikkelingen / kennis is specifiek voor de sector (bijvoorbeeld benutbaarheid van rookgassen van bio-WK-installaties voor CO₂-bemesting, LED-assimilatiebelichtingssystemen, en dergelijke) en dienen actief gestimuleerd te worden. Zowel deze ontwikkelaspecten op sectorniveau als het daadwerkelijk toepassen van reductiemaatregelen op bedrijfsniveau voor een energieneutrale energiehuishouding vergen investeringen vanuit de sector.

VERKLARENDE LIJST VAN AFKORTINGEN

WK	WarmteKracht installatie
PAR	Photosynthetic Active Radiation
LED	Light Emitting Diode
OLED	Organic Light Emitting Diode
HD-natrium	HogeDruk natriumlamp
ORC	Organic Rankine Cycle
BC	Brandstofcel
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
PPO	Pure Plantaardige Olie
PE	Primair Energieverbruik
NPE	Netto Primair Energieverbruik
LAI	Leaf Area Index
NFCRC	National Fuel Cell Research Center
EPC	Energie Prestatie Coëfficiënt
BCWK	BrandstofCel-WarmteKrachtinstallatie

1 INLEIDING

Momenteel gebruikt de belichte glastuinbouw relatief veel energie en in veel gevallen zelfs veel meer dan volgens de energienorm van het Besluit glastuinbouw is toegestaan. De glastuinbouwsector heeft echter de ambitie geformuleerd dat in 2020, in nieuw te bouwen kassen, vrijwel energieneutraal geteeld kan worden. Die ambitie geldt ook voor de belichte glastuinbouw. Productschap Tuinbouw en het ministerie van LNV hebben KEMA en WUR Glastuinbouw gevraagd om een studie te doen naar hoe de belichte glastuinbouw in 2020 energieneutraal kan zijn. Voor deze studie is een responsgroep, bestaande uit telers, beleidsmakers, (belichtings)industrie en ontwikkelaars opgericht. Vanaf het begin van het project zijn de ontwikkelingen en transitiepaden aan deze groep voorgelegd tijdens bijeenkomsten en zijn gezamenlijk keuzes gemaakt. In dit rapport wordt een beschrijving van ontwikkelingen gegeven die kunnen bijdragen aan energieneutraliteit. Hierbij wordt de huidige status gegeven, de verwachte ontwikkelingen en het effect van ontwikkelingen op de energiehuishouding voor verschillende teelten. Verder worden transitiepaden beschreven welke een energieneutrale belichte glastuinbouw kunnen bewerkstelligen.

In de aanpak van het probleem hoe energieneutraal te worden, zijn verschillende strategieën mogelijk, die los, maar bij voorkeur in combinatie met elkaar worden gebruikt. Een goed startpunt is het toepassen van de "Trias Energetica":

- 1 beperk de energievraag zoveel mogelijk
- 2 pas zoveel mogelijk duurzame energie toe om aan de energiebehoefte te voldoen
- 3 wek de energie van de resterende energievraag zo efficiënt mogelijk op (en zet alle energie zo efficiënt mogelijk in).

Beperking van de energievraag kan bijvoorbeeld door het in de belichte glastuinbouw benodigde groeilicht efficiënter op te wekken en/of beter te benutten. Duurzame energie aanwezig op het bedrijf is met name zonne-energie, waarvan er vooral in de zomer vaak te veel is voor natuurlijke verwarming. Het overschot zou kunnen worden geoogst, opgeslagen in een watervoerende laag in de bodem en in de winter weer kunnen worden gebruikt en bespaart dan brandstof. Verder kunnen duurzame brandstoffen worden ingezet om de (gereduceerde) energievraag van het bedrijf geheel of gedeeltelijk duurzaam in te vullen. Bij de opwekking van de benodigde energievormen/hoeveelheden voor het bedrijf is het zaak dit zo efficiënt mogelijk te doen. In dat verband zijn warmtekrachtinstallaties met een zo hoog mogelijk elektrisch en totaal rendement gewenst.

Tenzij alle gebruikte brandstoffen biobrandstoffen zijn, zal na het toepassen van de Trias Energetica er in het algemeen nog steeds een resterend fossiel energieverbruik zijn. Om dan

toch energieneutraal te kunnen worden, is een vierde strategie nodig: *energielevering aan derden*. Op belichtende glastuinbouwbedrijven bestaan vaak energieoverschotten, die elders nuttig gebruikt zouden kunnen worden. Hierbij wordt in eerste instantie gedacht aan warmte, maar dit kan ook elektriciteit zijn (en/of biomassa). Overtollige warmte kan afkomstig zijn van bijvoorbeeld de warmtekrachtinstallatie die de elektriciteit voor de lampen produceert, maar kan ook 'geogst' worden in de kas als daar de temperatuur in de zomer te hoog oploopt. Indien de energieoverschotten van het tuinbouwbedrijf elders nuttig gebruikt worden, dan betekent dat daar minder andere (in het algemeen fossiele) energie nodig is, en is daar dus sprake van "vermeden verbruik". Door dit vermeden verbruik toe te rekenen aan het bedrijf dat de vervangende energie levert, daalt het netto energieverbruik van dit bedrijf.

In de volgende hoofdstukken wordt het perspectief nagegaan van de verschillende strategieën en die elementen geselecteerd die het meeste potentieel hebben. Aan de hand van simulaties wordt de grootte van het potentieel afgeschat en wordt nagegaan of het mogelijk is door een combinatie van maatregelen energieneutraal te worden. Allereerst wordt in de volgende paragraaf het begrip "energieneutraal" nader gedefinieerd, daar dit een cruciale rol speelt in het vervolg.

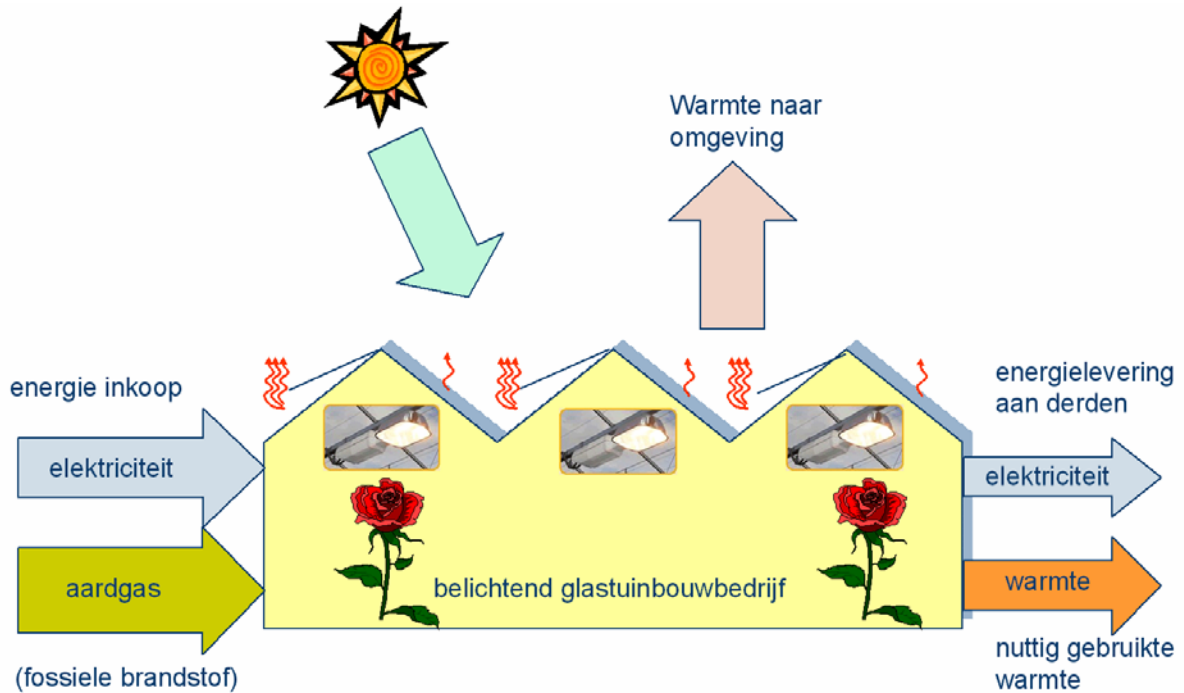
1.1 **Energieneutraliteit**

Figuur 1.1 toont de belangrijkste energiestromen die aan een glastuinbouwbedrijf worden (of kunnen worden) toegevoerd, of die eruit worden afgevoerd. De ingaande stromen betreffen:

- aardgas (voor de productie van warmte en/of elektriciteit in een ketel en/of een warmtekrachtinstallatie)
- elektriciteit (voor onder andere pompen, ventilatoren en assimilatiebelichting)
- zonnestraling (licht- + warmtestraling voor fotosynthese, verwarming en verdamping).

De belangrijkste uitgaande energiestromen (kunnen) zijn:

- warmteverliezen naar de omgeving
- elektriciteit (indien er een warmtekrachtinstallatie is die ook gebruikt wordt om elektriciteit terug te leveren aan het net)
- warmtelevering aan derden (indien het bedrijf een significant warmteoverschot heeft).



Figuur 1.1 Schematische voorstelling van een belichtend glastuinbouwbedrijf met de belangrijkste intredende en uitredende energiestromen

Definitie:

Een kas (of glastuinbouwbedrijf) is energieneutraal als er op jaarbasis netto geen fossiele primaire energie wordt verbruikt. Dit betekent (analoog aan de definitie van de energieproducerende kas (Boomen 2005), dat de kas (minimaal) evenveel benutbare energie exporteert als deze aan primaire (fossiele) energie importeert.

In de genoemde definitie is een correcte interpretatie van de term "netto geen verbruik van fossiele primaire energie" van groot belang. De definitie is daarom In bijlage A nader uitgewerkt¹.

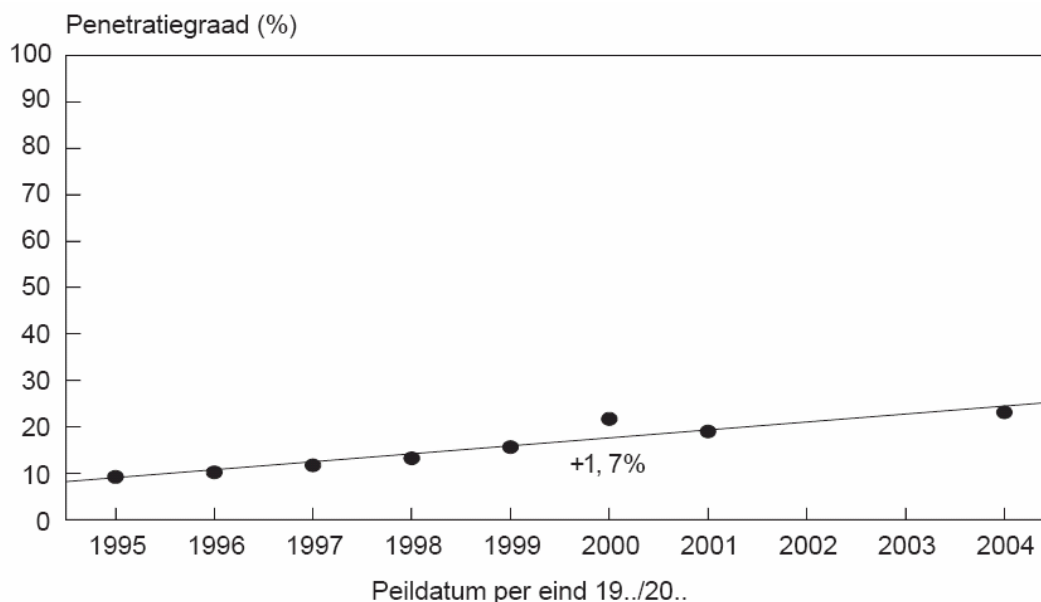
¹ Kort gezegd komt het er op neer dat het (fossiele) primaire energieverbruik dat het bedrijf in kwestie (eventueel) nog heeft, moet worden gecompenseerd, door elders (minimaal) een zelfde hoeveelheid fossiele primaire energie minder te verbruiken ("vermeden verbruik") als gevolg van het gebruik van energie(output)stromen van het bedrijf in kwestie.

1.2 Areaal 2020

Het LEI in Den Haag heeft de ontwikkelingen op het gebied van belichting tot en met 2004 uitgebreid beschreven in een rapport (Van der Knijff, 2006). Onderstaande schets van areaal, lichtintensiteit en belichtingsduur zijn grotendeels overgenomen uit dat rapport.

1.2.1 Areaal belichting

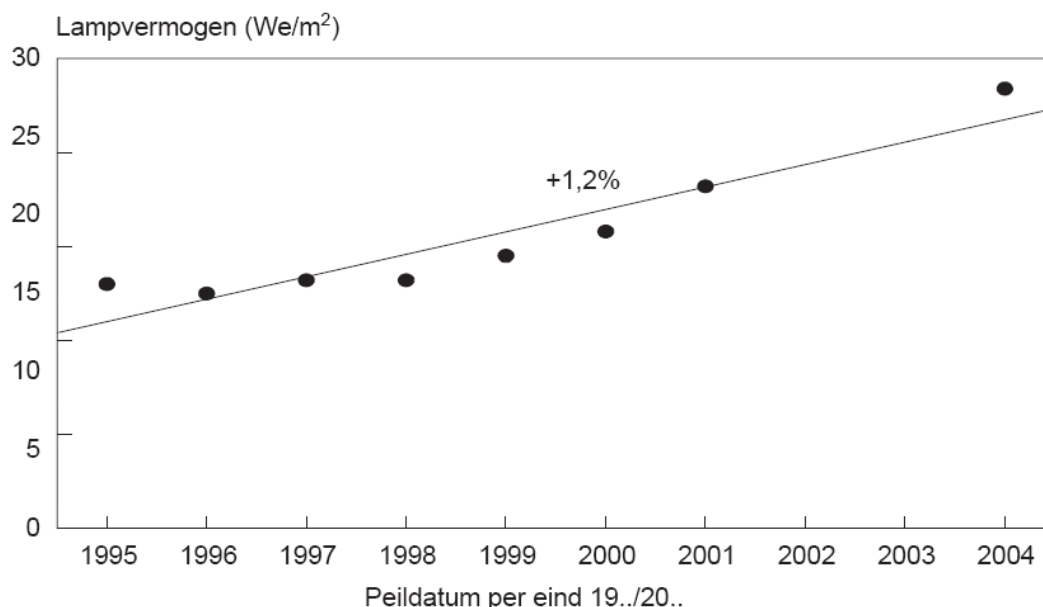
Het areaal met belichting (exclusief belichting voor de bloeibeïnvloeding) is vanaf 1995 gemiddeld met 1,7% per jaar toegenomen tot 23% in 2004 (figuur 1.2). De penetratiegraad van belichting bij roos is met circa 95% zeer hoog. Bij chrysant wordt circa 65% van het areaal belicht. Bij de overige snijbloemgewassen is dit gemiddeld circa 25% en bij potplanten circa 18%. Uitbreiding van het areaal belichting heeft plaatsgevonden op zowel snijbloemen-, potplanten als glasgroentenbedrijven. De laatste jaren is vooral het areaal belichting op glasgroentenbedrijven sterk toegenomen. Werd het areaal belichting bij de groente in 2003 nog op 40 ha geschat (De Groot, 2004 & Knijff, 2006), voor 2005 was dit circa 188 ha, waarvan 125 ha bij tomaat, 36 ha bij paprika en ruim 7 ha bij komkommer (Boonekamp, 2005). Dit is circa 5% van het areaal groenten onder glas.



Figuur 1.2 Aandeel areaal met belichting in de periode eind 1995 - eind 2004 (gemiddelde mutatie in procentpunten per jaar). (Van der Knijff, 2006)

1.2.2 Belichtingsintensiteit

Het totale energieverbruik door belichting is afhankelijk van het totale areaal belichting, de belichtingsintensiteit en het aantal belichtingsuren per jaar. De gemiddelde belichtingsintensiteit is vanaf eind jaren negentig sterk toegenomen tot gemiddeld $43 \text{ W}_e/\text{m}^2$ in 2004 (figuur 1.3). De laatste tien jaar is de belichtingsintensiteit gemiddeld met 1,2% per jaar toegenomen.



Figuur 1.3 Gemiddeld lampvermogen (W_e/m^2) in de periode eind 1994 - eind 2004. (Van Der Knijff, 2006)

De gemiddelde belichtingsintensiteit bij roos ($50 \text{ W}_e/\text{m}^2$) is beduidend hoger dan bij chrysaant ($39 \text{ W}_e/\text{m}^2$). Zo heeft bijna 60% van de chrysaantenbedrijven een belichtingsintensiteit tussen de 20 en $40 \text{ W}_e/\text{m}^2$, terwijl bijna 30% van het aantal rozenbedrijven een belichtingsintensiteit van $60 \text{ W}_e/\text{m}^2$ of meer (tabel 1.1). Echter, uit de tabel blijkt ook dat bij hetzelfde gewas er grote verschillen in belichtingsintensiteit zijn tussen de bedrijven.

Bovengenoemde intensiteiten zijn gebaseerd op gemiddelden van alle bedrijven uit de database van het LEI. Op bedrijven waar recent belichting is geïnstalleerd zien we hogere intensiteiten, maar ook hier zien we steeds verdere toename van intensiteiten (Tabel 1.2) bij een lichtrendement van 33,5% van de lampen, dan komt $1 \text{ W}_e/\text{m}^2$ overeen met circa $1,65 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Tabel 1.1. Aandeel belichtende bedrijven per klasse van gemiddelde belichtingsintensiteit in 2004. (Van Der Knijff, 2006)

	Klasse van belichtingsintensiteit (W_e/m^2)					Gemiddeld (W_e/m^2)
	minder dan 20	20 - 40	40 - 50	50 - 60	meer dan 60	
Totaal	6	59	21	6	8	43
Roos	0	39	24	8	29	50
Chry sant	0	59	25	16	0	39

Tabel 1.2 Globale schatting van voorkomende belichtingsintensiteiten op moderne bedrijven vanaf 1990. Schatting is gebaseerd op gesprekken met leveranciers, telers en voorlichters

<i>jaar</i>	<i>roos</i>	<i>chry sant</i>	<i>tomaat</i>
	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
1990	30-40		
2000	50-90	50-70	120
2005	100-180	60-100	120-180

1.2.3 Belichtingsuren

Het gemiddeld aantal belichtingsuren in 2004 bedroeg 2.600 uur (tabel 1.3). Dit is 420 uur per jaar minder dan in 2001. Deze daling van het gemiddeld aantal belichtingsuren is het gevolg van het feit dat de uitbreiding van het areaal belichting in de jaren 2002-2004 vooral heeft plaatsgevonden bij andere gewassen dan roos. Bij deze gewassen, waar chry sant de belangrijkste van is, worden per jaar minder uren belicht dan bij roos. Zo belicht circa 71% van de rozenbedrijven meer dan 4.000 uur per jaar belicht, terwijl bij chry sant tweederde van de bedrijven tussen de 2.000 en 3.000 uur per jaar belichten. Dit komt omdat chry sant een korte dag plant is. Bij teveel belichtingsuren in een bepaalde periode van de teelt gaat de plant niet bloeien. De laatste jaren zien we steeds vaker dat het aantal branduren niet alleen bepaald wordt door wat gewaskundig gewenst is, maar dat het mede bepaald wordt door de prijs van aan het elektriciteitsnet geleverde elektriciteit.

Tabel 1.3 Aandeel belichtende bedrijven per klasse van belichtingsuren per jaar in 2004.
(Van Der Knijff, 2006)

Gewas	Klasse van belichtingsuren per jaar					Gemiddeld
	minder dan 1.000	1.000 - 2.000	2.000 - 3.000	3.000 - 4.000	4.000 -5.000	
Totaal	2	17	25	21	35	2.600
Roos	0	1	0	28	71	3.930
Chrysant	2	14	66	18	0	2.140

1.2.4 Te onderscheiden gewasgroepen

Omdat iedere teelt zijn eigen belichtingstrategie heeft, maar het behandelen van alle teelten in dit rapport veel te complex is, worden de gewassen verdeeld in drie gewasgroepen op basis van lichtsom:

- 130 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bij 4500 uur (zoals roos)
- 160 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bij 2500 uur (zoals tomaat)
- 75 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bij 2500 uur (zoals chrysant, gerbera, potplanten).

Bij roos wordt het meest intensief belicht. Er wordt veelal 20-24 uur per dag belicht gedurende een relatief groot deel van het jaar, waardoor het aantal branduren vaak op circa 4500 uur per jaar uit komt. Tevens is de lichtintensiteit op moderne bedrijven hoog: 130 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. In 2006 wordt het areaal belichte roos geschat op circa 600 ha.

Bij vruchtgroenten (met name tomaat) worden soms nog hogere intensiteiten (160 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) gehanteerd. Echter het aantal branduren van de lampen is veel lager dan bij roos, wat mede komt doordat een gewas zoals tomaat een voldoende lange nacht nodig heeft (aannee minimaal 6 uur geen licht). In 2006 wordt het areaal van deze groep geschat op circa 200 ha.

Bij gewassen zoals chrysant, gerbera, lelie, anthurium, potplanten worden veelal wat lager lichtintensiteiten gehanteerd (75 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en is het aantal branduren vergelijkbaar met dat van de glasgroenten. Bij enkele gewassen zoals chrysant en in mindere mate bij gerbera heeft dit direct te maken met de daglengtegevoeligheid van deze gewassen, waardoor meestal niet te lang op een dag belicht kan worden. In 2006 wordt het areaal van deze groep geschat op circa 1100 ha.

Bij alle gewassen is overigens een grote variatie tussen de bedrijven aanwezig. Zo is het mogelijk dat bij ieder gewas wel telers van alle drie de categorieën te vinden zijn.

1.3 Oplossingsrichtingen energieneutraliteit

Om in 2020 daadwerkelijk een energieneutrale belichte glastuinbouw te bewerkstelligen zijn - gebaseerd op de definitie van energieneutraliteit - de volgende oplossingsrichtingen mogelijk²:

- de meest eenvoudige oplossing is het *inkopen van 100% duurzame energie* (bijvoorbeeld in de vorm van biobrandstof en/of duurzaam opgewekte elektriciteit). Zelfs al wordt er geen energie buiten het bedrijf geleverd, dan is men met deze optie al energieneutraal. Worden er wel energiestromen aan derden geleverd en door die derde gebruikt, dan is men energieproducerend. Dit is vanuit systeemtechnisch oogpunt gezien een triviale oplossing, waarbij echter de productie van duurzame energie buiten het eigen bedrijf ligt. Of het financieel interessant zal zijn in de toekomst, hangt behalve van de benodigde investeringen (in bijvoorbeeld bio-WKK) vooral ook af van de prijzen van de biobrandstoffen in relatie tot die van fossiele alternatieven (en eventueel een subsidie-regime)
- door in of rond de kas meer *duurzame zonnewarmte te oogsten* dan momentaan voor een optimaal kasklimaat nodig is, en dit meerdere te bewaren en op een ander moment te hergebruiken, wordt op (i.h.a.) aardgas bespaard. Dit gebeurt o.a. in gesloten en semi-gesloten kassen. (Qua duurzame uitstraling naar de maatschappij bestaat het beeld dat eigen duurzame energieproductie in / rond de kas nog wat beter scoort dan inkoop en gebruik van elders geproduceerde duurzame energie. Dit imago kan nog worden versterkt door overtollige energie te leveren aan derden buiten de sector.)
- indien *nuttige warmte geleverd wordt aan derden*, dan mag het corresponderende vermeden primaire energieverbruik van de derde in mindering worden gebracht op het primaire energieverbruik van het leverende bedrijf. Dit kan bijvoorbeeld bij bedrijven met een warmteoverschot als gevolg van assimilatiebelichting of bij een (semi-)gesloten kas
- een andere gedeeltelijke, maar wel belangrijke oplossing, die bij voorkeur eerst moet worden uitgevoerd, is het *reducen van de energievraag*. Indien bijvoorbeeld efficiëntere lampen worden toegepast, dan vermindert de elektriciteitsbehoefte en daarmee het vereiste primaire energieverbruik. Verder kunnen in de toekomst door veredeling en teeltmethoden planten worden geteeld die efficiënter met licht omgaan. Deze kunnen

² Aan de hand van de uitgewerkte definitie van energieneutraliteit en figuren A.2 en A.3 in bijlage A kan eenvoudig worden ingezien, dat de hieronder aangegeven oplossingsrichtingen een bijdrage kunnen leveren om energieneutraal te worden.

volstaan met een lager lichtniveau, waardoor de behoefte aan additioneel groeilicht afneemt. Ook kunnen nieuwe kasdekmaterialen voor verminderde toetreding van warmte in de gesloten kas zorgen en daarmee een energiereductie bewerkstelligen (minder koeling nodig in de zomer)

- *efficiëntere opwekking van elektriciteit*: een efficiëntere WK resulteert in minder warmteproductie. Bedrijven waarbij normaliter op veel dagen een relatief groot warmteoverschot bestaat bij het gekozen niveau van eigen elektriciteitsproductie profiteren hiervan omdat er dan minder WK-warmte nutteloos verloren gaat.

2 STATUS 2006

In dit hoofdstuk zullen de belangrijkste ontwikkelingen worden beschreven, welke invloed hebben op het netto primair (fossiel) energieverbruik bij belichte teelten, en die daarmee (kunnen) bijdragen aan het realiseren van de doelstelling van een energieneutrale (belichte) glastuinbouw in 2020. Zowel technische ontwikkelingen als planttechnische ontwikkelingen hebben effect op het benodigde energieverbruik. In dit hoofdstuk wordt de huidige status van deze ontwikkelingen beschreven.

2.1 Technisch

2.1.1 Assimilatielampen

2.1.1.1 Hogedruk-natrium lampen

Voor assimilatiebelichting worden meestal hogedruk-natriumlampen gebruikt. Deze bestaan uit een keramische ontladingsbuis in een heldere, buisvormige buitenballon. De lampen hebben in de nieuwstaat een omzettingsrendement van elektriciteit in groeilicht (of beter gezegd in PAR-stralingsenergie) van circa 39%. Uitgedrukt in micromolen³ PAR-licht per Watt elektrische energie ("PAR-fotonrendement") bedraagt die circa 1,85 à 1,95 $\mu\text{mol/s/W}_e$. Op systeemniveau, dat wil zeggen ingebouwd in een armatuur (met een aangenomen

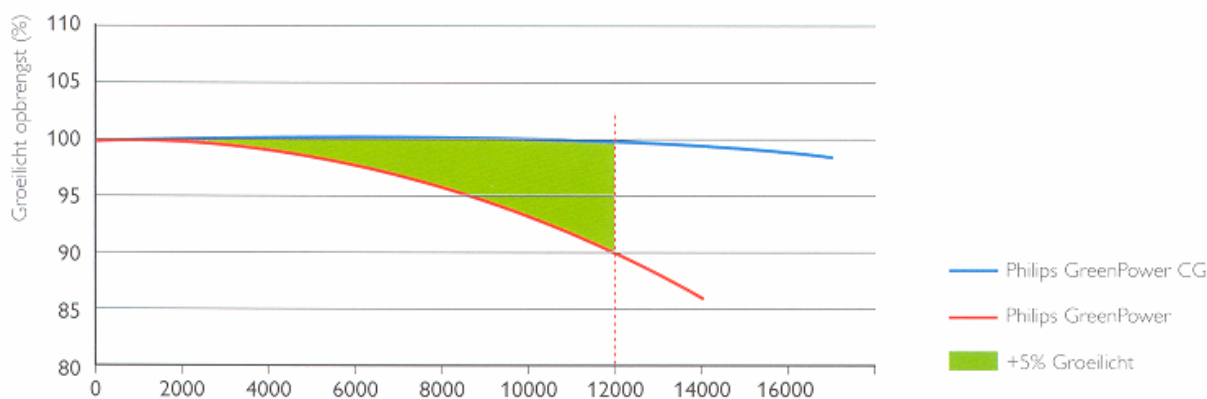
³ Voor fotosynthese van planten is vooral het aantal lichtdeeltjes (fotonen) in het golflengtegebied tussen 400 en 700 nm (het zogenaamde PAR-gebied) van belang. Dit aantal wordt uitgedrukt in de eenheid " μmol " ($1 \mu\text{mol} = 6,022 \times 10^{17}$). De verlichtingssterkte voor fotosynthese bij planten wordt uitgedrukt in $\mu\text{mol/s/m}^2$. De verlichtingssterkte zoals het menselijk oog het ervaart, wordt uitgedrukt in lux. Voor SON-T lampen geldt bij benadering de volgend omrekening: $10.000 \text{ lux} = 131,6 \mu\text{mol/s/m}^2$

reflectorrendement van 90%) en met een elektronisch voorschakelapparaat voor de aansturing, is het PAR-stralingsrendement circa 33,5% en het PAR-fotonrendement circa $1,65 \mu\text{mol/s/W}_e^4$.

Wat betreft de ontwikkelingen van het rendement van de hogedruk-natriumlamp worden door de fabrikanten nog slechts marginale verbeteringen verwacht.

Recentelijk zijn er nog wel ontwikkelingen geweest. De belangrijkste zijn:

- vervanging van de klassieke elektrische ballasten door een elektronisch voorschakelapparaat (2004/2005). Dit heeft geleid tot een verbetering van het PAR-stralingsrendement van het lampstelsel van circa 1%-punt⁵
- "Constant groeilicht": ontwikkeling van Philips die volgens hen leidt tot circa 5% extra groeilicht over de levensduur doordat de hoeveelheid groeilicht over de servicelevensduur minder terugvalt (introductie 2006, vooralsnog alleen voor 400 en 600 W-lampen⁶, zie figuur 2.1).



Figuur 2.1 Grafiek die verbetering van "constant groeilicht" laat zien voor Philips GreenPower CG lampen over de servicelevensduur (x-as+ aantal branduren)

⁴ Dit is in nieuwstaat en nog exclusief kabelverliezen

⁵ een toename van "1%-punt" betekent dat het rendementspercentage 1% hoger is geworden; in dit geval nam het systeemrendement toe van circa 32,5% tot 33,5%.

⁶ Momenteel worden vooral 1000W lampen verkocht.

2.1.1.2 LED's

Op het gebied van kunstmatige verlichting is de laatste jaren een sterke ontwikkeling gaande op het gebied van LED's (light emitting diodes) en OLED's (organic light emitting diodes) (De Ruijter 2004a).

LED's zijn "vaste-stof" lichtbronnen waarbij licht wordt geproduceerd in een stukje halfgeleidermateriaal. Dit gebeurt wanneer een elektrische stroom – die maar in één richting door de diode kan - door de overgang tussen het zogenaamd p- en n-gebied van de halfgeleider gaat. Door stroom worden positieve en negatieve ladingsdragers in het gebied geïnjecteerd die kunnen recombineren onder de uitzending van licht. LEDs zenden in principe min of meer monochromatisch licht uit. Ze kunnen in verschillende kleuren worden gefabriceerd. Door middel van een speciale coating op de binnenzijde van het transparante "huis" van een (blauwe of UV-) LED kan wit licht worden verkregen.



Figuur 2.2 Rode high power LED

Zogenaamde "high power LEDs" (ook wel "super-bright" LEDs genoemd, met een vermogen van meer dan 0,5 W) hebben een omzettingsrendement dat inmiddels vergelijkbaar is met dat van TL-verlichting. De beste rode LED heeft anno 2006 een fotonrendement van circa $1,65 \mu\text{mol/s/W}_e$ hetgeen nog circa 13% lager is dan van een hogedruk-natrium lamp. Dit rendement geldt bij een LED-chiptemperatuur van 25°C . In de praktijk zal die temperatuur meestal hoger liggen. Dan daalt het rendement (vooral bij rode en oranje LED's). Bij 60°C zendt de rode LED nog 70% uit van wat hij doet bij 25°C . Verder moet een LED worden gevoed met een gelijkstroom, die in het algemeen uit een wisselstroom wordt geproduceerd, met een omzettingsrendement van minder dan 100% (bijvoorbeeld 90%). Daarnaast kan

eventueel een externe optiek worden gebruikt om het licht te richten. Bij een verondersteld optisch rendement van het armatuur van 95%, een LED-chiptemperatuur van 60 °C en elektrische voedingrendement van 90% wordt het fotonrendement van een compleet LED-lampsystemen 0,99 $\mu\text{mol/s/W}_e$. Alhoewel er nog geen commercieel verkrijgbare LED-armaturen voor assimilatiebelichting op de markt zijn, wordt op basis van genoemde aannamen een LED-systeemrendement ingeschat dat - anno 2006 - nog circa 40% lager ligt dan dat van de hogedruk-natrium belichtingsystemen⁷.

De belangrijkste cijfers van hogedruk-natriumbelichting en LEDs (eind 2006/begin 2007) zijn samengevat tabel 2.1.

Tabel 2.1 Overzicht prestaties belichtingsystemen

Groeilicht → PAR-licht: 400-700 nm					
Vergelijking op basis van PAR-lichtdeeltjesstroom in ($\mu\text{mol/s}$)/ W_e ('fotonrendement')					
lampkenmerk	HD-natrium	Rode LED	Witte LED	eenheid	
Status	2006	2006	2007		
- fotonrendement lamp/LED	1,90	1,65 (25°C)	1,54	$\mu\text{mol/s/W}_e$	
- PAR-stralingsrendement	38,6%	31,5%	34%	%	
- fotonrendement systeem	1,66	0,99*) (60°C)	1,22*)	$\mu\text{mol/s/W}_e$	
- PAR-stralingsrend.systeem	33,7%	18,8%	26,9%	%	
- vermogen lamp	1000	1,03	1,20	W_e	
- lichtstroom/lamp	1900	1,7	1,84	$\mu\text{mol/s}$	
- prijs per eenheid licht	0.027	1,33	?	€/μmol/s	
<ul style="list-style-type: none"> - Achterstand fotonrendement rode LED's 2006 op HD-Na op lampsysteemniveau nog ca 40% - Achterstand fotonrendement witte LED's 2007 op HD-Na op lampsysteemniveau nog ca 26,5% 					
*) bij LED-chiptemp. van 60°C (vooral bij rode LED's sterk afhankelijk van temperatuur), $\eta_{\text{voeding}}=90\%$					

⁷ De vergelijking is in eerste instantie gemaakt voor rode LEDs aan het eind van 2006, omdat die op dat moment het hoogste fotonrendement hadden. Op 24 januari 2007 heeft Philips-Lumileds aangekondigd witte LEDs te kunnen maken, die (bij 350 mA stroom) een lichtrendement hebben van 115 lumen/Wat. Dit komt neer op een fotonrendement van ongeveer 1,54 $\mu\text{mol/s/W}_e$ en een geschat systeemrendement van 1,22 $\mu\text{mol/s/W}_e$ (d.w.z. nog 'maar' 26,5% lager dan hoge-druk natrium). Hierbij is overigens nog geen rekening gehouden met het feit dat LEDs bijvoorbeeld beter kunnen worden gericht op de plant, waardoor er minder verliezen hoeven te zijn naar oppervlakken die niet belicht hoeven te worden. Het systeemrendement is hoger dan dat van rode LEDs, omdat witte LEDs minder gevoelig zijn voor de temperatuur van de LED-chip.

Alhoewel de HD-natriumassimilatielampen op dit moment nog beter zijn, is de verwachting dat deze door LED- of OLED-belichting in de toekomst zal worden verdrongen. Argumenten hiervoor zijn:

- (uiteindelijk) hoger omzettingsrendement (waardoor energie wordt bespaard)
- langere levensduur (> 50.000 uur)
- verschillende kleuren mogelijk; kleuren kunnen optimaal worden afgestemd op de behoefte van de plant
- intensiteit is beter bestuurbaar/regelbaar (lichtverlies kan automatisch worden gecompenseerd; dimmen is heel eenvoudig; bij HD-natrium kan dit niet goed)
- warmte kan relatief eenvoudig worden gescheiden van de PAR-straling (LED's zenden koud licht uit; de warmte komt vrij door geleiding door een zogenaamde 'heat slug' (= goed warmtegeleidend klompje metaal aan achterzijde van LED)
- het licht kan beter worden gericht op de plant (waardoor er minder op de paden hoeft te vallen)
- (O)LEDs kunnen een rol spelen bij het reduceren van de lichthinder (onder andere door de keuze van kleuren waarvoor de mens niet, maar de plant wel gevoelig is).

Wat het uiteindelijke maximale omzettingsrendement van LEDs gaat worden is nog niet duidelijk. Op grond van de historie wordt verwacht dat het rendement nog een stuk hoger zal worden dan nu. In (De Ruijter 2004a) is aangegeven dat het lichtrendement (in lumen/Watt) in afgelopen 40 jaar met ongeveer een factor 10 per 10 jaar is gestegen. Ervan uitgaande dat de stijging van het rendement zich de komende jaren nog doorzet (alhoewel het geen factor 10 meer kan zijn, aangezien het dan hoger dan 100% wordt), is de verwachting dat het rendement nog flink toeneemt. Deskundigen verwachten voor witte LEDs in de toekomst een lichtrendement van circa 150-200 lumen/W. Omdat begin 2007 bij 'volwaardige' LED-stromen (350 mA) reeds 115 lumen/W is gerealiseerd, en bij kleine stromen (20 mA) zelfs 138 lumen/W, gaan we er vanuit dat in 2020 (en mogelijk al eerder) 200 lumen per Watt zal worden gehaald. Dit betekent een LED-fotonrendement van circa $2,71 \mu\text{mol/s/W}_e$ (en een PAR-stralingsrendement van ca 60%). Hiermee zou op systeemniveau dan een fotonrendement van circa $2,14 \mu\text{mol/s/W}_e$ mogelijk moeten zijn (dit correspondeert met een PAR-stralingsrendement van ca 47,5%). Een dergelijk belichtingsstelsel is dan circa 29% beter dan het huidige hogedruk-natrium systeem. In de energieberekeningen van hoofdstuk 3 is voorzichtigheidshalve (om geen overspannen verwachtingen te creëren) gerekend met een iets lager PAR-systeemrendement van 44,4%.

2.1.2 Elektriciteitsopwekking

Belichte teelten vragen relatief veel elektriciteit en weinig extra warmte. Bij de huidige warmtekrachtinstallaties, wordt er bij een elektriciteitsproductie gelijk aan het belichtingsvermogen, vaak veel meer warmte geproduceerd dan nodig is voor verwarming. Dit betekent dat een WK met een hoger elektrisch (en daaraan gekoppeld lager thermisch) rendement beter past bij de energievraag van de belichte teelt. Daardoor leidt een WK-installatie met een hogere warmtekrachtverhouding tot een lager gasverbruik (bij autonoom bedrijf zonder elektriciteits- en/of warmtelevering).

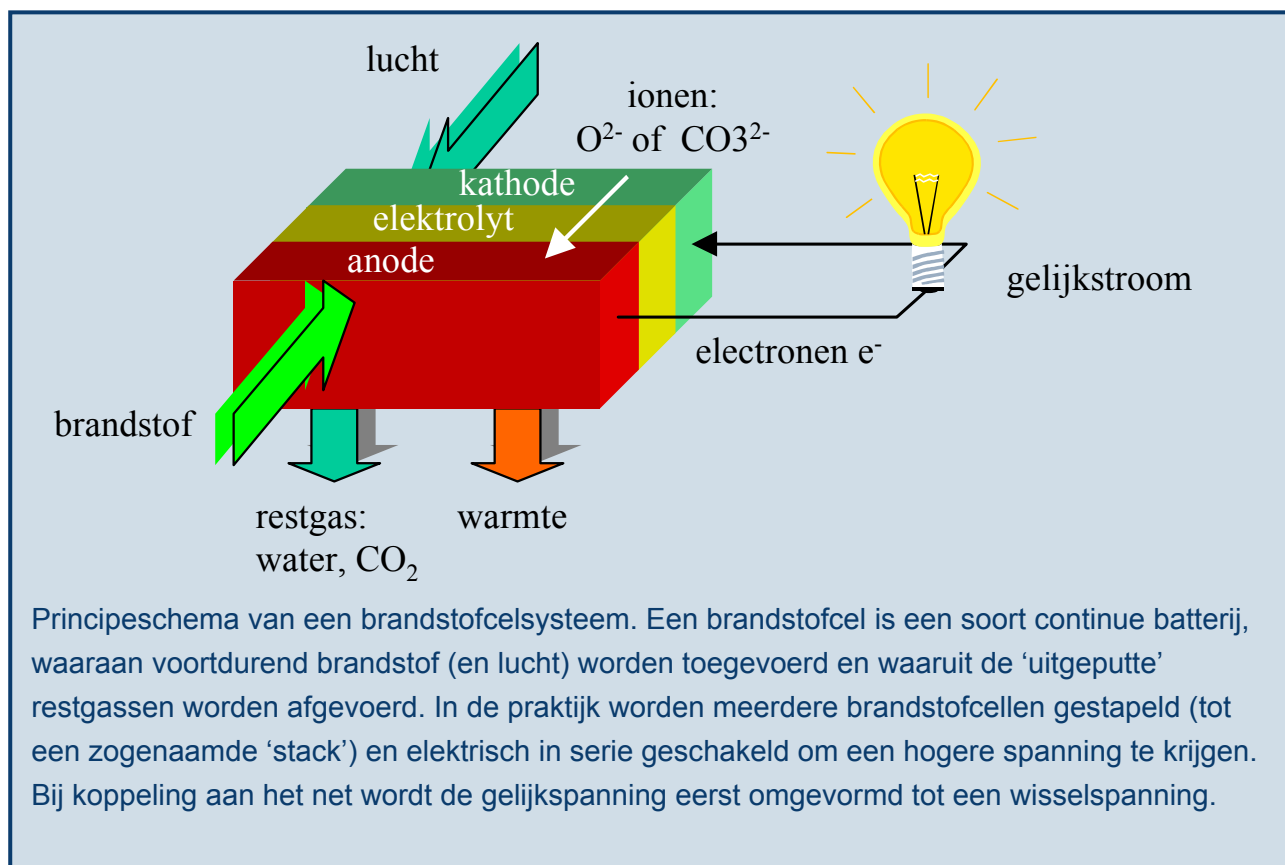
Bij warmtekrachtinstallaties op basis van gasmotoren zijn de laatste jaren de elektrische rendementen geleidelijk toegenomen. Bij grote motoren kan zelfs een elektrisch rendement van 46 à 47% worden gehaald. Voor significant hogere rendementen zijn echter andere technieken (of combinaties hiervan) nodig. De volgende technieken komen hiervoor in aanmerking:

- *toevoegen van ORC aan gasmotor*: met behulp van een nageschakelde, zogenaamde Organic Rankine Cycle (ORC) kan een deel van de restwarmte in de rookgassen van de gasmotor alsnog omgezet worden in elektriciteit. Hierdoor kan het elektrisch rendement van de combinatie gasmotor/ORC, een dergelijk 6 à 7 procentpunt hoger uitvallen dan het rendement van de sologasmotor (een en andere afhankelijk van de temperatuur van de rookgassen vóór en na de ORC, en het type en uitvoering van de ORC)
- *brandstofcel-WK*: deze bijzondere vorm van warmtekracht gebruikt brandstofcellen als hart van de WK-installatie. In een brandstofcel speelt zich een elektrochemisch proces af waarin een waterstof houdende brandstof via een elektrochemische reactie elektrische energie produceert en daarbij wordt omgezet in water (en - bij een eveneens koolstofhoudende brandstof – ook in CO₂).

Brandstofcellen (BC's) zijn veelbelovende energieconversiesystemen, waarbij brandstof in een soort continue batterij direct in elektriciteit wordt omgezet⁸ (zie intermezzo). Hierdoor zijn bij brandstofcelssystemen veel hogere (elektriciteits)conversierendementen mogelijk dan bij conventionele warmtekrachtinstallaties (in theorie tot ca 80%). Behalve elektriciteit produceren brandstofcellen ook warmte en (bij gebruikmaking van bijvoorbeeld aardgas, LPG of dieselolie als brandstof) ook CO₂. Omdat bij bepaalde typen brandstofcellen (zie kader) het aandeel elektriciteit hoger en het aandeel warmte (veel) kleiner is dan bij een gasmotor, zal bij toepassing van een BC-gebaseerde warmtekrachtinstallatie (BCWK) voor belichte teelten op jaarbasis veel minder warmte vernietigd hoeven te worden en is er minder primaire

⁸ Direct betekent hier zonder de tussenstap van een zogenaamde 'thermische cyclus' die qua omzettingrendement naar boven begrensd wordt door het zogenaamde Carnotrendement.

energie nodig. Een belangrijk bijkomend voordeel is dat de rookgassen van een BC-systeem zeer weinig NO_x en andere schadelijke stoffen (<1 ppm in het rookgas) bevatten, waardoor deze direct - zonder rookgasreiniging - bruikbaar zijn voor CO_2 -bemesting (Cogen, 2003).



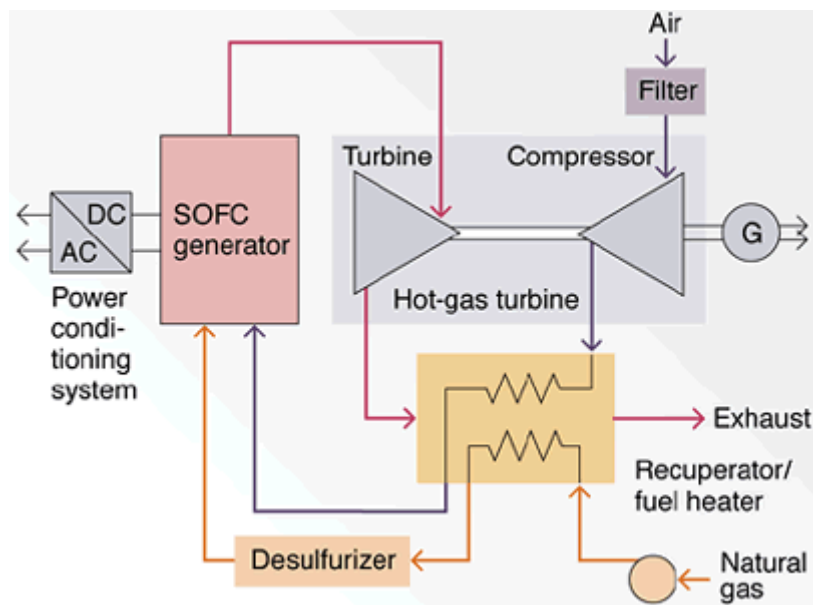
In het eerste deel van een studie naar het perspectief van brandstofcellen voor de glastuinbouw (Van Gerwen 2004b) zijn twee brandstofceltechnologieën geïdentificeerd als geschikte kandidaten voor de glastuinbouw. In het tweede deel is het perspectief verder verkend (De Ruijter 2004c). Het betreft:

- gesmolten carbonaatbrandstofcellen (MCFC = molten carbonate fuel cell)
- hybride systeem bestaande uit vastoxide brandstofcellen gecombineerd met een micro-gasturbine (SOFC-GT = solid oxide fuel cell – gas turbine); voor principe schema zie figuur 2.3.

Systemen op basis van *gesmolten carbonaatbrandstofcellen* (engels: molten carbonate fuel cells, afgekort MCFC) produceren elektriciteit met een elektrisch (wisselstroom)systeemrendement van 46 à 50%. Daarnaast kan uit de hete ‘afgassen’ van het MCFC-systeem (circa 400 °C) warmte worden teruggewonnen, waarmee heet water (of desgewenst stoom) kan worden geproduceerd (circa 40% van het vermogen). De afgassen zijn zo schoon, dat ze (na koeling) direct voor CO₂-dosering kunnen worden gebruikt.

SOFC-brandstofcellen (solid oxide fuel cells) werken op een hogere temperatuur dan MCFC (circa 1000 °C). De afgassen zijn zo heet, dat ze bruikbaar zijn als ‘aandrijfmedium’ in de expansietrap van een gasturbine die zelf weer een generator aandrijft. Door de combinatie van brandstofcel-elektriciteitsproductie en gasturbine-elektriciteitsproductie is het totale elektrische systeemrendement extra hoog. 55% is al gerealiseerd. In de toekomst worden rendementen tot circa 70% verwacht. Daarnaast kan circa 35 à 20% warmte worden geproduceerd.

Op termijn bieden met name hybride systemen het beste perspectief voor een hoog elektrisch omzettingsrendement. In de berekeningen in hoofdstuk 3 naar het perspectief van hoogefficiënte warmtekrachten (waarvoor hybride brandstofcel-systemen model staan) voor een energieneutrale, belichte glastuinbouw in 2020 wordt uitgegaan van een elektrisch omzettingsrendement van 70%.



Figuur 2.2 Schema van een hybride warmtekrachtstelsel bestaande uit een SOFC-brandstofcelgenerator en een microgasturbine. Bij dergelijke systemen wordt in de toekomst een elektrisch rendement van 70% verwacht

2.1.3 Biobrandstoffen

Zoals in bijlage A figuur A.3 is aangegeven dragen verbruikte biobrandstoffen niet (of hoogstens in geringe mate) bij aan het primaire energieverbruik. Daarom zijn biobrandstoffen bij uitstek geschikt om - na een maximaal haalbare beperking van de energievraag – de resterende energiebehoefte duurzaam in te vullen en daarmee een energieneutrale bedrijfsvoering te realiseren.

Er zijn verschillende mogelijkheden. In principe komen de volgende technieken in aanmerking:

- dieselmotoren op pure plantaardige olie (PPO, zoals palmolie of koolzaadolie) of eventueel olie van dierlijke oorsprong (zoals Bioline uit slachtbijproducten)
- gasmotoren op biogas⁹ (bijvoorbeeld afkomstig uit een biomassavergistingsinstallatie of -vergassingsinstallatie)
- ketels op bio-olie (momenteel worden die vooral en vrijwel uitsluitend gebruikt voor reductie van de gaspiek, op momenten van een hoge warmtevraag, en dragen daarmee op jaarbasis maar bescheiden bij aan de invulling van de energievraag)
- ketels op andere biomassa, bijvoorbeeld houtstook.

Het meeste perspectief voor een energieneutrale, belichte glastuinbouw bieden de warmtekrachtinstallaties op biobrandstof (de eerste twee opties). Met voldoende inzet van biobrandstoffen kan altijd een energieneutrale glastuinbouw worden gerealiseerd. Het heeft daarom ook weinig zin op bedrijfsniveau te willen berekenen wat de bijdrage aan energieneutraliteit kan zijn. Dit is daarom ook niet gebeurd.

2.1.4 Warmtelevering aan derden

Zoals in definitie energieneutraliteit is duidelijk gemaakt, leidt het leveren van overtollige warmte aan derden (of die nu afkomstig is van de warmtekrachtinstallatie of actief is geoogst in een (semi-)gesloten kas uit overtollige zonne-instraling) tot een reductie van het primaire energieverbruik. Het verdient daarom aanbeveling zoveel mogelijk beschikbare overtollige warmte te gebruiken. In eerste instantie zal dat - indien mogelijk - op het eigen bedrijf zijn, bijvoorbeeld in een deel niet-belichte kas en/of niet-gesloten kas. De warmte die dan nog overtollig is, moet zoveel mogelijk buiten het bedrijf gebruikt worden.

⁹ Bij grote installaties komen in principe ook gasturbines al dan niet in combinatie met stoomturbines (STEG's of varianten daarop) in aanmerking.

Gesloten en semi-gesloten kassen staan de laatste jaren sterk in de belangstelling en zijn nog volop in ontwikkeling. De belangstelling heeft te maken met de volgende voordelen:

- het kasklimaat kan beter worden beheerst in het warme deel van het jaar, waardoor betere teeltcondities mogelijk worden. Dit is gunstig voor gewas, productie en/of productkwaliteit
- de CO₂-concentratie kan in het warme deel van het jaren hoger zijn, omdat het dek (meer) gesloten blijft. (Ook) daardoor wordt een hogere gewasproductie verkregen
- in de zomer kan warmte worden geoogst die, na opslag in een watervoerende laag in de bodem, in de winter weer kan worden gebruikt. Hierdoor hoeft er minder gestookt te worden en kan zeer significant op het primaire energieverbruik worden bespaard (er worden op bedrijfsniveau reducties van 30 à 50% van de primaire energieverbruik gerapporteerd, waarbij er soms nog warmte op het bedrijf over is).

Het concept van de (semi-)gesloten kas is zeker nog niet uitontwikkeld. Afhankelijk het soort gewas en wijze van telen zijn er verschillende varianten mogelijk, die onder meer verschillen in het koelvermogen, de wijze van koudeproductie, wijze en plaats van inbrengen van koude en ontvochtigde lucht in de kas. Tevens zijn er ontwikkelingen gaande op het gebied van kasdekmaterialen, waarmee minder energie nodig is voor een optimale klimaatregeling in de kas.

2.2 Teelttechnisch

Zoals in Hoofdstuk 1 is beschreven is het gebruik van belichting en de intensiteit ervan de afgelopen jaren steeds verder toegenomen. Daarnaast zien we sinds kort dat het aan of uit schakelen van de lampen niet meer alleen door teeltkundige zaken bepaald wordt maar ook door de prijs van aan het elektriciteitsnet geleverde elektriciteit. Geleidelijk neemt de ervaring en kennis van belichting en teelt toe, waardoor de efficiëntie van belichting ook toeneemt. Een aantal voorbeelden hiervan worden hieronder gegeven:

- belichting zien we nogal eens in combinatie met nieuwe teeltsystemen, zoals hoge-draad teeltsysteem bij komkommer en mobiele teeltsystemen bij verschillende gewassen
- de aandacht voor verticale lichtverdeling in het gewas neemt toe en leidt bij tomaat tot praktijkexperimenten met veranderde padbreedte in combinatie met tussenplanten
- vanuit de positieve resultaten met de Airco kas is de aandacht voor luchtbevochtiging sterk toegenomen. Ook voor belichte teelten lijken hier mogelijkheden te liggen.

Hoewel de positieve effecten van CO₂ al lang bekend zijn, is de praktijk het belang hiervan juist ook in perioden met meer licht, meer en meer gaan realiseren. Het langer dicht kunnen houden van ramen, leidt tot het beter handhaven van voldoende hoge CO₂ niveaus,

waardoor de lichtbenutting van het gewas toeneemt. Hier tegenover staat dat mogelijke verontreiniging van rookgassen tot nadelige effecten kan leiden. Als gevolg hiervan zien we ook de toepassing van zuivere CO₂ in plaats van CO₂ uit rookgas toenemen.

Enkele jaren geleden werden zeer positieve resultaten van mobiele belichting geclaimd, waardoor mobiele belichting sterke opgang maakt. Deze claims zijn echter niet hard gemaakt en er lijkt dan ook geen toekomst voor mobiele belichting. Bovenstaande heeft dan betrekking op zogenaamde lange-slag belichting waar de lampen over een grotere afstand bewegen. Mogelijk zijn er wel positieve effecten mogelijk met korte-slag belichting waarbij de lampen over hooguit enkele meters heen en weer bewegen. De verbetering zou gelegen kunnen zijn in een betere lichtverdeling.

Schaalvergroting en automatisering zijn belangrijk ontwikkelingen die momenteel in snel tempo doorzetten. Hierbij gaan tuinders ook meer en meer naar gecontroleerd telen, waarbij het volledige productieproces continu gemonitord en geregeld wordt. Plant- en klimaat-sensoren en advies- en informatiemodellen nemen hierbij een steeds belangrijker plaats in.

3 ENERGIEHUISHOUDING

3.1 Simulatieberekeningen ter verkenning van perspectief technische ontwikkelingen c.q. maatregelen in 2020

Om het perspectief van verschillende ontwikkelingen c.q. maatregelen, zoals in paragraaf 1.3 gesuggereerd te verkennen zijn simulatieberekeningen uitgevoerd. De simulaties verschillen onder meer in:

- WK-vermogen als percentage van vermogen voor belichting
- warmtelevering aan x ha niet belichte kas
- rendement van de warmtekrachtinstallatie
- rendement van de assimilatiebelichting.

De uitgangspunten van de simulaties zijn beschreven in bijlage B. De simulaties zijn opgedeeld in twee delen:

- 1 het bepalen van de energie- en CO₂-vraag afhankelijk van de gemaakte keuzes voor kas, teelt, kasklimaat, belichtingintensiteit en buitenklimaat. (resultierend in jaarvraagprofielen)

2 gebaseerd op de energie- en CO₂-vraagprofielen, het bepalen van de gas- en elektriciteitsafnameprofielen en eventuele elektriciteitsterugleveringen en warmteoverschotten bij de geselecteerde energiesystemen en de gekozen inzetstrategie van de energieproductiemiddelen daarin.

De belangrijkste kenmerken van de warmte- en elektriciteitsvraag voor de verschillende belichtingssituaties zijn samengevat in tabel 3.1.

Tabel 3.1 Overzicht van de jaarvraag van warmte en elektriciteit bij de belichte roos respectievelijk tomaat, gebaseerd op de beste belichtingstechniek van 2006 respectievelijk die wordt verwacht in 2020

jaarvraag 'utilities' voor belichte rozenteelt resp. tomatenteelt	roos bat ^{*)} 2006	roos expect ^{**} 2020	tomaat bat ^{*)} 2006	tomaat expect ^{**} 2020	opmerking
belichtingsniveau ($\mu\text{mol/s/m}^2$)	130	130	160	160	
belichtingsniveau (W_e/m^2)	79	59.5	97	73	elektr.vermogen excl.kabelverliezen; bat o.b.v. SON-T Green Power (new), expect: o.b.v. systeemrend.van 44.4%
aantal uren belichten (uur)	3995	3995	2630	2630	zie tabel A.1, A.2 in bijlage A
warmtevraag (GJ/m^2)	0,910	1,031	1,136	1,206	aanvullend aan verwarming die door belichting wordt geleverd
elektriciteitsvraag (kWh/m^2) (GJ_e/m^2)	323,7 1,165	247,4 0,891	264,1 0,951	202,0 0.727	belichting + pompen / ventilatoren

*) bat = best available technique

) expect^{} = expected in 2020

3.1.1 Beschrijving simulaties

De volgende simulaties zijn uitgevoerd:

Roos belicht

- 1 Basissituatie:
 - a rozenteelt zoals in beschreven in bijlage B, (2 ha, 3995 uur belicht)
 - b status belichting: 2006; lamprendement= 38,6% en daarmee systeemrendement van circa 33,7%WK gedimensioneerd op 100% van vermogen voor belichting (elektrisch rendement WK = 42,5%)
 - c WK alleen aan of uit (geen deellast bedrijf)
 - d CO₂ doseren met WK (gedurende daguren), ook als warmtebuffer vol is (er wordt
 - e in deze situatie gedurende 2635 uur per jaar elektriciteit teruggeleverd)
- 2 Als 1, maar WK gedimensioneerd op 50% van vermogen voor belichting (de resterend benodigde elektriciteit wordt ingekocht; hierbij is er een kleiner warmteoverschot)
- 3 Als 1, maar daarnaast warmtelevering aan 1 ha onbelichte tomaat (levering derde)
- 4 Als 1, maar daarnaast warmtelevering aan 2 ha onbelichte tomaat (levering derde)
- 5 Als 1, maar WK met elektrisch rendement van 70%
- 6 Als 5, maar rendement van assimilatielampen 50% (systeemrendement 44,4%)
- 7 Als 6, maar WK gedimensioneerd op 200% van vermogen voor belichting (dus veel meer elektriciteitsteruglevering)
- 8 Als 6, maar WK gedimensioneerd op 300% van vermogen voor belichting (dus veel meer elektriciteitsteruglevering).

Tomaat belicht

- 1 Basissituatie:
 - a tomatenteelt zoals in beschreven in bijlage B, (2 ha, 2630 uur belicht)
 - b status belichting: 2006; lamprendement= 38,6% en daarmee systeemrendement van circa 33,7%
 - c WK gedimensioneerd op 100% van vermogen voor belichting (elektrisch rendement WK = 42,5%)

- d WK alleen aan of uit (geen deellast bedrijf)
 - e CO₂ doseren met WK (gedurende daguren), ook als warmtebuffer vol is (er wordt in
 - f deze situatie gedurende circa 3000 uur elektriciteit teruggeleverd)
- 2 Als 1, maar CO₂-dosering alleen zolang warmtebuffer niet vol is (in deze situatie wordt gedurende 1530 uur elektriciteit teruggeleverd)
 - 3 Als 2, maar daarnaast warmtelevering aan 1 ha onbelichte tomaat (levering derde)
 - 4 Als 2, maar daarnaast warmtelevering aan 1 ha onbelichte tomaat als onderdeel van het eigen bedrijf¹⁰.
 - 5 Als 2, maar daarnaast warmtelevering aan 2 ha onbelichte tomaat (levering derde)
 - 6 Als 2, maar daarnaast warmtelevering aan 2 ha onbelichte tomaat (onderdeel eigen bedrijf)
 - 7 Als 2, maar WK met elektrisch rendement van 70%
 - 8 Als 7, maar WK gedimensioneerd op 200% van de vermogensvraag voor belichting èn met warmtelevering aan 2 ha tomaat van derden
 - 9 Als 7, maar WK gedimensioneerd op 200% van de vermogensvraag voor belichting èn met warmtelevering aan 3 ha tomaat van derden
 - 10 Als 7, maar met rendement van assimilatielampen van 50%¹¹ (systeemrendement 44.4%)
 - 11 Als 10, maar WK gedimensioneerd op 200% van de vermogensvraag voor belichting èn met warmtelevering aan 3 ha tomaat van derden
 - 12 Als 10, maar WK gedimensioneerd op 266%¹² van de vermogensvraag voor belichting èn met warmtelevering aan 3 ha tomaat van derden.

¹⁰ Hierbij wordt naar het gemiddelde energieverbruik per m² van het 'gemengde' bedrijf gekeken (dus 2 ha tomaat belicht + 1 ha tomaat onbelicht); en vergeleken met dat van het referentiesysteem (situatie 1).

¹¹ In deze studie is ervan uitgegaan dat als in de toekomst de lampen efficiënter worden en/of het licht efficiënter kan worden benut door de plant het belichtingsniveau niet door de tuinder zal worden aangepast. Bij efficiëntere benutting van het licht, zal de productie dan omhoog gaan.

Tomaat belicht, semi-gesloten

- 1 Basissituatie:
 - a semi-gesloten tomatenteelt zoals is beschreven in bijlage C tabel C.3 (2 ha, 2480 uur belicht met $160 \mu\text{mol/s/m}^2$, totaal actief koelvermogen 300 W/m^2 , o.b.v. aquifer, koudebuffer en koelmachine)
 - b status belichting: 2006; lamprendement= 38,6% en daarmee systeemrendement van circa 33,7%
 - c warmtepomp/koelmachine met verwarmingsvermogen van $1031 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{ha}$)
 - d WK gedimensioneerd op 100% van maximum vermogen benodigd voor warmtepomp/koelmachines en ventilatoren+pompen ($303 \text{ kW}_e/\text{ha}$, elektrisch rendement WK = 39%). WK maakt circa 5200 draaiuren per jaar
 - e elektriciteit voor belichting wordt ingekocht (anders te groot warmteoverschot)
 - f WK wordt in stappen gemoduleerd op benodigd vermogen voor koelen/ontvochtigen en verwarmen (ter vermijding van extra WK-warmteoverschotten)
 - g CO_2 doseren op basis van CO_2 van WK aangevuld met ingekochte, zuivere CO_2
- 2 Als 1, maar WK en warmtepompvermogen 3x zo groot i.v.m. externe levering van warmte aan 4 ha onbelichte, niet-gesloten tomaat
- 3 Als 1, maar WK en warmtepompvermogen 4x zo groot i.v.m. externe levering van warmte aan 4 ha onbelichte, niet-gesloten tomaat
- 4 Als 1, maar WK en warmtepompvermogen 6x zo groot i.v.m. externe levering van warmte aan 6 ha onbelichte, niet-gesloten tomaat.

3.2 Energetisch effect maatregelen / ontwikkelingen

De belangrijkste uitkomsten van de in de vorige paragraaf beschreven simulaties zijn weergegeven in tabel 3.1, 3.2 en 3.3. Het gaat hier met name om het primaire energieverbruik per ha (bepaald zoals beschreven in paragraaf 1.1, met een aangenomen gemiddeld centralerendement van 45% op onderwaarde en 40,5% op bovenwaarde). Verder is de reductie ten opzichte van de basissituatie gegeven (simulatie 1). Ter referentie is ook het normenergie verbruik van de teelt voor 2010 volgens het Besluit glastuinbouw gegeven en in de laatste kolom de procentuele reductie die optreedt bij de verschillende maatregelen/ontwikkelingen ten opzichte van de basissituatie. Meer details van de bereke-

¹² Er is hier niet voor 300% gekozen, zoals bij de simulaties van de roos, omdat er bij die dimensionering een te groot warmteoverschot ontstond.

ningen (o.a. gasverbruik, elektriciteitsverbruik, elektriciteits- en warmtelevering e.d.) kunnen worden gevonden in bijlage F, tabel F.1, F.2 en F.3.

Tabel 3.1 Primair energieverbruik bij de diverse energiebesparende maatregelen c.q. ontwikkelingen bij belichte roos (bij centralerendement van 45% op onderwaarde)

Roos belicht 3995 h, 130 $\mu\text{mol/s/m}^2$	Primaire-energieverbruik			Norm Besluit glastuinbouw	
	Eprimair per ha	Reductie t.o.v. basecase	Opp. bedrijf ha	Energiedoelstelling 2010	Rel.verschil tov Enorm 2010
	GJ/ha/a	%	ha	GJ/ha/a	%
1 Basissituatie: WK op 100% van Pbelichten	32126		2	20830	54.2%
2 WK op 50% van Pbelichten	32747	1.9%	2	20830	57.2%
3 WK 100% v.Pbelicht+Wlev_1ha_tom	27071	-15.7%	2	20830	30.0%
4 WK 100% v.Pbelicht+Wlev_2ha_tom	24198	-24.7%	2	20830	16.2%
5 WK op 100% van Pbelichten, rend_WK=70%	17042	-47.0%	2	20830	-18.2%
6 WK op 100% v.Pbelicht, rend_WK=70%, rend_lamp=50%	16320	-49.2%	2	20830	-21.7%
7 WK op 200% v.Pbelicht, rend_WK=70%, rend_lamp=50%	1316	-95.9%	2	20830	-93.7%
8 WK op 300% v.Pbelicht, rend_WK=70%, rend_lamp=50%	-12896	-140.1%	2	20830	-161.9%

De maximale reductie van het primaire energieverbruik wanneer er geen warmte buiten de belichte tuin wordt geleverd, zonder inzet van biobrandstoffen en bij een WK gedimensioneerd op de elektriciteitsvraag van de belichtingsinstallatie bedraagt **49,2%** (rij 6). De reductie is een gevolg van betere lampen en een efficiëntere WK.

Tabel 3.2 Primair energieverbruik bij de diverse energiebesparende maatregelen c.q. ontwikkelingen bij belichte tomaat (bij centralerendement van 45% op onderwaarde)

Tomaat belicht 2630 uur, 160 $\mu\text{mol/s/m}^2$	Primaire-energieverbruik			Norm Besluit glastuinbouw	
	Eprimair per ha	Reductie t.o.v. basecase	Opp. bedrijf ha	Energiedoelstelling 2010	Rel.verschil tov Enorm 2010
	GJ/ha/a	%	ha	GJ/ha/a	%
1 WK 100% van Pbelicht; on plat.u+CO2;	29716		2	22142	34.2%
2 WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO2; buf niet vol	26707	-10.1%	2	22142	20.6%
3 WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO2; buf niet vol;ext.Wlev:1ha tom	22731	-23.5%	2	22142	2.7%
4 WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO2; buf niet vol;Wlev:1ha tom 3ha tot	20927	-29.6%	3	20731	0.9%
5 WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO2; buf niet vol;ext.Wlev:2ha tom	21117	-28.9%	2	22142	-4.6%
6 WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO2; buf niet vol;Wlev:2ha tom 4ha tot	19219	-35.3%	4	20026	-4.0%
7 WK op 100% van Pbelichten + rend_WK=70%	21311	-28.3%	2	22142	-3.8%
8 WK op 200% van Pbelichten + rend_WK=70%:Wlev.2ha tom	7901	-73.4%	2	22142	-64.3%
9 WK op 200% van Pbelichten + rend_WK=70%:Wlev.3ha tom	5085	-82.9%	2	22142	-77.0%
10 WK op 100% van Pbelichten, rend_lamp_50% + rend_WK=70%	13164	-55.7%	2	22142	-40.5%
11 WK 200% v.Pbelichten,rend_lamp50%, rend_WK=70%:Wlev.3ha tom	-3312	-111.1%	2	22142	-115.0%
12 WK 266% v.Pbelichten,rend_lamp50%, rend_WK=70%:Wlev.3ha tom	-13222	-144.5%	2	22142	-159.7%

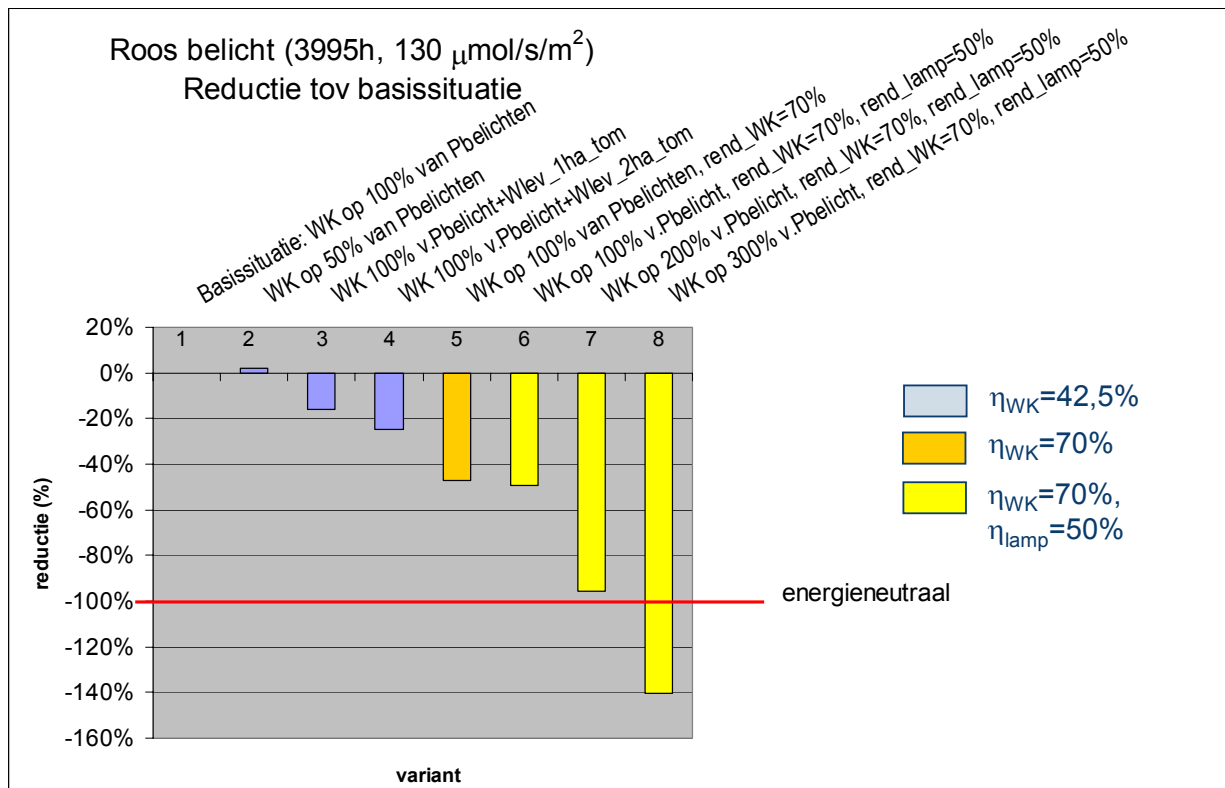
De maximale reductie van het primaire energieverbruik wanneer er geen warmte buiten de belichte tuin wordt geleverd, zonder inzet van biobrandstoffen en bij een WK gedimensioneerd op de elektriciteitsvraag van de belichtingsinstallatie bedraagt **55,7%** (rij 10).

Tabel 3.3 Primair energieverbruik van semi-gesloten, belichte tomatenteelt bij de verschillende niveau's van warmtelevering (bij centralerendement van 45% op onderwaarde)

Tomaat, semi-gesloten, belicht 2480 uur, 160 $\mu\text{mol/s/m}^2$ koeling max.300 W/m ² Beschrijving energiesysteem+inzetstrategie	Primaire-energieverbruik			Norm Besluit glastuinbouw	
	Eprimair per ha	Reductie t.o.v. basecase	Opp. bedrijf ha	Energiedoel- stelling 2010	Rel.verschil tov Enorm 2010
	GJ/ha/a	%	ha	GJ/ha/a	%
1 WK 100% van P_WK_WP0 gesloten; on plat.u+CO2;	31225	0.0%	2	22142	41.0%
2 WK+WP 300% van P_WK_WP0 gesloten; on plat.u+CO2; ext.Wlev:4ha	16383	-47.5%	3	22142	-26.0%
3 WK+WP 400% van P_WK_WP0 gesloten; on plat.u+CO2; ext.Wlev:4ha	17067	-45.3%	4	22142	-22.9%
4 WK+WP 400% van P_WK_WP0 gesloten; on plat.u+CO2; ext.Wlev:6ha	12435	-60.2%	5	22142	-43.8%

3.2.1 Discussie resultaten roos, belicht, 3995 uur, 130 $\mu\text{mol/s/m}^2$

Figuur 3.1 toont in een staafdiagram de procentuele energiebesparing van de maatregelen en ontwikkelingen bij de belichte roos. In figuur 3.4 respectievelijk figuur 3.7 is ditzelfde gebeurd voor de belichte tomatenteelt en semi-gesloten, belichte tomatenteelt.



Figuur 3.1 Procentuele besparing op energieverbruik bij verschillende maatregelen c.q. ontwikkelingen in het geval van belichte roos (bij centrale rendement van 45% o.w.). De nummers boven de balken verwijzen naar de nummers in de beschrijving van de simulaties in paragraaf 3.1.1

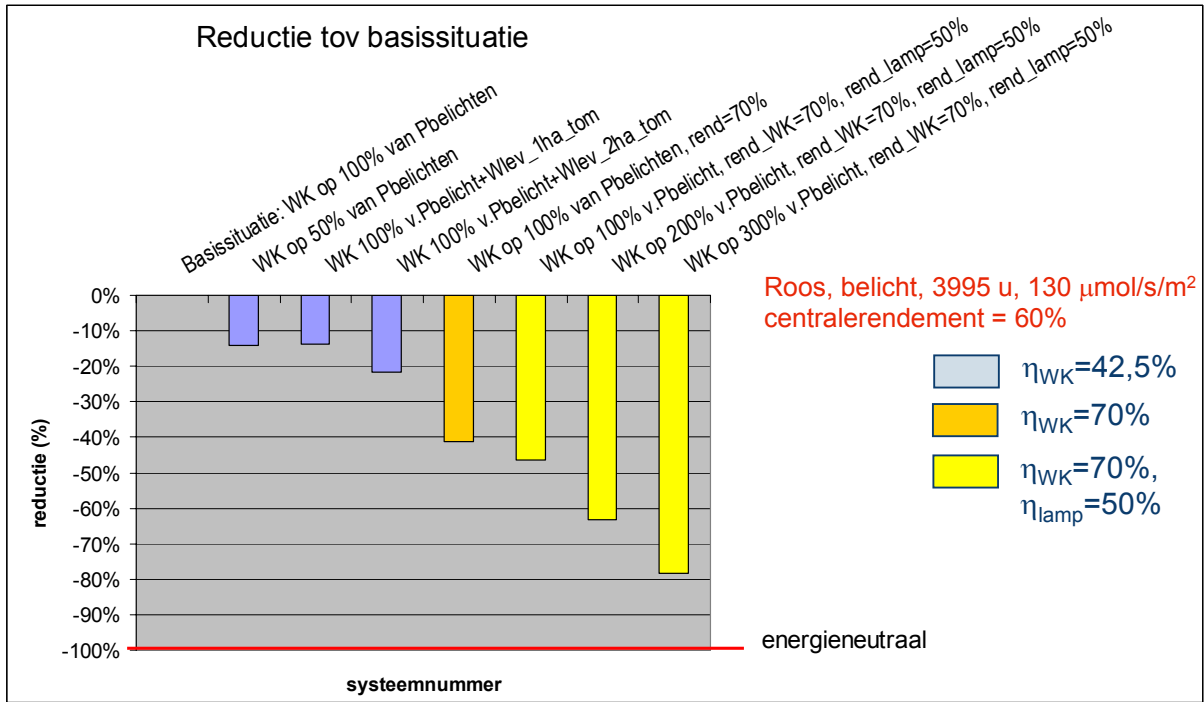
Uit figuur 3.1 (roos, belicht) kan het volgende worden afgeleid:

- simulatie 2: de warmtekrachtinstallatie dimensioneren op 50% van het vermogen van de belichting en de rest inkopen heeft geen positief effect op het primaire energieverbruik. Het verbruik neemt zelfs iets toe (door inkoop van extra elektriciteit voor belichting en minder teruglevering in niet belichte periode)
- simulatie 3+4: warmte leveren aan 1 respectievelijk 2 ha onbelichte (externe) tomatenteelt - bij een warmtekrachtinstallatie gedimensioneerd op 100% van het vermogen van de belichting - bespaart ca 16% respectievelijk 25% primaire energie
- simulatie 5: opvoeren van het rendement van de warmtekrachtinstallatie van 42,5% tot 70% (zonder warmtelevering) bespaart circa 47% op het primaire energieverbruik
- simulatie 6: als aan 5 nog een betere belichtingsinstallatie wordt “toegevoegd” (met 50% lamprendement, 44,4% systeemrendement), dan stijgt de besparing nog met ca 2% tot 49%. Dit lijkt op het eerste gezicht weinig. Dit heeft te maken met het feit dat er meer moet worden gestookt in de kas, omdat er minder lampwarmte in de kas gebracht wordt,

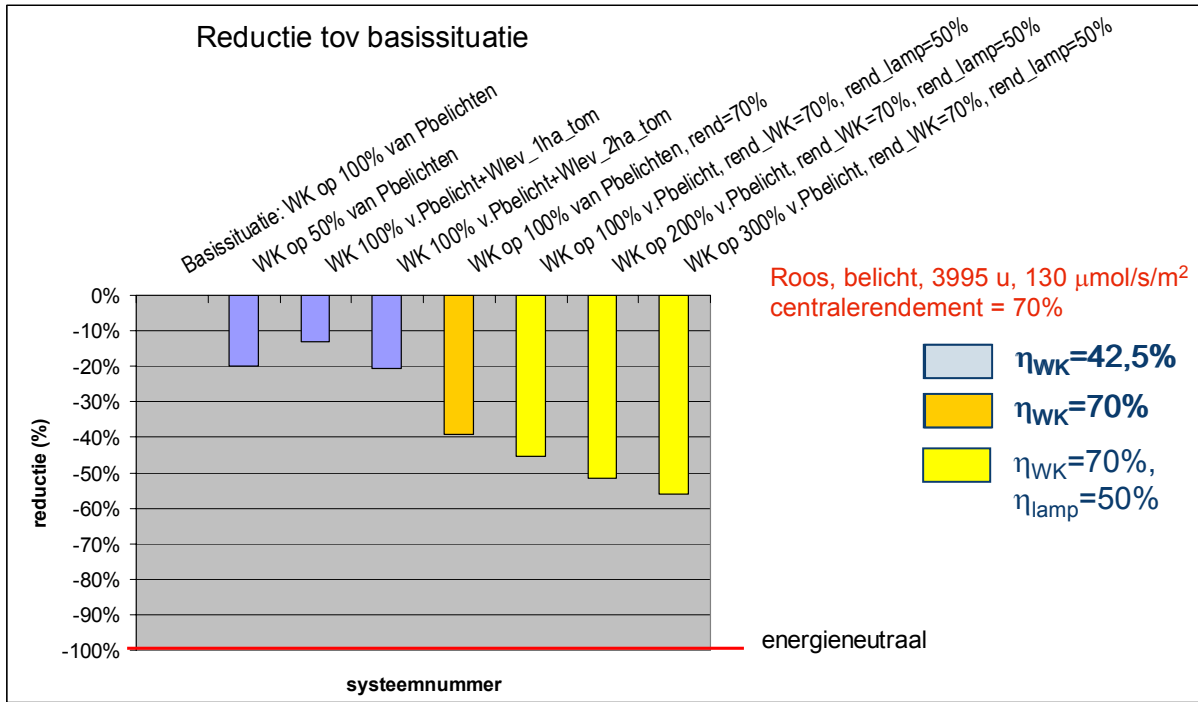
en vooral ook omdat er minder elektriciteit wordt teruggeleverd (de WK is immers kleiner en het aantal draaiuren is hetzelfde¹³). Bij de condities van deze simulatie is er bijna geen warmteoverschot op het bedrijf meer (zie ook tabel F.1 in bijlage F). Dit is het beste scenario waarbij geen warmte buiten de belichte tuin wordt geleverd (en de WKK gedimensioneerd is op het verbruik van de belichtingsinstallatie en geen biobrandstof wordt gebruikt).

- simulatie 7+8: hierbij wordt de WK groter gedimensioneerd dan nodig voor belichting (op 200% respectievelijk 300%). Er wordt in deze situatie veel meer elektriciteit teruggeleverd aan het net. Dit is in dit geval heel gunstig voor het primaire energieverbruik (PE), omdat de WK-eenheid door het hoge rendement relatief weinig brandstof nodig heeft (veel minder dan de gemiddelde elektriciteitscentrale voor diezelfde hoeveelheid elektriciteit nodig zou hebben. De verdrongen hoeveelheid PE mag van het bruto PE-verbruik worden afgetrokken.)
- in figuur 3.1 valt verder op dat situatie 7 bijna energieneutraal (ca 95% reductie op primair energieverbruik) en situatie 8 zelfs beter is dan energieneutraal. Het netto primaire energieverbruik is in die situatie negatief
- het blijkt dat bij WK's met een omzettingsrendement van 70% (beoogd in 2020) het voor het primaire energieverbruik heel gunstig is om zoveel mogelijk elektriciteit terug te leveren. Dit heeft te maken met het feit dat de WK-eenheid een veel hoger rendement heeft dan het centrale parkrendement, waarvoor een waarde van 45% (o.w.) is aangenomen (schatting voor 2010). In de toekomst zal, als er vanuit gegaan wordt dat er deels vervangende en deel additionele nieuwbouw van elektriciteitscentrales komt, het "parkrendement" naar verwachting ook toenemen. Tot hoever is vooralsnog niet duidelijk. Om na te gaan wat het effect is van een ander parkrendement op de reductie van het PE-verbruik is figuur 3.1 ook opgesteld voor 2 andere waarden van het rendement, te weten 60% en 70%. De resultaten zijn gegeven in figuur 3.2 respectievelijk figuur 3.3
- hieruit blijkt – zoals ook te verwachten viel - dat naarmate het centralerendement hoger wordt, het effect van een grotere WK met dienovereenkomstig meer terugleveren, minder gunstig wordt. Maar ook bij gelijk rendement van WK en centrale blijft er nog steeds een positief effect over van ca 7% extra reductie bij WK-vermogen van 200% en 11% bij WK-vermogen van 300% van het vermogen nodig voor belichting. Dit komt omdat er minder ketelgas nodig bij grotere WK's (zie ook tabel F.1)
- algemeen kan worden geconcludeerd, dat het voor het primaire energieverbruik gunstig is, om zoveel mogelijk elektriciteit terug te leveren, zolang het elektrisch opwekrendement van de (tuinders)WK hoger ligt dan het referentierendement van het centrale elektriciteitsproductiepark.

¹³ Dit komt in dit geval omdat de inzetstrategie van de WK zo is, dat deze bij CO₂-vraag altijd draait, ook al is de warmtebuffer vol.

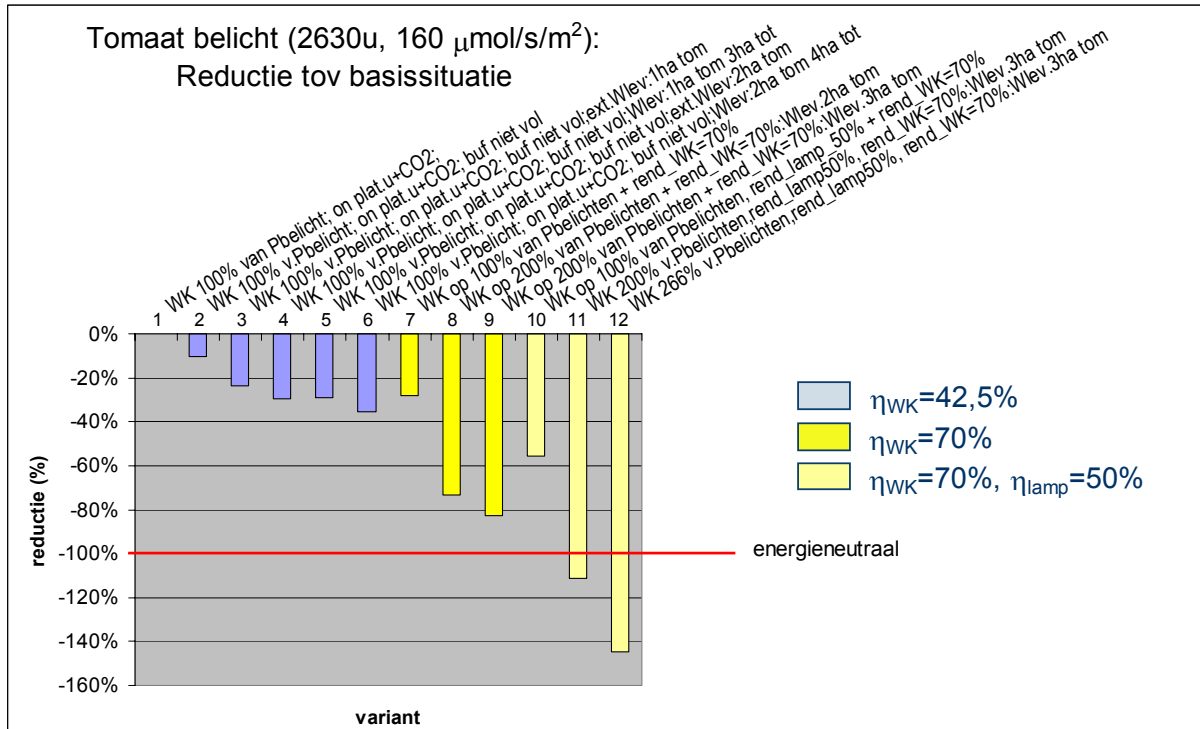


Figuur 3.2 Procentuele besparing op energieverbruik bij verschillende maatregelen c.q. ontwikkelingen in het geval van belichte roos (bij centralerendement van 60% o.w.). De nummers boven de balken verwijzen naar de nummers in de beschrijving van de simulaties in paragraaf 3.1.1



Figuur 3.3 Procentuele besparing op energieverbruik bij verschillende maatregelen c.q. ontwikkelingen in het geval van belichte roos (bij centralerendement van 70% o.w.). De nummers boven de balken verwijzen naar de nummers in de beschrijving van de simulaties in paragraaf 3.1.4

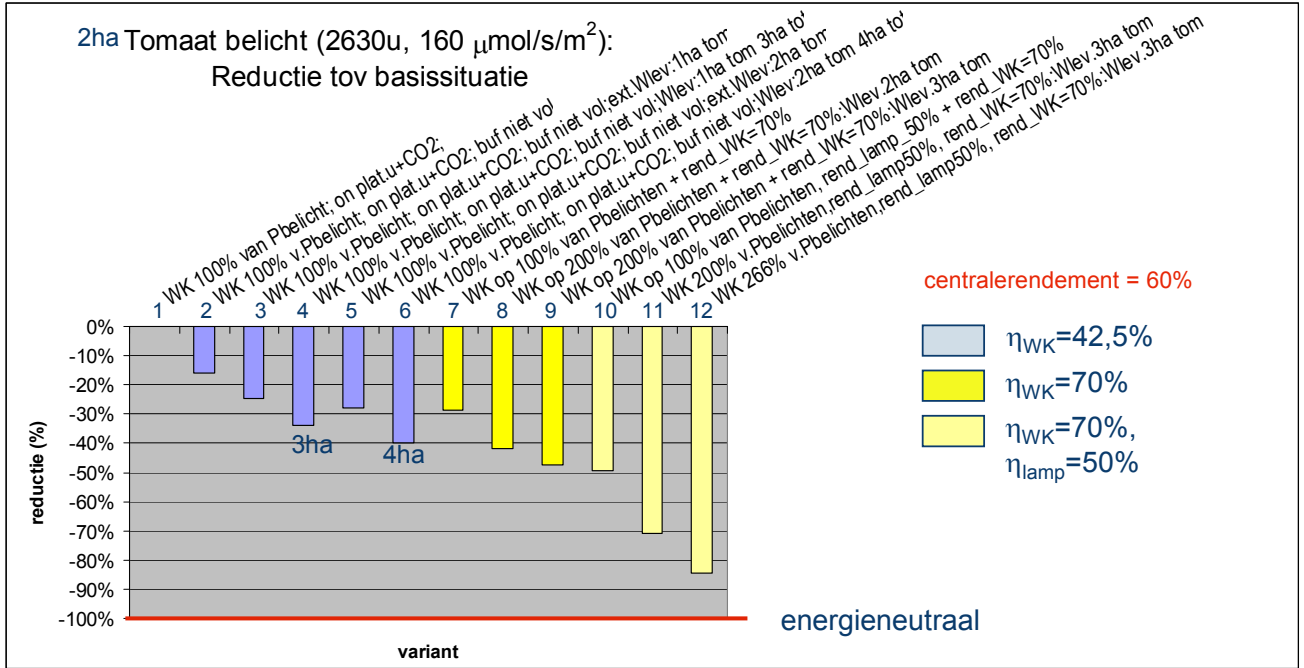
3.2.2 Discussie resultaten Tomaat, belicht, 2630 uur, 160 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (figuur 3.4)



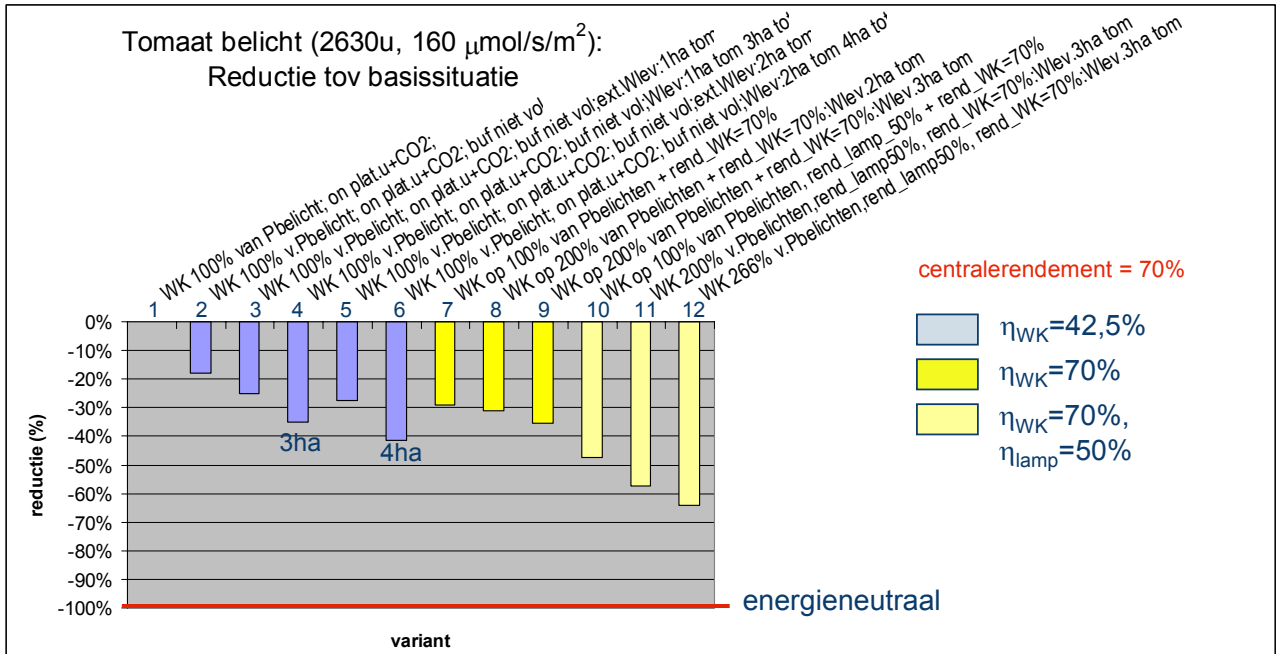
Figuur 3.4 Procentuele besparing op energieverbruik bij verschillende maatregelen c.q. ontwikkelingen in het geval van belichte tomaat (bij centralerendement van 45% o.w.)

- simulatie 2: hierbij wordt gestopt met CO₂-dosereren zodra de warmtebuffer vol is. Dit leidt tot minder overschotverliezen en daardoor tot een beter primair energieverbruik (-10%)
- simulatie 3+5: warmte leveren aan 1 respectievelijk 2 ha onbelichte (externe) tomatenteelt - bij een warmtekrachtinstallatie gedimensioneerd op 100% van het vermogen van de belichting - bespaart ca 24% respectievelijk 29% primaire energie ten opzicht van de basissituatie
- simulatie 4+6: warmte leveren aan 1 respectievelijk 2 ha onbelichte tomatenteelt op het eigen bedrijf - bij een warmtekrachtinstallatie gedimensioneerd op 100% van het vermogen van de belichting - bespaart ca 30% respectievelijk 45% primaire energie gemiddeld per ha van het gemengde bedrijf (belicht/niet belicht) ten opzicht van de basissituatie (alleen belichte teelt). N.b. dit is een iets andere verrekening als bij de simulaties 3+5
- simulatie 7: opvoeren van het rendement van de warmtekrachtinstallatie van 42,5% tot 70% (zonder warmtelevering) bespaart circa 28% op het primaire energieverbruik van de basissituatie

- simulatie 8+9: extra warmte leveren aan 2 respectievelijk 3 ha, met een WK die 2x zo groot als nodig is voor de belichting, leidt tot een reductie van het PE-verbruik van 73% respectievelijk 83% (bij een centrale rendement van 45%)
- simulatie 10: als aan case 7 nog een betere belichtingsinstallatie wordt “toegevoegd” (met 50% lamprendement, 44,4% systeemrendement), dan verdubbelt de besparing nog van ca 28% tot 56%. Dit komt vooral omdat er in deze situatie minder gas voor de WK hoeft te worden ingekocht, er een groter aantal WK-draaiuren is (5641 i.p.v. 4545), waardoor er meer kan worden teruggeleverd en geen warmteverliezen zijn (zie tabel F.2). N.B. deze situatie verschilt duidelijk van de equivalente simulaties 5 en 6 van de roos, waar het besparingseffect van de efficiëntere lamp in de setting aldaar juist wat tegenviel
- simulatie 11+12: hierbij wordt in vergelijking met case 10 de WK groter gedimensioneerd dan nodig voor belichting (op 200% respectievelijk 266% en er wordt warmte geleverd aan 3 ha onbelichte (externe) tomatenteelt. Er wordt in deze situatie veel meer elektriciteit teruggeleverd aan het net plus nog eens externe warmte geleverd. Het eerste is gezien het in deze set simulaties veronderstelde veel lagere centralerendement (van 45%, o.w.) heel gunstig voor het primaire energieverbruik (PE), omdat de WK-eenheid door het hoge rendement (70%) relatief weinig brandstof nodig heeft. Daarnaast draagt de warmtelevering fors bij aan de reductie van het primaire verbruik. Bij simulatie 11 is de reductie 111% en bij 12 zelfs 144%. (N.B. aan de warmtelevering zijn geen verliezen toegerekend)
- bij een in 2020 verondersteld beter centralerendement van bijvoorbeeld 60% respectievelijk 70% is de reductie van het primaire verbruik bij simulatie 11 en 12 minder (omdat, zoals ook al bij de roos toegelicht, de extra terug geleverde elektriciteit minder zwaar in de balans meetelt door de lagere primaire energiefactor in die situatie). De reductiegrafieken zijn gegeven in figuur 3.5 respectievelijk figuur 3.6. De besparingen zijn bij parkrendement van 60% nog steeds circa 70% respectievelijk 83% en bij een parkrendement van 70% nog steeds circa 58% respectievelijk 64%. Daarmee is deze wijze van bedrijfsvoeren onder alle omstandigheden gunstig voor het primaire energieverbruik.



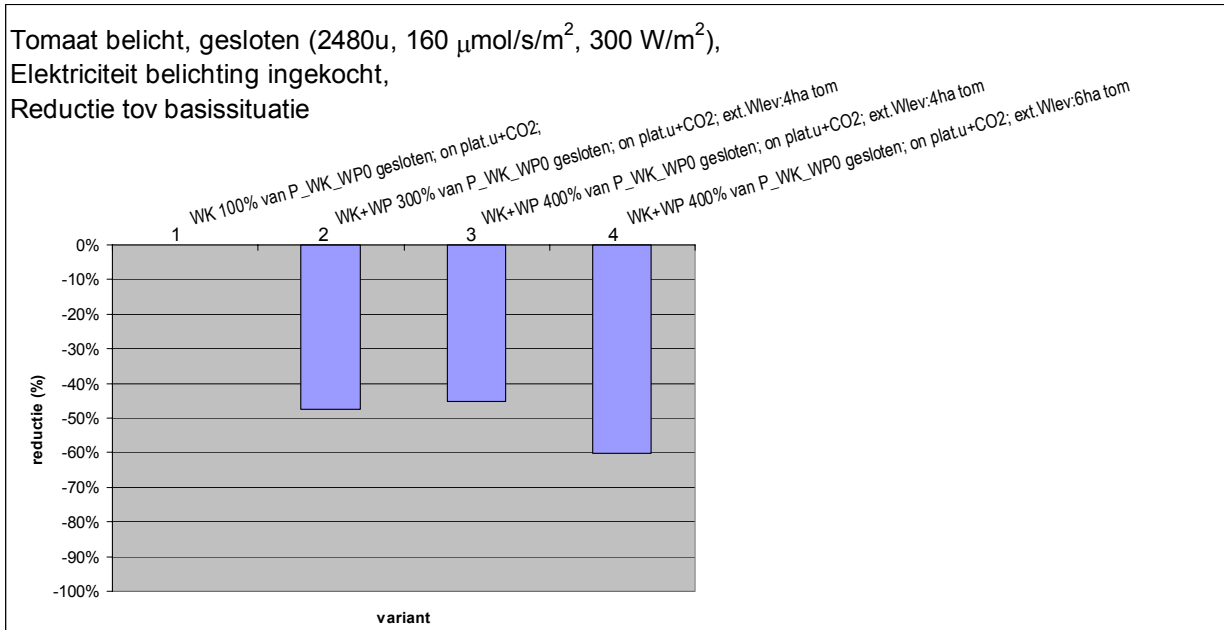
Figuur 3.5 Procentuele besparing op energieverbruik bij verschillende maatregelen c.q. ontwikkeling in het geval van belichte tomaat (bij centralerendement van 60% o.w.). De nummers boven de balken verwijzen naar de nummers in de beschrijving van de simulaties in paragraaf 3.1.1



Figuur 3.6 Procentuele besparing op energieverbruik bij verschillende maatregelen c.q. ontwikkeling in het geval van belichte tomaat (bij centralerendement van 70% o.w.). De nummers boven de balken verwijzen naar de nummers in de beschrijving van de simulaties in paragraaf 3.1.1

3.2.3 **Discussie resultaten gesloten-kas, Tomaat, belicht, 2480 uur, 160 $\mu\text{mol/s/m}^2$, 300 W/m² koelvermogen (figuur 3.7)**

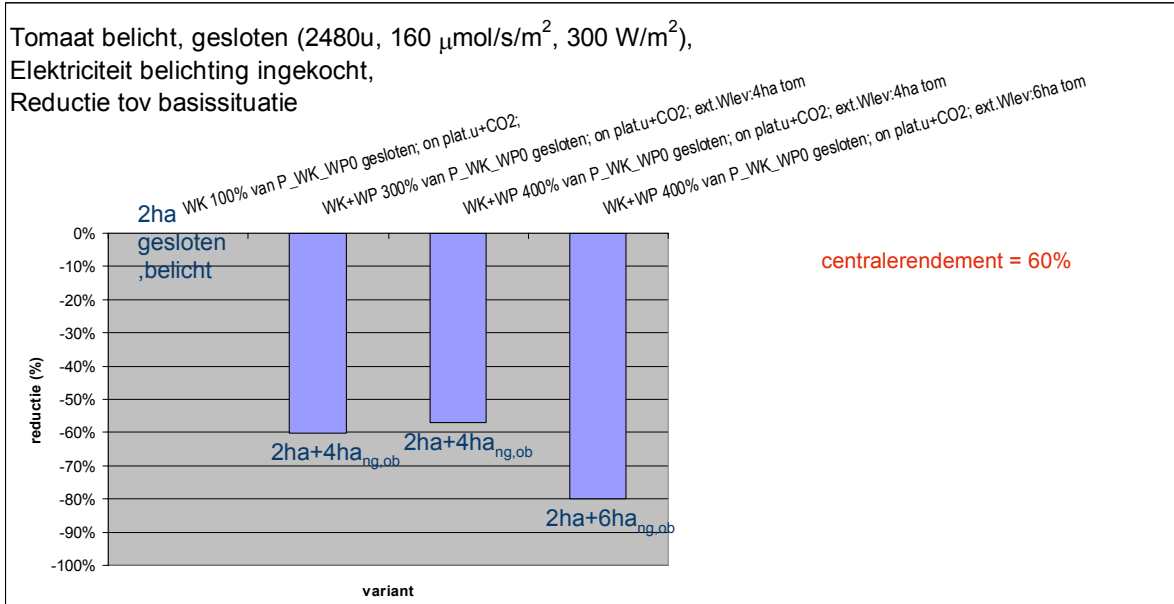
In de simulaties is met name onderzocht wat het effect is van verschillende hoeveelheden warmtelevering aan een niet-gesloten kas op het primaire energieverbruik. Hierbij is het vermogen van de warmtepomp en de WK hiervoor aangepast aan de grootte van de warmtevraag.



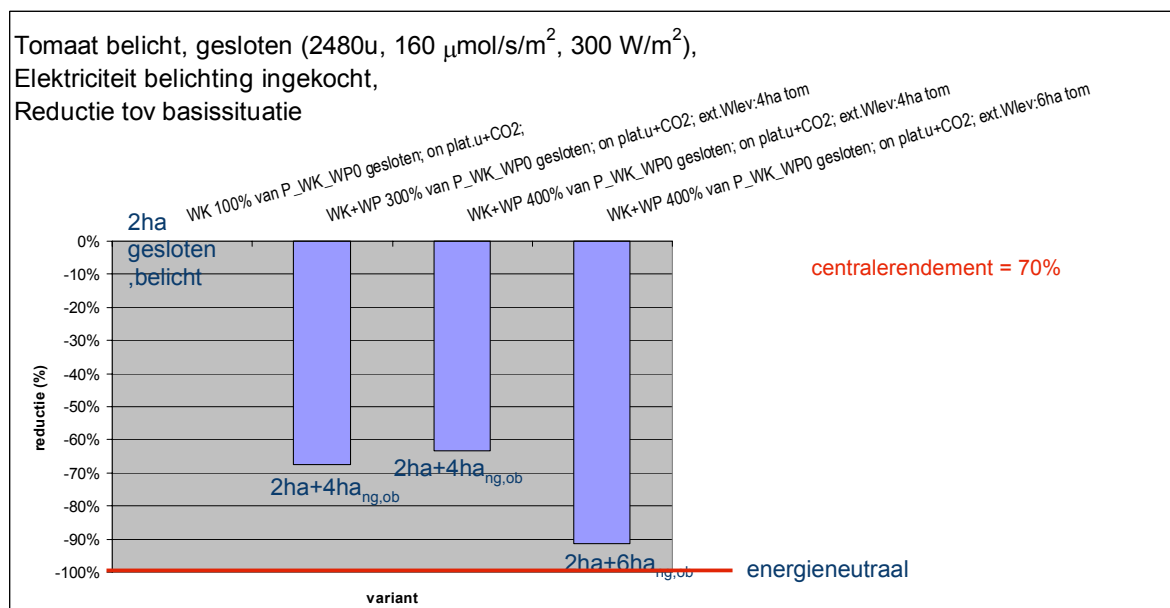
Figuur 3.7 Procentuele besparing op energieverbruik bij verschillende hoeveelheden externe warmtelevering in het geval van semi-gesloten, belichte tomaat (centraalrendement: 45% o.w.)

- simulatie 2: in deze situatie levert 2 ha semigesloten-kas warmte aan 4 ha externe belichte teelt. Het warmtepomp en warmtekrachtsysteem is op 300% gedimensioneerd ten opzichte van dat van de uitgangssituatie zonder externe warmtelevering. In deze situatie wordt op het semi-gesloten bedrijf circa 48% primaire energie bespaard ten opzichte van de uitgangssituatie
- simulatie 3 is hetzelfde als simulatie 2, behalve dat nu het warmtepomp en warmtekrachtsysteem is gedimensioneerd op 400% van de uitgangssituatie. Dit levert een reductie van het primaire energieverbruik van ca 45% (iets minder dan bij simulatie 2 omdat er wat meer warmteoverschotten zijn)
- simulatie 4: hierbij is de warmtepomp en warmtekrachtsysteem ook gedimensioneerd op 400% van de uitgangssituatie, maar nu wordt warmte geleverd aan 3x zoveel niet-gesloten teelt (6 ha). In dit geval is de reductie van het energieverbruik circa 60%
- indien een hoger centraalrendement wordt genomen dan verondersteld in de hiervoor beschreven simulaties (45% o.w.), dan komt de besparing op het primaire energieverbruik in tegenstelling tot bij de niet-gesloten belichte teelten juist hoger uit. Bij een centraalrendement van 60% is de reductie (bij simulatie 4) ca 80% en bij 70% zelfs 91%. De reden waarom hier bij toenemend centraalrendement de reductie op het primair energieverbruik juist toeneemt, komt omdat in deze case de elektriciteit voor belichting

wordt ingekocht. Deze wordt bij een hoger centralerendement met een lagere energiefactor verrekend.



Figuur 3.8 Procentuele besparing op energieverbruik bij verschillende maatregelen c.q. ontwikkeling in het geval van belichte tomaat in semi-gesloten kas (bij centralerendement van 60% o.w.)



Figuur 3.9 Procentuele besparing op energieverbruik bij verschillende maatregelen c.q. ontwikkeling in het geval van belichte tomaat in semi-gesloten kas (bij centralerendement van 70% o.w.)

3.3 Conclusies energiehuishouding versus energieneutraal

We hebben in paragraaf 3.2 aan de hand van simulaties gekeken naar de effecten op het jaarrond netto primair energieverbruik van:

- warmtelevering buiten het eigen bedrijf (of desgewenst op het eigen bedrijf) aan een niet-belicht teelt
- elektriciteitsopwekking met een hoger elektrisch rendement
- extra elektriciteitsproductie en teruglevering aan het net
- efficiëntere lampen (50%)
- grootte van het referentierendement van het centrale elektriciteitsproductiepark.

Bij de roos bleek bij een combinatie van warmtelevering, elektriciteits teruglevering, een hoger elektrisch WK-rendement ($\eta_{WK}=70\%$, beoogd in 2020) en efficiëntere lampen ($\eta_{lampen}=50\%$) alleen energieneutraalbedrijf te kunnen zijn, als het gemiddelde centralerendement in het jaar van beoordeling lager is dan circa 53%¹⁴. Ligt het hoger dan zijn aanvullende

¹⁴ In BOSSELAAR wordt voor 2020 een elektrisch omzettingsrendement af productie gegeven van (slechts) 45,5% (gebaseerd op “GC-scenario” uit de WLO-studie van het CMP, MNP en RPB). Als dit uitkomt dan biedt een 70% WK-rendement veel perspectief voor energieneutraal bedrijf!

maatregelen nodig zoals de inzet van een deel duurzame brandstof in de WK. Overigens is bij de genoemde combinatie van maatregelen bij een centralerendement van 60% het hiaat tot energieneutraal nog circa 22% en bij 70% is dat het dubbele circa 44%. In deze analyses is nog niet meegenomen, dat mogelijk met lagere lichtniveaus kan worden volstaan als in de toekomst planten met een efficiëntere fotosynthese kunnen worden verkregen.

Bij de belichte tomaat is bij de combinatie efficiëntere WK, efficiëntere belichting, warmtelevering aan een niet belichtend bedrijf en elektriciteitssteruglevering energieneutraal bedrijf mogelijk zolang het gemiddelde centralerendement lager ligt dan circa 55%. Bij 60% centralerendement is het hiaat ca 16%, bij 70% is deze 36%.

Bij semi-gesloten kassen met belichte tomaat, waarbij de elektriciteit voor belichting wordt ingekocht en overtollige geogoste warmte zoveel mogelijk zelf wordt gebruikt en de rest wordt geleverd aan derden is (in ieder geval bij de onderzochte techniek op basis van warmtepompen/koelmachines, condensatiekoeling en –ontvochting en luchtverdeelsysteem o.b.v. slurven met ventilatoren) energieneutraal bedrijf door alleen warmtelevering niet mogelijk. Bij een referentie-centralerendement van 45% is een reductie van het primair energieverbruik van 60% mogelijk (bij levering van overtollige warmte aan een 3x zo groot niet-belicht bedrijf). Neemt het centralerendement toe dan wordt de reductie (in tegenstelling tot bij de cases van de belichte roos en de “normale” belichte tomaat) juist groter. Bij een centralerendement van 60% is de reductie circa 80% en bij 70% zelfs 91%! (Hierbij is overigens nog geen rekening gehouden met efficiëntere lampen en efficiëntere WK's. Het belang van de laatste is hier relatief minder groot omdat het grootste deel van de elektriciteit wordt ingekocht¹⁵). De reden waarom hier bij toenemend centralerendement de reductie op het primair energieverbruik juist toeneemt, komt omdat hier de elektriciteit voor belichting wordt ingekocht. Deze energiestroom wordt bij een hoger centralerendement met een lagere energiefactor verrekend.

¹⁵ De elektriciteit voor belichting wordt bij de simulaties van de semi-gesloten kas ingekocht. Hiervoor is gekozen omdat bij eigen opwekking met een WK nog eens veel warmte extra vrij komt, terwijl er al een overschot is.

4 ONTWIKKELINGEN VAN 2006 TOT 2020

4.1 Technisch

4.1.1 Efficiëntere assimilatiebelichtingssystemen

Zoals in hoofdstuk 2 is aangegeven wordt ervan uitgegaan dat in 2020 assimilatielampen met een fotonrendement van ca 2,7 $\mu\text{mol/s/W}_e$ mogelijk moeten zijn (naar verwachting op basis van LEDs). Op systeemniveau rekening houdend met rendement van voeding, optiek e.d. moet dan een PAR-stralingsrendement van circa 47,5% mogelijk zijn. (Dit is circa 14%-punt hoger dan de best available technique van 2006).

Op basis van de simulaties in hoofdstuk 3 (waarbij in een selectie van de simulaties het systeemrendement toenam van 33,5% tot 44,4%) kan een besparing op het primaire energieverbruik worden gerealiseerd tussen circa:

- 28 tot 18%-punt¹⁶ bij de belichte tomaat (bij $\eta_{\text{WK}}=70\%$ en $\eta_{\text{centrale}}=45$ tot 70%)
- tot 6%-punt bij de belichte roos (bij $\eta_{\text{WK}}=70\%$, en $\eta_{\text{centrale}}=45$ tot 70%).

Omgerekend naar een procentuele reductie betekent dat:

- 38 tot 26% bij de belichte tomaat (bij $\eta_{\text{WK}}=70\%$ en $\eta_{\text{centrale}}=45$ tot 70%)
- 4 tot 10% bij de belichte roos (bij $\eta_{\text{WK}}=70\%$ en $\eta_{\text{centrale}}=45$ tot 70%).

Bij de roos lijkt dit op het eerste gezicht weinig. Dit heeft te maken met het feit dat er bij een hoger lamprendement meer moet worden gestookt in de kas, omdat er minder lampwarmte in de kas gebracht wordt, en vooral ook omdat er minder elektriciteit wordt teruggeleverd (de WK is immers “kleiner” en het aantal draaiuren is hetzelfde¹⁷). Bij de belichte tomaat, met een langere rustperiode (8 uur i.p.v. 4 uur per nacht) is er een grotere dagwarmtevraag en zijn er minder bufferverliezen. De WK kan hier bij een hoger lamprendement ook meer draaiuren maken, waardoor de jaarlijkse elektriciteitsteruglevering hier juist toeneemt, ondanks de kleinere WK-installatie. Overigens is voor de roos ook nagegaan wat een beter

¹⁶ “%-punt” betekent dat het een verschil van twee percentages betreft: hier het verschil van het reductiepercentage van simulatie 10 (ten opzichte van de basissituatie 1) en van simulatie 7 (eveneens ten opzichte van de basissituatie 1), zie ook tabel 3.2. De procentuele reductie van situatie 10 ten opzichte van 7 is een grotere waarde en ligt tussen circa 38% tot 26%. (bij $\eta_{\text{centrale}}=45$ tot 70%)

¹⁷ Bij de simulaties van de roos is er vanuit gegaan dat de WK altijd draait als er CO_2 -vraag is, ook als de warmtebuffer vol is. Daardoor neemt hier het aantal draaiuren niet toe bij efficiëntere lampen en een dienovereenkomstig kleinere WK.

lamprendement betekent bij een lager WK-rendement van 42,5%. In dit geval is de besparing op het netto primaire energieverbruik circa 20%.

Resumerend kan worden gesteld dat efficiëntere lampen belangrijk zijn voor een energiezuinigere glastuinbouw, maar dat het reductiepercentage sterk afhangt van de specifieke omstandigheden (4-38%). Dit pleit ervoor die omstandigheden bij voorkeur en voor zover mogelijk zo te kiezen dat de reductie maximaal is.

Bestaande leveranciers van tuinbouwbelichting maar ook nieuwkomers zijn al bezig met de ontwikkeling van LED-gebaseerde belichtingssysteem. Voorwaarde voor geslaagde producten zijn op de eerste plaats de verkrijgbaarheid van LEDs van voldoende hoog rendement en een voldoende laag prijsniveau. LED-fabrikanten zullen hiervoor moeten zorgen. De verwachting is dat dit proces vrij autonoom zal verlopen. Wellicht helpt het wel als de tuinbouwsector druk uitoefent om LEDs te ontwikkelen met bepaalde in de tuinbouw gewenste, maar elders minder gebruikte kleuren (bijvoorbeeld verrood). Tevens is stimulering gewenst van ontwikkeling van tuinbouwarmaturen, die optimaal – qua warmtehuishouding, lichtonderschepping, lichtverdeling, lichtuitstoot naar buiten, ergonomie en dergelijke – in de kas dienen te worden ingepast.

4.1.2 Efficiëntere WK-installaties

Verhoging van het rendement van de WK-installatie (van 42,5% naar 70%) leidde in alle gevallen tot een forse reductie van het netto (fossiele) primaire energieverbruik (NPE):

- bij de belichte roos ca 47-39%-punt (bij centralerendementen van 45% -70%)
- bij de belichte tomaat ca 18-11%-punt¹⁸ (bij centralerendementen van 45% -70%).

Omgerekend naar een procentuele reductie betekent dat:

- bij de belichte roos ca 47-39% (bij centralerendementen van 45% -70%)
- bij de belichte tomaat ca 20-13% (bij centralerendementen van 45% -70%).

Daarmee kan deze ontwikkeling een zeer belangrijke contribuant aan een energiezuinigere belichte glastuinbouw worden.

¹⁸ De procentuele reductie van situatie 7 ten opzichte van situatie 2 - met als enige verschil het rendement van de WK, zie tabel 3-2 - ligt in vergelijking met de “%-punt-waarde” wat hoger: circa 20-13,5%.

Terwijl bij de efficiëntere assimilatiebelichtingssystemen de NPE-reductie het grootst was bij de belichte tomaat, is een efficiëntere WK het meest effectief bij de belichte roos. Dit komt omdat de WK bij de roos relatief veel draaiuren maakt (ca 6600 tegen ca 4150-4550 bij de tomaat) waardoor de besparing hier groter is. Bij de tomaat – waarbij een iets andere regelstrategie wordt gehanteerd - gaat de WK bij het hogere elektrische rendement circa 400 draaiuren meer maken, omdat de warmtebuffer minder snel vol is. Hiervoor is extra gas nodig, maar daar staat wel tegenover dat de elektriciteitslevering toeneemt.

In paragraaf 3.1.1.2 is aangegeven dat bij een hybride brandstofcel-WK bestaande uit SOFC-brandstofcellen gecombineerd met een microgasturbine over een aantal jaren een omzettingrendement van 70% wordt verwacht. Verschillende bedrijven zijn bezig met de ontwikkeling van SOFC- en hybride SOFC-brandstofcelwarmtekrachtssystemen, waaronder gerenommeerde bedrijven als Siemens/Westinghouse, Rolls Royce en General Electric. Vanwege de universele behoefte aan energiezuinigere warmtekrachtinstallaties, bestaat de verwachting, dat het ontwikkelwerk hiervoor ook door zal gaan zonder “pulling” acties vanuit de Nederlandse glastuinbouwsector.

4.1.3 Warmtelevering aan derden (of desgewenst aan niet-belichtend deel van eigen bedrijf)

Levering van overtollige warmte aan derden is ook een goede maatregel om het primaire energieverbruik van het belichtende bedrijf te reduceren. Leveren van warmte van 1 ha belichte teelt aan 1 ha onbelichte (tomaten)teelt bespaart:

- bij belichte roos: circa 25-20%-punt (bij centralerendementen van 45% -70%)
- bij belichte tomaat: ca 19-9%-punt (bij centralerendementen van 45% -70%).

Omgerekend naar een procentuele reductie betekent dat:

- bij belichte roos: circa 25-20% (bij centralerendementen van 45% -70%)
- bij belichte tomaat: ca 21-11% (bij centralerendementen van 45% -70%).

De (hoge-temperatuur) warmtelevering vereist in principe geen nieuwe ontwikkelingen en kan met de huidige stand van de techniek worden gerealiseerd.

4.1.4 Levering van lage-temperatuurwarmte bij (semi-)gesloten kassen

Bij semi-gesloten kassen (met belichting waarvoor elektriciteit wordt ingekocht), kan door warmtelevering van overtollige (laagwaardige warmte) aan derden circa 60% op het primaire

energieverbruik worden bespaard (bij 1 ha semi-gesloten kas aan 3 ha onbelicht, centrale rendement 45%). Bij hogere centralerendementen van 60% respectievelijk 70% zelfs tot 80% respectievelijk 91%).

Lage-temperatuur warmtelevering vereist in het algemeen additionele warmteafgifte-systemen in de kas. Warmtelevering kan alleen als er warmteafnemers in de buurt zijn. Dat hoeft overigens niet per se aan glastuinbouwbedrijven te zijn, maar dit kunnen ook andere warmteafnemers zijn, zoals industrie, kantoren, utiliteitsgebouwen of woningbouw. De levering van warmte aan niet-tuinbouw – zeker van laagwaardige warmte - komt nog niet veel voor en zou verder gestimuleerd moeten (hiervoor dienen bij voorkeur flexibele “energywebs” te worden gerealiseerd, waarin op verschillende punten warmte kan worden ingevoed en kan worden onttrokken. Een dergelijk web en de beheersing daarvan dient nog verder te worden uitontwikkeld (Knies, 2005 & Bestebroer, 2005). De tuinbouwsector zou hierop als potentiële grote aanbieder van warmte een stimulerende invloed op uit kunnen oefenen.

4.2 Extra teruglevering van elektriciteit aan het net (door grotere WK dan nodig voor belichting) in combinatie met meer externe warmtelevering

Dit kan afhankelijk van de ontwikkeling van het centralerendement bij een hoog WK-rendement zeer gunstig zijn. Bij een WK-installatie gedimensioneerd op 300% van het belichtingsvermogen bij de roos en op 266% bij de tomaat), een WK-rendement van 70%, en een lampsysteemrendement van 44,4%) is de reductie van het netto fossiele primaire energieverbruik circa:

- 91% -11%-punt bij belichte roos (bij centrale rendement van 45% - 70%)
- 89% -17%-punt bij belichte tomaat (bij centrale rendement van 45% - 70%).

Omgerekend naar een procentuele reductie betekent dat:

- 179% - 21% bij belichte roos (bij centrale rendement van 45% - 70%)
- 200% - 32% bij belichte tomaat: (bij centrale rendement van 45% - 70%).

Als de verwachting van de ontwikkeling van het centrale rendement voor 2010 respectievelijk 2020 zoals aangegeven in de WLO-studie van het CPB, MNP en RPB kloppen (Bosselaar, 2006 & WLO, 2006), namelijk 44,7% respectievelijk 45,5%, dan biedt een grotere gedimensioneerde, hoogefficiënte WK met extra elektriciteitsteruglevering en warmtelevering heel veel perspectief voor reductie van het netto primair energieverbruik. (Ook) hiervoor is het nodig dat de hoogefficiënte hybride brandstofcellen tot ontwikkeling komen.

4.3 Teelttechnisch

In de afgelopen jaren is veel ervaring op gedaan met belichting. Met name in de sierteelt wordt veel belichting toegepast, en ook in de vruchtgroenteteelt wordt steeds meer belichting toegepast. Met meer kennis van het optimaal gebruik van groeilicht, zijn er mogelijkheden om de efficiëntie van groeilicht verder te verbeteren. Er kunnen vier hoofdroutes onderscheiden worden om tot substantiële verbetering van de belichtingsefficiëntie te komen:

- 1 betere timing van belichting
- 2 betere plaatsing van belichting en lichtonderschepping door het gewas
- 3 aangepaste lichtkleur
- 4 afstemming belichting met andere teeltfactoren.

4.3.1 Betere timing van belichting

Elk gewasstadium kent zijn eigen dynamiek en behoeften. Het ligt dan ook erg voor de hand de belichting af te stemmen op het gewasstadium. Zo heeft een tomatengewas in de productiefase een andere lichtbehoefte dan een tomatengewas dat net geplant is. Een tomatengewas moet direct na planten niet of in ieder geval nog niet intensief belicht worden, want dan raakt de plant uit balans. Dit geeft ook direct aan dat belichting niet alleen aan gewasstadium moet worden aangepast maar ook aan gewasstand. Bijvoorbeeld in een periode met een hoge source/sink balans (hoge verhouding tussen aanmaak en vraag naar assimilaten) heeft de plant minder behoefte aan belichting dan op momenten met lage source/sink balans. Een hoge source/sink balans kan bijvoorbeeld bij roos die op snee geteeld wordt, optreden kort nadat er bloemstelen geoogst zijn of bij paprika als er een periodieke dip in plantbelasting is.

Naast deze enigszins langere termijn (dagen, weken, maanden) aanpassingen, is het ook belangrijk rekening te houden met dynamische veranderingen gedurende de dag. Veel gewassen kennen een dagelijks patroon in fotosynthese-efficiëntie gedurende het etmaal (zie figuur 4.1). Momenteel vindt nader onderzoek naar dit fenomeen plaats. Wanneer de fotosynthese-efficiëntie varieert gedurende het etmaal, varieert de efficiëntie van belichting mee. Het zou wenselijk zijn de belichtingsstrategie daar op aan te passen.

Wanneer de belichting in de nacht wordt aangeschakeld, is de fotosynthese-efficiëntie nog heel laag, om gedurende het eerste half uur snel toe te nemen tot een 'normaal' niveau (figuur 4.2). Dit betekent dat het eerste half uur de belichtingsefficiëntie vrij laag is en het

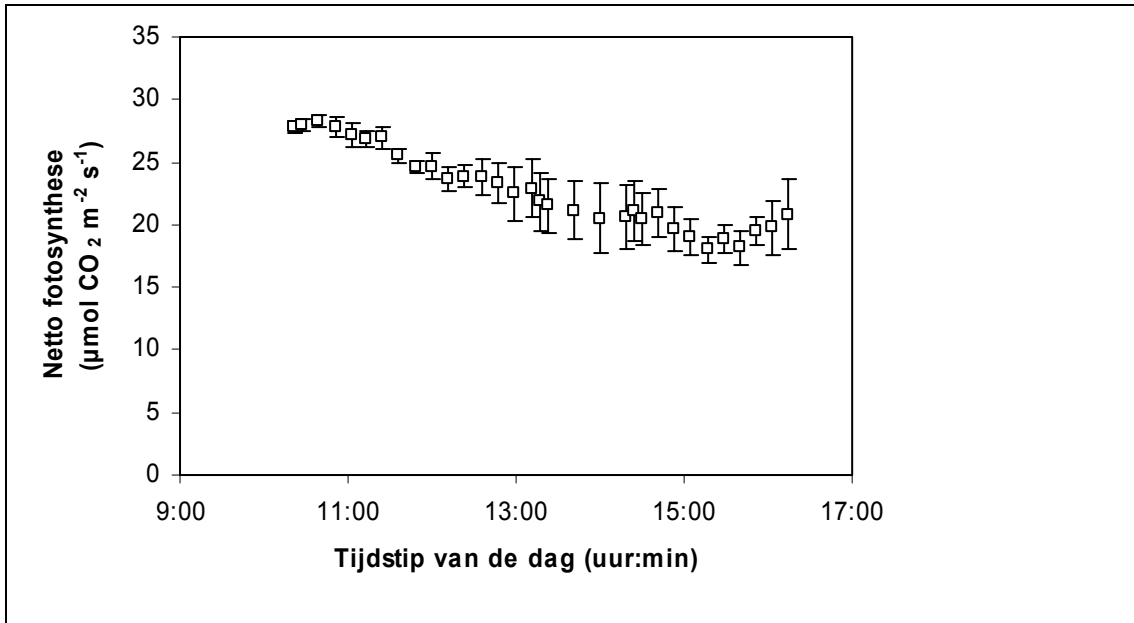
daarom niet zo efficiënt is om alle lampen tegelijk aan te schakelen. Het lijkt efficiënter om stapsgewijs het aantal aangeschakelde lampen te vergroten.

Bij enkele kasgewassen vertoont het fotosyntheseprocess het zogenaamde CAM mechanisme, zoals onder andere Phalaenopsis en verschillende bromelia's. Globaal kan gezegd worden dat deze planten 's nachts CO₂ opnemen terwijl overdag fotosynthese plaatsvindt; veelal kunnen bij CAM planten gedurende het etmaal 4 perioden onderscheiden worden met elk een verschillende huidmondjesopening en verschillende respons op CO₂ concentratie. Bij CAM planten zou het plantkundig gezien interessant kunnen zijn om na te gaan of enkele lichtperioden afgewisseld door donkerperioden meer fotosynthese geeft dan 1 licht- en 1 donkerperiode per etmaal. Overigens ook over de consequenties hiervan voor de overige planten (met het zogenaamde C3 mechanisme) is weinig bekend.

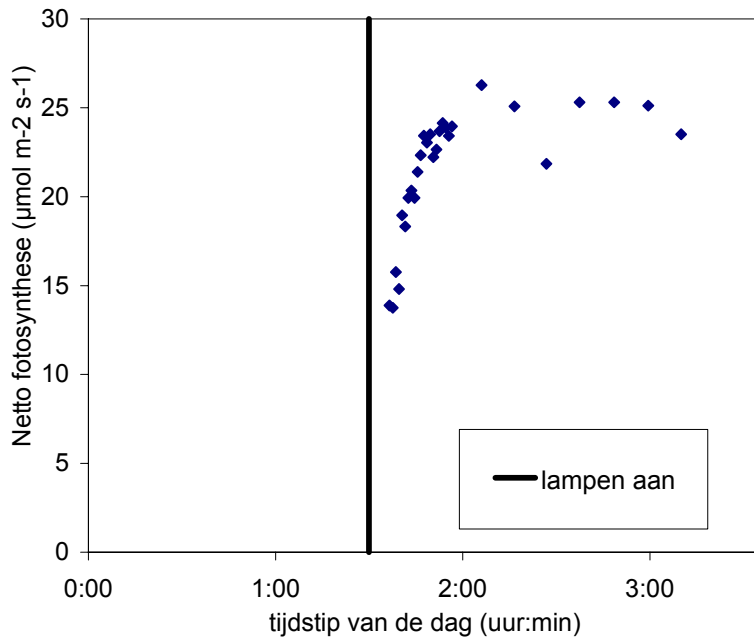
Veel gewassen hebben een bepaalde minimale donkerperiode nodig. De precieze daglengte waarboven de efficiëntie van belichten afneemt is niet altijd exact bekend, en dit is gewasafhankelijk en waarschijnlijk zelfs rasafhankelijk. Te lang belichten op een dag kan een duidelijk negatief effect hebben op de belichtingsefficiëntie. Als de plant SON belichting als laatste licht ziet voordat het donker wordt gaat hij met relatief veel rood/verrood de nacht in vergelijking met de situatie zonder groeilicht. Het is dan beter om de SON belichting uit te schakelen voordat de zon onder gaat. Dus dat planten met natuurlijk licht (een natuurlijke rood/verrood verhouding) de nacht in gaan. Er kan wel belicht worden voordat de zon opkomt, met inachtneming van een minimale donkerperiode (bijvoorbeeld 8 uur).

Bij een groot aantal planten (tomaat, kalanchoë, eenjarig perkgoed) kan wanneer ze onder korte dag condities (< circa 12 uur) geteeld worden, een duidelijke groeistimulans tot stand gebracht worden door de daglengte met lage lichtintensiteiten te verlengen of de nacht te onderbreken. Over de mogelijkheden die dit precies biedt, en met welke intensiteiten op welke momenten belicht moet worden is nog nagenoeg geen kennis. Deze witte vlek in de kennis verdient nader onderzoek voor toepassingsmogelijkheden in de tuinbouw.

Op basis van bovenstaande effecten van timing van belichting op productie schatten we dat de belichtingsefficiëntie (gram oogstbaar product per Watt licht) minimaal 10-15% verbeterd kan worden door een betere timing van de belichting.



Figuur 4.1 Verloop van de fotosynthese gedurende de dag bij roos. Metingen zijn uitgevoerd bij constante klimaatcondities in de meetcuvet. (Dueck, 2007b)



Figuur 4.2 Het verloop van de fotosynthese na start van de belichting bij tomaat. (Dueck 2007a)

4.3.2 **Betere plaatsing van belichting en lichtonderschepping door het gewas**

De eerste voorwaarde om groeilicht maximaal te kunnen benutten, is dat het door het gewas onderschept wordt. Voor de meeste gewassen geldt dat de leaf area index (LAI; m² bladoppervlakte per m² kasoppervlakte) niet onder de 3 mag zakken. Berekeningen met een groei-model (Marcelis 2002) laten bijvoorbeeld zien dat bij een belichting met 45 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gedurende 18 uur per dag (lampen uit bij globale straling groter dan 100 W m⁻²) de drooggewichtstoename van de planten als gevolg van de belichting 69% hoger is bij een LAI van 2,5 ten opzichte van een LAI van 1. Bij een LAI van 4 was de productie 15% hoger dan bij LAI van 2,5. Naast de totale lichtonderschepping van het gewas, is het ook heel belangrijk hoe het licht verdeeld wordt in het gewas (zoals ook blijkt uit de effecten van diffuus licht). Spreiding en stand van bladeren spelen hierbij ook een rol.

Het huidige standaard belichtingssysteem in de Nederlandse glastuinbouw bestaat uit hogedruk-natrium (SON) lampen die boven in de kas hangen. Uit onderzoek bij komkommer in Finland kwam een productieverhoging van 9% naar voren (117 in plaats van 108 kg per m² per jaar), wanneer een kwart van het groeilicht tussen het gewas in plaats van boven het gewas werd toegediend (Hovi 2004). Ook was de vruchtkwaliteit beter. In Nederlands onderzoek (Janse) waar TL lampen tussen het gewas werden gehangen, werd ook de betere vruchtkwaliteit gevonden. Echter een productieverhoging kon in dit onderzoek nog niet bevestigd worden. Figuur 4.3 laat een voorbeeld zien van tussenbelichting in de praktijk. Bij tomaat vonden (Gunnlaugsson 2006) 6,5% productietoename wanneer 45% van het groeilicht tussen het gewas in plaats van boven het gewas werd toegediend. Nader onderzoek is nodig om het perspectief van tussenlicht nader vast te stellen

Eerste praktijkervaringen bij tomaat duiden er op dat een aangepaste rijstructuur in combinatie met tussenplanten de lichtverdeling in het gewas verbeterd, waardoor een hogere productie behaald kan worden. Momenteel loopt onderzoek naar dit aspect.

Bij veel teelten waar het hoofdverwarmingsnet onderin de kas gelegen is, is in een onbelichte teelt de temperatuur in de winter het hoogst onderin het gewas. Bij gebruik van belichting wordt de temperatuurgradiënt sterk gewijzigd: het wordt bovenin warmer en onderin relatief koeler. Hoe meer belicht wordt hoe groter deze verandering van temperatuurgradiënt. Bij meer licht wordt met het licht meer warmte bovenin in het gewas gebracht, terwijl gelijktijdig minder verwarmd wordt met de buizen onderin het gewas. Effecten van deze veranderde temperatuurgradiënt zijn niet zo goed bekend.

Diffuus licht geeft een betere verdeling van het licht in het gewas dan direct licht. Modelberekeningen en een experiment met komkommer hebben aangetoond dat het diffuus

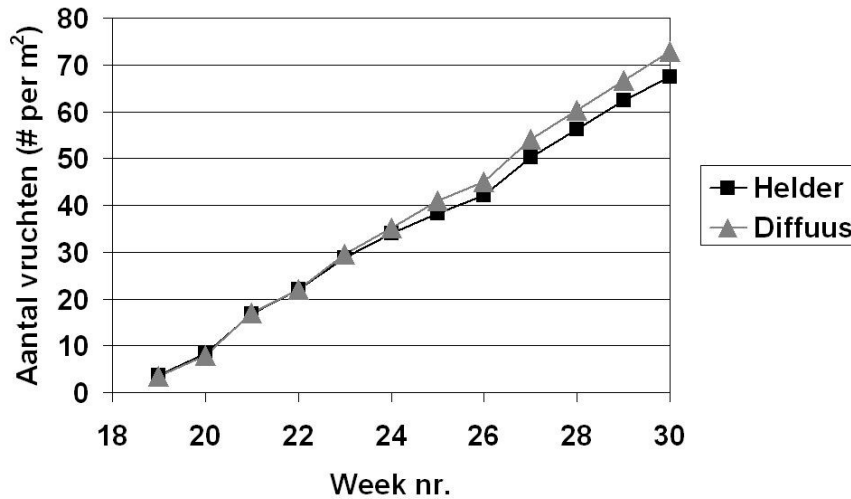
maken van de natuurlijke instraling in de kas 8-11% productieverbetering geeft (Figuur 4.4) (Hemming 2007); in het genoemde experiment werd het licht diffuus gemaakt, door een folie op het kasdek dat voor lichtverstrooiing zorgt. Dit duidt er op dat de belichtingsefficiëntie verbeterd kan worden als de diffusiteit van het groeilicht verhoogd wordt.

Er zijn praktijkervaringen dat bewegen van lampen over korte afstand productieverbetering geeft. Oorzaak zou gelegen zijn in de betere lichtverdeling in gewas. Er is hier nog geen wetenschappelijk onderzoek aan gedaan.

Op basis van bovenstaande effecten van plaatsing van belichting op productie schatten we dat de belichtingsefficiëntie (gram oogstbaar product per Watt licht) minimaal 10-15% verbeterd kan worden door een betere plaatsing van de belichting en betere lichtonderschepping door het gewas. Het gaat om een betere verdeling van licht en temperatuur in het gewas. Belangrijkste zaken hierbij zijn tussenlicht, diffusiteit van licht, voldoende bladoppervlakte en goede bladspreiding.



Figuur 4.3 Voorbeeld van tussenbelichting op een Noors komkommerbedrijf



Figuur 4.4 Effect van het diffuus maken van natuurlijke instraling op de productie bij komkommer. Kasdek was bedekt met een helder of een diffuus folie. De transmissie van het diffuse folie was 4% minder, desondanks was de stuksproductie 8% hoger. Als gecorrigeerd wordt voor mindere straling is de geschatte meerproductie 11%. (Hemming 2007)

4.3.3 Aangepaste lichtkleur

Ten aanzien van effecten van lichtkleur kan een onderscheid gemaakt worden naar licht voor assimilatie (=fotosynthese) en stuurlicht. Met stuurlichteffecten wordt bedoeld de effecten op groei en ontwikkeling, die niet het directe gevolg zijn van een veranderde assimilatie. Ze kunnen uiteindelijk wel leiden tot een effect op de fotosynthese.

De fotosynthese-efficiency uitgedrukt in mol CO₂ per Joule lichtenergie hangt sterk af van de golflengte. Dit komt voornamelijk doordat de energie-inhoud van een foton varieert met de golflengte. Voor de fotosynthese gaat het vooral om het aantal fotonen en de energie-inhoud van het foton speelt geen rol. Daarnaast spelen verschillen in absorptie een rol. Rood licht heeft de hoogste fotosynthese-efficiëntie. Op basis van het actiespectrum, zoals door McCree (1972) is vastgesteld, zou belichting met alleen rood licht ongeveer 5% meer fotosynthese opleveren dan belichting met dezelfde lichtenergie van een SON-lamp. We moeten ons hierbij wel realiseren dat er nog relatief weinig bekend is over hoeveel variatie er in actiespectra bestaat, of het actiespectrum mogelijk verandert bij langdurige belichting met een bepaalde golflengte en in welke mate de actiespectra van individuele bladeren doorvertaald worden naar actiespectrum van een heel gewas.

Lichtkleur kent een groot aantal stuurlichteffecten. Deze effecten zijn soms ook soortspecifiek. De belangrijkste kleuren zijn in dit verband rood, verrood, blauw en UV licht. Bij rood en verrood licht gaat het vooral om de onderlinge verhouding en dan met name aan het eind van de dagperiode, terwijl van blauw licht meestal aangenomen wordt dat een minimum hoeveelheid nodig is. Kenmerkend voor de huidige SON lampen die in de glastuinbouw worden gebruikt is de hoge verhouding tussen rood en verrood licht en de geringe hoeveelheid blauw en UV.

Hieronder worden in het kort enkele hoofdeffecten van lichtkleur genoemd. Voor een uitgebreid overzicht van literatuur op het gebied van lichtkleur kan verwezen worden naar (Hemming 2004). Verlagen van de rood/verrood verhouding leidt tot meer strekking, toename van bladoppervlakte, afname bladdikte, minder vertakking, remming van uitloop van okselknoppen, abortie en remming van zaadkieming. Uit klimaatkamer onderzoek bij tomaat blijkt dat bij teelt onder volledige SON belichting (zonder natuurlijk licht) een betere plantontwikkeling ontstaat als nabelicht wordt met verrood licht. Belichten met meer blauw licht remt de lengtegroei, resulteert in kleiner en dikker blad, stimuleert het opengaan van huidmondjes en vorming van anthocyaan. UV licht bevordert de vorming van secundaire plantenstoffen, wat kan leiden tot meer gezondheidsbevorderende stoffen, betere blad- en bloemkleur, betere afharding en weerbaarder gewas. Naast effecten op plant moet ook rekening gehouden worden met effecten op ziekten en plagen en de biologische bestrijders evenals het werkklimaat voor werknemers in de kas.

Door op een dynamische wijze lichtkleur aan te passen aan de gewasstatus en gewassoort, lijkt nog een substantiële verbetering van de gewasproductie mogelijk. Om de algemene fysiologische kennis over lichtkleur te vertalen naar toepassingen in de glastuinbouw zijn nog de nodige plantkundige proeven nodig.

Er zijn lichtkleuren (bijvoorbeeld 690nm) waarbij de fotosynthese-efficiëntie nog zeer hoog is, terwijl het menselijk oog voor die kleur zeer ongevoelig is. Dit is interessant in verband met de problematiek van lichthinder. Vooral wanneer LED-verlichting toepasbaar wordt in de glastuinbouw, gaat dit tot de mogelijkheden behoren.

Op basis van bovenstaande effecten van lichtkleur op productie schatten we dat de belichtingsefficiëntie (gram oogstbaar product per Watt licht) minimaal 10-15% verbeterd kan worden door gericht gebruik te maken van verschillende lichtkleuren. Deze verbetering kan voor ongeveer 5% bereikt worden via verhoging van assimilatie en voor 5-10% door stuurlichteffecten.

4.3.4 Afstemming belichting met andere teelfactoren

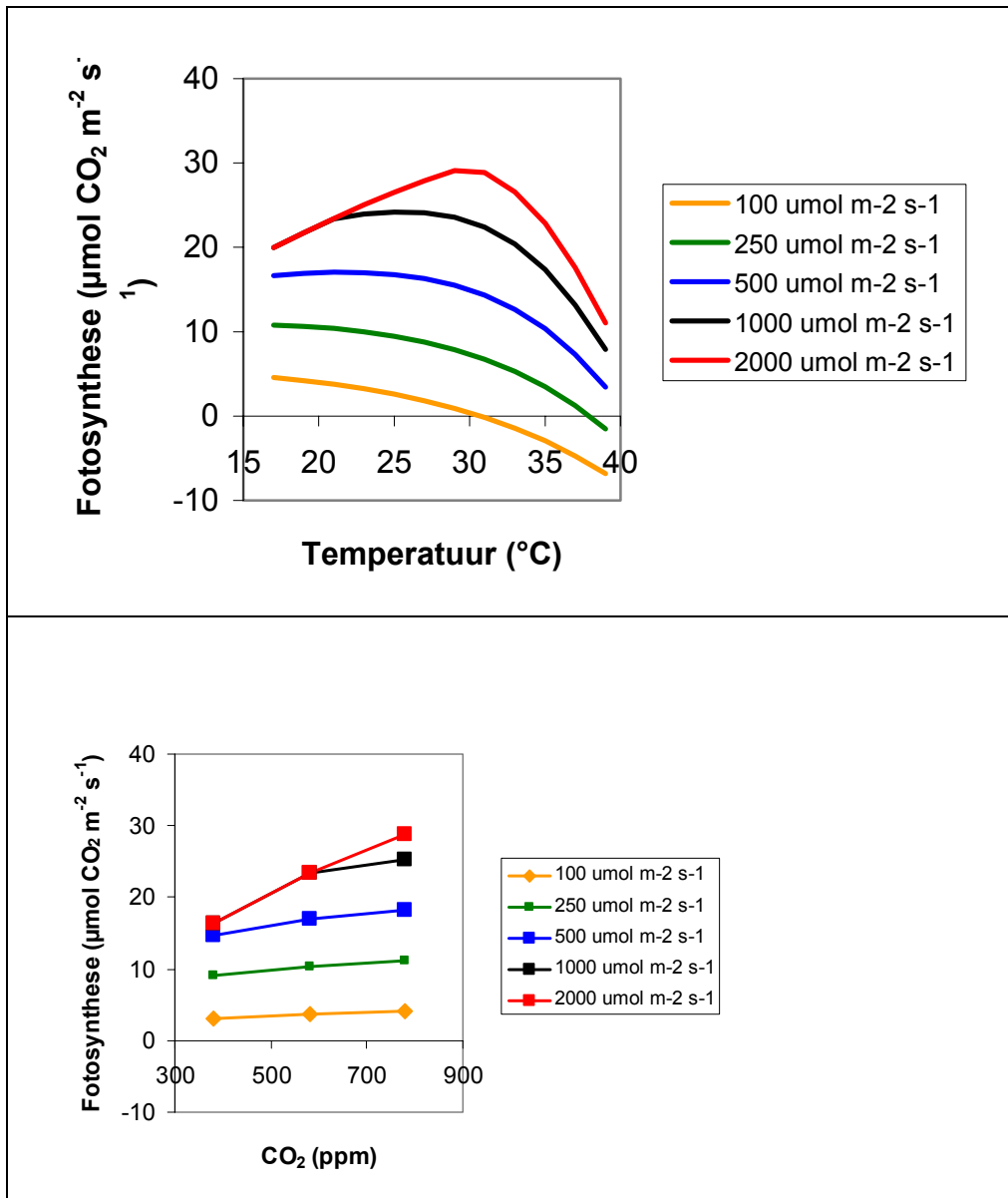
Als meer belicht wordt, verandert de gehele groei en ontwikkeling van het gewas ten opzichte van de onbelichte situatie. Dit geeft aan dat tegelijk met instellen van belichting de gehele teeltwijze aangepast moet worden.

Het is bekend dat effecten van licht op de plant interacties vertonen met andere klimaatfactoren. Figuur 4.5 geeft een voorbeeld van interactie met temperatuur en CO₂ (Dieleman 2003) Hieruit kan onder andere geconcludeerd worden dat voor het behalen van een hoog belichtingsrendement een hoge CO₂ concentratie nodig is of dat met name belicht moet worden als de CO₂ concentratie hoog is. Door de hogere fotosynthesesnelheid bij meer licht, kan bij veel gewassen de plantdichtheid (of stengeldichtheid) verhoogd worden als intensiever belicht wordt.

Bij o.a. tomaat wordt aangenomen dat bij belichting de groei gelimiteerd kan worden door de benutting van assimilaten. Er zijn indicaties dat bij gelijkblijvende etmaaltemperatuur een sterke temperatuurverlaging aan het einde van de middag (DIF) of 's nachts tot betere benutting van assimilaten leidt.

Bij gewassen als tomaat en aubergine waar hommels gebruikt worden voor bestuiving kunnen als gevolg van toepassing van groeilicht met lange belichtingsduur problemen met de bestuiving door hommels ontstaan. Dit is relatief eenvoudig op te lossen door de hommelmasten maar gedurende bepaalde perioden per dag (automatisch) te openen.

Dit zijn slechts enkele voorbeelden van afstemming tussen overige teelfactoren en belichting. Een afstemming die overigens tijdens de teelt continu opnieuw gedaan moet worden. Geschat wordt dat door verdergaande onderlinge afstemming tussen belichting en overige teelfactoren de belichtingsefficiëntie (gram oogstbaar product per Watt licht) circa 10% verbeterd kan worden.



Figuur 4.5 Interactie tussen effecten van licht en effecten van temperatuur en CO_2 . (Dieleman 2003)

4.4 Overbruggen gat tussen 2006 en 2020

Zoals in de vorige paragrafen aangegeven, worden autonome ontwikkelingen verwacht bij de verbetering van warmtekrachtsystemen en redelijke autonome ontwikkelingen bij de verbetering van assimilatiebelichtingssystemen. Als de verwachtingen uitkomen kan hiermee een reductie van het (huidige) primaire energieverbruik worden verkregen van circa 50% à

55%. Indien daarbij ook nog de WK wordt overgedimensioneerd ten opzichte van het benodigde verbruik voor belichting en de overtollige elektriciteit en warmte aan derden wordt geleverd, dan kan als het gemiddelde centrale rendement in 2020 lager dan circa 53 à 55 % blijft, energieneutraliteit worden bereikt in die zin dat er elders zoveel primaire energie wordt bespaard als er op het glastuinbouwbedrijf in kwestie wordt gebruikt. Gezien de lage snelheid waarmee het centralerendement verandert en de verwachting voor de toekomst in de WLO-studie van het CPB, MNP en RPB lijkt dit scenario realistisch.

Mocht het gemiddelde centralerendement toch op 60% uitkomen, dan is het gat tot energieneutraliteit circa 22% (bij roos) en 16% (bij tomaat). Bij het (voor 2020) onwaarschijnlijk hoog geachte 70% is dit 44% respectievelijk 36%.

Hierbij is overigens nog niet meegenomen, dat mogelijk met lagere lichtniveaus kan worden volstaan als in de toekomst planten met een efficiëntere fotosynthese kunnen worden verkregen. Natuurlijk bestaat hierbij wel het risico dat de tuinder dan echter niet overstapt op een lager lichtniveau maar gaat voor extra productie. In dat geval daalt het primaire energieverbruik per m² kas niet, maar wel per eenheid product (GJ/kg_tomaat of GJ/roos).

Er vanuit gaande dat met biobrandstoffen gestookte WK's verder van de grond komen, is het mogelijk om een eventueel "primaire-energiehaat tot energieneutraliteit" met deze techniek in te vullen (bijvoorbeeld met bio-olie- of biogasmotoren). Hiervoor dienen dan wel de obstakels die hiervoor nog (kunnen) zijn (o.a. certificatie van duurzaamheid van bepaalde biomassastromen, subsidieregime, rookgasreiniging van bioWK's en dergelijk) te worden weggenomen (zie ook paragraaf 4.5). Uitgaande van een belichtend rozen- respectievelijk tomatenbedrijf met een eigen WK-installatie (deels) op biobrandstof met een elektrisch rendement van 70%, een belichtingssysteemrendement van 44,4%, met gebruikmaking van de WK-rookgassen voor CO₂-bemesting en met elektriciteitsteruglevering (gedurende circa 2600 respectievelijk 3000 uur), maar zonder externe warmtelevering, is op jaarbasis circa 415 respectievelijk 335 ton/ha vloeibare biobrandstof¹⁹ nodig, om het bedrijf energieneutraal te maken (dat wil zeggen circa 61% respectievelijk 46% van het totaal benodigde brandstofverbruik). In deze situatie is er op het bedrijf (nagenoeg) geen warmteoverschot meer.

Plantkundig gezien zijn er nog volop mogelijkheden om het groeilicht efficiënter te benutten. In dit hoofdstuk zijn de mogelijkheden van vier hoofdroutes geschetst. De geschatte verbetering van de belichtingsefficiëntie bedraagt per hoofdroute:

¹⁹ Uitgaande van vloeibare biobrandstoffen met een stookwaarde van 39,4 MJ/kg. Bij een dichtheid van ca 920 kg/m³ en tankauto's met 40 m³ inhoud betekent dit 11 respectievelijk 9 tankauto's per ha per jaar

- 10-15% door betere timing van belichting
- 10-15% door betere plaatsing van belichting en lichtonderschepping door het gewas
- 10-15% door aanpassingen in de lichtkleur
- 10% door onderlinge afstemming van de belichting met andere teeltfactoren.

Als deze verbeteringen opgeteld worden zou in totaal meer dan 50% verbetering van de belichtingsefficiëntie gehaald kunnen worden. Het is natuurlijk nog maar de vraag of het allemaal additieve effecten zijn. Anderzijds zijn er op voorhand ook geen redenen aan te dragen dat de effecten elkaar zouden compenseren. Toetsing van de conclusies aan een groep telers en andere deskundigen, onderstreepte dat de genoemde potentiële verbeteringen van belichtingsefficiëntie per hoofdroute aannemelijk geacht worden. Een totale verbetering van 50% werd echter niet heel waarschijnlijk gevonden.

Voor toepassing van veel van de geschetste mogelijkheden schiet de huidige kennis nog te kort. Hiervoor zouden gerichte proeven in onderzoekskassen en op praktijkbedrijven moeten plaatsvinden. Allen op deze manier kan de geschatte verbetering in 2020 daadwerkelijke gerealiseerd worden. In enkele gevallen zijn ook technische verbeteringen nodig zoals de ontwikkeling van efficiëntere lichtbronnen (LEDs) om met specifieke golflengten te belichten of ontwikkeling van lampsystemen die een betere verdeling van licht in het gewas bewerkstelligen.

4.4.1 Discussie / opmerkingen

- Bedrijven die de op het bedrijf van anderen overtollige warmte inkopen, moeten deze in hun primaire energieverbruik meerekenen. Daarbij maakt het verschil of de warmte afkomstig is van fossiele bronnen (in het algemeen ketel- of WK-warmte) of dat het duurzame warmte betreft, bijvoorbeeld natuurlijke kaswarmte afkomstig van de zon die is geoogst in de semi-gesloten kas. (Het onderscheid is overigens niet eenvoudig te maken, omdat bij de warmteoogst ook vaak WK's in bedrijf zijn voor de productie van de benodigde elektriciteit). Duurzame warmte mag met een factor 0 worden verrekend, waarbij fossiele energie die eventueel nog wordt gebruikt om de warmte op te werken tot een bruikbaar temperatuurniveau wel in rekening moet worden gebracht (afhankelijk van waar de "opwerkinstallatie" staat, òf bij de leverancier òf bij de afnemer).
- Alhoewel door externe warmtelevering (en elektriciteitslevering) energieneutraliteit kan worden verkregen, zal dat dit bij de ontvangende tuinbouwbedrijven in het algemeen niet het geval zijn. Bij semi-gesloten kassen als leverancier is warmtelevering voor het ontvangende bedrijf in principe (primair-energetisch) gunstiger, omdat deze warmte deels

duurzaam is en dus minder zwaar toegerekend wordt dan warmte van fossiele oorsprong.

5 TRANSITIEPADEN

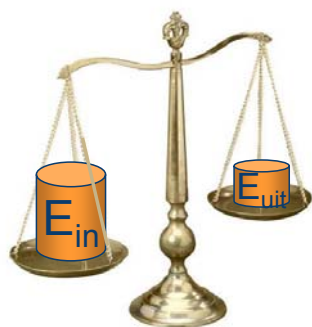
In deze paragraaf wordt ingegaan op de transitiepaden waarlangs energieneutraliteit kan worden bereikt. Er worden 4 hoofdsporen onderscheiden:

- efficiëntere lichtbenutting door plant
- efficiëntere lichtopwekking
- efficiëntere elektriciteitsopwekking
- meer warmtelevering aan derden
- biobrandstoffen.

In de paragrafen hierna wordt kort ingegaan op de tussenstappen die ons inziens zouden moeten worden gezet om het einddoel in 2020 te bereiken.

hoog energieverbruik

energie neutraal



?



stappen

2007

2013

2020

Figuur 5.1 Schematische voorstelling van de transitie van energie-intensieve belichte glastuinbouw naar energieneutrale glastuinbouw in 2020

5.1 Lichtbenutting

Door aanpassingen in teeltwijze, klimaatregeling en belichtingstrategie is in potentie de lichtbenutting van het gewas met circa 50% te verbeteren, zoals in hoofdstuk 4 is beschreven. Hiermee krijgt de teler de mogelijkheid om met dezelfde hoeveelheid energie 50% meer te produceren of om de energie-input te reduceren en de productie gelijk te houden. De uiteindelijke keuze van de teler zal vooral bepaald worden door het financiële rendement.

Zoals in hoofdstuk 4 beschreven kan de verbetering van de lichtbenutting door het gewas langs vier hoofdroutes gerealiseerd worden:

- timing van belichting
- plaatsing van belichting en lichtonderschepping door het gewas
- aanpassingen in de lichtkleur
- onderlinge afstemming van de belichting met andere teeltfactoren.

Om deze verbeteringen van de lichtbenutting te kunnen realiseren is vooral meer kennis nodig over. Hiervoor zouden een aantal gerichte proeven in onderzoekskassen en op praktijkbedrijven moeten worden uitgevoerd. In enkele gevallen zijn ook technische verbeteringen nodig zoals de ontwikkeling van efficiëntere lichtbronnen (LEDs) om met specifieke golflengten te belichten of ontwikkeling van lampsystemen die een betere verdeling van licht in het gewas bewerkstelligen.

Ontwikkeling van monitoringsystemen op basis van plantsensoren is een belangrijk aspect om bij de verschillende routes de verbeteringen te realiseren. Hierbij hoort ook de ontwikkeling van dynamische advies-, informatie- en besturingsystemen op basis van gewasmodellen gekoppeld aan de sensoren.

5.2 Lichtopwekking

Om efficiënter licht te kunnen maken dan momenteel met de state-of-the-art hogedruk-natriumlampen gebeurt, zijn andere lichtbronnen nodig. Zoals in hoofdstuk 4 aangegeven, zijn LEDs of OLEDs goede kandidaten om die doelstelling in de toekomst waar te kunnen maken. De ontwikkeling van deze lichtbronnen verloopt de laatste jaren stormachtig en worden vooral gedreven door de grote markten die er voor betere verlichting in het verschiet liggen. Op de hoofdlijnen van de ontwikkeling van (O)LEDs kan de Nederlandse tuinbouwsector weinig invloed uitoefenen. Wel kan zij bijvoorbeeld speciale accenten leggen (bijvoorbeeld fabrikanten stimuleren om LEDs met bepaalde golflengten te ontwikkelen).

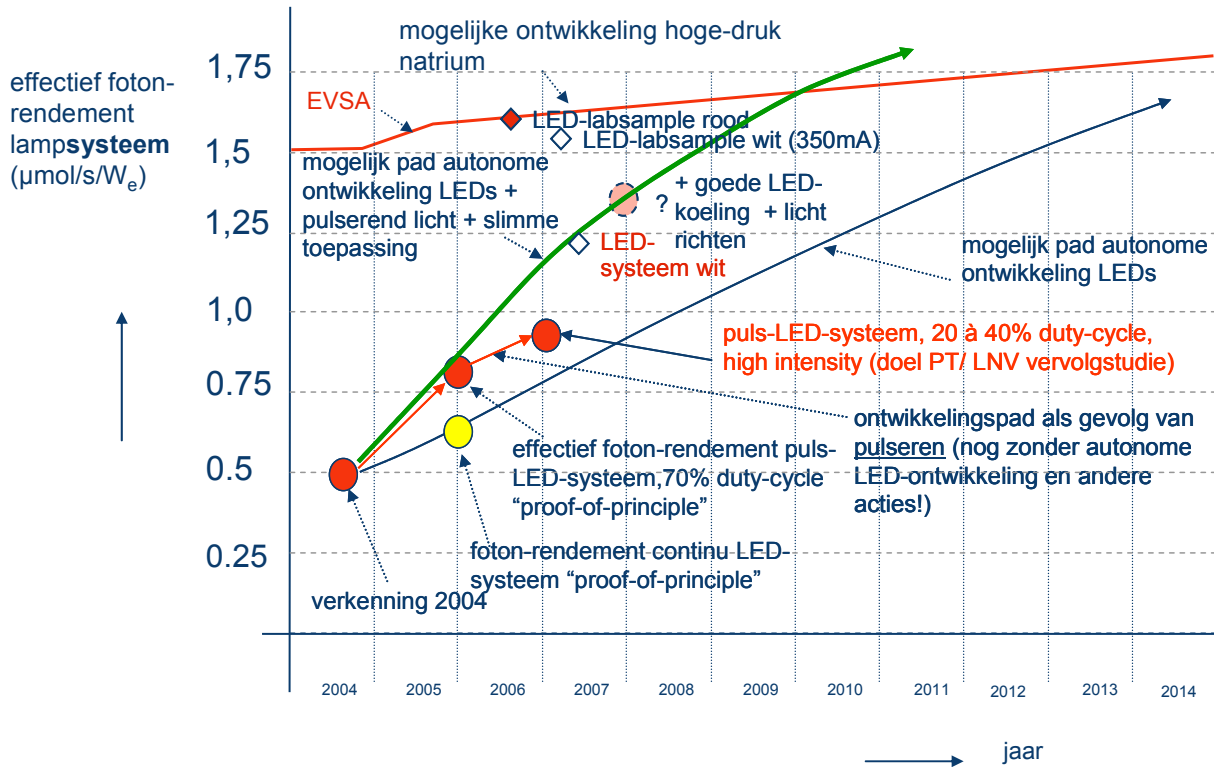
Verder moet de sector en haar toe- en kennisleveranciers zich vooral richten op een totaal belichtingssysteem - LEDs in armatuur met elektrische voeding, koeling, optiek e.d. - dat optimaal geïntegreerd wordt in de doelomgeving, dat wil zeggen de kas met bepaalde teelten en teeltwijzen, met een bepaalde kasbiologie (bijen, hommels, plaaginsecten) en met de mens als verzorger en oogster van de teelt).

Hoofdthema's die bij de ontwikkeling van een dergelijk belichtingssysteem dienen te worden onderscheiden zijn:

- Plant & Licht (o.a. welke golflengtes of golflengtegebieden zijn optimaal, zie paragraaf 5.1)
- LED-lampsystemen (wat is de optimale positie van LEDs in de kas, hoe kunnen LEDs efficiënt worden gekoeld en kan de warmte worden hergebruikt, e.d.?)
- LED-componenten (de sector en haar toeleveranciers moeten met name helder zien te krijgen welke kleuren en welke type LED's, welke lichtverdeling op LED-niveau, etc. men idealiter zou willen hebben en dit bij fabrikanten onder de aandacht brengen)
- Mens & Licht (aspecten o.a.: kan de mens zijn werk doen bij het gekozen gloeilichtspectrum, kan er aan de richtlijn voor kunstmatige optische straling worden voldaan?)
- Dier & Licht (invloed van LED-licht op bestuivers (bijen en hommels), biologische bestrijders en plaaginsecten)
- Energie (lampsystemen met een zo hoog mogelijk systeemrendement, warmte afvangen bij de bron, hergebruik van warmte)
- LED & economie (dergelijke (O)LED systemen zullen alleen doordringen als er, alle relevante aspecten in ogenschouw nemend, overall gezien een positief plaatje ontstaat). Een hoog energetisch rendement alleen is niet voldoende.

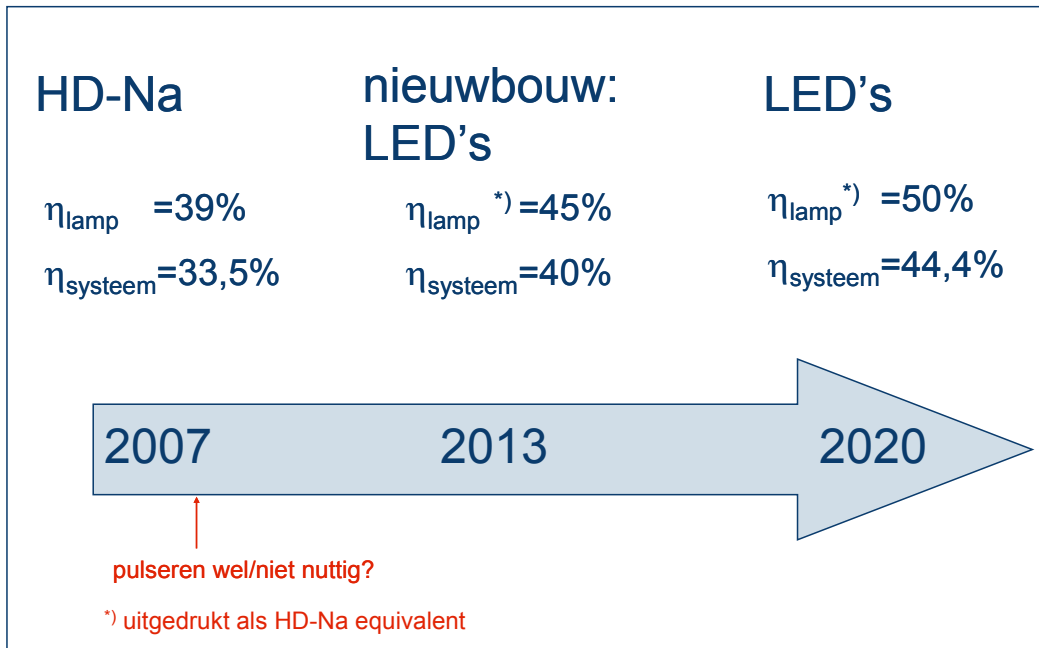
Deze aandachtsgebieden worden nader uitgewerkt in de studie "Roadmap voor de transitie naar gewasbelichting met LEDs", die KEMA in opdracht van het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van LNV (met financiële ondersteuning van GasTerra B.V.) uitvoert.

Een cruciaal element in de transitie naar gewasbelichting met LEDs is de ontwikkeling van het (effectieve) fotonrendement van de nieuwe belichtingvorm. Dit zal beter moeten worden dan het huidige alternatief (de hogedruk-natriumlamp). Een mogelijk scenario hiervoor met schattingen voor autonome groei en beoogde acties ter versnelling van die groei zijn aangegeven in het LED-ontwikkelpad van figuur 5.2.



Figuur 5.2 Mogelijk groeiscenario van de ontwikkeling van het effectief fotonrendement van LED's in vergelijking met dat van hogedruk-natriumlampen (met ruwe schatting van autonome groei en gerealiseerde en beoogde tussenstappen ter versnelling van de autonome ontwikkeling)

Als aanknopingspunten voor de ontwikkeling van betere assimilatiebelichtingsystemen kunnen op hoofdlijnen de volgende (efficiency) targets worden gesteld (zie figuur 5.3). Tot slot zijn in figuur 5.4 de belangrijkste ontwikkel- en onderzoeksacties samengevat met de belangrijkste factoren hiervoor.



Figuur 5.3 Belangrijkste doelstelling en tussendoelen voor efficiëntere lichtopwekking



^{*)} voor een succesvolle introductie van de LED is een nieuw lampconcept nodig. Er is een geïntegreerd ontwerp vereist waarbij rekening gehouden wordt met uitkoppeling van warmte, kleur(en), lichtverdeling, plaats in de kas etc.

Figuur 5.4 Belangrijkste benodigde onderzoeks- en ontwikkelingsacties en actoren hiervoor

5.3 Elektriciteitsopwekking

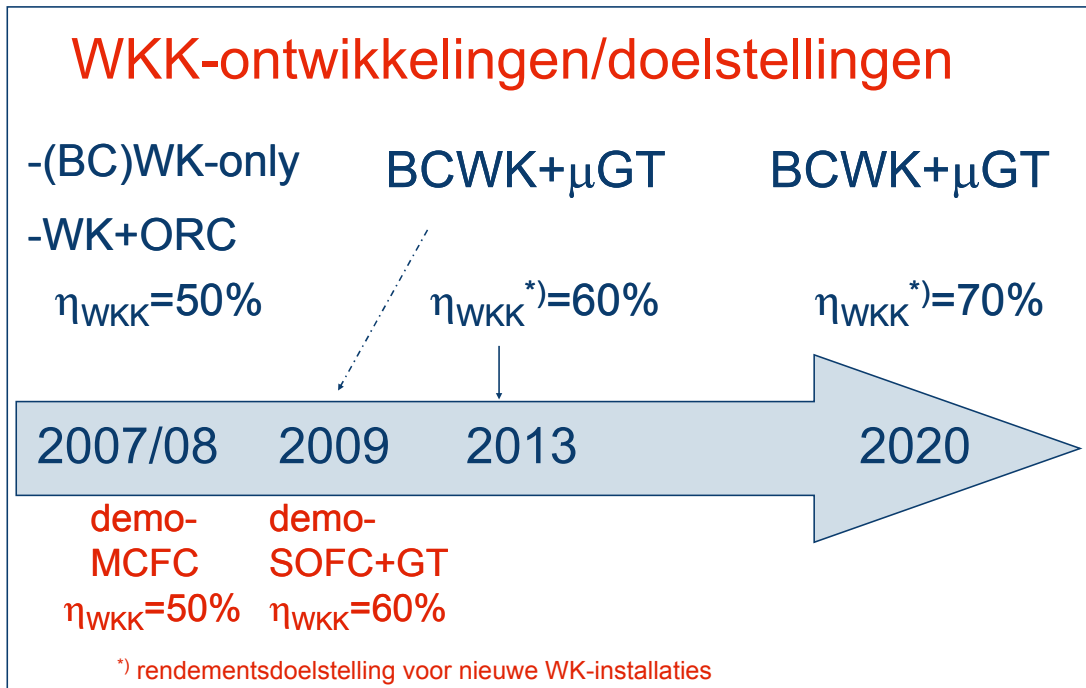
Bij het transitiepad efficiëntere elektriciteitsopwekking is het einddoel in 2020 een warmtekrachteenheid met een elektrisch omzettingsrendement van 70% en minimaal 25% warmterendement (op onderwaarde). Een techniek waarvan nu aangenomen wordt, dat deze de potentie heeft om dat te halen is een hybride brandstofcelsysteem bestaande uit een hoge-temperatuur SOFC-brandstofcelstack gecombineerd met een microturbine (zie figuur 2.2).

Voordat dit einddoel bereikt wordt, zullen ook middels andere technieken rendementen worden nagestreefd die hoger liggen dan de nu gangbare (hiervoor is in deze studie 42,5% aangenomen). We zien de volgende technieken als tussenstappen naar het einddoel:

- gasmotoren met een rendement van 47% (bij grote gasmotoren van Rolls Royce van 3,75 MW wordt nu al 46,2% gehaald)
- gasmotoren gecombineerd met een Organic Rankine Cycle (ORC-cyclus) waarvan de benodigde aandrijfwarmte geleverd wordt door de rookgassen van de gasmotor. Afhankelijk van het vermogen en type van de gasmotor en type en temperaturen van de ORC worden bij deze techniek elektrisch totaalrendement tussen circa 47 en 54% verwacht
- brandstofcelwarmtekracht op basis van gesmolten carbonaat cellen (MCFC). Hierbij zijn al rendementen van 47% gerealiseerd. In de nabije toekomst worden rendementen van meer dan 50% verwacht. Belangrijke ontwikkelitems zijn levensduur en prijsniveau van de brandstofcellen en totaal systeem. Om het elektrisch rendement verder te verhogen kan de MCFC worden gecombineerd met een ORC.
- hybride brandstofcelsysteem op basis van SOFC-microturbine. Er is reeds een eerste demonstratie geweest bij het NFCRC (National Fuel Cell Research Center) waarbij (bij een Siemens Westinghouse systeem) een rendement van 52,5% is aangetoond. Volgens het NFCRC was bij een betere afstemming van de microturbine op de brandstofcelstack zeker een rendement van 57% mogelijk geweest. Verschillende fabrikanten zijn met de ontwikkeling van deze hybride systemen bezig (waaronder gerenommeerde partijen als Siemens-Westinghouse, Rolls-Royce en General Electric). Belangrijke ontwikkeldoelstellingen zijn:
 - fabricagetechnologie van de SOFC brandstofcellen gericht op hoog volume, lage kostprijs en lange levensduur
 - betrouwbare en goedkopere reformers
 - optimale afstemming van microturbine op brandstofcelmodules
 - een belangrijke belofte van brandstofcellen is dat de afgassen direct kunnen worden gebruikt voor bemesting zonder rookgasreiniger. Voor het krijgen van voldoende vertrouwen daarin is het wel belangrijk, dat dit middels eerste demonstraties wordt

aangetoond. (Op de korte termijn is de MCFC-technologie hiervoor geschikt²⁰, omdat hiermee reeds in andere sectoren op systeemniveau goede ervaringen zijn opgedaan, en de eerste kinderziektes van de nieuwe technologie reeds elders zijn opgelost, waardoor het risico van de demo beperkt blijft). Ook het aantonen van het hoge rendement (en het voldoende vasthouden daarvan tijdens de levensduur) is gewenst om de introductie te bespoedigen

- daarom wordt aanbevolen op het transitiepad voor efficiëntere WK's een aantal demonstraties te doen van de nieuwe type WK's of combinaties (gasmotor + ORC, brandstofcel WK en hybride brandstofcelsysteem). De ervaringen hiermee kunnen worden gebruikt om de systemen verder te verbeteren en de kans op adoptatie door de sector te verhogen. De hoofdpunten van het transitiepad zijn samengevat in figuur 5.5.



Figuur 5.5 Belangrijkste doelstelling en tussendoelen voor efficiëntere elektriciteitsopwekking ten behoeve van energieneutrale belichte glastuinbouw

Er is in eerste instantie gekozen voor twee brandstofceldemo's. De redenen hiervoor zijn:

- de winnende brandstofceltechnologie is nog niet bekend
- de potentieel geschikte technologieën verschillen nog qua ontwikkelingsfase

²⁰ bijvoorbeeld de "Hot Module" van MTU

- de eerste demo is gericht op het direct – zonder rookgasreiniger - kunnen gebruiken van de afgassen van een brandstofcelstack voor CO₂-bemesting, het demonstreren van de bedrijfszekerheid en het halen en vasthouden van het hoge elektrische omzettingsrendement van het brandstofcelsysteem zelf
- de tweede demo is gericht op hybride technologie (combinatie van brandstofcel met gasturbine, stoomturbine of ORC) met een extra hoog totaal elektrisch omzettingsrendement. Deze techniek is complexer en nog minder ver ontwikkeld en is daarom enkele jaren later gepland.

5.4 Warmtelevering

Het belang en de potentie van warmtelevering voor energieneutrale glastuinbouw is in paragraaf 4.3 aangegeven. Voor warmtelevering gelden de volgende overwegingen en bezwaren:

- rangorde van warmtelevering van (technisch/organisatorisch) gemakkelijk naar (relatief) moeilijk/lastig:
 - o aan een onbelicht deel van het eigen bedrijf (is niet altijd mogelijk)
 - o aan naburig niet-belichtend glastuinbouwbedrijf
 - o aan grote warmteafnemer buiten de sector (bijvoorbeeld kantoor, utiliteitsgebouw, zorginstelling)
 - o aan woningbouw (hoge temperatuur / lage temperatuur)
- warmtenetten zijn duur (in het bijzonder bij grote afstanden)
- geschikte afnemers liggen vaak op (te) grote afstanden
- voor lagetemperatuurwarmte (met kleine ΔT) zijn leidingen met een grote diameter nodig die extra duur zijn
- tuinder wil het liefst zo onafhankelijk mogelijk kunnen opereren
- bij bestaande bouw is laagwaardige warmte moeilijk in te passen
- nieuwe woningen zijn tegenwoordig goed geïsoleerd en hebben daardoor een relatief kleine warmtevraag. Daardoor worden warmteaansluitingen relatief duur.

Omdat warmtelevering een belangrijke pijler onder brug naar energieneutraliteit kan zijn (en afhankelijk van de condities en energieprijzen financieel meer of minder interessant), is het ons inziens belangrijk om ondanks de bezwaren en moeilijkheden warmtelevering toch een van de speerpunten te maken en de beste mogelijkheden verder uit te werken. In de ultieme situatie komen er “energywebs”, waarin aanbieders van warmte op verschillende punten warmte kunnen leveren en gebruikers warmte kunnen onttrekken. Een dergelijk web en de

beheersing daarvan dient nog verder te worden uitontwikkeld. De tuinbouwsector zou hierop als potentiële aanbieder van warmte een stimulerende invloed op uit kunnen oefenen (zie o.a. de studies betreffende “Energywebs” (Knies 2005 & Bestebroer 2005).

Ter indicatie van het potentieel van warmteoverschotten in de tuinbouw voor ruimteverwarming elders: met het warmteoverschot van één ha belichte tomatenteelt met circa 2500 belichtingsuren met $160 \mu\text{mol/s/m}^2$ en een eigen WK-installatie (met een elektrisch rendement van 42,5%) kunnen in principe circa 250 vrijstaande nieuwbouwwoningen worden verwarmd²¹. Voor een belichte rozenteelt met 4000 belichtingsuren kan dit aantal nog verdubbelen.

Als tussendoelen worden de volgende doelen geformuleerd:

- als eerste stap zoveel mogelijk overtollige warmte leveren binnen de sector (eigen bedrijf, buurman)
- demonstratieprojecten opzetten met warmtelevering buiten de sector:
 - o zorginstellingen / utiliteit / kantoren
 - o woningbouw, hogetemperatuurwarmtelevering van WK (zoals gepland demoproject in Nieuwveen, v.d. Weijden, rozenteelt, 2008)
 - o woningbouw, lagetemperatuurwarmtelevering bij nieuwbouw
- met externe levering van lagetemperatuurwarmte is nog maar weinig ervaring. Toch is dit met name voor het verder penetreren van (semi-)gesloten teelten van belang. Voor de ontwikkeling hiervan is het gewenst met een demonstratie te komen van een energyweb voor zowel hoge- als lagetemperatuurwarmte en eventueel koude (en desgewenst ook elektriciteit en CO₂)
- doelstelling voor 2012: minimaal 10 projecten met warmtelevering buiten de sector, met minimaal 2 ‘energywebs’
- streven naar het toekennen van extra waardering voor het gebruik van laagwaardige warmte afkomstig uit (semi-)sloten kassen in de Energie Prestatie Coëfficiënt (EPC) van gebouwen (de EPC is de maat voor de (gemiddelde) energiekwaliteit van een gebouw, inclusief technische installaties). Op die manier zullen projectontwikkelaars meer gemotiveerd zijn om bij nieuwbouwprojecten warmtelevering vanuit de tuinbouw op te nemen in de energievoorziening van hun projecten.

²¹ Hierbij is uitgegaan van nieuwbouwwoningen die voldoen aan de huidige EPC-eis van 0,8, met een geschatte ruimteverwarmingsvraag van 13,6 GJ/jr, een transport- en distributierendement van het warmtenet van 80% en een ‘gelijktijdigheidsbruikbaarheid’ van de warmte van 80%. Bij de inzet van de WK-installatie is aangenomen, dat deze overdag draait voor CO₂-bemesting zolang de buffer niet vol is, resulterend in een warmteoverschot van circa 0,53 GJ/m²/jr.

5.5 Biobrandstoffen

Zoals hiervoor aangegeven hebben biobrandstoffen de potentie om een glastuinbouwbedrijf ("in hun eentje") geheel energieneutraal te maken en bij elektriciteits- en/of warmtelevering aan derden zelfs energieleverend. Ook kunnen ze worden gebruikt om het hiaat (qua resterend netto primair energieverbruik) wat (eventueel) nog bestaat na de hiervoor genoemde maatregelen in te vullen.

Voor belichte teelten zijn met name warmtekrachtinstallaties op biobrandstof (bio-WK) interessant. Hiermee is op dit moment in de sector nog maar weinig ervaring. De eenvoudigste oplossing lijken (robuuste scheeps)dieselmotoren op bio-olie. Tot het moment dat de MEP-vergoeding voor biomassa-installaties in augustus 2006 op 0 werd gezet, was de belangstelling voor bio-WK in de sector sterk groeiend. Om deze technologie op een goede manier in de sector geïntroduceerd te krijgen zijn de volgende zaken van belang:

- herstel van (een vorm van) MEP voor bio-olie-WK
- certificering van biobrandstoffen (o.a. met betrekking tot duurzaamheid; certificaten van oorsprong)
- reductie van rookgasemissies (o.a. NO_x, roet e.d.) uit milieuoogpunt
- reductie van emissies tot niveau waarbij rookgassen bruikbaar worden voor CO₂-bemesting (ontwikkelen en demonstreren van efficiënte en kosteneffectieve rookgasreinigingstechnieken voor bio-olie-WK)
- inzicht in de relatie tussen de kwaliteit van de brandstoffen en de beschikbaarheid en het benodigde onderhoud van de bio-WK (voor o.a. bio-olie en biogas)
- koppeling met biomassastromen van agrarische, niet-tuinbouw bedrijven (bijvoorbeeld mestvergisters bij veetelers); hier zijn vaak substantiële biomassastromen aanwezig waarvan de energie-inhoud goed op glastuinbedrijven zou kunnen worden gebruikt. Hier liggen dus kansen, die ontplooid moeten worden. De beschikbaarheid en het potentieel van deze biomassastromen dient in een nadere studie in verder in kaart te worden gebracht.
- onderzoek naar de meest geschikte biobrandstoffen.

Als tussendoelen voor de verdere introductie van biomassa worden voorgesteld:

- 2007/2008: herstel van een vorm van MEP-vergoeding voor bio-WK
- 2009/2010: certificeringssysteem voor de belangrijkste biobrandstoffen
- 2009: gasreinigingsinstallatie voor bio-olie-WK bruikbaar voor CO₂-dosering
- 2012: 200 MWe WK op biobrandstof²² in de sector (≈ 16% van WK-vermogen in 2006)

²² In KOPPEJAN is geschat dat in 2010 er in Nederland ca 132 PJ aan biomassa en biogene fractie in afvalstromen beschikbaar is waarmee duurzame energie zou kunnen worden opgewekt. De hoeveel-

- 2015: 400 MWe WK op biobrandstof in de sector (\approx 16% van door CoGen verwacht WK-vermogen in 2010, circa 2400 MWe).

Het eerste punt lijkt door de overheid te worden opgepakt. Een goede lobby vanuit de sector lijkt gewenst om een zo goed mogelijk regeling voor de sector 'uit het vuur te slepen'. Aan het derde punt wordt al door enkele marktpartijen gewerkt. Er wordt aanbevolen dat de sector dit verder stimuleert bijvoorbeeld door praktijkdemonstraties mee te ondersteunen. Voor het tweede, vierde en vijfde punt wordt voorgesteld een plan van aanpak op te stellen en later een taskforce bestaande uit relevante stakeholders om dit doel te bereiken.

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 Conclusies

Energieneutrale belichte glastuinbouw is mogelijk.

Systeemtechnisch gezien is de eenvoudigste oplossing om energieneutraal te worden, het inkopen van 100% duurzame energie (bijvoorbeeld duurzame elektriciteit, duurzame warmte en/of biobrandstof). Hierbij ligt de productie van duurzame energie echter buiten het eigen bedrijf.

Beter is het om eerst de energievraag zoveel mogelijk te reduceren (onder andere door efficiëntere lampen en belichtingssystemen en/of door planten die met minder licht toe kunnen) en vervolgens door de resterende energievraag op te wekken met een warmtekrachtinstallatie waarbij de kracht/warmteverhouding hoger ligt dan nu gangbaar is. Indien het tuinbouwbedrijf geen energie wil leveren aan derden, dan is de optimale situatie dat deze verhouding gelijk is aan de verhouding van de kracht- (elektriciteit) en warmtevraag op het bedrijf. Bestaat de mogelijkheid tot terugleveren dan moet het elektrisch rendement

heden biomassa welke via import beschikbaar zijn, zijn vrijwel onbeperkt. Voor 200 MWe biomassa-WK met een elektrisch rendement van 40% en 7000 draaiuren per jaar is circa 12,6 PJ aan biomassa nodig. Dit is ongeveer 10% van wat in Nederland naar verwachting in 2010 beschikbaar is. Hierbij moet worden bedacht dat lang niet alle beschikbare biomassa met zo'n rendement kan worden omgezet. Daarom is naar verwachting voor de realisatie van de hier genoemde sector 'bio-WKK-target' ook import van biomassa noodzakelijk (bijvoorbeeld palmolie), zeker bij een bio-WKKvermogen van 400 MWe in 2015.

van de WK juist zo hoog mogelijk zijn voor een maximale reductie. Bij een WK-energieproductie die is afgestemd op de dagelijkse warmtevraag zal overtollige elektriciteit die wordt teruggeleverd aan het net, leiden tot een sterke reductie van het netto primaire energieverbruik. Bij een WK die een hoger elektrisch rendement heeft dan het referentierendement (gemiddelde centralerendement), is zelfs elektriciteitslevering zonder warmtegebruik nog gunstig voor het netto primaire energieverbruik. (Voor maximale reductie moet die situatie uiteraard zoveel mogelijk worden vermeden).

De omvang van de inspanning om energieneutraal te worden, hangt af van het gemiddelde centralerendement. Naarmate de grote elektriciteitscentrales beter presteren, is de vereiste inspanning bij de tuinders groter.

Efficiëntere belichtingssystemen (met een PAR-stralingsrendement van 44,4% in vergelijking tot circa 33,5% van de huidige best available technique) leiden tot een reductie op het netto primair energieverbruik (NPE-verbruik) van circa:

- 38 tot 26% bij de belichte tomaat (bij $\eta_{WK}=70\%$ en $\eta_{centrale}= 45$ tot 70%)
- 4 tot 10% bij de belichte roos (bij $\eta_{WK}=70\%$ en $\eta_{centrale}= 45$ tot 70%)
- 20 tot 21% bij de belichte roos (bij $\eta_{WK}=42,5\%$ en $\eta_{centrale}= 45$ tot 70%).

Warmtekrachtinstallaties met een hoger elektrisch rendement (70% in plaats van nu circa 42,5%) leiden tot een reductie van het netto primaire energieverbruik van circa:

- 47-39% bij de belichte roos (bij centralerendementen van 45-70%)
- 20-13% bij de belichte tomaat (bij centralerendementen van 45 -70%).

Levering van overtollige warmte aan derden (of aan een niet-belicht deel van het eigen bedrijf) is ook een goede maatregel om het primaire energieverbruik van het belichtende bedrijf te reduceren. Leveren van warmte van 1 ha belichte teelt aan 1 ha onbelichte (tomaten)teelt bespaart circa:

- 25-20% bij belichte roos (bij centralerendementen van 45% -70%)
- 21-11% bij belichte tomaat ca (bij centralerendementen van 45% -70%).

Extra elektriciteit produceren met een 'grotere' WK dan nodig voor de elektriciteitsvraag voor belichting en terugleveren van het overschot aan het net samen met de levering van de overtollige warmte aan derden, kan een forse reductie van het primaire energieverbruik opleveren. De reductie is echter sterk afhankelijk van het actuele centralerendement in het jaar van beoordeling. Het reductiepotentieel is hieronder getabelleerd (voor een WK-rendement van 70%).

roos reductie door grotere WK + extra E+W-levering			tomaat reductie door grotere WK + extra E+W-levering		
rendement gemidd.centrale	relatief vermogen WK		rendement gemidd.centrale	relatief vermogen WK	
	200%	300%		200%	266%
45%	-92%	-179%	45%	-125%	-200%
60%	-32%	-59%	60%	-43%	-69%
70%	-12%	-20%	70%	-19%	-32%

$\eta_{WK}=70\%$

De waarde van het centralerendement heeft de meeste invloed op het reductiepotentieel van extra elektriciteits- en warmtelevering. Het effect op het reductiepotentieel van een efficiëntere WK is daarentegen relatief gering.

Gezien de lange levensduur van centrales en ook gezien de lage snelheid van verandering in het verleden is de verwachting dat de waarde van het gemiddelde centralerendement maar langzaam zal toenemen (in 2005 hanteerde SenterNovem in het Protocol Monitoring Duurzame Energie een waarde van 43,1%; in 2000 was dit 43,5%; in 2020 verwacht zij 'slechts' 45,5%). In dit scenario heeft elektrisch hoogefficiënte WK een groot NPE-reductiepotentieel.

De meest robuuste en effectieve oplossing voor een reductie van het netto primaire energieverbruik is - na de 'triviale' oplossing van de inzet van (in te kopen) biobrandstoffen, duurzame elektriciteit en/of duurzame warmte – de *toepassing van warmtekrachtinstallaties met een hoger elektrisch omzettingsrendement*, gevolgd door *warmtelevering* aan een niet-belichtend bedrijf en *efficiëntere belichtingssystemen*. Toekomstig beleid dient daarom in ieder geval deze oplossingsrichtingen te stimuleren.

De overtollige warmte kan in principe ook buiten de sector worden geleverd, bijvoorbeeld aan utiliteitsbouw, gezondheidsinstellingen of woningbouw. Met het warmteoverschot van één ha belichte tomatenteelt met circa 2500 belichtingsuren met 160 $\mu\text{mol/s/m}^2$ en een eigen WK-installatie (met een elektrisch rendement van 42,5%) kunnen in beginsel circa 250 vrijstaande nieuwbouwwoningen (met een EPC van 0,8) worden verwarmd. Voor een belichte rozenteelt met 4000 belichtingsuren kan dit aantal nog verdubbelen.

Bij semi-gesloten kassen (met belichting waarvoor elektriciteit wordt ingekocht), kan door warmtelevering van overtollige (laagwaardige warmte) aan derden circa 60% op het primaire energieverbruik worden bespaard (bij 1 ha semi-gesloten kas aan 3 ha onbelicht bij een centralerendement van 45%). Bij hogere centralerendementen van 60% respectievelijk 70% kan zelfs tot 80 respectievelijk 91% worden bespaard).

Uitgaande van een belichtend rozen- respectievelijk tomatenbedrijf met een eigen WK-installatie (deels) op biobrandstof met een elektrisch rendement van 70%, een belichtings-systeemrendement van 44,4%, met gebruikmaking van de WK-rookgassen voor CO₂-bemesting en met elektriciteitsteruglevering (gedurende circa 2600 respectievelijk 3000 uur), maar zonder externe warmtelevering, is op jaarbasis circa 415 respectievelijk 335 ton/ha vloeibare biobrandstof²³ (\approx 11 tot 9 tankauto's van 40 m³) nodig, om het bedrijf energieneutraal te maken (dit correspondeert met circa 61% respectievelijk 46% van het totaal benodigde brandstofverbruik). In deze situatie is er op het bedrijf (nagenoeg) geen warmteoverschot meer. Bij doorzetting van de historische groei van het areaal belichte teelt en grootschalige implementatie van de genoemde systemen is in dit scenario naar verwachting import van biobrandstof noodzakelijk.

Efficiëntere WK en efficiëntere lichtopwekking zijn thema's die ook buiten de tuinbouwsector belangrijk zijn en zullen zich grotendeels autonoom ontwikkelen. Met name bij lichtopwekking is het wel belangrijk om als sector de juiste accenten in de ontwikkeling aan te brengen en met tuinbouwproductontwikkelaars specifieke op de sector en de toepassing gerichte belichtingssystemen te ontwikkelen. Bij efficiëntere WK is als te stimuleren sectorspecifiek element vooral van belang de bruikbaarheid van de rookgassen voor CO₂-bemesting. Daarnaast is flexibiliteit ten aanzien van brandstoffen gewenst en is het kunnen gebruiken van biobrandstoffen een belangrijk element in dit gereedschap voor een energieneutrale glastuinbouw.

Plantkundig gezien zijn er nog volop mogelijkheden om het groeilicht efficiënter te benutten. Dit kan via vier hoofdroutes bereikt worden. De geschatte verbetering van de belichtingsefficiëntie bedraagt per hoofdroute:

- 10-15% door betere timing van belichting
- 10-15% door betere plaatsing van belichting en lichtonderschepping door het gewas
- 10-15% door aanpassingen in de lichtkleur
- 10% door afstemming van de belichting met andere teeltfactoren.

In totaal kan de lichtbenutting van het gewas met circa 50% verbeterd worden door aanpassingen in teeltwijze, klimaatregeling en belichtingsstrategie. Om dit daadwerkelijk te realiseren zal door experimenten de kennis over lichtbenutting vergroot moeten worden.

Kortom energieneutrale belichte glastuinbouw is mogelijk, maar hiervoor zijn wel investeringen noodzakelijk in zowel onderzoek, implementatie van technologieën en

²³ Uitgaande van vloeibare biobrandstoffen met een stookwaarde van 39,4 MJ/kg

infrastructurele aspecten. Een aantal ontwikkelingen verlopen autonoom (bijvoorbeeld verbetering van WK-installaties, betere lichtbronnen) en vergen beperkte additionele inspanning van de sector. Bepaalde ontwikkelingen / kennis is specifiek voor de sector (bijvoorbeeld benutbaarheid van rookgassen van bio-WK-installaties voor CO₂-bemesting, LED-assimilatiebelichtingssystemen, en dergelijke) en dienen actief gestimuleerd te worden. Zowel deze ontwikkelaspecten op sectorniveau als het daadwerkelijk toepassen van reductiemaatregelen op bedrijfsniveau voor een energieneutrale energiehuishouding vergen investeringen vanuit de sector.

6.2 Aanbevelingen

Ten aanzien van referentierendementen wordt aanbevolen aan te sluiten bij de rendementen die vastgesteld worden in het Protocol Monitoring Duurzame Energie ten behoeve van de waardering van duurzame energiestromen.

In het kader van de stimulering van de introductie van hogere elektrische omzettingsrendementen bij warmtekrachtinstallaties in de glastuinbouw, wordt aanbevolen demonstraties met nieuwe technologieën op te zetten (bijvoorbeeld gasmotoren met ORC²⁴ en brandstofcel-WK's) om de potentie te demonstreren, gebruikservaring op te doen en de systemen waar mogelijk en nodig verder te verbeteren.

Voor toepassing van veel van de geschetste teelttechnische mogelijkheden schiet de huidige kennis nog te kort. Hiervoor zouden gerichte proeven in onderzoekskassen en op praktijkbedrijven moeten plaatsvinden. Alleen op deze manier kan de geschatte verbetering in 2020 daadwerkelijke gerealiseerd worden. In enkele gevallen zijn ook technische verbeteringen nodig zoals de ontwikkeling van efficiëntere lichtbronnen (LEDs) om met specifieke golflengten te kunnen belichten of ontwikkeling van lampsystemen die een betere verdeling van licht in het gewas bewerkstelligen. Bij de ontwikkelingen rond LEDs gaat het om een integraal lampconcept waarin alle relevante aspecten (zoals lichtintensiteit, omzettingsrendement, koeling / uitkoppeling van warmte, kleurkeuze, lichtverdeling, inbouw in de kas, elektrische aansturing, ergonomie et cetera) dienen te worden meegenomen.

Om energieneutraliteit in de belichte glastuinbouw te bewerkstelligen is warmtelevering aan omliggende niet-belichtende glastuinbouwbedrijven of derden buiten de sector dringend gewenst. Er wordt aanbevolen een studie uit te voeren naar de daadwerkelijke

²⁴ Een eerste demonstratie van een ORC achter een gasmotor is in voorbereiding bij Olij Rozen en is naar verwachting vanaf april/mei 2007 operationeel.

mogelijkheden van warmtelevering aan andere glastuinbouwbedrijven c.q. aan derden buiten de sector. Hierbij dient onder andere te worden onderzocht of deze glastuinbouwbedrijven in de toekomst zelf gaan belichten, of en in hoeverre ze over gaan op semi-gesloten teelten en wat de infrastructurele eisen zijn aan warmtelevering in de diverse mogelijke situaties.

Voor de daadwerkelijke realisatie van een energieneutrale belichte glastuinbouw is het noodzakelijk dat de implementatie economisch rendabel is. Mocht tijdens vervolgonderzoeken blijken dat dit niet het geval is, maar de maatregel wel noodzakelijk is om energieneutraliteit te bewerkstelligen, zijn financiële tegemoetkomingen vanuit de overheid richting de eindgebruiker noodzakelijk, b.v. via een MEP-regeling. Tevens wordt aanbevolen beslissingsondersteunende systemen te ontwikkelen, zodat een glastuinbouwbedrijf kan bepalen of de implementatie van een energieneutrale technologie rendabel is. Hierbij dient er ook een voorlichtingscampagne te worden opgezet, zodat glastuinbouwbedrijven verantwoorde investeringskeuzes kunnen maken en daarbij tevens energieneutraliteit bewerkstelligen.

De belichte glastuinbouw moet worden opgenomen in zogenaamde energywebs, zodat overtollige energie gedeeld kan worden met derden en niet verloren gaat. In de nabije toekomst moet hiermee rekening worden gehouden wanneer infrastructurele plannen worden ontwikkeld. De sector dient hiervoor een lobby uit te voeren richting gebiedsontwikkelaars. Tevens zijn demonstratieprojecten noodzakelijk om de veelbelovende interactie tussen glastuinbouw en omgeving aan te tonen.

Koppeling met biomassastromen van agrarische, niet-tuinbouw bedrijven (bijvoorbeeld via mestvergisters bij veetelers) biedt kansen voor verduurzaming van de energievoorziening in de glastuinbouw. Bij deze bedrijven zijn vaak substantiële biomassastromen aanwezig waarvan de energie-inhoud goed op glastuinbedrijven zou kunnen worden gebruikt. Hier liggen dus kansen, die ontplooid moeten worden. Er wordt aanbevolen de beschikbaarheid en het potentieel van deze biomassastromen voor de glastuinbouw in een nadere studie verder in kaart te brengen.

Voor ondernemers in de glastuinbouw is het van belang zoveel mogelijk hun onafhankelijkheid te bewaren en daarmee energielevering niet tot hun core-business te maken. Het bedenken van een constructie waarbij de ondernemer alle vrijheid op het gebied van energie leveren heeft en de consument voldoende leveringszekerheid heeft is dan ook noodzakelijk.

LITERATUUR

BESTEBROER, S.I., J.J. de Wolff en K.J. Braber, "Een Model voor een lokaal tuinbouwenergiesysteem, Opstap naar een regionaal energieweb", ISBN 90-5059-273-2, augustus 2005.

BOOMEN, M, 2005, Notitie aan Stuurgroep Kas als Energiebron: Definitie Energieproducerende kas".

BOONEKAMP, G. 2005. Assimilatiebelichting is nodig om te overleven. Groenten en Fruit 17: 18-21.

BOSSELAAR, L., T. Gerlagh, "Protocol Monitoring Duurzame Energie, Update 2006" SenterNovem, dec. 2006.

BREUER, J.J.G., N.J. van de Braak, "Reference year for dutch greenhouses", Acta Horticulturae 248, 1989.

COGEN projects, 2005, CO₂-bemesting met rookgassen van W/K-motoren.

DIELEMAN, J.A., Meinen, E., Elings, A., Uenk, D., Uittien, J.J., Broekhuijsen, A.G.M., de Visser, P.H.B. en Marcelis, L.F.M. 2003. Effecten van langdurig hoog CO₂ op groei en fotosynthese bij paprika. Eindrapport van het project 'Efficiënt gebruik van CO₂'. Nota 274, Plant Research International, 32 pp.

DUECK T, Meinen E, Steenhuizen J, Muusers R, Uenk D & Marcelis L. 2007a. Belichting tomaat. Elk belichtingsuur volledig benutten. Nota 439, PRI, Wageningen. 39 blz. + bijlagen. (in druk).

DUECK, T.A., R.E.E. Jongschaap, F. de Zwart, H.J. van Telgen, J.W. Steenhuizen, D. Uenk & L.F.M. Marcelis. 2007b. Optimaliseren van de energie-efficiëntie van belichting (in druk) Nota Wageningen UR Glastuinbouw.

GERWEN, R.J.F. van. Brandstofcellen in de glastuinbouw: status en mogelijkheden, rapport nr. 03-3008, KEMA, 2004b.

GUNNLAUGSSON, B. & Adalsteinsson S. 2006. Interlight and plant density in year-round production of tomato at northern latitudes. Acta Horticulturae 711: 71-78.

GROOT, N.S.P. de & Ruijs, M.N.A. 2004. Quickscan; toekomstvisie glastuinbouw in Nederland en effecten voor de CO₂-emissie. Interne notitie. LEI, Den Haag.

HEMMING S, Jongschaap REE, Janse J, Steenhuizen JW, Uenk D & Dueck TA. 2007. Effecten van diffuus licht op komkommer. Resultaten van een teelt experiment. (in druk). Nota Wageningen UR Glastuinbouw.

HEMMING, S., .D Waaijenberg, G. Bot, P. Sonneveld, F. de Zwart, T. Dueck, C. van Dijk, A. Dieleman, N. Marissen, E. van Rijssel, B. Houter. 2004 . Optimale lichtomstandigheden bij de transitie naar een energiezuinige kastuinbouw. A&F report 100, ...pp.

HOVI, T., Näkkilä, J and Tahvonen, R. 2004. Interlighting improves production of year-round cucumber. *Sci. Hortic.* 102: 349-355.

KEMA, 2002 (W.J.A. Ruijgrok, K.J. Braber). Kas als energiebron.

KNIES, P., M. Raaphorst en N. van der Velden, "De kas als knooppunt in een energienet", Rapportnummer: AF-R--454; ISBN 90-6754-927-4, juni 2005.

KNIJFF, A. van der, Benninga, J., Reijnders, C. & Nienhuis, J. 2006. Energie in de glastuinbouw van Nederland. Ontwikkelingen in de sector en op bedrijven tot en met 2004. LEI rapport 3.06.02, Den Haag.

KOPPEJAN J., P.D.M. de Boer – Meulman, "De verwachte beschikbaarheid van biomassa in 2010", SenterNovem, 2005.

MARCELIS L.F.M., Maas F.M. & Heuvelink. E. 2002. The latest developments in the lighting technologies in dutch horticulture. *Acta horticultrae* 580: 35-42.

MC CREE, K.J. 1972. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric Meteorol.* 9: 191-216.

RUIJTER, J.A.F. de., Verkenning van het perspectief van LEDs voor gewasbelichting in de glastuinbouw, 50361787-KPS/TCM 04-2059 KEMA, 2004a.

RUIJTER, J.A.F. de., (b) Haalbaarheid brandstofcelgebaseerde warmte-kraftinstallaties bij belichte teelten in de glastuinbouw, Case-studies 'MCFC' en 'SOFC-GT', rapport nr. 04-2086, KEMA, 2004c.

SWINKELS, G.L.A.M., H.F. de Zwart, "Standaard teelten", IMAG, 2000.

NEN 5060: "Verkort referentiejaar voor buitencondities", 1987.

WLO-studie: "Welvaart en leefomgeving. CPB, MNP en RPB, 2006.
www.welvaartenleefomgeving.nl.

BIJLAGE A SPECIFICATIE ENERGIENEUTRAAL

Definitie:

Een kas (of glastuinbouwbedrijf) is energieneutraal als er op jaarbasis netto geen fossiele²⁵ primaire energie wordt verbruikt.

Dit betekent (analoog aan de definitie van de energieproducerende kas (Boomen, 2005)), dat de kas (minimaal) evenveel benutbare energie exporteert als deze aan primaire (fossiele) energie importeert.

In de definitie energieneutraal zijn de volgende zaken van belang:

Op één noemer brengen van energiestromen

In de definitie worden verschillende energiestromen bij elkaar opgeteld c.q. van elkaar afgetrokken. Dit mag alleen als de energiestromen onderling vergelijkbaar zijn ("op een noemer zijn gebracht"). Dit kan door de feitelijke over de systeemgrens van het glastuinbouwbedrijf gaande energiestromen te herrekenen naar het primaire energieverbruik dat nodig is om ze maken of – voor uitredende energiestromen - dat bij derden wordt vermeden door de betreffende energiestroom daar te gebruiken (er is dan bij die derde minder brandstof - in het algemeen aardgas - nodig).

De belangrijkste energiestroom waarvan het nodig is om die vergelijkbaar te maken met warmte (of eigenlijk de primaire brandstof hiervoor) is elektriciteit. Het primaire energieverbruik wat nodig is voor de productie en aflevering van elektriciteit hangt af van de wijze van opwekking (en met name van het rendement hiervan) en van de wijze van transport en distributie hiervan (en meer in het bijzonder van de verliezen hierbij). Omdat de precieze herkomst van elektriciteit vaak onbekend is, zal worden uitgegaan van een soort gemiddeld rendement van het Nederlandse centrale elektriciteitsproductiepark²⁶. Hiermee worden bedoeld de grote conventionele elektriciteitscentrales, hier gedefinieerd als centrales met een elektrisch vermogen van meer dan 100 MWe (er wordt wel gesproken van het elektrisch omzettingsrendement van de "mix – af productie").

²⁵ Fossiele energie is afkomstig van fossiele bronnen zoals aardolie en aardgas. In deze definitie wordt fossiel echter gebruikt in bredere zin als "niet-duurzame" (niet hernieuwbare) energie. Hiertoe wordt bijvoorbeeld ook nucleaire energie gerekend.

²⁶ Er wordt verondersteld dat decentrale elektriciteitsproductie bespaart op binnenlandse (centrale) productie, niet op de import van elektriciteit.

Bijlage A blad 2

Indien de geleverde elektriciteit decentraal geproduceerd en dichtbij weer gebruikt wordt dan is het redelijk, in het omzettingsrendement van de referentietechnologie ook de gemiddelde transport- en distributieverliezen (ca 4%) te verdisconteren (men spreekt dan van “rendement – geleverd bij verbruiker”).

Het gemiddelde centralerendement²⁷ is niet constant in de tijd. Door nieuwbouw van centrales met de modernste technieken en verbeteringen bij de bestaande centrales zal het rendement in de loop van de tijd naar verwachting toenemen. Voor praktische toepassing van de verrekening moet de waarde van het omrekeningsrendement per jaar worden vastgesteld (bijvoorbeeld door de overheid²⁸).

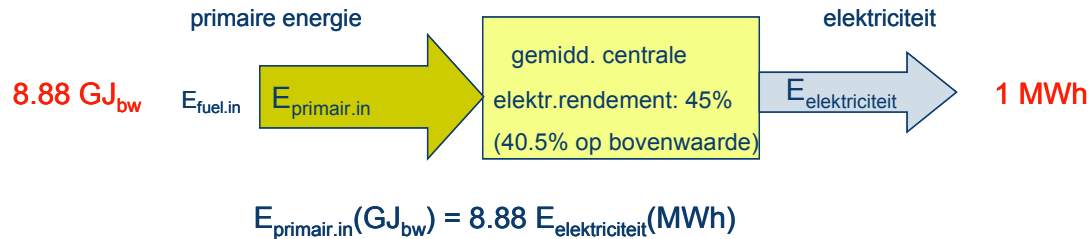
Voor het omrekenen naar primaire energie wordt aanbevolen dit te doen naar de energie-inhoud op bovenwaarde²⁹ (dit is in overeenstemming met de manier waarom dit in het Besluit glastuinbouw gebeurt).

Het omrekenen van elektriciteit in primaire energie is schematisch aangegeven in figuur A.1. In dit voorbeeld is uitgegaan van gemiddeld centralerendement (exclusief transport- en distributieverliezen) van 40,5% op bovenwaarde \approx 45% op onderwaarde, schatting voor 2010). Er is dan 8,88 GJ primaire energie nodig om 1 MWh aan elektriciteit te produceren.

²⁷ Als in het vervolg over centralerendement wordt gesproken, dan wordt er vanuit gegaan dat hierin de gemiddelde transport- en distributieverliezen niet zijn verdisconteerd, tenzij dit expliciet is vermeld. Bij teruglevering aan het net is het in het algemeen niet bekend waar de elektriciteit verbruikt wordt en zullen transport- en distributieverliezen (T&D) optreden. Alhoewel die bij invoeding en gebruik op een laag- of middenspanningsnet lager zullen zijn dan van de hele keten van hoogspanning naar laagspanning, zal voor de verrekening worden uitgegaan van de referentietechnologie “mix – af productie”, dus zonder T&D-verliezen. Hierdoor is de primaire energiefactor iets lager dan met T&D-verliezen.

²⁸ Hierbij kan mogelijk worden aangesloten bij de elektrische omzettingsrendementen zoals die worden gehanteerd in het Protocol Monitoring Duurzame Energie (opgesteld door Senter-Novem). Hierin worden twee omzettingsrendementen onderscheiden: “af productie” respectievelijk “geleverd bij verbruiker”. Voor 2005 zijn waarden van 43,1% respectievelijk 41,4% op onderwaarde getabelleerd [6].

²⁹ De bovenwaarde van een brandstof is de energie-inhoud die vrijkomt als de brandstof wordt verbrand, waarbij de waterdamp die daarbij vrijkomt wordt gecondenseerd.



Figuur A.1 Schematische voorstelling van de omrekening van elektriciteit in primaire (fossiele) energie

In het algemeen kan de omrekening van elektriciteit naar primair energieverbruik worden verkregen door te vermenigvuldigen met een zogenaamde primaire energiefactor f . In het bovenstaande voorbeeld is de primaire energiefactor dus $8,88 \text{ GJ/MWh}_e$.

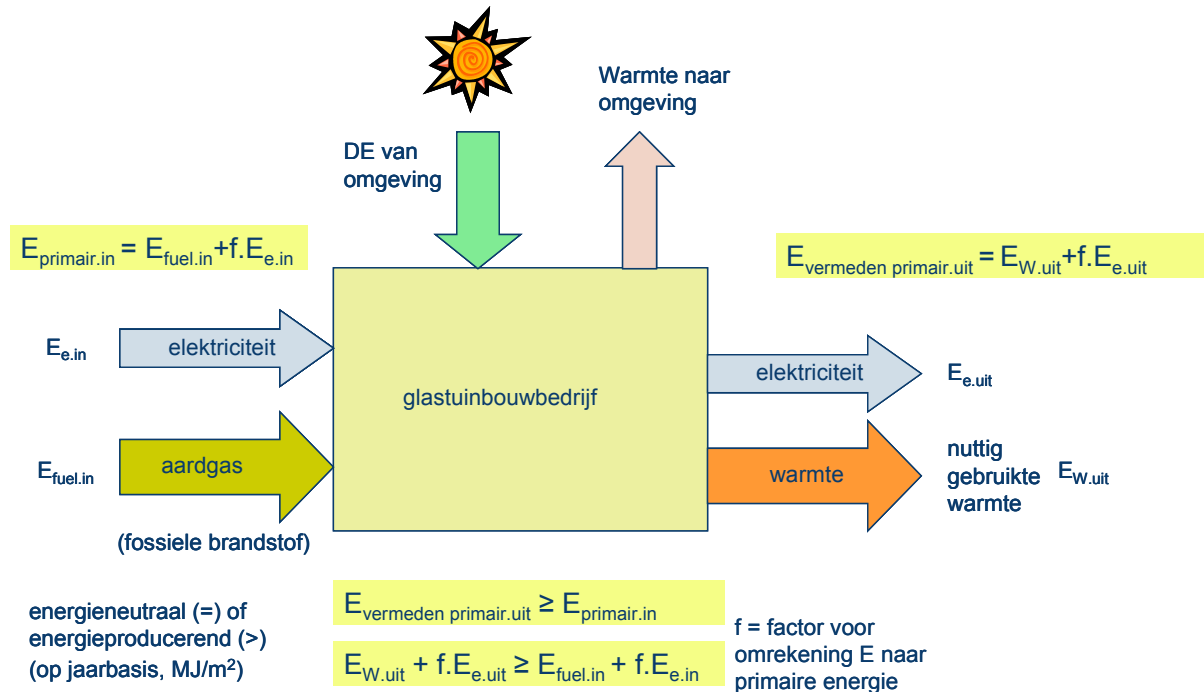
Benutbaarheid

Bij de definitie van energieneutraliteit is het verder belangrijk op te merken, dat een uittredende energiestroom alleen in mindering mag worden gebracht als en voor zover de energie bij derden nuttig gebruikt wordt.

Voor het voorbeeld van een glastuinbouwbedrijf met aardgas- en elektriciteitsinkoop en warmte- en elektriciteitslevering aan derden is in figuur A.2. schematisch aangegeven hoe kan worden bepaald of het bedrijf energieneutraal dan wel energieproducerend is.

Voor de eenvoud is er (voorlopig, en dus ook bij de in dit rapport uitgevoerde berekeningen) van uitgegaan dat de energie om de brandstoffen te winnen³⁰ niet is meegenomen in de eraan toegerekende primaire energie. Indien voor een energiestroom dit echter een significante fractie van de thermodynamische energie-inhoud is (bijvoorbeeld $> 10\%$), dan wordt aanbevolen deze winningsenergie wel mee te nemen.

³⁰ Energie nodig voor bijvoorbeeld oppompen, transporteren, raffineren, reinigen, uitpersen enzovoort.

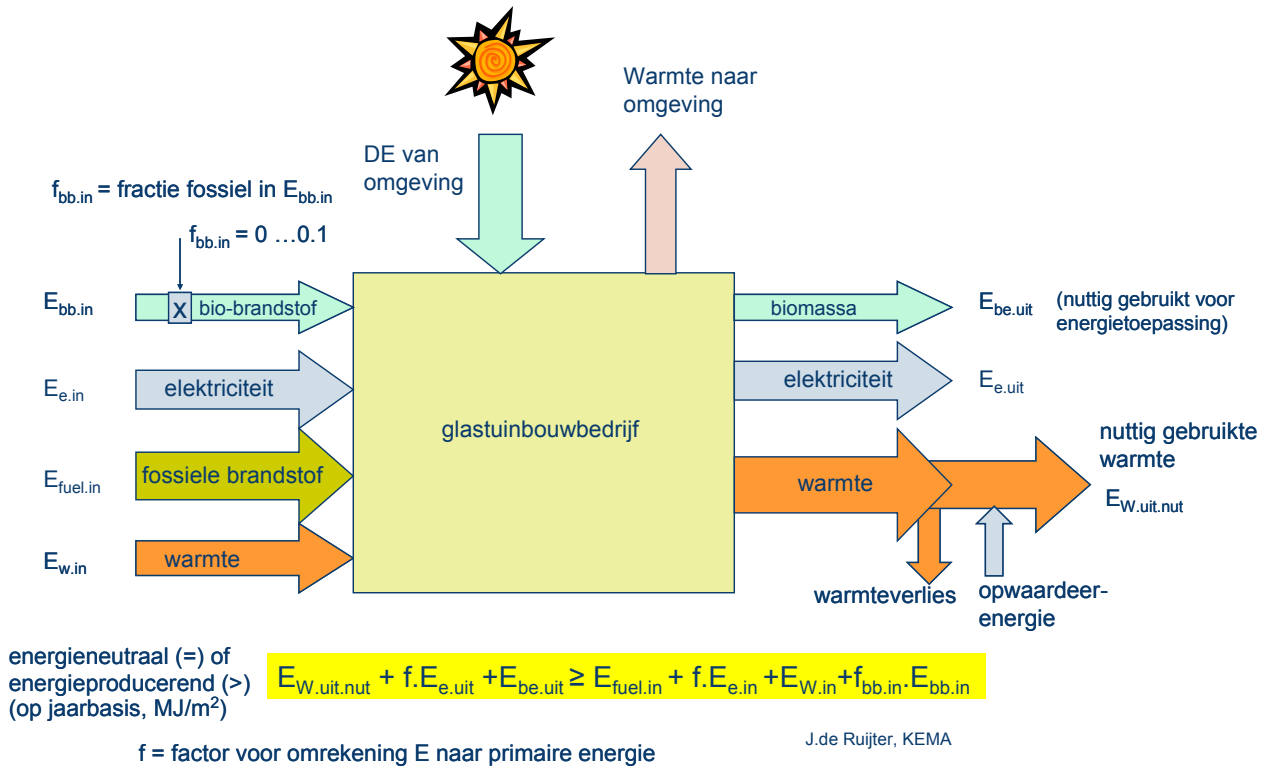


Figuur A.2 Schematische voorstelling van de bepaling of glastuinbouwbedrijf energieneutraal c.q. energieproducerend is voor de 'base case' van aardgas en elektriciteitsinkoop en warmte- en elektriciteitslevering aan derden. (DE = duurzame energie)

In de praktijk zijn complexere situaties mogelijk dan die van figuur A.2. Dit is onder andere het geval als er ook nog andere energiestromen een rol spelen, zoals:

- biobrandstoffen (ingekocht c.q. geleverd aan derden)
- ingekochte warmte
- hulpenergie voor de opwerking van de geleverde warmte.

Figuur A.3. laat zien hoe voor een uitgebreider geval - bedrijf met naast aardgas- en elektriciteitsinkoop ook inkoop van biomassa en warmte (van fossiele oorsprong) en levering aan en nuttig gebruik door derden van warmte, elektriciteit en biomassa - het criterium voor energieneutraal/energieproducerend wordt. Hierbij dienen nog de volgende opmerkingen worden gemaakt:



Figuur A.3 Schematische voorstelling van de bepaling of glastuinbouwbedrijf energieneutraal c.q. energieproducerend is voor de 'base case' van aardgas en elektriciteitsinkoop en warmte- en elektriciteitslevering aan derden

- biobrandstof wordt in principe gezien als een duurzame energiestroom. In de door ons gehanteerde definitie van "energieneutraal" hoeft de energie-inhoud van deze stroom in die zin dus niet te worden meegerekend tot de primaire energie-input van het systeem. Dit betekent dat de factor $f_{bb.in} = 0$. Mocht echter voor het maken/beschikbaar krijgen van deze energie een significante hoeveelheid fossiele energie nodig zijn, dan is het redelijk deze wel mee te nemen. In dat geval krijgt de factor $f_{bb.in}$ een factor ongelijk 0
- als duurzame elektriciteit wordt ingekocht, heeft deze ook een primaire energiefactor van 0 (of eventueel een lage waarde indien deze ook nog wat fossiele "winningsenergie" vereist)
- voor geleverde warmte is het redelijk rekening te houden met energieverlies. Alleen die hoeveelheid warmte die bij de derde daadwerkelijk nuttig wordt gebruikt mag in mindering worden gebracht op het primaire energieverbruik³¹ van het leverende bedrijf.

³¹ Als referentietechnologie voor vermeden primair energieverbruik door warmtelevering wordt hier uitgegaan van warmteproductie middels een ketel met rookgascondensator met een totaal rendement

Bijlage A blad 6

Energie die 'onderweg' nog wordt toegevoerd om de geleverde energie op te krikken tot bruikbare energie (bijvoorbeeld verhogen van temperatuurniveau met behulp van een warmtepomp) dient daarbij juist te worden opgeteld bij het nettoverbruik van het (leverende) glastuinbouwbedrijf.

van 100% op onderwaarde. (Bij warmteproductie in de tuinbouw is dat goed haalbaar; bij ruimteverwarming in gebouwen wordt vaak een iets lagere waarde aangehouden, bijvoorbeeld 95% [6]).

BIJLAGE B UITGANGSPUNTEN ENERGIEBEREKENINGEN

B.1 UITGANGSPUNTEN ENERGIEBEREKENINGEN

Op basis van modelberekeningen is een inschatting gemaakt van het perspectief van de mogelijke maatregelen/oplossingen om tot een energieneutrale glastuinbouw te komen. Er is uitgegaan van de volgende situatie zoals hierna beschreven.

B.1.1 Teelt en teelttechnische uitgangspunten

- 1 Als modelteelten is gekozen voor de roos en de tomaat. In de rozenteelt is belichting gemeengoed. Nagenoeg het hele Nederlandse areaal van circa 800 ha (in 2005) wordt belicht (>95%). De rozenteelt is de meest voorkomende belichte teelt in Nederland (circa 8% van het totale glasoppervlak). Bij tomaten komt belichting veel minder voor, maar deze is de laatste jaren wel sterk toegenomen. In 2006 werd ca 10% van de tomatenteelt belicht.
- 2 De belichting wordt gebruikt in de periode van 1 september tot 30 april. De lampen worden ingeschakeld als de lichtintensiteit (globale instraling buiten de kas) zakt onder een bepaalde waarde (bijvoorbeeld 125 W/m^2). Van 20:00 tot 24:00 uur zijn de lampen uitgeschakeld (o.a. in verband met de eisen ten aanzien van lichtuitstoot). Bij de tomatenteelt en de lichtbelichte bloemen/potplantenteelt is de donkerperiode langer (van 20:00 tot 04:00 uur), omdat deze teelten een langere rustperiode nodig hebben. Dit komt tot uiting in het aantal belichtingsuren, dat bij de roos circa 4000 uur per jaar bedraagt en bij de andere teelten circa 2500 uur.
- 3 In tabel B.1 zijn de gekozen belichtingsniveaus aangegeven. Vanwege het grote aantal belichtingsuren en het hoge belichtingsniveau wordt de roos een *zwaar belichte teelt* genoemd. De tomaat wordt vanwege het hoge belichtingsniveau, maar geringere aantal belichtingsuren een *middelbelichte teelt* genoemd en gerbera, chrysant en potplant een *lichtbelichte teelt*. Afhankelijk van het belichtingsniveau en aantal belichtingsuren kunnen andere gewassen in een van deze teeltgroepen worden opgenomen.

teelt type	belichtingsniveau $\mu\text{mol/s/m}^2$	aantal belichtings- uren (uren)	teelten
zwaarbelichte teelt	130	4000	roos
middelbelichte teelt	160	2500	tomaat
lichtbelichte teelt ³²	75	2500	chrysan, gerbera, potplant

Tabel B-1 Overzicht van de belangrijkste kenmerken van de onderzochte belichtings-categorieën.

- 4 De instellingen van het kasklimaat voor de verschillende teelten zijn samengevat in tabel C.1 tot en met C.3 in bijlage C. Deze zijn gebaseerd op (Swinkels 2000). De bijlage bevat ook de relevante bouwfysische kenmerken van de modelkas.
- 5 Wat betreft het elektriciteitsverbruik voor de belichting is in eerste instantie uitgegaan van de beste hogedruk-natriumlampen/armaturen met een overall PAR-rendement van circa 33,5% en voor inschatting van het perspectief van verbeterde verlichting in 2020 van 44,4%.

B.1.2 Energiesysteemtechnische uitgangspunten (energievoorziening)

1 Capaciteit warmtekrachtinstallatie (WK)

De WK-capaciteit of BCWK-capaciteit (BCWK=brandstofcel-warmtekrachtinstallatie) wordt gedimensioneerd op de elektriciteitsbehoefte van de assimilatiebelichting + een gering extra vermogen voor de gemiddelde 'vaste' elektriciteitsvraag. Bij sommige simulaties met extra elektriciteits- en warmtelevering is deze groter gedimensioneerd.

2 Bedrijfsvoeringwijze WK

Ten behoeve van de energetische analyses wordt er van uitgegaan, dat er een netkoppeling bestaat. Via deze koppeling kan de in de (BC)WK-opgewekte elektriciteit desgewenst worden teruggeleverd aan het net.

³² Deze oorspronkelijk beoogde categorie is uiteindelijk niet gesimuleerd. Hiervoor in de plaats zijn simulaties aan een semi-gesloten kas uitgevoerd (tomaat met belichting, 300 W/m² koeling, 160 $\mu\text{mol/s/m}^2$)

Bijlage B blad 3

Dit maakt het (BC)WK-systeem flexibeler inzetbaar. In het bijzonder kan hierdoor in het warme deel van het jaar, als de belichting niet in bedrijf is, toch met de (BC)WK CO₂ worden gedoseerd. CO₂-dosereren met (BC)WK zorgt – uitgaande van een bepaalde, nog bruikbare warmteproductie – voor een grotere CO₂-stroom, dan mogelijk was met de ketel. (Een bijkomend energetisch voordeel is, dat dit – dankzij de energetische verrekening van de teruglevering – leidt tot een lager verbruik aan primaire energie). Buiten het belichtingsseizoen draait de (gasmotor)WK niet in de nachturen (23 – 7 uur). De reden hiervoor is de lage terugleververgoeding in dat deel van het etmaal. Mocht 's nachts de hoeveelheid warmte die aan de warmtebuffer kan worden onttrokken onvoldoende zijn, dan zal de extra warmte worden geproduceerd met de ketel.

3 Keuze capaciteit (hulp)ketel

In principe is het voldoende dat de ketel de verwachte piekvraag bij extreme condities (circa 200 kW_{th}/m²) minus de thermische vermogens van de WK (voor zover van toepassing) kan leveren. Uit betrouwbaarheidsoverwegingen kan een ketelinstallatie worden gekozen die de volledige piekvraag kan dekken. In deze studie wordt van de laatste situatie uitgegaan. Het ketelrendement (inclusief rookgascondensators) wordt gesteld op 98% (op onderwaarde).

4 Buffergrootte

Warmtebuffer: 100 m³/ha (dit is een gangbaar volume bij CO₂-bemesting (Cogen, 2003); een buffer van deze omvang kan in de zomermaanden in de nacht doorgaans worden geleege)³³.

5 CO₂-bemesting

Zoals in punt 2 al impliciet aangegeven, wordt de CO₂ bij voorkeur geproduceerd met de WK-installatie. In het geval van een gasmotor zal deze worden uitgerust met een rookgasreiniger om het rookgas te ontdoen van etheen en NO_x. Bij een BC-WK is dit niet nodig (Ruijter 2004a). De maximale doseerstream bij CO₂-dosereren wordt bepaald door het maximale gasverbruik van de WK- (of ketel-) installatie, die de CO₂ levert. Bij de bepaling van de CO₂-vraag is uitgegaan van een maximale doseercapaciteit van 205 kg/ha per uur, overeenkomend met 116 m³ aardgas per uur (zie ook (Cogen 2003)).

³³ Eventueel kan overwogen worden een groter volume te nemen, bijv. 150 m³/ha, omdat dit meer mogelijkheden biedt voor sturing van de gasafname; dit aspect is in deze studie niet onderzocht).

Of deze hoeveelheid ook kan worden geleverd hangt af van de kenmerken van de WK-installatie. Indien de CO₂-vraag bij bepaalde condities (vooral 's zomers, als er flink geventileerd moet worden om de kas op de gewenste 'ventilatietemperatuur' te houden) groter is dan de maximale doseercapaciteit, dan zal de gewenste CO₂-concentratie niet worden gehaald.

6 Energetische jaarrondberekening

De energetische 'jaarrondberekening' wordt gebaseerd op de energieproductie- en brandstofconsumptie van de hoofdcomponenten in het energievoorzieningsysteem (de gasmotor of BCWK, en de ketel). De inzet van deze productiemiddelen (zie paragraaf 4.3) wordt afhankelijk gekozen van de energievraag bij de gekozen teelt en teeltcondities. Hulpsystemen zoals pompen en motoren, die t.o.v. de hoofdcomponenten een marginaal elektriciteitsverbruik hebben, worden in de energetische jaarrondberekening niet expliciet meegemodelleerd, omdat dit de berekeningen aanzienlijk complexer zou maken. Wel is een geschat elektriciteitsverbruik voor deze componenten in de energievraag verdisconteerd.

In deze studie is beperkt aan een (semi-)gesloten kas gerekend. Deze kas had een koelvermogen van 300 W. De benodigde koude in de zomer werd grotendeels onttrokken aan een aquifer en koudebuffer (dat in de nacht vanuit de aquifer werd gevuld) en werd deels met een koelmachine geproduceerd. De geogste warmte werd opgeslagen in de warme bel van de aquifer en in de winter daaraan weer onttrokken en middels een warmtepomp weer in de kas gebracht. Vanwege de grote hoeveelheid beschikbare warmte is de elektrische aandrijfenergie ingekocht en niet geproduceerd met een WK, omdat anders het warmteoverschot nog groter zou worden. Het energiebesparingspotentieel door levering aan derden is gerapporteerd in hoofdstuk 4.

B.1.3 Inzetstrategieën

Uitgangs- en aandachtspunten bij de bepaling van geschikte inzetstrategieën voor de WK of BCWK zijn de elektriciteits-, CO₂- en warmtevraagprofielen van de teelt (zie hoofdstuk B.2.) en de intrinsieke eigenschappen van de (gasmotor of brandstofcel)systemen ten aanzien van onder meer regelbaarheid, regelbereik, vollast/deellast-rendement en start/stop gedrag (zie ook (Van Gerwen, 2004b), en hoofdstuk 5). De belangrijkste facetten waarmee rekening gehouden moet worden, zijn:

Warmte/elektriciteitsvraag

- de elektriciteitsvraag in de situatie van belichting is relatief groot ten opzichte van de situatie zonder belichting (verhouding > 10). Dit betekent dat de WK in principe uit kan als er niet belicht wordt (tenzij de WK ook gebruikt wordt voor CO₂-dosering). Als de WK toch in bedrijf is of komt op tijden dat er niet wordt belicht, dan wordt vrijwel alle geproduceerde elektriciteit teruggeleverd aan het net. Bij de uitgevoerde simulaties is er vanuit gegaan dat de CO₂-vraag met de WK (of BCWK) wordt ingevuld en de overtollige elektriciteit wordt teruggeleverd (op plateau-uren is dit in het algemeen ook financieel aantrekkelijk). Bij de tomaat wordt bij een aantal simulaties de CO₂-dosering gestopt als de warmtebuffer vol is
- de warmtevraag kan sterk fluctueren over een dag (er kunnen veranderingen van meer dan 1 MW/ha per uur optreden (bij bijvoorbeeld het opentrekken van het scherm)). Door de warmtebuffers is de actuele inzet van de warmteproductiemiddelen grotendeels ontkoppeld van de actuele warmtevraag.

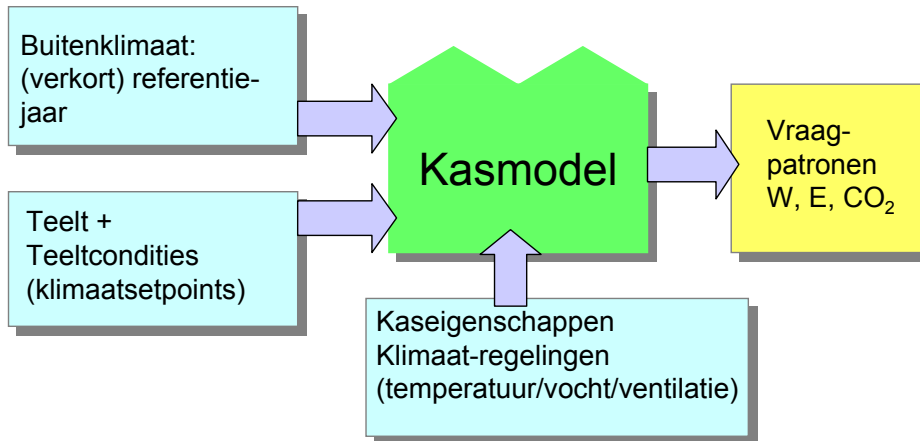
Regelbaarheid brandstofcelsystemen

- Met betrekking tot de regelbaarheid van brandstofcelsystemen zijn enkele relevante aandachtspunten gegeven in bijlage B.

B.2 JAARRONDANALYSE

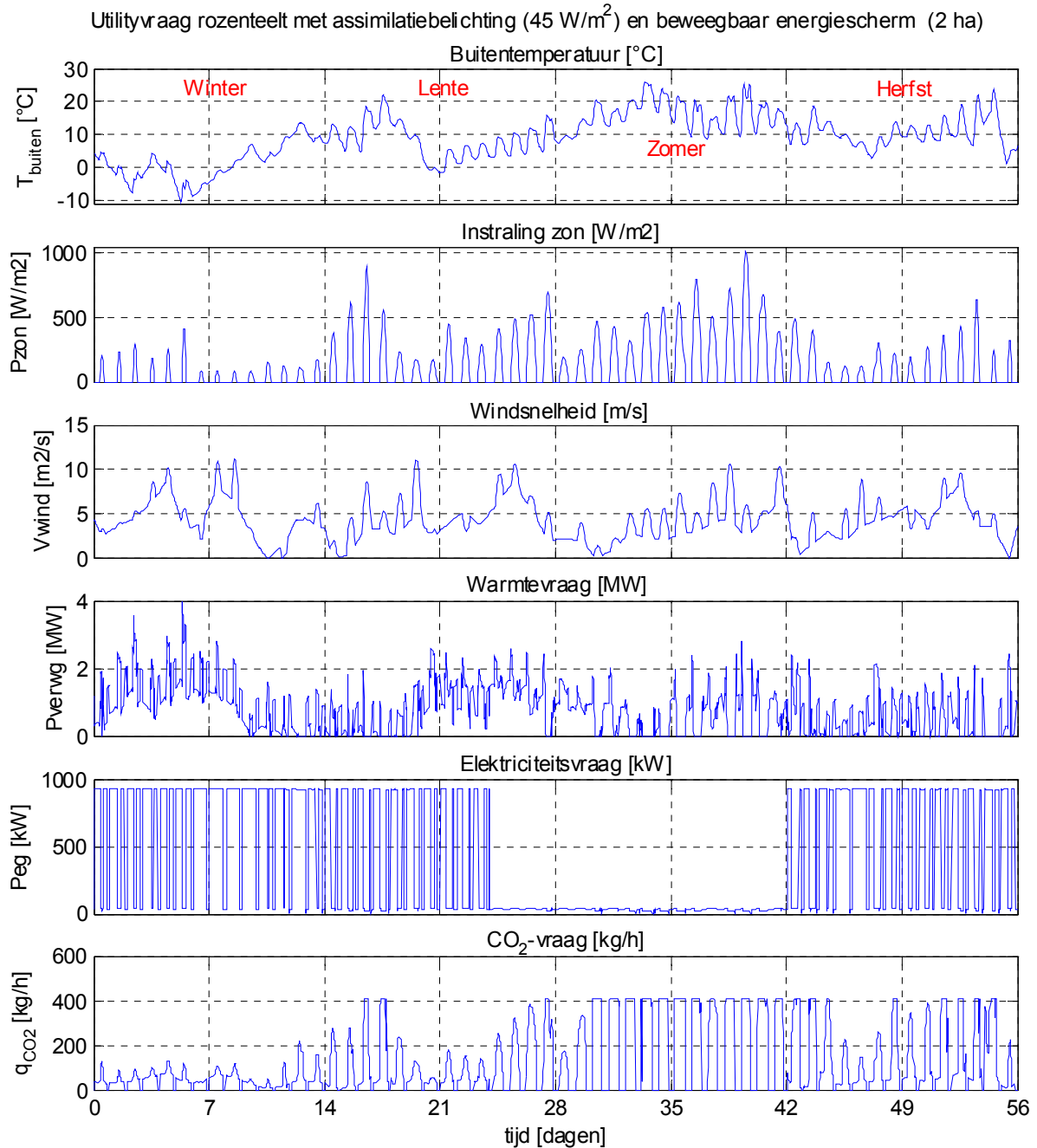
B.2.1 Vraagpatronen

Voor een goede bepaling van de gas- en elektriciteitsbehoefte is het een eerste vereiste te beschikken over representatieve vraagprofielen van warmte, elektriciteit en CO₂. Hierin moeten de kortstondige dag/nachtvariaties en de lange-termijn variaties (op seizoentijdschaal) voldoende in zijn verdisconteerd. De vraagprofielen zijn bepaald met behulp van een dynamisch kasmodel (i.c. SimKas, ontwikkeld door KEMA), dat afhankelijk van de bouwfysische kaskenmerken (zie bijlage A), de gewenste kasklimaatsetpoints (zie tabel A.1 tot en met A.3) en een representatief buitenklimaat, de benodigde warmte-, CO₂- en elektriciteitsstromen berekent. De werkwijze is schematisch getekend in figuur B.1. Voor het buitenklimaat is uitgegaan van het Verkort Referentiejaar (volgens NEN 5060). De achtergronden hiervan zijn gegeven in bijlage D.



Figuur B.1 Schematische voorstelling berekeningswijze van vraagpatronen voor warmte (W), elektriciteit (E) en CO₂ voor een kas. Centraal staat een dynamisch procesmodel van de kas

Figuur B.2. geeft een voorbeeld van een set vraagpatronen zoals bepaald voor een belichte rozenteelt met een elektrisch vermogen van $45 \text{ W}_e/\text{m}^2$.



Figuur B.2 Voorbeeld van Vraagpatronen voor een rozenteelt (2 ha) met assimilatiebelichting (45 W/m^2) voor het Verkort Referentiejaar. De CO₂-vraag is begrensd op een maximumwaarde van 410 kg/h. De vijfde 'stripplot' van boven laat duidelijk zien wanneer de assimilatiebelichting in bedrijf is

De belangrijkste kenmerken van de energie- en CO₂-vraag voor de verschillende belichtingssituaties zijn samengevat in tabel B.2.

Tabel B.2 Overzicht jaarvraag warmte en elektriciteit bij de belichte roos respectievelijk tomaat, gebaseerd op de beste belichtingstechniek van 2006 respectievelijk die wordt verwacht in 2020

Jaarvraag 'utilities' voor belichte tomatenteelt	rozenteelt resp. bat ^{*)} 2006	Roos expect ^{**} 2020	Tomaat bat ^{*)} 2006	Tomaat expect ^{**} 2020	Opmerking
belichtingsniveau (μmol/s/m ²)	130	130	160	160	
belichtingsniveau (W _e /m ²)	79	59,5	97	73	elektr.vermogen excl.kabelverliezen; bat o.b.v. SON-T Green Power (new), expect: o.b.v. systeemrend.van 44.4%
aantal uren belichten (uur)	3995	3995	2630	2630	Zie tabel A.1, A.2 in bijlage A
Warmtevraag (GJ/m ²)	0,910	1,031	1,136	1,206	aanvullend aan verwarming die door belichting wordt geleverd
elektriciteitsvraag (kWh/m ²)	323,7	247,4	264,1	202,0	belichting + pompen / ventilatoren
(GJ _e /m ²)	1,165	0,891	0,951	0,727	

*) bat = best available technique

) expect^{} = expected in 2020

BIJLAGE C KASKLIMAAT MODELTEELTEN

Tabel C.1 Teeltdata en teeltcondities voor referentieteelte belichte roos

<i>Teelt</i>	<i>Specificatie</i>	<i>Opmerkingen</i>
Gewas	Roos (belicht)	steenwol (jaarrond)
Assimilatiebelichting	130 $\mu\text{mol/s/m}^2$: (ca 12160 lux) circa 79 W_e/m^2 *)	niet tussen 20 en 24 uur; als globale instraling buiten < 175 W/m^2 periode 1 sept – 30 april → totaal 3995 uur
Kasoppervlak	2 ha	
<i>Teeltklimaat</i>		
Verwarmingstemperatuur	01-12 t.m. 28-02: dag 18°C, nacht 17 °C 01-03 t.m. 07-09: dag 19,5°C, nacht 18,5°C 08-09 t.m. 30-11: dag 18°C, nacht 17 °C	'lichtverhoging': tussen 100 en 300 W/m^2 globale instraling wordt de verwarmings- temperatuur lineair met 0 tot 6 °C verhoogd
Ventilatietemperatuur	3 °C boven verwarmingstemperatuur	'lichtverhoging': tussen 100 en 300 W/m^2 globale instraling wordt de ventilatie- temperatuur lineair met 0 tot 6 °C verhoogd
RV	streefwaarde: max. 85%	
Minimum buis temp.	geen	
Energiescherm	transparant; vochtdoorlatend	dicht als buitentemperatuur 8 °C lager is dan kastemperatuur, mits globale instraling minder dan 50 W/m^2 (3410 schermuren bij verkort ref.jaar)
CO ₂ -bemesting	door WK; gewenste waarde: 800 ppm	maximale dosering bij vraagbepaling: 205 kg/ha.h

* uitgaande van Philips Master SON-T Green Power lampen 1000 W/ 400 V, met elektronisch voorschakelapparaat en een reflectorrendement van 90%, geen leidingverliezen

Tabel C.2 Teeltdata en teeltcondities voor referentieteelt middelbelichte teelt

<i>Teelt</i>	<i>Specificatie</i>	<i>Opmerkingen</i>
Gewas	Tomaat (belicht)	steenwol (jaarrond)
Assimilatiebelichting	160 $\mu\text{mol/s/m}^2$: (ca 12160 lux) circa 97 W_e/m^2 *)	niet tussen 20:00 en 4:00 uur; als globale instraling buiten < 120 W/m^2 periode 1 sept – 30 april → totaal 2630 uur
Kasoppervlak	2 ha	
<i>Teeltklimaat</i>		
Verwarmingstemperatuur	01-12 t.m. 28-02: dag 18°C, nacht 17 °C 01-03 t.m. 07-09: dag 19,5°C, nacht 18,5°C 08-09 t.m. 30-11: dag 18°C, nacht 17 °C	'lichtverhoging': tussen 100 en 300 W/m^2 globale instraling wordt de verwarmings- temperatuur lineair met 0 tot 6 °C verhoogd
Ventilatietemperatuur	3 °C boven verwarmingstemperatuur	'lichtverhoging': tussen 100 en 300 W/m^2 globale instraling wordt de ventilatie- temperatuur lineair met 0 tot 6 °C verhoogd
RV	streefwaarde: max. 85%	
Minimum buis temp.	geen	
Energiescherm	transparant; vochtdoorlatend	dicht als buitentemperatuur 8 °C lager is dan kastemperatuur, mits globale instraling minder dan 50 W/m^2 (3608 schermuren bij verkort ref.jaar)
CO ₂ -bemesting	door WK; gewenste waarde: 800 ppm	maximale dosering bij vraagbepaling: 205 kg/ha.h

*) uitgaande van Philips Master SON-T Green Power lampen 1000 W/ 400 V, met elektronisch voorschakelapparaat en een reflectorrendement van 90%, geen leidingverliezen

Tabel C.3 Teeltdata en teeltcondities voor referentieteelt middelbelichte teelt (gesloten)

<i>Teelt</i>	<i>Specificatie</i>	<i>Opmerkingen</i>
Gewas	Tomaat (belicht / gesloten)	(jaarrond)
Assimilatiebelichting	160 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (ca 12160 lux) circa 97 W_e/m^2 *)	niet tussen 20:00 en 4:00 uur; als globale instraling buiten < 120 W/m^2 periode 1 sept – 30 april (behalve 20 nov - 11 dec.) → totaal 2480 uur
Kasoppervlak	2 ha	
<i>Teeltklimaat</i>		
Verwarmingstemperatuur	01-12 t.m. 28-02: dag 18°C, nacht 17 °C 01-03 t.m. 07-09: dag 19,5°C, nacht 18.5°C 08-09 t.m. 30-11: dag 18°C, nacht 17 °C	'lichtverhoging': tussen 100 en 300 W/m^2 globale instraling wordt de verwarmings- temperatuur lineair met 0 tot 2 °C verhoogd
Ventilatietemperatuur	3 °C boven verwarmingstemperatuur	'lichtverhoging': tussen 100 en 300 W/m^2 globale instraling wordt de ventilatie- temperatuur lineair met 0 tot 4 °C verhoogd, en tussen 500 en 1000 W/m^2 van 4 tot 6 °C
RV	streefwaarde: max. 85%	
Minimum buis temp.	geen	
Energiescherm	transparant; vochtdoorlatend	dicht als buitentemperatuur 8 °C lager is dan kastemperatuur, mits globale instraling minder dan 50 W/m^2 (2548 schermuren bij verkort ref.jaar)
CO ₂ -bemesting	door WK; gewenste waarde: 800 ppm	maximale dosering bij vraagbepaling: 205 kg/ha.h

*) uitgaande van Philips Master SON-T Green Power lampen 1000 W/ 400 V, met elektronisch voorschakelapparaat en een reflectorrendement van 90%, geen leidingverliezen

Eigenschappen kas

De *energievraag* in een kas hangt af van de bouwfysische kenmerken van de kas, het gewenste binnenklimaat, de teelt en de optredende buitencondities. Ter bepaling van het benodigde energieverbruik is het nodig hierover bepaalde aannamen te maken.

Wat betreft kasomhulling wordt in deze studie uitgegaan van een enkelglas kasdek (maar met dubbelglasgevels). De kas is voorzien van (een beweegbaar) energiescherm en assimilatiebelichting. De belangrijkste constructietechnische en bouwfysische kenmerken zijn samengevat in tabel A.1.

Tabel C.4 Kenmerken (referentie)kas

<i>Kas</i>	<i>Specificatie</i>	<i>Opmerkingen / aannamen</i>
Oppervlak	2 ha	
Type	Venlo (kapbreedte= 3,2 m)	
Gemiddelde hoogte	4 m	
Kap	enkel glas dakhoek 23°	warmtedoorgangscoefficiënt U=6,82 W/m ² K bij windsnelheid 0 m/s
Gevel	geïsoleerd	warmtedoorgangscoefficiënt U=3,5 W/m ² K
Scherm	energiescherm (transparant, vochtdoorlatend)	circa 42 % energiebesparing indien gesloten.
Verhouding oppervlak ventilatieramen/kasoppervlak	0,234	

BIJLAGE D AANDACHTSPUNTEN BRANDSTOFCEL-WARMTE-KRACHTTEENHEDEN

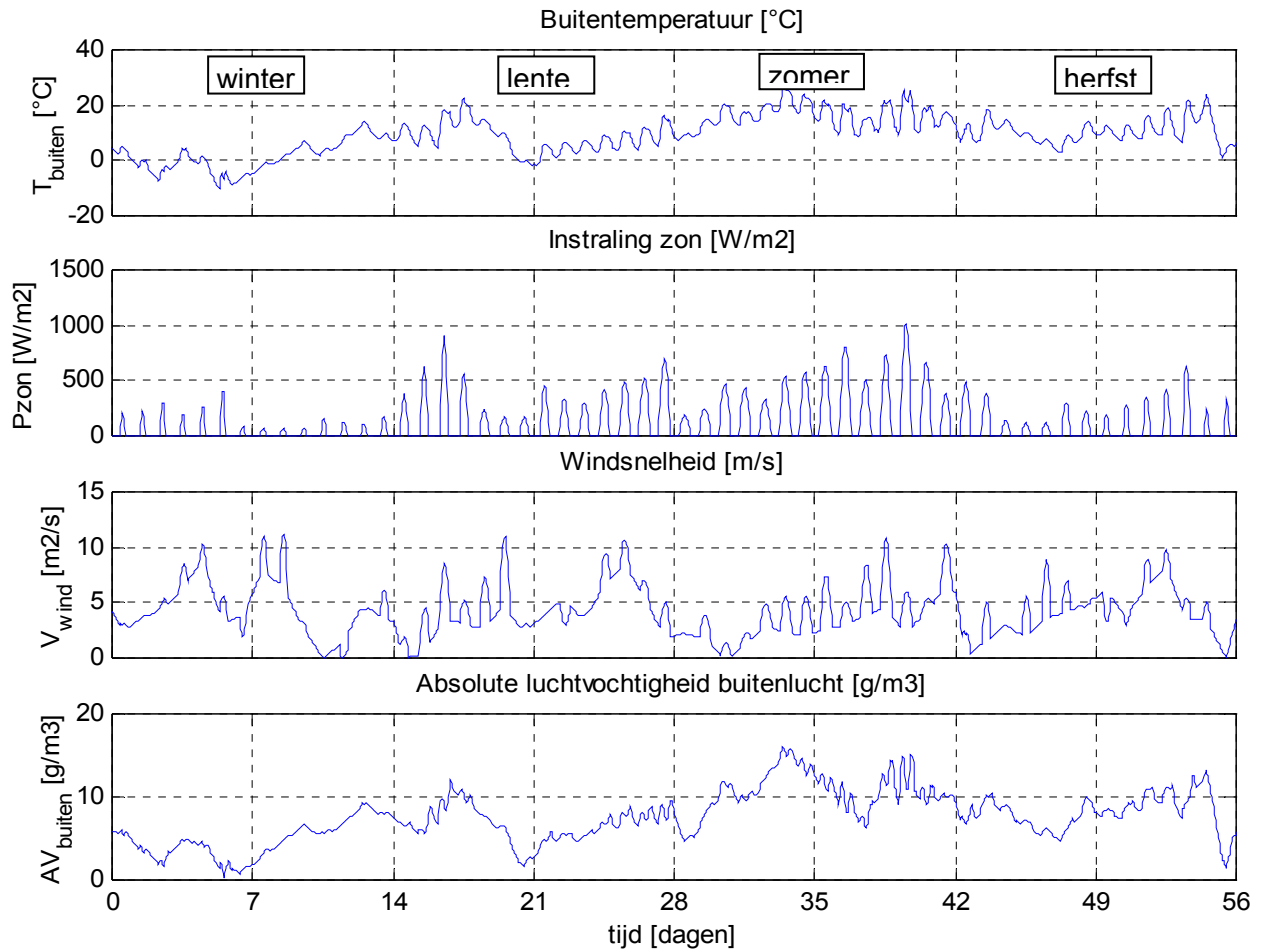
Regelbaarheid

- het regelbereik van een MCFC-eenheid (Hot Module van MTU) is ca 8%-100% van het nominale elektrische vermogen
- de op- en afregelsnelheid van een MCFC is relatief (ten opzichte van bijvoorbeeld een gasmotor) zeer laag. De leverancier van de Hot Module verwacht voor toekomstige systemen voor de overgang van minimumlast naar vollast een tijdsduur in de ordegrrootte van enige uren (idem voor de overgang van vollast naar minimumlast). Voor de huidige generatie is dat nog 1 à 2 dagen (zie (Van Gerwen 2004b), en hoofdstuk 5).
- een MCFC unit kan niet zomaar worden ingeschakeld. Een koude start kost ca 16 à 20 uur (zie (Van Gerwen 2004b), en hoofdstuk 5).
- een MCFC-systeem kan met behulp van een (elektrische) heater op temperatuur worden gehouden ('hot-stand-by'). Bij een 250 kW_e-eenheid is circa 20 kW_e nodig voor het op temperatuur houden (dit vermogen kan desgewenst ook door de stack zelf geleverd worden). Starten vanuit een 'hot-stand-by'-toestand en opregelen naar 20 kW_e kost enkele minuten.
- het regelbereik van een SOFC/GT-systeem is circa 60-100% van de nominale elektrische belasting
- het opstarten van een koude SOFC-stack vanaf kamertemperatuur kost circa 24 uur
- een SOFC-stack kan in ca 10 minuten van minimumlast naar vollast worden opgeregeld
- om een SOFC-systeem op hot-stand-by te houden, is het, naast het middels elektrische verwarming op temperatuur houden, nodig het stacksysteem continu te 'purgen' met zogenaamde schutgassen (reducerend gas, bijvoorbeeld waterstof/stikstof mengsel, voor de anode en oxiderend gas (lucht) voor de kathode. Het reducerende mengsel zou bijvoorbeeld met een electrolyser kunnen worden gemaakt. Dit vraagt echter een extra installatie en besturing en verder extra elektrische energie naast het al forse verbruik voor de elektrische heater. Gezien de complexiteit en kosten van de extra voorzieningen en het hoge elektrische energieverbruik, stellen we dat 'hot-stand-by' bedrijf voor de SOFC/GT-combinatie niet zinvol is.

BIJLAGE E KLIMAATREFERENTIEJAAR

Voor jaarrond-energievraagberekeningen aan gebouwen dient voor de buitencondities (weerdata) een zogenaamd “referentiejaar” te worden genomen dat in voldoende mate zowel dag-/nachtvariaties laat zien, als ook kenmerkende lange-termijn variaties over een jaar. Uiteraard zijn exacte voorspellingen van het weer in een bepaald jaar onmogelijk. In het algemeen zal een representatieve schatting van de energievraag kunnen worden verkregen door uit te gaan van historische weerdata van meerdere opeenvolgende jaren (bijvoorbeeld 10). Dit betekent echter een zeer groot gegevensbestand en een dito aantal berekeningen. Teneinde het rekenwerk te beperken zijn zogenaamde referentie jaren ontwikkeld (o.a. door de Technische Universiteit Eindhoven en door de Technisch Physische Dienst TNO-TPD). Deze referentie jaren hebben de lengte van één jaar en zijn opgebouwd uit aangeschakelde reeksen uurlijkse waarnemingen van het werkelijke klimaat gedurende maanden van verschillende jaren. Deze delen zijn uit de 10 jaren waarvan de waarnemingen beschikbaar zijn zo gekozen, dat de berekende warmte- en koudebehoefte over deze periode van 10 jaar gemiddeld en over dat gekozen samengestelde jaar zo goed mogelijk met elkaar overeenstemmen. Om de berekeningen verder te versnellen is door de TU Delft het zogenaamd “Verkort referentiejaar” ontwikkeld, dat werkt met representatieve dagen voor de verschillende seizoenen. Het is gebaseerd op een statistische analyse van de werkelijke uurlijkse klimaatgegevens van het KNMI, over een periode van 10 jaar (1961-1970), voor De Bilt. Het resulterende klimaatmodel bestaat uit een beknopt bestand van klimaatgegevens waarin de karakteristieke eigenschappen van het klimaat gehandhaafd zijn, voor zover deze van belang zijn bij de bepaling van het energieverbruik in gebouwen, en bij het berekenen van de gemiddelde opbrengst van zonneboilersystemen. In het “Verkort referentiejaar voor buitencondities” (dat als NEN-norm is aanvaard door de normcommissie 35174 “Klimaatbeheersing in gebouwen (NEN 5060) zijn de gegevens van een heel jaar geconcentreerd in 4 seizoenen van 14 dagen.

In dit voorbeeld zal gebruik gemaakt worden van het “Verkort referentiejaar” (volgens NEN 5060). Doordat maar 56 dagen hoeven te worden doorgerekend, kan de simulatie veel sneller worden uitgevoerd (bij een tijdstap van 15 minuten hoeven nu “slechts” 5376 situaties te worden doorgerekend versus 35 040 bij een heel jaar of 350 400 bij 10 opeenvolgende jaren). De cumulatieve verbruiken berekend over het Verkort referentiejaar (VRJ) worden teruggerekend naar een vol jaar. Figuur E.1 toont het verloop van buitentemperatuur, zonneinstraling, windsnelheid en absolute luchtvochtigheid van het “Verkort referentiejaar”.



Figuur E.1 Verloop van buitencondities verkort referentiejaar

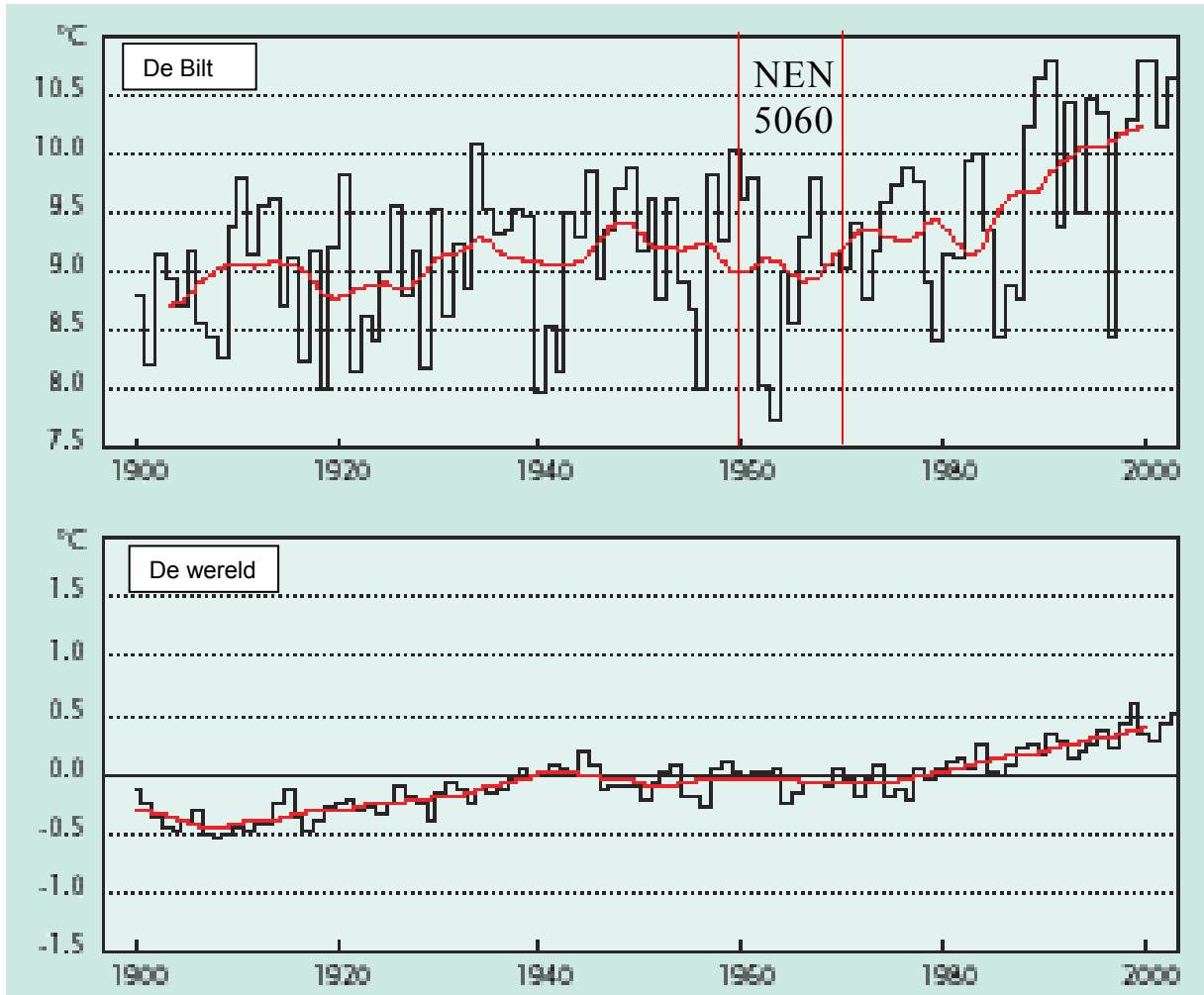
De Bilt kan als representatief voor het geografisch gemiddelde van Nederland worden beschouwd³⁴. Voor specifieke geografische locaties verdient het aanbeveling de data-set van het Verkort referentiejaar te corrigeren. Desgewenst kunnen ook andere datasets worden gehanteerd mits deze maar voldoende representatief zijn (bijvoorbeeld “SEL-referentiejaar”, (Breuer, 1989).

³⁴ In het westen van het land, waar veel glastuinbouw voorkomt, de gemiddelde temperatuur hoger dan geografisch gemiddeld over Nederland) 1971-2000; Tgem_de Bilt=9,8°C Tgem_Vlissingen=10,4 Tgem_Eelde=9,0 °C

Bijlage E blad 3

Het verkort referentiejaar is gebaseerd op gegevens van 1961-1970. Eind 2001 heeft het KNMI bekend gemaakt, dat de jaren negentig van de vorige eeuw in Nederland 0.8 graden warmer waren dan de voorgaande periode van 30 jaar. Ook werd aangegeven dat er een verband bestaat tussen de wereldwijde temperatuurstijging en de recente warme periode in Nederland (zie figuur E.2). Het KNMI verwacht ook dat de eerste 10 jaar van de 21-ste eeuw duidelijk warmer worden dan het gemiddelde over 1961-1990, maar ongeveer net zo warm als de zeer warme jaren negentig. Met deze jongste inzichten in de klimaatontwikkeling is in deze studie nog geen rekening gehouden.

De absolute warmtebehoefte van een kas die op basis van het VRJ is berekend, zal derhalve in vergelijking met de warmtebehoefte die zou behoren bij het gemiddelde klimaat van de negentiger jaren, wat hoger zijn. Echter, omdat het in deze studie gaat om verschillen in energieverbruik tussen een alternatief en referentie-energiesystemen, waarbij voor beiden van hetzelfde buitenklimaat wordt uitgegaan, is dit geen probleem. In het verschil van de verbruiken valt het effect van een gemiddeld iets lagere buitentemperatuur grotendeels weg.



Figuur E.2 Boven zwarte lijn: jaargemiddelde temperatuur in De Bilt van 1900 tot 2002. De rode lijn in deze grafiek geeft het 10-jarig voortschrijdend gemiddelde van deze temperatuur. In de onderste grafiek staat de jaargemiddelde (zwart) en 10-jaargemiddelde (rood) 'wereldtemperatuur' uitgezet (relatief ten opzichte van het gemiddelde van de periode 1977-1980 (bron KNMI))

BIJLAGE F RESULTATEN MODELBEREKENINGEN

In deze bijlage zijn wat uitgebreider dan in paragraaf 3.2 is gebeurd, de resultaten van de modelberekeningen gegeven.

Roos, belicht, ca 4000 uur: tabel F.1

Tomaat, belicht, ca 2600 uur: tabel F.2

Tomaat, semi-gesloten, belicht, ca 2500 uur: tabel F.3

De primaire-energieverbruiken in tabel F.1, F.2 en F.3 zijn berekend bij een centralerendement (inclusief transport- en distributieverliezen) van 45% op onderwaarde (= 40,52% op bovenwaarde).

In tabel F.4, F.5 respectievelijk F.6 zijn dezelfde tabellen gegeven voor een centrale-rendement van 60% op onderwaarde

In tabel F.7, F.8 respectievelijk F.9 zijn dezelfde tabellen gegeven voor een centrale-rendement van 70% op onderwaarde.

Tabel F.1: Resultaten modelberekening Roos, belicht, 3995 uur, 2 ha (centralerendement = 45% o.w.)

Belichtings-+WK-kenmerken				Roos belicht 3995 h, 130 $\mu\text{mol/s/m}^2$		Energievraag		Verbruiken					Leveringen		Primaire-energieverbruik				Norm Besluit glastuinbouw		
vermogen belichten	WK P_{Wke}	draai-uren	rendem WK	Beschrijving energiesysteem+inzetstrategie	Wvraag	Evraag	Gas WK	Gas ketel	Gasverbruik	Wverlies	Einkoop	Everkoop	Wlevering aan derde	Eprimair totaal	Eprimair per ha	Eprimair per m^2	Reductie t.o.v. basecase	Opp. bedrijf	Energiedoelstelling 2010	Rel.verschil tov Enorm	
W_e/m^2	W_e/m^2	uur			GJ/a	MWh/a	Nm^3/a	Nm^3/a	Nm^3/a	GJ/a	MWh/a	MWh/a	GJ/a	GJ/a	GJ/a	GJ/ha/a	$\text{GJ/m}^2/\text{a}$		ha	GJ/ha/a	2010
78.68	79.4	6630	42.5%	1 Basissituatie: WK op 100% van Pbelichten	18193	6475	2815483	34838	2850321	24580	66.3	4118	0	64252	32126	3.213			2	20830	54.2%
78.68	79.4	6630	42.5%	2 WK op 50% van Pbelichten	18193	6475	1420155	147688	1567843	7249	3209.9	2045	0	65494	32747	3.275	1.9%		2	20830	57.2%
78.68	79.4	6630	42.5%	3 WK 100% v.Pbelicht+Wlev_1ha_tom	34637	6475	2815483	214943	3030425	13888	66.3	4118	16443	54143	27071	2.707	-15.7%		2	20830	30.0%
78.68	79.4	6630	42.5%	4 WK 100% v.Pbelicht+Wlev_2ha_tom	51084	6475	2815483	519178	3334661	7362	66.3	4118	32891	48395	24198	2.420	-24.7%		2	20830	16.2%
78.68	79.4	6630	69.5%	5 WK op 100% van Pbelichten, rend_WK=70%	18193	6475	1721698	270857	1992555	2107	66.3	4118	0	34084	17042	1.704	-47.0%		2	20830	-18.2%
59.44	59.44	6630	69.5%	6 WK op 100% v.Pbelicht, rend_WK=70%, rend_lamp=50%	20623	4949	1304396	388084	1692479	455	77.4	3104	0	32639	16320	1.632	-49.2%		2	20830	-21.7%
59.44	118.9	6630	69.5%	7 WK op 200% v.Pbelicht, rend_WK=70%, rend_lamp=50%	20623	4949	2593609	236765	2830373	4772	43.9	10952	0	2631	1316	0.132	-95.9%		2	20830	-93.7%
59.44	178.3	6630	69.5%	8 WK op 300% v.Pbelicht, rend_WK=70%, rend_lamp=50%	20623	4949	3882822	130523	4013345	10586	43.9	18834	0	-25792	-12896	-1.290	-140.1%		2	20830	-161.9%
59.44	59.44	6630	42.5%	9 WK op 100% v.Pbelicht, rend_WK=42.5%, rend_lamp=50%	20623	4949	2133070	92303	2225373	13764	77.4	3104	0	51381	25691	2.569	-20.0%		2	20830	23.3%

Tabel F.2: Resultaten modelberekening Tomaat, belicht, 2630 uur, 2 ha (centralerendement = 45% o.w.)

Belichtings-+WK-kenmerken				Tomaat belicht 2630 uur, 160 $\mu\text{mol/s/m}^2$		Energievraag		Verbruiken					Leveringen		Primaire-energieverbruik				Norm Besluit glastuinbouw		
vermogen belichten	WK P_{Wke}	draai-uren	rendem WK	Beschrijving energiesysteem+inzetstrategie	Wvraag	Evraag	Gas WK	Gas ketel	Gasverbruik	Wverlies	Einkoop	Everkoop	Wlevering aan derde	Eprimair totaal	Eprimair per ha	Eprimair per m^2	Reductie t.o.v. basecase	Opp. bedrijf	Energiedoelstelling 2010	Rel.verschil tov Enorm	
W_e/m^2	W_e/m^2	uur			GJ/a	MWh/a	Nm^3/a	Nm^3/a	Nm^3/a	GJ/a	MWh/a	MWh/a	GJ/a	GJ/a	GJ/a	GJ/ha/a	$\text{GJ/m}^2/\text{a}$		ha	GJ/ha/a	2010
97	97.5	5641	42.5%	1 WK 100% van Pbelicht; on plat.u+CO2;	22722	5283	2943499	61292	3004791	22755	77.4	5283	0	59432	29716	2.972			2	22142	34.2%
97	97.5	4160		2 WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO2; buf niet vol	22722	5283	2170639	63636	2234275	11044	109.0	2942	0	53414	26707	2.671	-10.1%		2	22142	20.6%
97	97.5	4571		3 WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO2; buf niet vol;Wlev:1ha tom	39165	5283	2384897	293170	2678067	5165	98.2	3732	16443	45462	22731	2.273	-23.5%		2	22142	2.7%
97	97.5	4571		4 WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO2; buf niet vol;Wlev:1ha tom 3ha tot	39165	5381	2384897	293170	2678067	5165	196.6	3732	0	62780	20927	2.093	-29.6%		3	20731	0.9%
97	97.5	4796		5 WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO2; buf niet vol;ext.Wlev:2ha tom	55612	5283	2502229	662539	3164768	2573	92.4	4165	32890	42235	21117	2.112	-28.9%		2	22142	-4.6%
97	97.5	4796	42.5%	6 WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO2; buf niet vol;Wlev:2ha tom 4ha tot	55612	5480	2502229	662539	3164768	2573	289.3	4165	0	76875	19219	1.922	-35.3%		4	20026	-4.0%
97	97.5	4545	69.5%	7 WK op 100% van Pbelichten + rend_WK=70%	22722	5283	2015600	101354	2116954	5916	99.5	3682	0	42623	21311	2.131	-28.3%		2	22142	-3.8%
97	195	4318	69.5%	8 WK op 200% van Pbelichten + rend_WK=70%;Wlev.2ha tom	55612	5283	3816545	474057	4290602	8242	91.2	11595	32890	15803	7901	0.790	-73.4%		2	22142	-64.3%
97	195	4502	69.5%	9 WK op 200% van Pbelichten + rend_WK=70%;Wlev.3ha tom	72059	5283	3979288	799644	4778932	5503	86.13	12306	49337	10171	5085	0.509	-82.9%		2	22142	-77.0%
73.1	73.8	5641	69.5%	10 WK op 100% van Pbelichten, rend_lamp_50% + rend_WK=70%	24128	4040	1362627	469788	1832415	0	81.5	4372	0	26328	13164	1.316	-55.7%		2	22142	-40.5%
73.1	147	5543	69.5%	11 WK 200% v.Pbelichten,rend_lamp50%, rend_WK=70%;Wlev.3ha tom	73466	4040	2665328	1644925	4310253	95	66.35	12321	49338	-6625	-3312	-0.331	-111.1%		2	22142	-115.0%
73.1	195.2	5363	69.5%	12 WK 266% v.Pbelichten,rend_lamp50%, rend_WK=70%;Wlev.3ha tom	73466	4040	3425173	1495071	4920243	396	69.2	16970	49338	-26445	-13222	-1.322	-144.5%		2	22142	-159.7%

Tabel F.3: Resultaten modelberekening Tomaat, belicht (2480 uur), semi-gesloten (max. koeling: 300 W/m²), 2 ha. In deze simulaties wordt met name het effect van het leveren van warmte aan derden onderzocht (centralerendement = 45% o.w.)

Belichtings-+WK-kenmerken				Tomaat, semi-gesloten, belicht 2480 uur, 160 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (2 ha)		Energievraag		Verbruiken					Leveringen		Primaire-energieverbruik					Norm Besluit glastuinbouw	
vermogen belichten	WK P_{Wke}	draai-uren WK	rendem WK	koeling max.300 W/m ² Beschrijving energiesysteem+inzetstrategie		Wvraag	Evraag	Gas WK	Gas ketel	Gasverbruik	Wverlies	Einkoop	Everkoop	Wlevering aan derde	Eprimair totaal	Eprimair per ha	Eprimair per m ²	Reductie t.o.v. basecase	Opp. bedrijf	Energiedoelstelling 2010	Rel.verschil tov Enorm
W_e/m^2	W_e/m^2	uur				GJ/a	MWh/a	Nm ³ /a	Nm ³ /a	Nm ³ /a	GJ/a	MWh/a	MWh/a	GJ/a	GJ/ha/a	GJ/m ² /a		ha	GJ/ha/a	2010	
97	30.26	5200	38.7%	1	WK 100% van P_WK_WP0 gesloten; on plat.u.+CO2;	22672	6729	538806	470	539276	18526	5039	145	0	62449	31225	3.122	0.0%	2	22142	41.0%
97	90.77	4648	38.7%	2	WK+WP 300% van P_WK_WP0 gesloten; on plat.u.+CO2; ext.Wlev.4ha tom	88450	6729	1401236	1397	1402633	6397	5781	242	65778	32766	16383	1.638	-47.5%	3	22142	-26.0%
97			38.7%	3	WK+WP 400% van P_WK_WP0 gesloten; on plat.u.+CO2; ext.Wlev.4ha tom	88450	6729	1489727	0	1489727	8036	5771	423	65778	34135	17067	1.707	-45.3%	4	22142	-22.9%
97	121	4616	38.7%	4	WK+WP 400% van P_WK_WP0 gesloten; on plat.u.+CO2; ext.Wlev.6ha tom	121345	6729	1852239	1716	1853955	3466	6903	336	98673	24869	12435	1.243	-60.2%	5	22142	-43.8%

Tabel F.4: Resultaten modelberekening Roos, belicht, 3995 uur, 2 ha (centralerendement = 60% o.w.)

Belichtings-+WK-kenmerken				Roos belicht 3995 h, 130 $\mu\text{mol/s/m}^2$		Energievraag		Verbruiken					Leveringen		Primaire-energieverbruik					Norm Besluit glastuinbouw	
vermogen belichten	WK P_{Wke}	draai-uren WK	rendem WK	Beschrijving energiesysteem+inzetstrategie		Wvraag	Evraag	Gas WK	Gas ketel	Gasverbruik	Wverlies	Einkoop	Everkoop	Wlevering aan derde	Eprimair totaal	Eprimair per ha	Eprimair per m ²	Reductie t.o.v. basecase	Opp. bedrijf	Energiedoelstelling 2010	Rel.verschil tov Enorm
W_e/m^2	W_e/m^2	uur				GJ/a	MWh/a	Nm ³ /a	Nm ³ /a	Nm ³ /a	GJ/a	MWh/a	MWh/a	GJ/a	GJ/ha/a	GJ/m ² /a		ha	GJ/ha/a	2010	
78.68	79.4	6630	42.5%	1	Basisituatie: WK op 100% van Pbelichten	18193	6475	2815483	34838	2850321	24580	66.3	4118	0	73250	36625	3.663		2	20830	75.8%
78.68	79.4	6630	42.5%	2	WK op 50% van Pbelichten	18193	6475	1420155	147688	1567843	7249	3209.9	2045	0	62906	31453	3.145	-14.1%	2	20830	51.0%
78.68	79.4	6630	42.5%	3	WK 100% v.Pbelicht+Wlev_1ha_tom	34637	6475	2815483	214943	3030425	13888	66.3	4118	16443	63141	31571	3.157	-13.8%	2	20830	51.6%
78.68	79.4	6630	42.5%	4	WK 100% v.Pbelicht+Wlev_2ha_tom	51084	6475	2815483	519178	3334661	7362	66.3	4118	32891	57394	28697	2.870	-21.6%	2	20830	37.8%
78.68	79.4	6630	69.5%	5	WK op 100% van Pbelichten, rend_WK=70%	18193	6475	1721698	270857	1992555	2107	66.3	4118	0	43083	21541	2.154	-41.2%	2	20830	3.4%
59.44	59.44	6630	69.5%	6	WK op 100% v.Pbelicht, rend_WK=70%, rend_lamp=50%	20623	4949	1304396	388084	1692479	455	77.4	3104	0	39360	19680	1.968	-46.3%	2	20830	-5.5%
59.44	118.9	6630	69.5%	7	WK op 200% v.Pbelicht, rend_WK=70%, rend_lamp=50%	20623	4949	2593609	236765	2830373	4772	43.9	10952	0	26859	13430	1.343	-63.3%	2	20830	-35.5%
59.44	178.3	6630	69.5%	8	WK op 300% v.Pbelicht, rend_WK=70%, rend_lamp=50%	20623	4949	3882822	130523	4013345	10586	43.9	18834	0	15943	7972	0.797	-78.2%	2	20830	-61.7%
59.44	59.44	6630	42.5%	9	WK op 100% v.Pbelicht, rend_WK=42,5%, rend_lamp=50%	20623	4949	2133070	92303	2225373	13764	77.4	3104	0	58102	29051	2.905	-20.7%	2	20830	39.5%

Tabel F.5: Resultaten modelberekening Tomaat, belicht, 2630 uur, 2 ha (centralerendement = 60% o.w.)

vermogen belichten				Tomaat belicht 2630 uur, 160 $\mu\text{mol/s/m}^2$		Energievraag		Verbruiken					Leveringen		Primaire-energieverbruik					Norm Besluit glastuinbouw			
W _e /m ²	W _g /m ²	draai-uren	rendem WK	Beschrijving energiesysteem+inzetstrategie		Wvraag	Evraag	Gas WK	Gas ketel	Gasverbruik	Wverlies	Einkoop	Everkoop	Wlevering aan derde	Eprimair totaal	Eprimair per ha	Eprimair per m ²	Reductie t.o.v. basecase	Opp. t.o.v. bedrijf	Energiedoelstelling 2010	Rel.verschil tov Enorm		
W _e /m ²	W _g /m ²	uur	WK			GJ/a	MWh/a	Nm ³ /a	Nm ³ /a	Nm ³ /a	GJ/a	MWh/a	MWh/a	GJ/a	GJ/a	GJ/ha/a	GJ/m ² /a	basecase	ha	GJ/ha/a	2010		
97	5641	42.5%	1	WK 100% van Pbelicht; on plat.u+CO ₂ ;		22722	5283	2943499	61292	3004791	22755	77.4	5283	0	70994	35497	3.550			2	22142	60.3%	
97	4160		2	WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO ₂ ; buf niet vol		22722	5283	2170639	63636	2234275	11044	109.0	2942	0	59705	29853	2.985	-15.9%		2	22142	34.8%	
97	4571		3	WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO ₂ ; buf niet vol;ext.Wlev.1ha tom		39165	5283	2384897	293170	2678067	5165	98.2	3732	16443	53532	26766	2.677	-24.6%		2	22142	20.9%	
97	4571		4	WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO ₂ ; buf niet vol;Wlev.1ha tom 3ha tot		39165	5381	2384897	293170	2678067	5165	196.6	3732	0	70632	23544	2.354	-33.7%		3	20731	13.6%	
97	4796		5	WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO ₂ ; buf niet vol;ext.Wlev.2ha tom		55612	5283	2502229	662539	3164768	2573	92.4	4165	32890	51280	25640	2.564	-27.8%		2	22142	15.8%	
97	4796	42.5%	6	WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO ₂ ; buf niet vol;Wlev.2ha tom 4ha tot		55612	5480	2502229	662539	3164768	2573	289.3	4165	0	85482	21371	2.137	-39.8%		4	20026	6.7%	
97	97.5	4545	69.5%	7	WK op 100% van Pbelichten + rend_WK=70%		22722	5283	2015600	101354	2116954	5916	99.5	3682	0	50580	25290	2.529	-28.8%		2	22142	14.2%
97	195	4318	69.5%	8	WK op 200% van Pbelichten + rend_WK=70%;Wlev.2ha tom		55612	5283	3816545	474057	4290602	8242	91.2	11595	32890	41354	20677	2.068	-41.7%		2	22142	-6.6%
97	195	4502	69.5%	9	WK op 200% van Pbelichten + rend_WK=70%;Wlev.3ha tom		72059	5283	3979288	799644	4778932	5503	86.13	12306	49337	37312	18656	1.866	-47.4%		2	22142	-15.7%
73.1	73.8	5641	69.5%	10	WK op 100% van Pbelichten, rend_lamp_50% + rend_WK=70%		24128	4040	1362627	469788	1832415	0	81.5	4372	0	35857	17929	1.793	-49.5%		2	22142	-19.0%
73.1	147	5543	69.5%	11	WK 200% v.Pbelichten,rend_lamp50%, rend_WK=70%;Wlev.3ha tom		73466	4040	2665328	1644925	4310253	95	66.35	12321	49338	20595	10298	1.030	-71.0%		2	22142	-53.5%
73.1	195,2	5363	69.5%	12	WK 266% v.Pbelichten,rend_lamp50%, rend_WK=70%;Wlev.3ha tom		73466	4040	3425173	1495071	4920243	396	69.2	16970	49338	11093	5547	0.555	-84.4%		2	22142	-74.9%

Tabel F.6: Resultaten modelberekening Tomaat, belicht (2480 uur), semi-gesloten (max. koeling: 300 W/m²), 2 ha. In deze simulaties wordt met name het effect van het leveren van warmte aan derden onderzocht (centralerendement = 60% o.w.)

Belichtings-WK-kenmerken				Tomaat, semi-gesloten, belicht 2480 uur, 160 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (2 ha)		Energievraag		Verbruiken					Leveringen		Primaire-energieverbruik					Norm Besluit glastuinbouw			
W _e /m ²	W _g /m ²	draai-uren	rendem WK	koeling max.300 W/m ²		Wvraag	Evraag	Gas WK	Gas ketel	Gasverbruik	Wverlies	Einkoop	Everkoop	Wlevering aan derde	Eprimair totaal	Eprimair per ha	Eprimair per m ²	Reductie t.o.v. basecase	Opp. t.o.v. bedrijf	Energiedoelstelling 2010	Rel.verschil tov Enorm		
W _e /m ²	W _g /m ²	uur	WK	Beschrijving energiesysteem+inzetstrategie		GJ/a	MWh/a	Nm ³ /a	Nm ³ /a	Nm ³ /a	GJ/a	MWh/a	MWh/a	GJ/a	GJ/ha/a	GJ/m ² /a	basecase	ha	GJ/ha/a	2010			
97	30.26	5200	38.7%	1	WK 100% van P_WK_WP0 gesloten; on plat.u+CO ₂ ;		22672	6729	538806	470	539276	18526	5039	145	0	51578	25789	2.579	0.0%		2	22142	16.5%
97	90.77	4648	38.7%	2	WK+WP 300% van P_WK_WP0 gesloten; on plat.u+CO ₂ ; ext.Wlev.4ha tom		88450	6729	1401236	1397	1402633	6397	5781	242	65778	20463	10231	1.023	-60.3%		3	22142	-53.8%
97			38.7%	3	WK+WP 400% van P_WK_WP0 gesloten; on plat.u+CO ₂ ; ext.Wlev.4ha tom		88450	6729	1489727	0	1489727	8036	5771	423	65778	22255	11127	1.113	-56.9%		4	22142	-49.7%
97	121	4616	38.7%	4	WK+WP 400% van P_WK_WP0 gesloten; on plat.u+CO ₂ ; ext.Wlev.6ha tom		121345	6729	1852239	1716	1853955	3466	6903	336	98673	10285	5142	0.514	-80.1%		5	22142	-76.8%

Tabel F.7: Resultaten modelberekening Roos, belicht, 3995 uur, 2 ha (centralerendement = 70% o.w.)

Belichtings-+WK-kenmerken				Roos belicht 3995 h, 130 $\mu\text{mol/s/m}^2$		Energievraag		Verbruiken				Leveringen		Primaire-energieverbruik					Norm Besluit glastuinbouw				
vermogen belichten	WK P_{Wke}	draai-uren WK	rendem WK	Beschrijving energiesysteem+inzetstrategie				Wvraag	Evraag	Gas WK	Gas ketel	Gasverbruik	Wverlies	Einkoop	Everkoop	Wlevering aan derde	Eprimair totaal	Eprimair per ha	Eprimair per m^2	Reductie t.o.v. basecase	Opp. bedrijf	Energiedoelstelling 2010	Rel.verschil tov Enorm
W_e/m^2	W_e/m^2	uur					GJ/a	MWh/a	Nm^3/a	Nm^3/a	Nm^3/a	GJ/a	MWh/a	MWh/a	GJ/a	GJ/a	GJ/ha/a	GJ/ m^2/a		ha	GJ/ha/a	2010	
78.68	79.4	6630	42.5%	1 Basissituatie: WK op 100% van Pbelichten				18193	6475	2815483	34838	2850321	24580	66.3	4118	0	77107	38553	3.855		2	20830	85.1%
78.68	79.4	6630	42.5%	2 WK op 50% van Pbelichten				18193	6475	1420155	147688	1567843	7249	3209.9	2045	0	61797	30898	3.090	-19.9%	2	20830	48.3%
78.68	79.4	6630	42.5%	3 WK 100% v.Pbelicht+Wlev_1ha_tom				34637	6475	2815483	214943	3030425	13888	66.3	4118	16443	66998	33499	3.350	-13.1%	2	20830	60.8%
78.68	79.4	6630	42.5%	4 WK 100% v.Pbelicht+Wlev_2ha_tom				51084	6475	2815483	519178	3334661	7362	66.3	4118	32891	61250	30625	3.063	-20.6%	2	20830	47.0%
78.68	79.4	6630	69.5%	5 WK op 100% van Pbelichten, rend_WK=70%				18193	6475	1721698	270857	1992555	2107	66.3	4118	0	46939	23470	2.347	-39.1%	2	20830	12.7%
59.44	59.44	6630	69.5%	6 WK op 100% v.Pbelicht, rend_WK=70%, rend_lamp=50%				20623	4949	1304396	388084	1692479	455	77.4	3104	0	42241	21121	2.112	-45.2%	2	20830	1.4%
59.44	118.9	6630	69.5%	7 WK op 200% v.Pbelicht, rend_WK=70%, rend_lamp=50%				20623	4949	2593609	236765	2830373	4772	43.9	10952	0	37243	18622	1.862	-51.7%	2	20830	-10.6%
59.44	178.3	6630	69.5%	8 WK op 300% v.Pbelicht, rend_WK=70%, rend_lamp=50%				20623	4949	3882822	130523	4013345	10586	43.9	18834	0	33830	16915	1.691	-56.1%	2	20830	-18.8%
59.44	59.44	6630	42.5%	9 WK op 100% v.Pbelicht, rend_WK=42.5%, rend_lamp=50%				20623	4949	2133070	92303	2225373	13764	77.4	3104	0	60983	30491	3.049	-20.9%	2	20830	46.4%

Tabel F.8: Resultaten modelberekening Tomaat, belicht, 2630 uur, 2 ha (centralerendement = 70% o.w.)

				Tomaat belicht 2630 uur, 160 $\mu\text{mol/s/m}^2$		Energievraag		Verbruiken				Leveringen		Primaire-energieverbruik					Norm Besluit glastuinbouw				
vermogen belichten	WK P_{Wke}	draai-uren WK	rendem WK	Beschrijving energiesysteem+inzetstrategie				Wvraag	Evraag	Gas WK	Gas ketel	Gasverbruik	Wverlies	Einkoop	Everkoop	Wlevering aan derde	Eprimair totaal	Eprimair per ha	Eprimair per m^2	Reductie t.o.v. basecase	Opp. bedrijf	Energiedoelstelling 2010	Rel.verschil tov Enorm
W_e/m^2	W_e/m^2	uur					GJ/a	MWh/a	Nm^3/a	Nm^3/a	Nm^3/a	GJ/a	MWh/a	MWh/a	GJ/a	GJ/a	GJ/ha/a	GJ/ m^2/a		ha	GJ/ha/a	2010	
97		5641	42.5%	1 WK 100% van Pbelicht; on plat.u+CO2;				22722	5283	2943499	61292	3004791	22755	77.4	5283	0	75949	37974	3.797		2	22142	71.5%
97		4160		2 WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO2; buf niet vol				22722	5283	2170639	63636	2234275	11044	109.0	2942	0	62402	31201	3.120	-17.8%	2	22142	40.9%
97		4571		3 WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO2; buf niet vol;ext.Wlev:1ha tom				39165	5283	2384897	293170	2678067	5165	98.2	3732	16443	56991	28496	2.850	-25.0%	2	22142	28.7%
97		4571		4 WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO2; buf niet vol;Wlev:1ha tom 3ha tot				39165	5381	2384897	293170	2678067	5165	196.6	3732	0	73997	24666	2.467	-35.0%	3	20731	19.0%
97		4796		5 WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO2; buf niet vol;ext.Wlev:2ha tom				55612	5283	2502229	662539	3164768	2573	92.4	4165	32890	55156	27578	2.758	-27.4%	2	22142	24.6%
97		4796	42.5%	6 WK 100% v.Pbelicht; on plat.u+CO2; buf niet vol;Wlev:2ha tom 4ha tot				55612	5480	2502229	662539	3164768	2573	289.3	4165	0	89171	22293	2.229	-41.3%	4	20026	11.3%
97	97.5	4545	69.5%	7 WK op 100% van Pbelichten + rend_WK=70%				22722	5283	2015600	101354	2116954	5916	99.5	3682	0	53991	26995	2.700	-28.9%	2	22142	21.9%
97	195	4318	69.5%	8 WK op 200% van Pbelichten + rend_WK=70%;Wlev.2ha tom				55612	5283	3816545	474057	4290602	8242	91.2	11595	32890	52305	26153	2.615	-31.1%	2	22142	18.1%
97	195	4502	69.5%	9 WK op 200% van Pbelichten + rend_WK=70%;Wlev.3ha tom				72059	5283	3979288	799644	4778932	5503	86.13	12306	49337	48945	24472	2.447	-35.6%	2	22142	10.5%
73.1	73.8	5641	69.5%	10 WK op 100% van Pbelichten, rend_lamp_50% + rend_WK=70%				24128	4040	1362627	469788	1832415	0	81.5	4372	0	39941	19971	1.997	-47.4%	2	22142	-9.8%
73.1	147	5543	69.5%	11 WK 200% v.Pbelichten,rend_lamp50%, rend_WK=70%;Wlev.3ha tom				73466	4040	2665328	1644925	4310253	95	66.35	12321	49338	32261	16130	1.613	-57.5%	2	22142	-27.2%
73.1	195,2	5363	69.5%	12 WK 266% v.Pbelichten,rend_lamp50%, rend_WK=70%;Wlev.3ha tom				73466	4040	3425173	1495071	4920243	396	69.2	16970	49338	27181	13591	1.359	-64.2%	2	22142	-38.6%

Tabel F.9: Resultaten modelberekening Tomaat, belicht (2480 uur), semi-gesloten (max. koeling: 300 W/m²), 2 ha. In deze simulaties wordt met name het effect van het leveren van warmte aan derden onderzocht (centralerendement = 70% o.w.)

Belichtings-+WK-kenmerken				Tomaat, semi-gesloten, belicht 2480 uur, 160 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (2 ha)	Energievraag		Verbruiken					Leveringen		Primaire-energieverbruik					Norm Besluit glastuinbouw	
vermogen belichten	WK P _{Wke}	draai-uren	rendem WK	koeling max.300 W/m ² Beschrijving energiesysteem+inzetstrategie	Wvraag	Evraag	Gas WK	Gas ketel	Gasverbruik	Wverlies	Einkoop	Everkoop	Wlevering aan derde	Eprimair totaal	Eprimair per ha	Eprimair per m ²	Reductie t.o.v. basecase	Opp. bedrijf	Energiedoelstelling 2010	Rel.verschil tov Enorm
W _e /m ²	W _e /m ²	uur			GJ/a	MWh/a	Nm ³ /a	Nm ³ /a	Nm ³ /a	GJ/a	MWh/a	MWh/a	GJ/a	GJ/a	GJ/ha/a	GJ/m ² /a		ha	GJ/ha/a	2010
97	30.26	5200	38.7%	1 WK 100% van P_WK_WP0 gesloten; on plat.u+CO2;	22672	6729	538806	470	539276	18526	5039	145	0	46920	23460	2.346	0.0%	2	22142	6.0%
97	90.77	4648	38.7%	2 WK+WP 300% van P_WK_WP0 gesloten; on plat.u+CO2; ext.Wlev:4ha tom	88450	6729	1401236	1397	1402633	6397	5781	242	65778	15190	7595	0.759	-67.6%	3	22142	-65.7%
97			38.7%	3 WK+WP 400% van P_WK_WP0 gesloten; on plat.u+CO2; ext.Wlev:4ha tom	88450	6729	1489727	0	1489727	8036	5771	423	65778	17164	8582	0.858	-63.4%	4	22142	-61.2%
97	121	4616	38.7%	4 WK+WP 400% van P_WK_WP0 gesloten; on plat.u+CO2; ext.Wlev:6ha tom	121345	6729	1852239	1716	1853955	3466	6903	336	98673	4034	2017	0.202	-91.4%	5	22142	-90.9%