



Evaluatie systeemontwerpen voor ontvochtigen en energievoorziening

M.G.M. Raaphorst (PPO)
M.N.A. Ruijs (PPO/LEI)
J.K. Nienhuis (PPO/LEI)
N.J. van de Braak (IMAG)
H.F. de Zwart (IMAG)
G.G. Schoonderbeek (Ecofys)
E.M.B. Heller (Ecofys)
J.J.G. Opdam (Ecofys)

© 2001 Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

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

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



Dit project is gefinancierd door Productschap Tuinbouw en NOVEM.

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Sector Glastuinbouw

Adres : Kruisbroekweg 5, Naaldwijk
: Postbus 5, 2600 AA, Naaldwijk
Tel. : 0174 - 63 67 00
Fax : 0174 - 63 68 35
E-mail : infoglastuinbouw@ppo.dlo.nl
Internet : www.ppo.dlo.nl

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	9
1.1	Achtergrond concepten.....	9
1.2	Samenwerking	10
1.3	Doelstelling	10
1.4	Leeswijzer	10
2	Materiaal en methoden	11
2.1	Kastypen, gewassen en productiesystemen (casus)	11
2.1.1	Lichttransmissie	11
2.1.2	Gewassen	12
2.1.3	Productiesysteem en kasklimaat	13
2.2	Systeemontwerpen	14
2.2.1	Gesloten kas	14
2.2.2	Minder geventileerde kas.....	15
2.3	Uitgangspunten behoeft patronen	16
2.4	Uitgangspunten energievoorziening	16
2.4.1	Warmtepomp.....	18
2.4.2	Gasmotor	18
2.4.3	Gasketel	18
2.5	Uitgangspunten bedrijfskundige beoordeling	19
3	Resultaten	21
3.1	Behoeft patronen warmte, koude en CO ₂	21
3.2	Energievoorziening en primair brandstofverbruik	23
3.2.1	Minder geventileerde kas.....	23
3.2.2	Gesloten kas	24
3.3	Bedrijfskundige beoordeling systeemontwerp	26
3.3.1	Bedrijfseconomische kengetallen	26
3.3.2	Gevoelighedsanalyse economische kengetallen	28
4	Afbreukrisico's systeemontwerpen en energievoorziening	31
4.1	Kasconstructie	31
4.2	Installatie	31
4.2.1	Warmtepomp.....	31
4.2.2	Gasmotor	31
4.2.3	Aquifer	31
4.2.4	Dagbuffers	32
4.2.5	Luchtbehandelingskasten	32
4.2.6	Totale installatie en klimaatregeling	32
4.3	Risico's bij uitvallen van de installatie	32
4.3.1	Verwarming	32
4.3.2	Ontvochtiging en koeling	33
4.4	Overige risico's	33
4.4.1	Teeltkundige risico's	33
4.4.2	Juridische risico's	33
5	Discussie.....	35

5.1	Algemeen	35
5.2	Minder geventileerde kas.....	35
5.3	Gesloten kas	36
6	Conclusies en aanbevelingen	37
6.1	Conclusies	37
6.1.1	Energiebesparing.....	37
6.1.2	Bedrijfseconomie	39
6.2	Sterke en zwakke punten.....	40
6.3	Aanbevelingen.....	40

Samenvatting

Voor het demonstreren van de "Kas van de Toekomst" op de Floriade in 2002 neemt het behalen van de energie-efficiencydoelstelling van de glastuinbouwsector een belangrijke plaats in. Een belangrijke bijdrage hierin wordt verwacht van het hergebruik van zomerse warmte-overschotten voor de energievoorziening. Het doel van dit project is het beoordelen van de bedrijfskundige perspectieven van twee verschillende systeemontwerpen die met koeling en ontvochtiging deze warmte-overschotten verzamelen voor verschillende teelten. De verschillende systeemontwerpen betreffen het zogenaamde minder geventileerde en het gesloten kassysteem. In het minder geventileerde kassysteem (ontwerp IMAG) kan koeling en ontvochtiging plaatsvinden met behulp van een dubbel buisrailnet. Hierdoor hoeven de luchtramen minder vaak geopend te worden en kan het CO₂-niveau vaker op een hoger peil worden gehouden. Door dit hoge CO₂-niveau wordt de productie verhoogd. Het gesloten kassysteem (ontwerp Ecofys) bevat helemaal geen luchtramen en wordt de kaslucht gekoeld, ontvochtigd of verwarmd met een luchtbehandelingskast. Hierdoor kan de CO₂-concentratie constant op een hoog niveau worden gehouden. De productiestijging kan daarom maximaal zijn.

Beide systemen maken gebruik van warmte- en koudeopslag in dagbuffers en in aquifers. De verwarming vindt zo veel mogelijk plaats door aan de warme bron ($\pm 18^{\circ}\text{C}$) van de aquifer met een warmtepomp energie te onttrekken en het hierbij afgekoelde water aan de koude bron ($\pm 6^{\circ}\text{C}$) toe te voegen. Bij behoefte aan koeling en ontvochtiging van de kaslucht wordt de koude bron gebruikt.

In deze evaluatie worden de energiebehoefte en de productieverhoging en de energievoorziening van de twee systeemontwerpen gesimuleerd voor vijf gewassen (tomaat, paprika, chrysant, belichte roos en belichte Kalanchoë) in twee nieuwe typen kasontwerpen (enkeldekskas met antireflectiecoating en kunststof dubbeldekskas). Deze simulatie wordt vergeleken met referentieberekeningen voor een moderne venlo-type kas en een standaard verwarming en ventilatiesysteem. De simulaties voor energiebehoefte en productieverhoging worden uitgevoerd door IMAG met het rekenmodel Kaspro. Op basis van deze resultaten bepaalt Ecofys de energievoorziening. Daarna geeft Praktijkonderzoek Plant & Omgeving een bedrijfskundige beoordeling.

Resultaten

Uit de resultaten blijkt dat de behoeft Patronen voor warmte, koude en CO₂ per situatie verschillen. De warmtevraag is laag bij belichte teelten en bij een dubbel kasdek. De maximale koudevraag bij een gesloten kas is bijna 10 maal hoger dan de maximale hoeveelheid koude die in de minder geventileerde kas nodig is. Dit geldt nog iets meer voor de dubbeldekskas. Ondanks het hogere CO₂-niveau is het CO₂-gebruik bij een gesloten kas tot 65% lager dan bij een minder geventileerde kas.

Bij de energievoorziening blijkt dat de belichte teelten in geen van de simulaties energie besparen. Dit komt doordat er bij belichte teelten meer moet worden gekoeld, terwijl de opgeslagen energie niet nuttig kan worden gebruikt. Wel is in de gesloten kas vanwege de hogere productie het energiegebruik per eenheid product iets lager. Bij de onbelichte teelten wordt wel energie bespaard zoals blijkt in tabel a.

Tabel a - Besparing primaire energie in % ten opzichte van de referentie

		<i>Dubbel dek</i>		<i>Enkel dek</i>	
		Gesloten	Min. Vent.	Gesloten	Min. Vent.
Absolute besparing	Tomaat	48	57	35	21
	Paprika	32	58	26	30
	Chrysant	32	59	24	28
	Roos	-9	-15	-4	-15
	Kalanchoë	-16	-18	-12	-16
Besparing per eenheid product	Tomaat	53	60	45	28
	Paprika	41	60	36	36
	Chrysant	43	45	37	45
	Roos	1	-15	7	-13
	Kalanchoë	4	-12	9	-6

Uit de bedrijfskundige beoordeling blijkt dat het verschil in het netto bedrijfsresultaat alleen voor de tomatenteelt in de gesloten enkeldekskas niet negatief is (zie tabel c). Voor die situatie is een terugverdiendtijd van bijna 7 jaar berekend (zie tabel b). Toch zijn ook voor de andere systemen en ook voor het gewas paprika de bedrijfsresultaten niet slecht te noemen. Zeker gezien de vele onzekerheden en mogelijke verbeteringen die verwacht worden. De terugverdiendtijd is bij paprika met een enkel dek 8 jaar voor zowel de gesloten kas als de minder geventileerde kas.

Tabel b - Terugverdiendtijd van de verschillende concepten in jaren

	<i>Dubbel dek</i>		<i>Enkel dek</i>	
	Gesloten	Min. vent.	Gesloten	Min. vent.
Tomaat	7	16	7	10
Paprika	10	-	8	8
Chrysant	45	-	21	-
Roos	35	-	16	-
Kalanchoë	-	-	39	28

Tabel c - Netto bedrijfsresultaat ten opzichte van de referentieteelten in f/m².jaar

	<i>Dubbel dek</i>		<i>Enkel dek</i>	
	Gesloten	Min. vent.	Gesloten	Min. vent.
Tomaat	-2	-3	0	-1
Paprika	-6	-8	-3	-1
Chrysant	-16	-11	-13	-8
Roos	-24	-24	-17	-16
Kalanchoë	-25	-12	-20	-8

Ontvochtiging en koeling zijn voor de glastuinbouw nog ongebruikelijk en er zijn nog een aantal kleine afbreukrisico's. Voor de meeste van deze afbreukrisico's zijn de te nemen maatregelen bekend.

Conclusies en aanbevelingen

Voor de vruchtgroentegewassen als tomaat en paprika zijn beide koel- en ontvochtigingssystemen hoopvol. De mogelijke besparing op het primaire energiegebruik die toe te wijzen is aan de systemen is erg groot (21-35%) terwijl de berekende verandering van het netto bedrijfsresultaat slechts een beetje negatief tot 0 is. Voor de onbelichte chrysant is de berekende verandering in netto bedrijfsresultaat nog te negatief om op korte termijn een rendabele toepassing te verwachten. Voor de belichte teelten is het koelen en ontvochtigen verre van rendabel en kost zelfs meer energie dan bij de referentiesituatie.

Mogelijke verbeteringen van de resultaten zijn voor de *gesloten kas* te verwachten bij clustering van bedrijven. In de gesloten kas wordt namelijk over het jaar meer warmte geogst dan dat er warmtevraag is gedurende de rest van het jaar. Deze warmte moet dus met een koeltoren worden afgevoerd om te voorkomen dat de aquifer blijvend wordt opgewarmd. Met clustering zou de warme bron van de aquifer kunnen worden aangewend voor bedrijven die niet koelen of ontvochtigen. Ook de benodigde hulpenergie voor de luchtbehandelingskasten en de te behalen COP van de warmtepompen zouden kunnen worden verbeterd. Verder zouden de investeringskosten door grootschaliger inkoop van luchtbehandelingskasten omlaag kunnen.

De bedrijfseconomische perspectieven van de *minder geventileerde kas* kunnen worden verbeterd door meer aandacht te geven aan de CO₂-doseerstrategie. Ook de ontwikkeling van low-cost systemen om warmte aan de kaslucht te onttrekken kan het perspectief van de minder geventileerde kas verbeteren. Verder onderzoek zou zich moeten richten op praktijktoepassingen van de systeemontwerpen, zodat mogelijke risico's beter in kaart kunnen worden gebracht en eventueel verkleind. Verder kan worden overwogen om een tussenvorm tussen de systemen te onderzoeken, waarbij het gesloten kassysteem van luchtramen wordt voorzien om de pieken op te kunnen vangen zodat de benodigde koelcapaciteit lager kan worden.

1 Inleiding

Voor het demonstreren van de "Kas van de Toekomst" op de Floriade in 2002 neemt het behalen van de energie-efficiëntie doelstelling van de glastuinbouwsector een belangrijke plaats in. Een belangrijke bijdrage hierin wordt verwacht van het hergebruik van latente warmte (ontvochtiging kaslucht) en zomerse warmteoverschotten voor de energievoorziening. Ten behoeve van de "Kas van de Toekomst" is in opdracht van de Provincie Noord-Holland een haalbaarheidsstudie uitgevoerd naar het concept van de Kas van de Toekomst [Bakker et al, 1998]. Deze "kas" moet zicht geven op een glastuinbouwbedrijf in 2010.

In deze haalbaarheidsstudie is door IMAG aandacht besteed aan een eenvoudig systeem van koelen en ontvochtigen (installatie met warmtepomp en directe warmte teruglevering) in een standaard kas. Door ECN en Ecofys zijn in diezelfde studie verschillende energievoorzieningsconcepten bekeken bestaande uit warmtekrachtsystemen (gasmotor en brandstofcellen) in combinatie met (lange termijn) warmte- en CO₂-opslagsystemen.

1.1 Achtergrond concepten

Na afronding van genoemde haalbaarheidsstudie heeft Ecofys begin 1999 een nieuw concept van klimaatbeheersing (incl. ontvochtiging) én energievoorziening ontworpen, welke het mogelijk moet maken om gesloten kassen te realiseren [Ecofys, Schoonderbeek et al, 1999]. In vervolg hierop is met financiële ondersteuning van Novem het nieuwe concept verder uitgewerkt en op technische en globaal bedrijfseconomische perspectieven nader bekeken [Ecofys, Opdam et al, 2000]. Een van de conclusies was dat het concept technisch goed en op korte termijn uitvoerbaar is. Door Ecofys is bij Novem en LTO (in kader van de Kas van de Toekomst) een BSE-aanvraag ingediend en gehonoreerd voor het uitvoeren van een praktijkexperiment met een gesloten kas, waarbij naast een optimale energievoorziening een volledige klimaatbeheersing (incl. ontvochtigen) centraal staat.

IMAG heeft het ontvochtigingssysteem zoals voorgesteld in de haalbaarheidstudie van de kas van de Toekomst met financiële ondersteuning van Novem en met behulp van programmageld van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij verder ontwikkeld tot een systeem voor kasluchtontvochtiging, warmtewinning en -opslag [de Zwart, 2001]. Hierbij werd gebruik gemaakt van een gevinde buis boven in de kas. In deze studie kwam echter naar voren dat de lichtonderschepping en de verwachte investeringen niet in verhouding stond met de energiebesparing die ermee gehaald kon worden. Bovendien bleek uit de analyse van de modelberekeningen met dit systeem dat ontvochtiging middels een koud oppervlak in de kas niet energiezuiniger is dan ontvochtiging middels het openen van ramen. Beide conclusies uit deze parallelle studie hebben ertoe geleid dat het door het IMAG voorgestelde systeem voor demonstratie op de Floriade anders zal zijn dan bij aanvang van de voorliggende evaluatiestudies werd gedacht. In concreto is in het huidige systeem gekozen voor warmtewinning en ontvochtiging met behulp van een meervoudig gebruik van het buisrailsysteem. Deze ontwikkeling resulteert in een concept waarmee het mogelijk is de ramen minder vaak te openen: de zogenaamde minder geventileerde kas.

Beide concepten worden vergeleken in een situatie van een eilandbedrijf van 4 ha. Alhoewel dit waarschijnlijk niet de realiteit van morgen zal zijn is hiervoor toch gekozen om het aantal variabelen niet nog verder te verhogen.

Voor de uitvoering van dit project leveren beide concepten (de gesloten kas en de minder geventileerde kas) informatie aan wat betreft de systeemeigenschappen van zowel energievoorziening als klimaatbeheersing. De energievoorziening van zowel de gesloten kas als ook van de minder geventileerde kas is gebaseerd op het ontwerp van Ecofys, waarin gedurende de zomer warmte aan de kas wordt onttrokken die na tussenkomst van een dagbuffer en een aquifer in de winter met behulp van een warmtepomp weer gebruikt kan worden voor verwarming van de kas. Het verschil tussen beide concepten ligt in het startpunt voor de dimensionering van de warmte-onttrekkingscapaciteit. In de gesloten kas is de

koelcapaciteit gedimensioneerd op de wens de kas het hele jaar door gesloten te houden. In de minder geventileerde kas is gekozen voor een systeem met een minder zware investering bij een redelijke energiebesparing. Ook verschillen de beide onderzochte concepten in de toegepaste klimaatbeheersingsinstallaties en daarmee in de besturing van het kasklimaat.

Het praktijkexperiment met de gesloten kas bij PPO in Naaldwijk loopt tot eind oktober 2001. Voor de onderliggende rapportage levert dit experiment informatie over het energiegebruik in de beperkte periode maart -april 2001. Deze gegevens geven evenwel de mogelijkheid om de schattingen van het energiegebruik te valideren.

De experimenten bij het IMAG met diverse koelementen voor het concept van de minder geventileerde kas hebben experimentele informatie opgeleverd over koel en ontvochtigingscapaciteit onder praktijkomstandigheden.

Voor beide systemen zijn de jaarlijkse ontvochtigingskarakteristiek en de energiegebruiken met modelsimulaties bepaald.

1.2 Samenwerking

In een samenwerking tussen PPO (Naaldwijk), IMAG (Wageningen) en Ecofys (Utrecht) zijn de bedrijfskundige perspectieven nader uitgewerkt. Gedrieën is uitgebreid gediscussieerd over de te hanteren uitgangspunten. IMAG heeft voor beide concepten en de referentiesituatie de behoeft patronen berekend. Ecofys heeft de energiesystemen gedimensioneerd en doorgerekend. PPO heeft op basis van aangedragen informatie vanuit IMAG en Ecofys de bedrijfskundige analyse uitgevoerd, en voerde de projectleiding.

1.3 Doelstelling

Het doel van dit project is het beoordelen van de bedrijfskundige perspectieven van twee verschillende systeemontwerpen voor kassen waarin de warmte die bij koeling en ontvochtiging na opslag beschikbaar komt middels een warmtepomp tijdens warmtebehoefte in de kas wordt gebruikt. Deze beoordeling is gemaakt voor verschillende bedrijfstypen (teelten). De verschillende systeemontwerpen worden getypeerd met het minder geventileerde en het gesloten kassysteem.

De projectresultaten geven inzicht in de energetische, productietechnische en bedrijfseconomische aspecten van de twee concepten in verschillende omstandigheden.

1.4 Leeswijzer

Na deze inleiding worden in hoofdstuk 2 de uitgangspunten van de verschillende kassen, de systeemontwerpen en de rekenmethoden bepaald. In hoofdstuk 3 worden de resultaten van de energiebehoefte, de energievoorziening en de bedrijfskundige beoordeling getoond, waarna de afbreukrisico's in hoofdstuk 4 aan bod komen. Hierop volgt de discussie in hoofdstuk 5 en de conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 6.

2 Materiaal en methoden

In de evaluatie worden twee typen kassen bestudeerd namelijk de gesloten kas en de minder geventileerde kas. Het eerste systeem is een volledig gesloten kas die in de zomer door geforceerde ventilatie wordt gekoeld. Het tweede systeem is een natuurlijk geventileerde kas. In deze kas zijn echter ook koelbuizen aangebracht waarmee de kaslucht kan worden gekoeld en ontvochtigd. Om deze concepten op hun potenties te kunnen beoordelen worden beide systemen modelmatig uitgewerkt en doorgerekend. De berekeningen hebben betrekking op het energiegebruik (warmte en elektriciteit) en er wordt een indicatie van de fotosynthese gegeven. Bovendien wordt in dit project een bedrijfskundige beoordeling gegeven. Om zinvolle berekeningen te kunnen maken moeten de uitgangspunten over de te bestuderen systemen en de gehanteerde berekeningsmethode worden uitgewerkt en vastgelegd. Daarom worden in dit hoofdstuk eerst de gebruikte kastypen, verwarmings- en koelsystemen en de eigenschappen van de klimaatregeling beschreven. Ook wordt vastgelegd op welke wijze deze systemen tot energiegebruik leiden en hoe dit energiegebruik wordt vertaald naar primair energiegebruik. Tenslotte wordt uiteengezet op welke wijze de bedrijfskundige beoordeling tot stand komt.

2.1 Kastypen, gewassen en productiesystemen (casus)

De werking van de gesloten kas en de minder geventileerde kas wordt doorgerekend bij twee verschillende kasbedekkingsmaterialen. Het eerste bedekkingsmateriaal bestaat uit gehard en gelijmd glas dat voorzien is van een antireflectiecoating. Dit glas heeft een hoge lichtdoorlatendheid maar geen hoge warmteweerstand. Het tweede type kasdek bestaat uit een dubbel kunststof plaatmateriaal. Dit kasdek heeft een wat lagere lichttransmissie, maar een hoge warmteweerstand.

Met de twee keer twee varianten ontstaan er dus vier door te rekenen systemen. Deze zullen worden aangeduid met de GSe, GSd, (de gesloten kassen met een 'e' van enkel en een 'd' van dubbel), MVe en MVd (de minder geventileerde kassen).

2.1.1 Lichttransmissie

Een hoge lichttransmissie van kassen is een belangrijke eigenschap voor een hoge productie. Voor de vier systemen wordt in de volgende paragrafen de waarde voor de lichttransmissie door het dek en op plantniveau besproken. Daarbij wordt een onderscheid gemaakt in de transmissie van het kasdek en de lichttransmissie (of liever de obstructie) van de onderliggende constructie en installaties. Deze twee tezamen bepalen de lichtdoorlatendheid van de kas.

Ter vergelijking wordt eerst ingegaan op de lichttransmissie voor een 'standaard'kas, met enkel glas en met dubbelwandig kunststof dek.

Standaardkas

In de haalbaarheidsstudie van de Kas van de Toekomst [Bakker et al., 1998] is voor een 'standaard' 8,0 meter venlo-kas, vakmaat 4,5 meter zonder scherm met enkel glas een lichttransmissie van 74% op gewasniveau aangehouden. Uitgaande van een lichtonderschepping van 2% door een energiescherm, resulteert dit in 72% licht op gewasniveau in een kas met scherm.

De lichttransmissie door het dek is ca. 81%. De lichtonderschepping van de onder het glas gelegen constructiedelen (luchtmechaniek, poten) en uitrusting (gewasdraden, armaturen, verwarmingsbuizen, etc.) is ca. 7%.

Enkel glas dek met grote gelijmd en/of gehard glazen ruiten

Door voortgaande productontwikkeling van de bestaande enkelglas kassen, bijvoorbeeld ook door het harden en/of lijmen van het glas moet op plantniveau ca. 3% lichtwinst ten opzichte van de 8,0 meter Venlo-referentiekas te behalen zijn, verdeeld over 2% lichtwinst 'door het dek' en 1% verminderde lichtonderschepping door de constructieonderdelen onder het dek. Van de 4,5% lichtonderschepping door constructie onder het dek wordt ca. 2% veroorzaakt door de onderdelen van de luchting (extra gording, stangen en motoren) De lichttransmissie door installaties blijft 1,5% en de lichtonderschepping door een eventueel scherm pakket bedraagt 2,0%.

Dubbel kunststof dek

Het gebruik van kunststof kanaalplaten in de Nederlandse glastuinbouw is zeker niet geoptimaliseerd. De plaaieigenschappen zijn wel verbeterd, wat betreft lichtdoorlatendheid, slagvastheid, anticondensedrip, e.d. maar noch de plaatafmetingen, noch de kasconstructie zijn optimaal geïntegreerd voor Nederlandse kassen.

De kanaalplaat die tot nu toe wordt gebruikt in simulaties is gebaseerd op Plexiglas SDP 16 mm Alltop platen met een plaatbreedte van 980 mm op een 4,0 meter Venlo-kas [van de Braak, 1997]. Vanwege de grote mechanische en thermische vervormingen van dergelijke kunststofplaten dient de roedebreedte tweemaal zo breed als een glasroede te zijn, waardoor de lichtdoorlatendheid van de kas met dubbel kunststof dek, ondanks de goede lichttransmissie van 89% van de platen, toch slechts uitkomt op 69,7% op gewasniveau (inclusief installaties e.d.).

IMAG ontwikkelt in samenwerking met General Electric een verbeterde dubbelwandige kunststof plaat met een nog hogere lichtdoorlatendheid. Bij de Kas van de Toekomst wordt voor die plaat een geoptimaliseerde constructie ontwikkeld (Floridakas). Dat zou zeker 3% lichtwinst op gewasniveau ten opzichte van de huidige kas moeten opleveren.

Samenvatting lichttransmissie

In Tabel 1 worden de verschillende transmissiefactoren en de totale transmissie voor de vier kastypen weergegeven.

Tabel 1 - Diffuse lichttransmissie voor de referentiekas en de vier kasconcepten

Systeemconcept*	Referentie	gelijmd gehard enkel glas		dubbel kunststof dek (Floridakas)	
		MV	GS	MV	GS
Transmissie door het dek	81,0%	83,0%	83,0%	79,0%	79,0%
Onderschepping door luchting	2,0%	2,0%	nvt	2,0%	nvt
Onderschepping door overige constructie	3,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%
Onderschepping door installaties	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%
Onderschepping door scherm	2,0%	2,0%	2,0%		
Licht op gewasniveau (zonder scherminstallatie)	74,0%	77,0%	79,0%	73,0%	75,0%
Licht op gewasniveau (met scherminstallatie)	72%	75,0%	77%	nvt	nvt

* GS=gesloten systeem; MV=minder ventilatie

2.1.2 Gewassen

Er wordt uitgegaan van vijf intensieve gewassen.

Groentegewassen: tomaat en paprika

Snijbloemen: roos met belichting en chrysant zonder belichting.

Potplanten: Kalanchoë met belichte opkweek.

2.1.3 Productiesysteem en kasklimaat

Bij de klimaatinstellingen voor de gewassen paprika, tomaat, roos, chrysant en Kalanchoë worden de uitgangspunten voor de projecten 'Kas van de Toekomst' [Bakker et al., 1998] en 'Milieukundige en economische analyse van geïntegreerde teelt- en bedrijfssystemen' [Ruijs et al. 1999] gehanteerd. In deze paragraaf worden de algemene uitgangspunten voor de gewassen behandeld. De gewasspecifieke uitgangspunten staan in bijlage 1 vermeld.

Stooktemperatuur

De stooktemperatuur is de kastemperatuur die minimaal is aangehouden. Voor sommige gewassen wordt de stooktemperatuur proportioneel verhoogd (lichtverhoging) indien de globale straling ligt tussen de 100 en de 300 W/m². De gerealiseerde kastemperatuur kan hoger liggen door bijvoorbeeld een hoge buitentemperatuur of zonnig weer. Er wordt bovendien temperatuurintegratie toegepast.

Buistemperatuur

Er wordt bij geen van de gewassen uitgegaan van een minimum buis. Bij gewassen met gewasverwarming (chrysant) wordt wel een maximum buistemperatuur van 40 °C gehanteerd.

Luchtvochtigheid

In de berekeningen moet worden uitgegaan van een RV van maximaal 90%. Verder mag de vrucht- of stengeltemperatuur niet lager worden dan 1 °C boven de dauwpunttemperatuur. Gezien de mogelijke temperatuurverschillen in de kas van 1,5 °C wordt bij de berekeningen 1+1,5=2,5 °C boven de dauwpunttemperatuur als tolerantie aangehouden. Hierbij dient rekening te worden gehouden met vertraging in de verhoging van de vrucht- of stengeltemperatuur. Bij tomaat wordt de vruchttemperatuur iedere minuut bepaald met de volgende formule:

$$Vruchttemperatuur_{nieuw} = \frac{60 * Vruchttemperatuur_{oud} + Kastemperatuur}{61}$$

Voor paprika geldt:

$$Vruchttemperatuur_{nieuw} = \frac{15 * Vruchttemperatuur_{oud} + Kastemperatuur}{16}$$

Voor de andere gewassen geldt:

$$Planttemperatuur_{nieuw} = \frac{10 * Planttemperatuur_{oud} + Kastemperatuur}{11}$$

De luchtvochtigheid wordt in de minder geventileerde kas geregeld door zonodig de ramen te openen. De raamstandregeling gebeurt met een PI-regelaar, wat wil zeggen dat de ramen zover open gezet worden als nodig om de luchtvochtigheid onder de maximum waarde te houden. Indien nodig wordt naast het openen van de ramen ook het buisrailnet ingezet om het vocht af te voeren. Deze situatie treedt met name in vochtige herfst dagen op.

De maximum waarde voor de luchtvochtigheid is de hierboven genoemde 90% of zoveel lager als nodig om de dauwpunttemperatuur 1 graad boven de vrucht- of planttemperatuur te houden.

In de gesloten kas wordt de luchtvochtigheid geregeld door met de luchtbehandelingskast zoveel te ontvochtigen als nodig is.

Maximale temperatuur

De kasluchttemperatuur wordt naar boven toe in de hand gehouden middels koeling via de buisrailingen en ventileren (bij de minder geventileerde kas) of middels een luchtbehandelingssysteem (bij de gesloten kas). In beide situaties zorgt de klimaatregeling ervoor dat de kas niet warmer, maar ook niet kouder wordt dan in een standaardkas het geval is. In de standaardkas staat de ventilatielijn in principe één graad boven de stooklijn. Door het temperatuurintegratie-algoritme wordt de ventilatielijn echter met 2 °C verhoogd, zolang de etmaaltemperatuur niet meer dan 200 graden boven de gewenste etmaaltemperatuur uitkomt. Bij het invallen van de avond loopt de afbouw van de ventilatielijn een half uur achter op de afbouw van de stooklijn. De ramen worden in de referentiekas en de minder geventileerde kas voor iedere graad overschrijding van de ventilatielijn 10% geopend. Indien de zijdelingse luchting meer dan 60% geopend is (dus bij een kasluchttemperatuur van 6 °C boven de ventilatielijn), gaan de loefzijdige ramen meelopen.

CO₂-niveaus

CO₂-dosering vindt plaats bij globale stralingsintensiteit (inclusief eventuele assimilatiebelichting) vanaf 10 W/m². De streefwaarde voor CO₂ wordt hoog gekozen (1200 ppm). Bij de minder geventileerde kassen zal deze streefwaarde bij de beperkte doseercapaciteit lang niet altijd gehaald kunnen worden. Dit betekent dat de gerealiseerde concentratie, met name op warme dagen tussen de 500 en 600 ppm zal uitkomen.

Schermb

Bij paprika, chrysant, Kalanchoë en roos is het scherm gesloten indien de buitentemperatuur beneden een gewas- en periode-afhankelijk ingestelde waarde is.

Assimilatiebelichting

Alleen de gewassen roos en Kalanchoë hebben assimilatiebelichting. De assimilatiebelichting brandt als de globale straling onder een bepaalde waarde komt. Tussen 20:00 en 24:00 is de assimilatiebelichting geblokkeerd.

2.2 Systeemontwerpen

De systeemontwerpen, zowel qua hardware als qua software, zijn voor beide kastypen zeer verschillend. Daarom worden deze in twee aparte paragrafen uitgewerkt. De energievoorziening bestaat voor beide systemen uit dezelfde componenten, deze worden in paragraaf 2.4 besproken. De dimensionering van de energievoorzieningssystemen is echter wel anders door de andere ontvochtigings- en verwarmingskarakteristieken.

2.2.1 Gesloten kas

Het kasklimaat wordt in de gesloten kas geregeld met de volgende componenten:

1. Verwarmingsbuizen
2. Luchtbehandelingskast
3. Warmtepomp aangedreven via gasmotor met generator
4. Korte-termijn warmteopslag
5. Lange-termijn warmteopslag (aquifer)
6. Gasketel

In deze paragraaf wordt het systeemontwerp behandeld van de gesloten kas, volgens het concept van Ecofys. Warmte en koude wordt in de kas door lucht gedistribueerd. Een luchtbehandelingskast zorgt voor de circulatie van gekoelde, verwarmde of ontvochtigde lucht. Luchtbehandeling vindt plaats via warmtewisselaars die aan de kopse kant van de kas staan opgesteld.

Koelen en ontvochtigen

Wanneer de kaslucht door de luchtbehandelingskast wordt ontvochtigd wordt de lucht tegelijkertijd gekoeld. Dit komt doordat de ontvochtiging is gebaseerd op condensatie aan een koud oppervlak. Condensatie treedt op wanneer de oppervlaktetemperatuur van een koelelement lager is dan die van de dauwpunttemperatuur van de langsstromende lucht. Door de condensatie wordt er behalve voelbare warmte ook latente warmte aan de langsstromende lucht onttrokken.

In de berekeningen wordt rekening gehouden met de op ieder moment geldende RV zodat de verhouding tussen voelbare en latente warmte-onttrekking als gevolg van de dan geldende luchtcondities wordt meegenomen. Dit betekent dat onder vochtige kasluchtcondities relatief meer latente warmte wordt onttrokken dan onder droge kasluchtcondities.

Verwarmen

In de gesloten kas kan worden verwarmd met het standaard buisrailsysteem, maar ook met het luchtverdeelsysteem. Het luchtverdeelsysteem kan door het grote verwarmend oppervlak in de luchtbehandelingskasten zeer grote vermogens afgeven bij lage temperatuurverschillen. Voor de COP van de warmtepomp is het dus aantrekkelijk te verwarmen via de luchtbehandelingskasten. De circulatie van de lucht vereist echter een hoeveelheid elektrisch vermogen. Als het elektrisch verbruik van de luchtcirculatieventilatoren opgeteld wordt bij het asvermogen van de warmtepomp dan neemt de effectieve COP af. Aangezien de luchtcirculatieventilatoren een duidelijk minimumvermogen hebben is uitgerekend dat tot een bepaald verwarmingsvermogen de kleinere COP waarmee warmte via het buisrailnet kan worden geleverd niet toch nog groter is dan de overall COP van verwarming met behulp van de luchtbehandelingskasten. Er is voor de situatie met de grootste COP gekozen.

Op basis van het ventilatordiagram, de ontwerpcondities van de luchtbehandelingskast en een meting van de ontvochtiging in het praktijkexperiment is de hulpenergie die nodig is voor koelen en ontvochtigen berekend.

2.2.2 Minder geventileerde kas

De installatie die voor het gewenste klimaat moet zorgen in de kas met minder ventilatie bestaat uit de volgende componenten:

1. diverse verwarmingsbuizen
2. warmtepomp aangedreven via gasmotor met generator
3. korte termijn warmteopslag
4. lange termijn warmte- en koudeopslag (doublet)
5. gasketel
6. koelelementen (= verwarmingsbuizen)

Koelen en ontvochtigen

De koelelementen worden gevormd door een dubbel buisrailsysteem met een buisdiameter van \varnothing 51mm. Hiertoe wordt naast het bestaande gebruikelijke buisrailsysteem dat al voor de verwarming aanwezig is, wordt een tweede identiek net geïnstalleerd. Beide netten kunnen nu worden ingezet voor zowel afvoer als voor toevoer van warmte. Wanneer de capaciteit van deze koude put en koelelementen tekortschiet om de kasluchttemperatuur onder het ventilatiesetpoint te houden, wat in zomerse situaties al snel zal voorkomen, dan worden de ramen geopend om met behulp van natuurlijke ventilatie extra koeling te realiseren. De optredende kasluchttemperatuur wordt in dat geval op hetzelfde niveau gehouden als bij een kas met alleen natuurlijke ventilatie.

In de perioden dat er warmtevraag is, maar dat de luchtvochtigheid hoger wordt dan de ingestelde maximumwaarde, moet er waterdamp worden afgevoerd. In de huidige kassen vindt dit plaats middels het openen van ramen. In dat geval wordt er echter ook voelbare warmte afgevoerd. Aanvankelijk werd gedacht dat door een warmtepomp aangedreven actief ontvochtigingssysteem te gaan gebruiken deze voelbare in

het kassysteem kon worden gehouden. Parallele experimenten en analyses hebben het IMAG echter doen concluderen dat in de praktijk een actief ontvochtigingssysteem dermate veel meer voelbare warmte aan de kaslucht onttrekt dan het ventileren met buitenlucht dat er hogere energiebesparingen kunnen worden behaald door een koelend oppervlak niet te gebruiken voor ontvochtiging tijdens stoken, maar uitsluitend in perioden met een warmte-overschot. Daarom is er voor de minder geventileerde kas gekozen voor vochtbeheersing middels het openen van ramen.

Verwarmen

In de minder geventileerde kas wordt verwarmd met het (dubbele) buisrailnet. De warmte wordt geleverd door de warmtepomp en indien deze onvoldoende vermogen levert vult de ketel aan.

2.3 Uitgangspunten behoeftepatronen

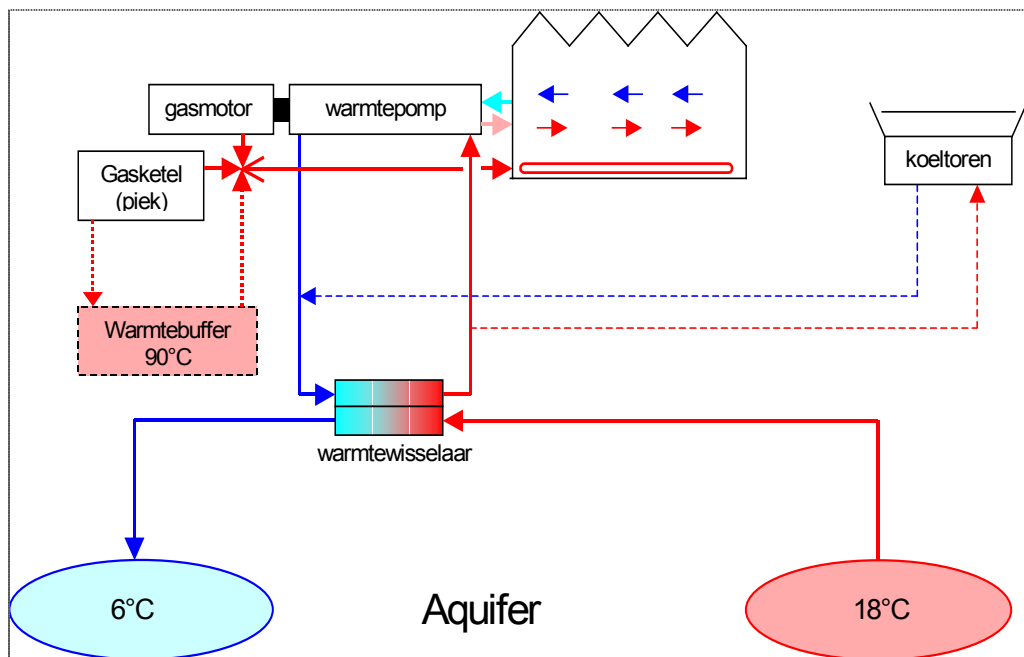
De behoeftepatronen aan warmte, elektriciteit en CO₂ zijn een gevolg van de teelt van de verschillende gewassen in elk van de kassystemen. De eisen die de gewassen aan het binnenklimaat stellen worden via de klimaatcomputer ingesteld. Voor de 5 gebruikte teelten zijn de klimaatcomputer-instellingen vastgelegd in paragraaf 2.1.3 en bijlage 1.

De kassen worden gekoeld indien de kasluchttemperatuur boven het dan geldende ventilatiesetpoint komt. Bij voldoende koelvermogen zou de temperatuur in de kas precies op dat setpoint gehouden kunnen worden. Binnen dit project is echter aangenomen dat het aanhouden van de temperaturen die in standaardkassen bij maximaal geopende ramen worden gerealiseerd in de praktijk geen onacceptabele schade oplevert en dat deze temperaturen daarom aangehouden kunnen worden. Qua berekening betekent dit dat voor elk gewas eerst een standaardsituatie wordt doorgerekend en dat de daarbij optredende kasluchttemperaturen als uitgangspunt voor de koeling worden aangehouden. In de berekening wordt rekening gehouden met het feit dat er bij koeling meestal ook ontvochtiging optreedt.

Van de behoeftepatronen zijn de daggemiddelden en de uurwaarden van de zomermaanden als input voor de energievoorzieningsberekeningen gebruikt.

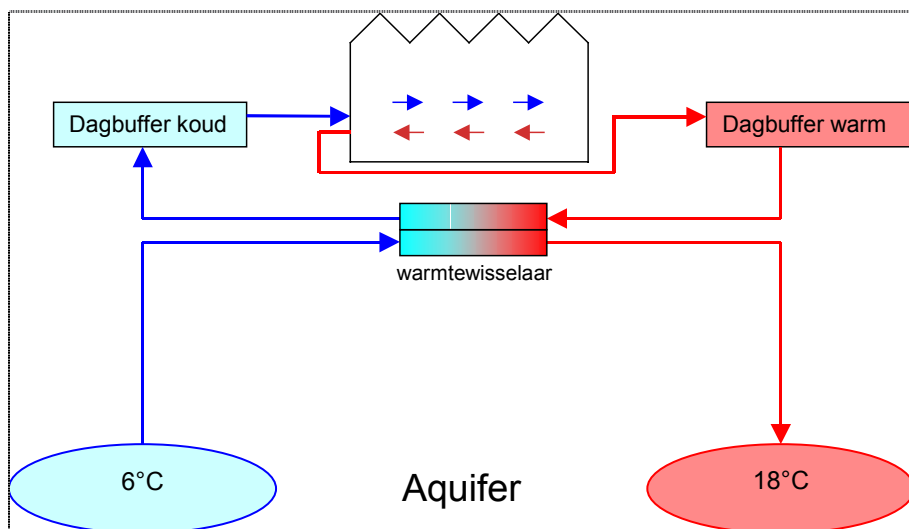
2.4 Uitgangspunten energievoorziening

De energievoorziening bestaat in beide concepten uit een gasmotor aangedreven compressie warmtepomp gecombineerd met een gasketel voor verwarming. Een aquifer fungeert als bron voor de warmtepomp. Tevens zijn er twee lage-temperatuur-buffers voor de korte termijn warmte- en koude-opslag. Dit om de piek van de ontvochtigings- of koelbehoefte niet meteen naar de aquifer te hoeven afvoeren, maar dit over een etmaal uit te kunnen smeren. Hierdoor kan het vermogen van de aquifer kleiner gedimensioneerd worden. Er is een hoge-temperatuur-buffer om CO₂ te kunnen doseren wanneer dit gewenst is terwijl er geen warmtevraag is. In Figuur 1 staan de energiestromen aangegeven bij verwarmen.



Figuur 1- Schema van energiestromen tijdens het verwarmen. Een koeltoren wordt alleen in de gesloten kas ingezet. Ter vereenvoudiging zijn de korte termijn buffers weggelaten.

Koelen en ontvochtigen gebeurt met koud water uit de koude buffer (dagbuffer of aquifer). In de gesloten kas wordt alle onttrokken warmte na ontvochtiging en koeling van de kas naar de aquifer afgevoerd. In de minder geventileerde kas wordt indien er geen koelbehoefte is zonodig vocht afgevoerd via de ramen. Is er wel koelbehoefte dan worden warmte en vocht afgevoerd via de gekoelde buizen. Zodra de koelbehoefte hoger wordt dan de capaciteit van de koelbuizen, zorgt het openen van de ramen voor de afvoer van rest van de overtollige warmte. De aquifer en de dagbuffers kunnen in dit geval kleiner gedimensioneerd worden. In Figuur 2 staan de energiestromen tijdens koelen en ontvochtigen.



Figuur 2- Schema van energiestromen tijdens het koelen en ontvochtigen.

De exacte dimensionering van de installatie voor de energievoorziening hangt verder af van het concept en zal in de volgende paragrafen per onderdeel worden aangegeven. Daarna worden de keuzes die voor de regelstrategie gemaakt zijn aangegeven.

2.4.1 Warmtepomp

De warmtepomp die onderzocht wordt is een elektrische compressorwarmtepomp aangedreven door elektriciteit afkomstig van een gasmotor. Van de opbrengstfactor van de warmtepomp wordt aangenomen dat deze een bepaald percentage van het carnotrendement bedraagt. Dit betekent dat de COP wordt uitgerekend aan de hand van

$$\text{COP} = \text{percentage} * \frac{T_{\text{condensor}}}{T_{\text{condensor}} - T_{\text{verdampner}}}$$

Waarin $T_{\text{condensor}}$ de absolute temperatuur [K] is van het warme deel van de warmtepomp (2 K boven de temperatuur waarop het water ten behoeve van de verwarming moet worden gebracht) en $T_{\text{verdampner}}$ de absolute temperatuur [K] van het koude deel van de warmtepomp is (2 K onder de temperatuur waarnaar de warmtebron van de warmtepomp moet worden afgekoeld).

Bij de bepaling van het percentage van het carnotrendement is voor de gesloten kas uitgegaan van 49%, de waarde die bepaald is uit de experimentele gegevens van het praktijkexperiment. Voor het minder geventileerde kassysteem is uitgegaan van gemiddelde gegevens van commerciële warmtepompen die op 50% uitkomen.

De bron van de warmtepomp is in het gesloten kassysteem of de warme dagbuffer of de aquifer. Als er warmte aan de dagbuffer onttrokken wordt zal de warmtepomp deze tot 6°C afkoelen en tot 4°C wanneer de warmte aan de aquifer onttrokken wordt. De COP van de warmtepomp is dus in het ene geval lager dan in het andere geval.

In het minder geventileerde kassysteem is er voor de dimensionering van de warmtepomp voor gekozen dat deze op jaarbasis niet meer warmte aan de aquifer mag onttrekken dan er in de zomer met het koelsysteem wordt ingestopt.

2.4.2 Gasmotor

De gasmotor die wordt gebruikt voor de aandrijving van de warmtepomp heeft een asrendement van 35% op onderwaarde. Het grootste deel (55% op onderwaarde) van de gebruikte primaire energie komt vrij in de vorm van hoge temperatuur (80°C) restwarmte. In de gesloten kas wordt dit gebruikt om de kas te verwarmen. Doordat tijdens gebruik van de gasmotor de warmtepomp warmte levert bij 35 tot 45°C kan de waterdamp in de rookgassen condenseren en warmte afstaan aan de kas. In de minder geventileerde kas kan de condensatiewarmte worden gebruikt om warmte te leveren aan de aquifer (regeneratie van de aquifer). Dit laatste is alleen mogelijk als de aquifer wordt gebruikt als koeling van de kas via het buisrailnet. Indien er geen koeling plaatsvindt zal de condensatie warmte aan de kas worden geleverd, net zoals bij de gesloten kas.

2.4.3 Gasketel

In de gesloten kas wordt de gasketel alleen ingezet om de piek warmtevraag te dekken. In de gesloten kas is hierbij gekozen voor een dekkingsgraad van de jaarlijkse warmtevraag van 10%.

2.5 Uitgangspunten bedrijfskundige beoordeling

De bedrijfskundige beoordeling zal zich richten op de bedrijfseconomische aspecten, de arbeidskundige aspecten en de analyse van de afbreukrisico's.

De twee systeemontwerpen worden per pilotgewas vergeleken met een referentiesituatie (zie bijlage 2). Bij de bedrijfseconomische beoordeling wordt inzicht gegeven in het niveau van de opbrengsten, investeringen en kosten en worden economische kentallen bepaald.

De kentallen betreffen de terugverdientijd en het netto bedrijfsresultaat.

Voor de referentiesituatie wordt uitgegaan van de beschreven situaties 2000 uit de studies van Ruijs e.a. [Ruijs et al., 2000] en Bakker e.a. [Bakker et al., 1998] t.a.v. het teeltsysteem, arbeidsmethode, e.d.

Op basis van de beschrijvingen van de systeemontwerpen worden de uitgangspunten t.b.v. de bedrijfseconomische beoordeling vastgesteld. Daarnaast leveren de resultaten uit de berekeningen van de vraagpatronen en de energievoorziening input voor de beoordeling. De zaken die dit betreft zijn onder meer:

- Energiegebruik (vaste prijs onafhankelijk van capaciteitsbehoefte f 0,40 per m³ gas en f 0.15 per kWh elektriciteit).
- Additionele kosten van CO₂-dosering
- Additioneel leidingwaterverbruik en kosten
- Productieresultaten en opbrengsten (gemiddelde veilingprijzen per periode)
- Investeringen, afschrijving, onderhoud
- Rentevoet.

In de arbeidskundige beoordeling wordt behalve het kwantitatieve aspect (arbeidsbehoefte) ook rekening gehouden met de arbeidsomstandigheden. Belangrijke aspecten zijn:

- Klimaat (temperatuur en luchtvochtigheid)
- Geluidsniveau
- Aanwezigheid van obstakels.

In de studie worden ook de afbreukrisico's van de systeemontwerpen in kaart gebracht. Met afbreukrisico's of ook wel kritische factoren wordt bedoeld op:

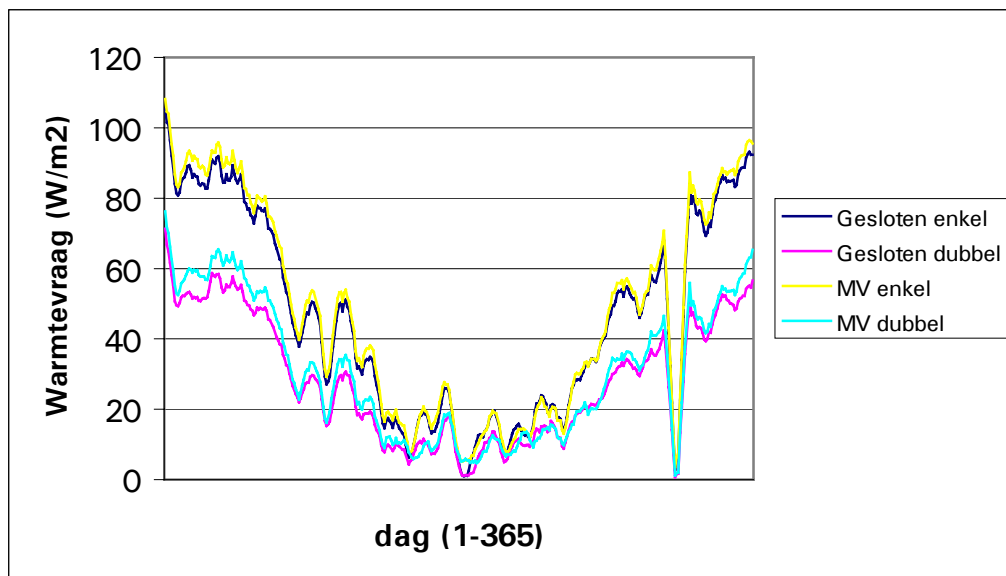
- technische risico's: wat zijn de kritische punten in het technisch ontwerp en hoe groot wordt de kans op risico (storing, etc.) ingeschat;
- teeltkundige risico's: aan welke potentiële gevaren wordt het gewas blootgesteld inherent aan het systeemontwerp en hoe groot is de kans daarop;
- juridische aangelegenheden: welke wet- en regelgeving is relevant (i.v.m. vergunningverlening) en welke aansprakelijkheden zijn potentieel in het geding.

3 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten gegeven van de berekende behoeftepatronen, primaire energiegebruiken en de bedrijfseconomische beoordeling. Voor de uitgangspunten van de gehanteerde rendementen en investeringskosten wordt verwezen naar bijlage 3.

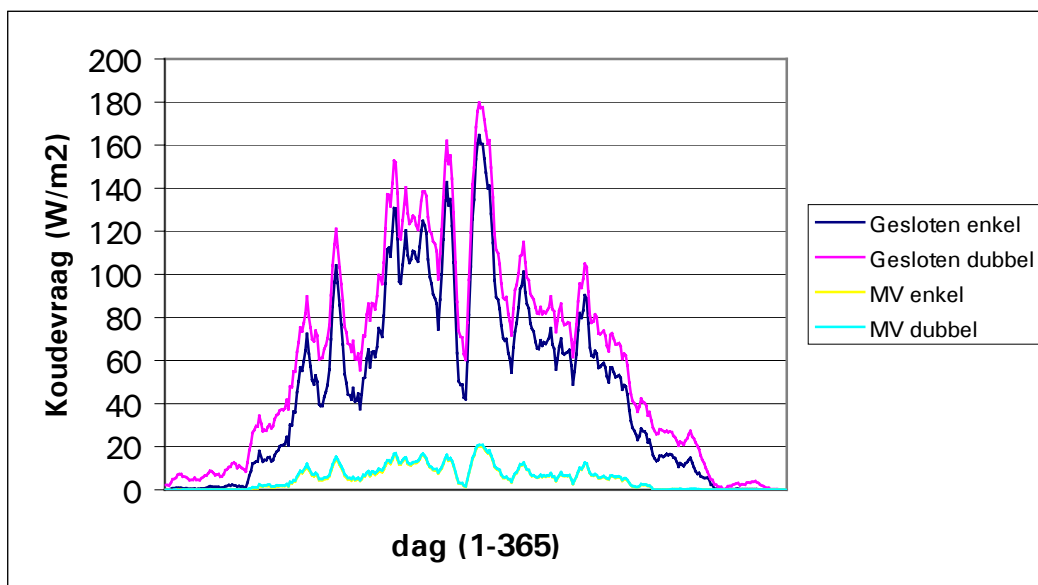
3.1 Behoeft Patronen warmte, koude en CO₂

De behoeftepatronen voor warmte, koude en CO₂ verschillen voor de verschillende kasdekken en concepten. In deze paragraaf wordt voor het gewas tomaat deze verschillen aangegeven.



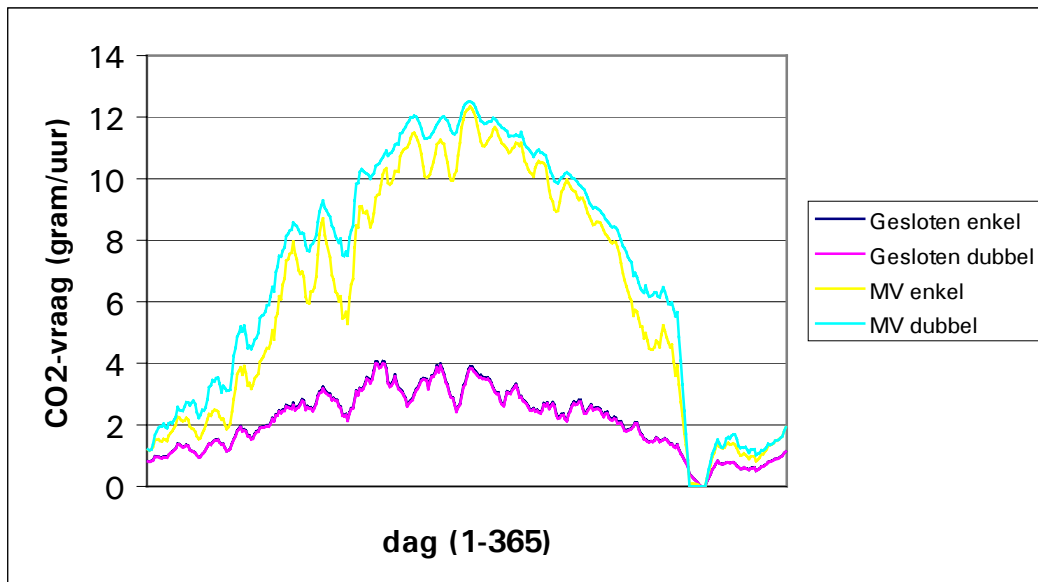
Figuur 3 - Warmtevraagpatroon over een jaar bij tomaat

De warmtevraag is bij een dubbel dek over het hele jaar, maar vooral in de herfst en winter lager dan bij een enkel dek. Dit komt door de hoge isolatiewaarde. Hoewel ontvochtiging aan een koud oppervlak meer voelbare warmte kost dan ontvochtiging middels natuurlijke ventilatie is de warmtevraag van de gesloten kas toch wat lager dan die van de minimaal geventileerde kas. Dit komt doordat het effect van de beperking van het lekverlies (doordat er geen lekkende raammechanieken zijn) groter is dan de toename van het voelbare warmte-onttrekking. De warmtevraag van de referentiekas is vergelijkbaar met de warmtevraag van MV enkel.



Figuur 4 - Behoeftte aan koeling en ontvochtiging bij tomaat

De koeling en ontvochtiging (koudevraag) is voor de gesloten kas vanzelfsprekend veel hoger dan voor de minder geventileerde kas. In de gesloten kas moet immers het volledige warmte-overschot worden onttrokken. Vanwege de hoge isolatie van de dubbeldekskas is de behoefte aan koeling daar nog iets hoger. De koudevraag van de referentiekas is gelijk aan nul.



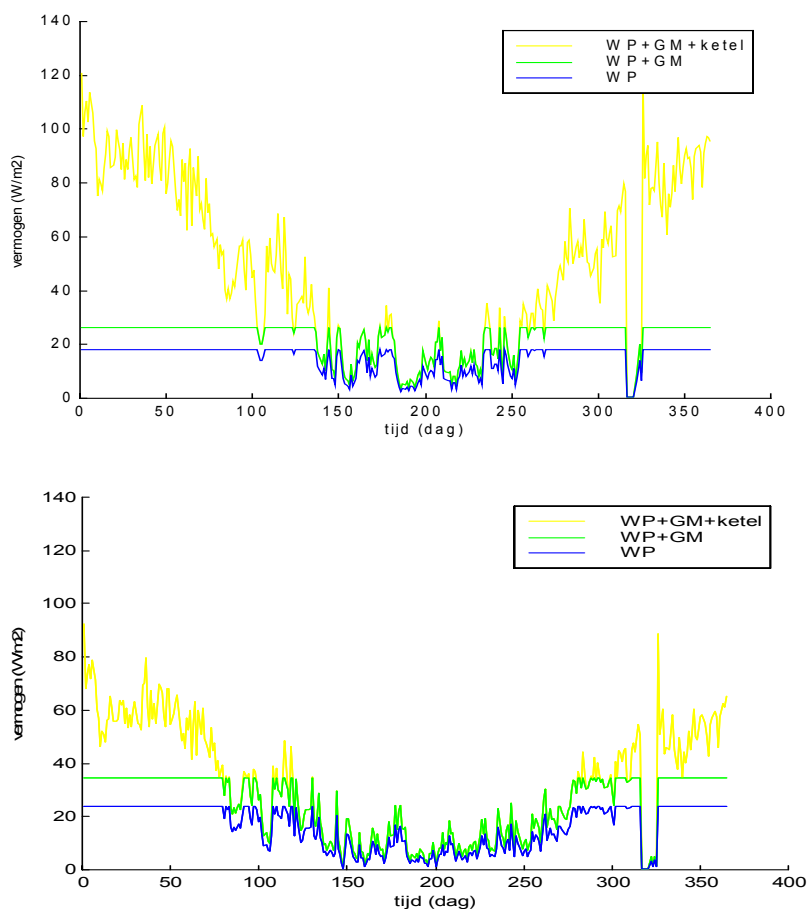
Figuur 5 - CO₂-vraagpatroon over een jaar bij tomaat

De CO₂-behoefte van de gesloten kas benadert de vastlegging aan CO₂ door fotosynthese. Het CO₂-verlies door ventilatie is bij de minder geventileerde kas nog altijd aanzienlijk. De CO₂-vraag van de referentiekas is niet opgenomen in Figuur 5. Deze zal in ieder geval hoger liggen dan die van "MV enkel".

3.2 Energievoorziening en primair brandstofverbruik

3.2.1 Minder geventileerde kas

Het minder geventileerde kassysteem heeft een energievoorziening bestaande uit een elektrische warmtepomp, aangedreven door een gasmotor en een gasketel. De bron voor de warmtepomp is een aquifer die geregenereerd wordt met warmte uit de kas. De warmte wordt via water in het buisrailnet uit de kas gehaald. De gasmotor/warmtepomp combinatie is gedimensioneerd op de beschikbaarheid van warmte in de aquifer. Warmte uit de kas (latente en voelbare) wordt eerst in de dagbuffer opgeslagen en daarna afgevoerd naar de aquifer. De grootte van dagbuffer en de aquifer wordt bepaald door de hoeveelheid warmte die maximaal in een etmaal afgevoerd moet worden uit de kas.



Figuur 6- Inzet van warmtepomp (WP), gasmotor (GM) en gasketel voor de warmtevoorziening van enkel- (boven) en dubbeldekskas (onder) bij tomatenteelt.

De inzet van warmtepomp, gasmotor en ketel over een jaar staat hierboven grafisch weergegeven voor tomatenteelt in een kas met een enkel (boven) en dubbel (onder) dek. Zoals te zien kan er bij een dubbeldeks kas een grotere warmtepomp ingezet worden, waardoor het aandeel van de ketel in de warmtedekking lager is. Dit komt omdat er bij een dubbel dek meer warmte geogst kan worden met het buizensysteem voor de regeneratie van de aquifer. Hierdoor mag de warmtepomp meer warmte aan de aquifer onttrekken op jaarbasis.

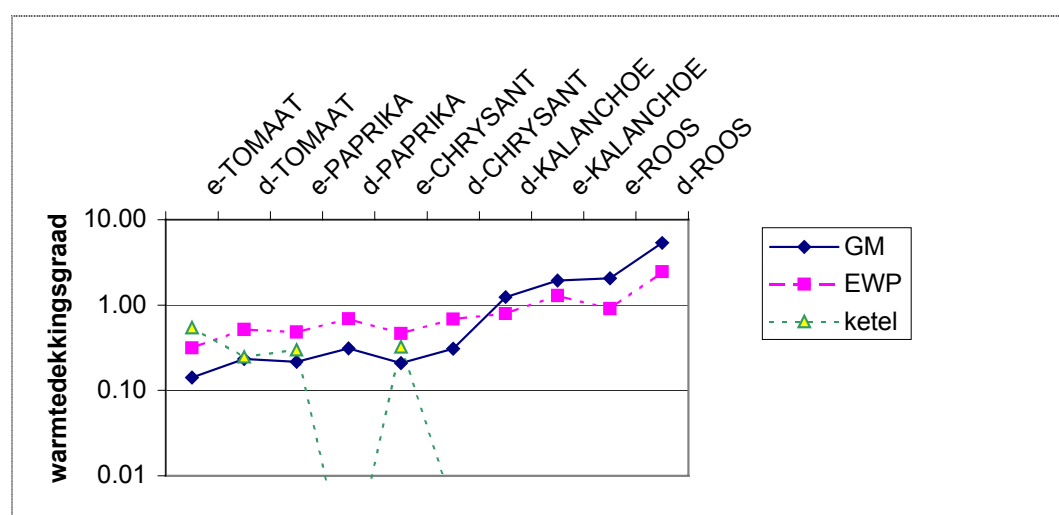
In Tabel 2 staan de resultaten van de dimensionering voor alle teelten aangegeven. Zoals te verwachten uit bovengenoemde resultaten bij tomatenteelt, is de warmtepomp bij een dubbeldekskas voor elke teelt groter dan bij een enkeldeks kas. In Figuur 7 is met een logaritmische schaal aangegeven wat de warmtedekkingsgraad op jaarbasis van de verschillende installatiecomponenten per teelt en kasdek is.

Hierin is te zien dat voor de belichte teelten (Kalanchoë en roos) de gasmotor al in de volledige warmtebehoefte voorziet (warmtebedekkingsgraad >1). Bij de dubbeldeksteelten van chrysant en paprika leveren de gasmotor en de warmtepomp samen voldoende warmte om de ketel niet meer te hoeven gebruiken.

Zoals verder te zien is in Tabel 2 is de energiebesparing ten opzichte van de referentiesituatie (gasketel voor onbelichte teelt en gasmotor voor belichte teelten) 21-30% voor onbelichte teelten bij een enkel dek en circa 58% voor een dubbel dek. Bij belichte teelten is er geen energiebesparing. Het energiegebruik per eenheid product bij enkel dek onbelichte teelt is 28-45% lager dan de referentiesituatie. Voor een dubbeldeks kas onbelichte teelt is het energiegebruik per eenheid product tussen de 60 en 68% lager. Voor belichte teelten is er geen afname van het energiegebruik per eenheid product, de productiestijging is te klein om door de toename van het energiegebruik te worden gecompenseerd.

Tabel 2- Vermogens en verbruik per m2 per gewas en per kasdek voor de minder geventileerde kas.

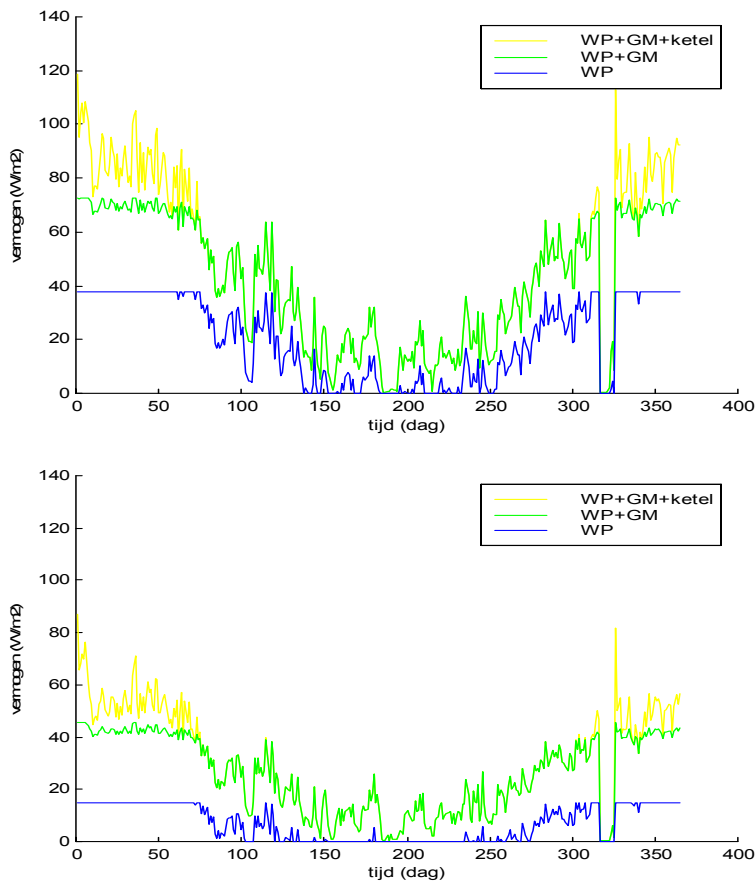
minder geventileerde kas		TOMAAT		PAPRIKA		CHRYSANT		KALANCHOE		ROOS	
		enkel	dubbel	enkel	dubbel	enkel	dubbel	enkel	dubbel	enkel	dubbel
gasverbruik	m3/jr	41.2	21.6	25.3	14.6	22.3	12.1	62.1	63.2	115.6	117.1
elektriciteitsverbruik	kWh/jr	17.4	13.3	14.4	12.4	13.0	10.9	0.0	0.0	0.0	0.0
zuiver CO2 nodig	kg/jr	29.8	41.7	27.3	38.8	25.6	30.1	3.9	5.1	6.6	7.9
primaire energie tov referentie	%	-21.3	-57.2	-29.8	-57.5	-28.1	-58.7	15.6	17.8	15.4	15.3
energie-efficiency tov referentie	%	-28.0	-59.8	-36.2	-60.3	-45.0	-68.2	5.9	11.7	13.3	14.8



Figuur 7- Warmtebedekkingsgraad op jaarbasis van warmtepomp (EWP), gasmotor (GM) en ketel voor verschillende teelten in de minder geventileerde kas met enkel (e) en dubbel (d) kasdek

3.2.2 Gesloten kas

Het gesloten kassysteem heeft een energievoorziening bestaande uit een elektrische warmtepomp, aangedreven door een gasmotor en een gasketel. De bron voor de warmtepomp is een aquifer die geregenereerd wordt met warmte uit de kas. Deze warmte wordt met behulp van luchtbehandelingskasten uit de kas gehaald, waardoor deze gekoeld en ontvochtigd wordt.



Figuur 8- Inzet van warmtepomp (WP), gasmotor (GM) en gasketel voor de warmtevoorziening van enkel- (boven) en dubbeldeks kas (onder) bij tomatenteelt.

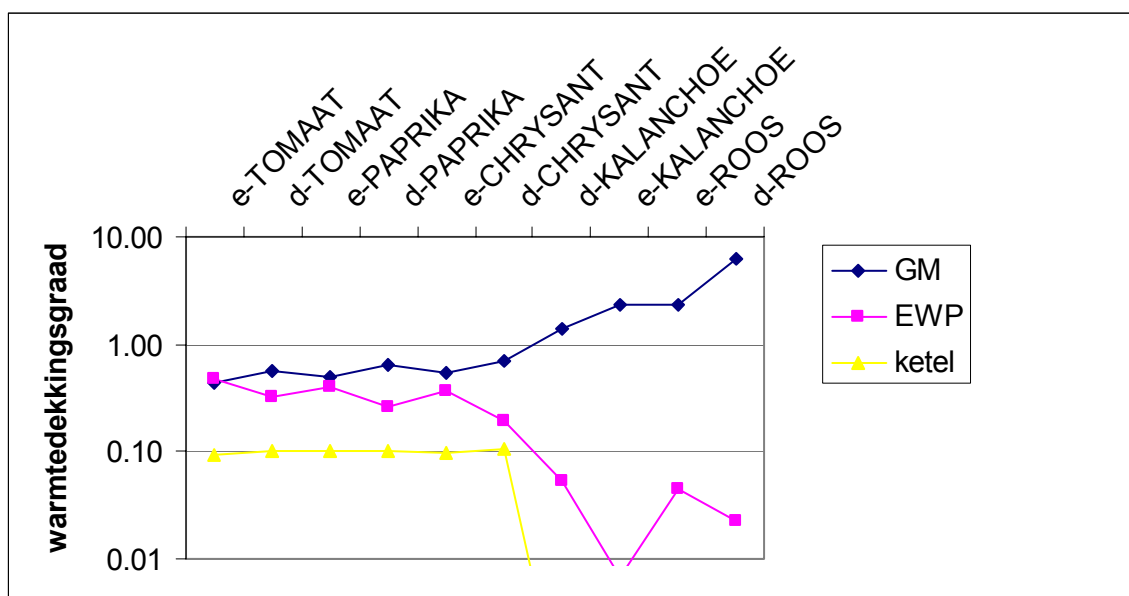
De inzet van warmtepomp, gasmotor en ketel over een jaar staat hierboven grafisch weergegeven voor tomatenteelt in een kas met een enkel (boven) en dubbel (onder) dek. Zoals te zien is wordt er bij dit concept in een dubbeldeks kas een kleinere warmtepomp ingezet dan bij de enkeldeks kas. Dit komt omdat er in dit concept, om de investeringskosten te drukken, voor gekozen is het aandeel van de ketel in de warmtedekking gelijk te houden (~10%).

In Tabel 3 staan de resultaten van de dimensionering voor alle teelten aangegeven. Zoals te verwachten uit bovengenoemde resultaten bij tomatenteelt is de warmtepomp bij een dubbeldekskas voor elke teelt kleiner dan bij een enkeldeks kas. In Figuur 9 is aangegeven wat de warmtedekkingsgraad op jaarbasis van de verschillende installatiecomponenten per teelt en kasdek is. Hierin is te zien dat voor de belichte teelten (Kalanchoë en roos) de gasmotor al in de volledige warmtebehoefte voorziet (warmtedekkingsgraad >1). De energiebesparing ten opzichte van de referentiesituatie (gasketel voor onbelichte teelt en gasmotor voor belichte teelten) is 24-35% voor onbelichte teelten bij enkel dek en 32-48% voor dubbel dek. Bij belichte teelten is er geen energiebesparing.

Het energiegebruik per eenheid product is 36% tot 45% lager ten opzichte van de referentiesituatie voor onbelichte teelten in enkeldeks kassen. In dubbeldeks kassen is het bij elke onbelichte teelt 41 tot 53% lager dan de referentie. Bij Kalanchoë en roos is er door de productiestijging een verlaging van het energiegebruik per eenheid product van 7-8% (enkeldeks kas) respectievelijk 1-4% (dubbeldeks kas) ondanks het groter primair energiegebruik.

Tabel 3 - Vermogens en verbruik per m2 per gewas en per kasdek voor de gesloten kas.

gesloten kas		TOMAAT		PAPRIKA		CHRYSANT		KALANCHOE		ROOS	
		enkel	dubbel	enkel	dubbel	enkel	dubbel	enkel	dubbel	enkel	dubbel
gasverbruik	m3/jr	37.4	30.0	30.1	27.6	28.7	25.8	60.0	62.3	105.6	110.6
elektriciteitsverbruik	kWh/jr	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
zuiver CO2 nodig	kg/jr	1.4	2.5	0.6	1.3	3.6	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0
primaire energie tov referentie	%	-34.5	-47.5	-25.5	-31.8	-24.2	-31.9	11.7	16.0	4.0	8.9
energie-efficiency tov referentie	%	-44.7	-52.6	-36.3	-41.1	-37.1	-43.0	-8.8	-4.4	-6.5	-1.2



Figuur 9 - Warmte dekingsgraad op jaarbasis van warmtepomp (EWP), gasmotor (GM) en ketel voor verschillende teelten in de gesloten kas met enkel (e) en dubbel (d) kasdek.

3.3 Bedrijfskundige beoordeling systeemontwerp

In deze paragraaf worden de bedrijfseconomische kengetallen en de gevoeligheidsanalyse behandeld. Arbeidskundige en juridische aspecten worden behandeld in paragrafen 4.4.1 en 4.4.2.

3.3.1 Bedrijfseconomische kengetallen

De bedrijfseconomische kengetallen van het systeemontwerp van de minder geventileerde kas worden vergeleken met die van de gesloten kas voor de vijf gewassen in bijlage 4. Uit de kengetallen is per gewas, per kastype en per systeemontwerp de terugverdientijd bepaald door het investeringsbedrag te delen door het jaarlijkse saldo van meeropbrengsten minus meerkosten. Bij deze meerkosten zijn de kosten voor rente en onderhoud niet meegeteld. De terugverdientijden zijn vermeld in Tabel 4. Indien er geen aantal jaren is vermeld betekent dit dat het saldo van meeropbrengsten minus de meerkosten negatief is.

Tabel 4 - Terugverdientijd van de verschillende concepten in jaren

	<i>Dubbeldeks</i>		<i>Enkeldeks</i>	
	Gesloten	Min. vent.	Gesloten	Min. vent.
Tomaat	7	16	7	10
Paprika	10	-	8	8
Chrysant	45	-	21	-
Roos	35	-	16	-
Kalanchoë	-	-	39	28

Uit deze resultaten blijkt, dat ontvochtiging met de gesloten kas eerder wordt terugverdiend dan met de minder geventileerde kas. Dit is met name toe te schrijven aan de hogere productie die in een gesloten kas wordt behaald. De terugverdientijd is bij enkeldekskassen korter dan bij dubbeldekskassen. Bij een gewas als chrysant, waarbij een extra productie gepaard gaat met een lage productprijs in de zomer en relatief hoge productiekosten is ontvochtiging minder snel rendabel. Ook door het gebruik van een goed isolerend scherm is de te behalen energiebesparing bij chrysant minder groot. De belichte gewassen roos en Kalanchoë zijn in een eilandbedrijf niet geschikt voor ontvochtiging en warmte-oogst, omdat de geogste warmte niet voldoende kan worden teruggeleverd. Wel zouden de perspectieven voor een geclusterde situatie kunnen worden onderzocht.

De laagste terugverdientijden zijn te vinden bij de vruchtgroentegewassen tomaat en paprika.

In Tabel 5 is berekend hoe het netto bedrijfsresultaat verandert ten opzichte van de referentieteelten. Hierbij is uitgegaan van jaarkosten van 15% van de investering voor ontvochtiging (dus neutraal bij een terugverdientijd van 6,7 jaar) en komt alleen de tomaat in de gesloten enkeldekskas met een terugverdientijd van bijna 7 jaar niet negatief uit.

Tabel 5 - Netto bedrijfsresultaat ten opzichte van de referentieteelten in f/m².jaar

	<i>Dubbel dek</i>		<i>Enkel dek</i>	
	Gesloten	Min. Vent.	Gesloten	Min. Vent.
Tomaat	-2	-3	0	-1
Paprika	-6	-8	-3	-1
Chrysant	-16	-11	-13	-8
Roos	-24	-24	-17	-16
Kalanchoë	-25	-12	-20	-8

De verandering van het netto bedrijfsresultaat is het minst negatief bij de vruchtgroentegewassen. Bij de belichte gewassen en ook bij chrysant is de extra productie en de energiebesparing blijkbaar te laag om de extra kosten te compenseren.

3.3.2 Gevoeligheidsanalyse economische kengetallen

De terugverdiertijden uit Tabel 4 veranderen als de gas-, elektriciteits- en CO₂-prijs veranderen. In onderstaande tabellen is de invloed van deze factoren op de terugverdiertijd weergegeven.

Tabel 6 - Terugverdiertijd in jaren bij een gasprijs van f 0,50 i.p.v. f0,40 per m³

	<i>Dubbeldeks</i>		<i>Enkeldeks</i>	
	Gesloten	Min. vent	Gesloten	Min. vent
Tomaat	6	6	6	6
Paprika	9	40	8	6
Chrysant	32	-	19	-
Roos	32	-	15	-
Kalanchoë	-	-	48	47

Bij een hogere gasprijs wordt de terugverdiertijd van de concepten in de dubbeldekskas aanzienlijk verlaagd. Dit komt doordat in de dubbeldekskas ten opzichte van de referentiekas veel minder gas wordt gebruikt. Bij het gewas tomaat, waar een hoge besparing op het gasverbruik wordt behaald is de terugverdiertijd (met name bij de minder geventileerde kas) bij beide kasdekken aanzienlijk verlaagd.

Tabel 7 - Terugverdiertijd in jaren bij een elektriciteitsprijs van f 0,20 i.p.v. f0,15 per kWh

	<i>Dubbeldeks</i>		<i>Enkeldeks</i>	
	Gesloten	Min. vent	Gesloten	Min. vent
Tomaat	7	20	6	12
Paprika	10	-	8	9
Chrysant	38	-	20	-
Roos	31	-	15	-
Kalanchoë	-	-	37	24

De hogere elektriciteitsprijs heeft een kleine positieve invloed op de terugverdiertijden van de gesloten kas omdat in de simulaties de gesloten kas al zijn elektriciteit zelf opwekt en dus minder nodig heeft dan de referentiekas. Bij de minder geventileerde kas heeft een hoge elektriciteitsprijs een negatieve invloed op de terugverdiertijden van de onbelichte gewassen omdat er in de simulaties is uitgegaan van een hogere elektriciteitsinkoop dan de referentiekas.

Tabel 8 - Terugverdiertijd in jaren bij een CO₂-prijs van f 0,20 i.p.v. f0,25 per kg

	<i>Dubbeldeks</i>		<i>Enkeldeks</i>	
	Gesloten	Min. vent	Gesloten	Min. vent
Tomaat	7	7	7	6
Paprika	10	76	8	6
Chrysant	42	-	21	-
Roos	35	-	16	-
Kalanchoë	-	-	39	25

In de minder geventileerde kas zouden alleen de gewassen paprika en tomaat kunnen profiteren van een lagere CO₂-prijs. Roos en chrysant heeft dan nog steeds geen positief saldo voor de investeringsruimte. Kalanchoë heeft nauwelijks extra CO₂ nodig omdat de WKK ten behoeve van de assimilatiebelichting meestal voldoende CO₂ produceert. In de gesloten kas is zo weinig extra CO₂ nodig, dat de CO₂-prijs slechts geringe invloed heeft op de terugverdiertijd.

Bij 10% lagere investeringskosten wordt ook de terugverdientijd 10% lager. In Tabel 9 is het netto bedrijfsresultaat bij 10% lagere investeringskosten weergegeven. Gezien de hogere investeringskosten bij de gesloten kas heeft 10% kostenreductie meer invloed op het resultaat dan bij de minder geventileerde kas.

Tabel 9 - Netto bedrijfsresultaat ten opzichte van de referentieteelten in f/m².jaar bij 10% minder investeringskosten

	<i>Dubbeldeks</i>		<i>Enkeldeks</i>	
	Gesloten	Min. vent	Gesloten	Min. vent
Tomaat	0	-2	2	-1
Paprika	-5	-7	-1	0
Chrysant	-14	-11	-11	-7
Roos	-21	-22	-14	-14
Kalanchoë	-23	-11	-18	-7

Als de berekende productieverhoging nog 10% hoger is dan stijgt het netto bedrijfsresultaat volgens Tabel 10 gemiddeld f 1,- per m².

Tabel 10 - Netto bedrijfsresultaat ten opzichte van de referentieteelten in f/m².jaar bij 10% meer productieverhoging

	<i>Dubbeldeks</i>		<i>Enkeldeks</i>	
	Gesloten	Min. vent	Gesloten	Min. vent
Tomaat	-1	-2	2	0
Paprika	-5	-7	-2	0
Chrysant	-15	-12	-13	-8
Roos	-23	-24	-16	-16
Kalanchoë	-24	-11	-19	-7

4 Afbreukrisico's systeemontwerpen en energievoorziening

De gesloten kas en de minder geventileerde kas verschillen vooral in de klimaatinstallatie en regeling van een standaard open kas. De klimaatinstallatie maakt voornamelijk gebruik van bewezen technieken. In het onderstaande stuk zullen eerst de technische risico's verbonden aan individuele componenten en daarna van het gehele concept geëvalueerd worden.

4.1 Kasconstructie

De gesloten kas heeft een andere kasconstructie dan de standaardkas door het ontbreken van luchtramen. Dat er geen ventilatieramen in een gesloten kas hoeven heeft als voordeel dat er een verminderd risico op het falen van deze constructie is. Een ander belangrijk voordeel is dat er minder risico is op biologische infecties, omdat er vrijwel geen luchtuitwisseling met buiten is. De lucht wordt gerecirculeerd en niet van buiten gehaald. Het ontbreken van luchtramen heeft als nadeel dat bij het falen van de klimaatinstallatie er geen ramen zijn die open gezet kunnen worden om op die manier aan het gewas schade (door te hoge temperatuur of RV) te beperken.

4.2 Installatie

De installatie van de gesloten kas verschilt op sommige punten van de minder geventileerde kas. Zo heeft de minder geventileerde kas geen luchtbehandelingskasten en draagt dus ook geen risico's over deze onderdelen.

4.2.1 Warmtepomp

Elektrische warmtepompen worden in woningbouw, utiliteitsbouw, industrie en agrarische sector met succes ingezet voor (ruimte)verwarming of koeling. Een groot verschil met deze toepassingen en toepassing bij de glastuinbouw is er niet. Technische problemen worden hier niet voorzien.

4.2.2 Gasmotor

De gasmotor die gebruikt wordt voor de aandrijving van de warmtepomp is standaard bij warmtekrachtinstallaties (WKK). Deze worden in de tuinbouw veelvuldig toegepast bij bedrijven die hun gewas belichten. De technische risico's zijn gering en niet groter dan bij het huidige gebruik van gasmotoren.

4.2.3 Aquifer

Als bron van de warmtepomp wordt een aquifer gebruikt. Hiermee is vooral binnen de utiliteitsbouw ervaring opgedaan. Het onttrekken van grondwater wordt zelden of nooit belemmerd door technische problemen. Wel duurt het ongeveer een jaar voordat de koude en de warme bron van de aquifer op de gewenste temperatuur zijn. Het concept van de gesloten kas vertoont grote overeenkomst met verschillende gerealiseerde projecten met lange termijn koude opslag [Novem 1997]. Regeneratie van de koude bron in de winter is onderdeel van het ontwerp en wordt gerealiseerd door de warmtevraag van de kas in de winter. Deze warmte wordt door de warmtepompen onttrokken aan de warme bron van de aquifer en na warmte-onttrekking afgevoerd naar de koude bron. Indien het koelvermogen in de winter niet toereikend is kan met een droge luchtkoeler de aquifer worden geregenereerd.

4.2.4 Dagbuffers

De dagbuffers die voor de gesloten kas nodig zijn, kunnen worden uitgevoerd als de bassins die nu voor regenwateropvang worden gebruikt. Deze bassins zijn standaard in de glastuinbouw. Technische problemen zijn niet te verwachten.

4.2.5 Luchtbehandelingskasten

De gesloten kas is voorzien van luchtbehandelingskasten. Deze luchtbehandelingskasten met een koel/ontvochtigings- en verwarmingsbatterij bestaande uit warmtewisselaars zijn een bewezen techniek voor luchtbehandeling en klimaatbeheersing (temperatuur- en RV-regeling) in kantoren en fabrieken. Het verschil is echter de hogere luchtvochtigheid waaronder deze bij de gesloten kas moet opereren. De onderdelen in de LBK kunnen volgens de specificaties van de fabrikant onder deze omstandigheden functioneren. Om ongewenste condensvorming in de LBK te voorkomen is deze geïsoleerd.

4.2.6 Totale installatie en klimaatregeling

Bij plaatsing van de warmtepompen, gasmotor en buffervat zal rekening moeten gehouden worden met het buitenklimaat, bevriezing van onderdelen zal voorkomen moeten worden. Plaatsing in de kas heeft hierbij de voorkeur.

Het concept in zijn geheel met alle componenten bij elkaar is nieuw. De faalkans van de klimaatinstallaties is hoger dan bij een traditionele installatie omdat het aantal componenten groter is. Door een goede regeling te ontwerpen dient het risico tot aanvaardbare proporties te worden gebracht. In principe zal dit niet tot technische problemen hoeven te leiden, maar dit betekent wel dat er extra aandacht moet worden geschonken aan de begeleiding van de installateur.

De aansturing van het kasklimaat is ook volledig nieuw. Ten opzichte van een standaard kasklimaatregeling is de regeling voor de gesloten kas complexer doordat er meer componenten zijn om aan te sturen. Het huidige praktijkexperiment is o.a. bedoeld om de klimaatregeling te optimaliseren en de daarmee samenhangende risico's te verminderen.

4.3 Risico's bij uitvallen van de installatie

In geval van problemen met de installatie voor luchtbehandeling of de regeling zal de noodregeling overgaan op de regeling die nu in een standaardkas geïnstalleerd is.

4.3.1 Verwarming

Voor een storing wat betreft de warmtepompen (en eventueel de gasmotor) zorgt in dat geval de gasketel die het buisrailnet voedt waarmee voldoende verwarmingscapaciteit aanwezig is om de kas op temperatuur te houden.

4.3.2 Ontvochtiging en koeling

Bij het uitvallen van de luchtbehandeling voor ontvochtiging en koeling dient het vocht en warmte bij een gesloten kas op een andere wijze te worden afgevoerd. De mogelijke storing zijn in drie groepen te verdelen:

- Storing aanvoer koud water naar warmtewisselaar
De kans op leiding breuk is zeer klein. Het gevolg van een leiding breuk kan worden beperkt door de leiding in tweevoud aan te voeren (bij gelijke totale capaciteit) zodat bij een enkelvoudige leidingbreuk de halve capaciteit nog beschikbaar is.
- Mechanische storing luchtbehandeling
Bij een kas op realistische bedrijfsgrootte zal altijd een aantal ventilatoren worden geplaatst. Het gevolg van het falen van één ventilator heeft dan slechts beperkte gevolgen.
- Elektrische storing luchtbehandeling
De elektriciteitsvoorziening is uitgevoerd met een netaansluiting en een warmtekrachtinstallatie. Uitval van één van de bronnen heeft geen gevolg voor capaciteit van de elektriciteitslevering. De risico's kunnen verder worden verkleind door gebruikt te maken van meer dan één warmtekrachtinstallatie.

Gastoevoerstoring is een risico waarvoor de tuinder bij een standaardkas nu geen oplossing heeft. De kans op storingen wordt met het gebruik van de installatie voor de gesloten kas of de minder geventileerde kas niet groter. Met de aanwezigheid van een WKK wordt bij stroomuitval het risico voor de warmtevoorziening en ontvochtiging (uitvallen van pompen) zelfs kleiner (in vergelijking met een kas zonder WKK), omdat de stroom van de gasmotor ook voor de pompen gebruikt zou kunnen worden.

Een noodaggregaat voor elektriciteit is standaard aanwezig. Voor de ontvochtiging in de gesloten kas zal 24-uurservice van een installateur geregeld kunnen worden die pompen, kleppen en frequentieregelaars snel kan vervangen.

4.4 Overige risico's

4.4.1 Teeltkundige risico's

De minder geventileerde kas zal nauwelijks extra teeltkundige risico's met zich meebrengen. Voor een dubbel buisstelsel zal in de meeste teelten wel plaats zijn. De gesloten kas levert voor een tomatenteelt ook geen problemen op. Op het gebied van klimaatomstandigheden worden geen risico's verwacht. Met een gesloten of een minder geventileerde kas zijn dezelfde klimaatomstandigheden te bereiken als bij de referentie.

4.4.2 Juridische risico's

Bij beide concepten moet vergunning worden aangevraagd voor de aanleg van een aquifer. Dit kan enige tijd duren. De luchtbehandelingskasten van de gesloten kas moeten zodanig tegen geluidsoverdracht worden geïsoleerd en de ventilatoren dienen dermate geluidsarm te zijn dat geen geluidsnormen worden overschreden. De ventilatie genereert enig geruis en plaatselijke luchtverplaatsingen, maar niet in die mate dat de arbo-normen worden overschreden.

5 Discussie

In de discussie worden eerst de algemene punten behandeld. Vervolgens zijn er voor zowel het minder geventileerde als het gesloten systeemconcept enkele verbeterpunten aangegeven die gedurende het project naar voren zijn gekomen. Aangezien deze verbeterpunten niet in de berekeningen zijn opgenomen, worden ze hier aangestipt.

5.1 Algemeen

De in dit project genoemde besparingen op primaire energie dragen tevens bij aan de doelstellingen voor CO₂-emissiereductie. Ook kunnen deze besparingen worden beschouwd als duurzame energie, aangezien het hier gaat om benutting van de energie van een duurzame bron (de zon). Hierdoor dragen de genoemde besparingen ook bij aan de doelstelling om in 2010 4% duurzame energie in de glastuinbouw te gebruiken.

De berekende productieverhogingen zijn niet alleen toe te schrijven aan het verhoogde CO₂-niveau, maar ook aan de lichtere kassen ten opzichte van de referentiekas.

De productiestijging van potplanten (Kalanchoë) door een hoger CO₂-niveau is volgens teeltdeskundigen [Verberkt (PPO), mededeling] gering. Wel kan een betere kwaliteit en daardoor ook een betere prijs worden verkregen. Aangezien deze betere prijs moeilijk is te kwantificeren is uitgegaan van een gelijke opbrengstverhoging van $\pm f$ 10,- per m² voor alle vier de systemen.

Bij de bedrijfseconomische beoordeling is geen rekening gehouden met subsidiemogelijkheden op de aanschaf van warmtepompen of het gebruik van warmte/koude opslag.

5.2 Minder geventileerde kas

Gezien de gevoeligheid van het bedrijfseconomisch resultaat voor de kosten van CO₂-dosering zou meer kunnen worden gelet op het CO₂-regime. Als van uur tot uur zou worden afgewogen of een kg extra CO₂ wordt terugverdiend door de extra productie zou dit met name in de minder geventileerde kas tot aanzienlijke vermindering van het CO₂-verbruik kunnen leiden.

Ten behoeve van lagere CO₂-kosten zou kunnen worden gedacht om de gedurende perioden met hoge CO₂-behoefte meer gebruik te maken van de ketel in plaats van de warmtepomp en zuivere CO₂ te gebruiken. Hierbij zou de warmtepomp bij de minder geventileerde kas in de winterperiode intensiever en in de zomer minder intensief gebruikt moeten worden. Dit heeft wel tot gevolg dat het te installeren warmtepompvermogen en aquifervermogen iets zouden moeten toenemen.

IMAG onderzoekt een systeem van koeling ontvochtiging met dakbevoeiing. Met dit systeem zou het minder geventileerde kasconcept kunnen worden verbeterd.

5.3 Gesloten kas

Het warmteoverschot dat in de aquifer op jaarbasis optreedt wordt in deze studie (in eilandbedrijf) met koeltorens weggekoeld. Met deze warmte zou met behulp van warmtepompen een andere (dichtbij liggende open) kas van warmte kunnen worden voorzien. Met deze clustering zou de energiebesparing van een open/gesloten kascluster hoger zijn dan in een referentiesituatie van twee open kassen. Dit is onderwerp van de studie 'gesloten kas in open clusters' [Schoonderbeek et al., 2001].

Voor de gesloten kas is (afhankelijk van het jaarlijkse warmte-overschot) een investering voor een koeltoren meegenomen. Als het warmte-overschot ingezet zou kunnen worden bij een aanliggende kas, dan is de koeltoren niet nodig en de investering navenant lager. Er is ook geen rekening mee gehouden dat het warmte-overschot geld op zou kunnen leveren. Hierdoor zou de gesloten kas een economisch en energetisch positiever resultaat kunnen geven.

In de gesloten kas is de hulpenergie voor de luchtbehandelingskasten een belangrijke energie kostenpost. Door verdere engineering en verbetering van het ontwerp is het mogelijk dit verder terug te brengen. In het praktijkexperiment worden de mogelijkheden hiertoe onderzocht. Tevens is een verbetering van de COP van de warmtepompen in de nabije toekomst met 5-10% reëel.

Het energiegebruik van de luchtbehandelingskasten is nu ruim geschat. Verdere metingen aan de hulpenergie die nodig is bij koelen en ontvochtigen tijdens de zomer hebben uitgewezen dat dit iets te hoog ingeschat is. Dit geeft een relatieve verbetering in de orde van 10% op het primaire energiegebruik

In de gesloten kas is een vermindering van gewasbeschermingsmiddelenverbruik te verwachten. Dit zou kunnen oplopen tot een besparing van f 0,50 per m^2 per jaar. Deze effecten zijn in de bedrijfseconomische beoordeling niet meegenomen.

Bij de berekeningen voor de gesloten kas is geen rekening gehouden met mogelijke besparingen op de inkoop van water. Uitgaande van een terugwinning van 50% op het door het gewas verdampte water ($\pm 0,7 m^3/m^2$.jaar) en een prijs van f 1,50 per m^3 zou dit neerkomen op f 0,53 per m^2 per jaar besparing.

Naast energetische en economische overwegingen zijn er nog andere overwegingen die het gesloten kasconcept interessant maken. Zo is in een gesloten kas een homogener klimaat over de hele kas te verwachten. Tevens is het moment van oogsten beter stuurbaar omdat parameters als vochtigheid en temperatuur beter door de tuinder in de hand te houden zijn.

Economische berekeningen zijn gedaan op basis van inschattingen van de toekomstige kosten van het concept. Vooral in de kosten voor de luchtbehandelingskasten in de gesloten kas is een onzekerheid. Bij opschaling en verdere engineering zijn hier zeker besparingen te verwachten. Daar deze kosten ongeveer 30% van de investeringskosten van het concept uitmaken kan dit de investeringen flink omlaag brengen.

6 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk komen de conclusies aan bod, gevolgd door een overzicht aan sterke en zwakke punten van de twee systeemontwerpen. Tenslotte worden enkele aanbevelingen gegeven.

6.1 Conclusies

In de conclusies wordt eerst de mogelijke energiebesparing van de twee systeemontwerpen met de twee kastypen en bij verschillende teelten behandeld. Vervolgens wordt de bedrijfseconomische haalbaarheid toelicht.

6.1.1 Energiebesparing

Minder geventileerde kas

Voor onbelichte teelten levert de inzet van de warmtepomp in het minder geventileerde kasconcept een energiebesparing van ruim $14 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{jaar}$ (21-30%). In de gekozen opzet is deze energiebesparing begrensd door de warmte-oogst-capaciteit van het koelsysteem. Deze capaciteit is klein gehouden vanwege het feit dat tijdens de formulering van de door te rekenen concepten geen andere systemen voorhanden waren waarmee met lage kosten de aquifer gedurende de zomer kan worden geregenereerd. Bij belichte teelten wordt niet of nauwelijks energiebesparing gerealiseerd. Door de hoge belichtingsniveaus is de elektriciteitsbehoefte dusdanig groot dat de warmteproductie van de WKK groter is dan de behoefte aan warmte (dekkingsgraad > 1). Het inzetten van de warmtepomp is dus niet nodig om in de warmtebehoefte te voorzien. In de referentiesituatie wordt bij belichte teelten ook al een gasmotor ingezet. Afhankelijk van het belichtingsniveau is ook hier de warmteproductie van de gasmotor meestal groter dan de warmtevraag. Het was dus al verwacht dat de warmtepomp in de belichte teelten nauwelijks aan bod zou komen en daarmee in deze teelten dus geen bijdrage kan leveren aan energiebesparing. Uit deze studie blijkt dat dit effect niet alleen bij zeer hoge belichtingsniveaus, zoals bij de rozenteelt, maar ook bij matige belichting van Kalanchoë-teelt optreedt. Dit kan worden toegeschreven aan het feit dat de in dit project toegepaste klimaatregelaarinstellingen in alle teelten gebruik wordt gemaakt van temperatuurintegratie.

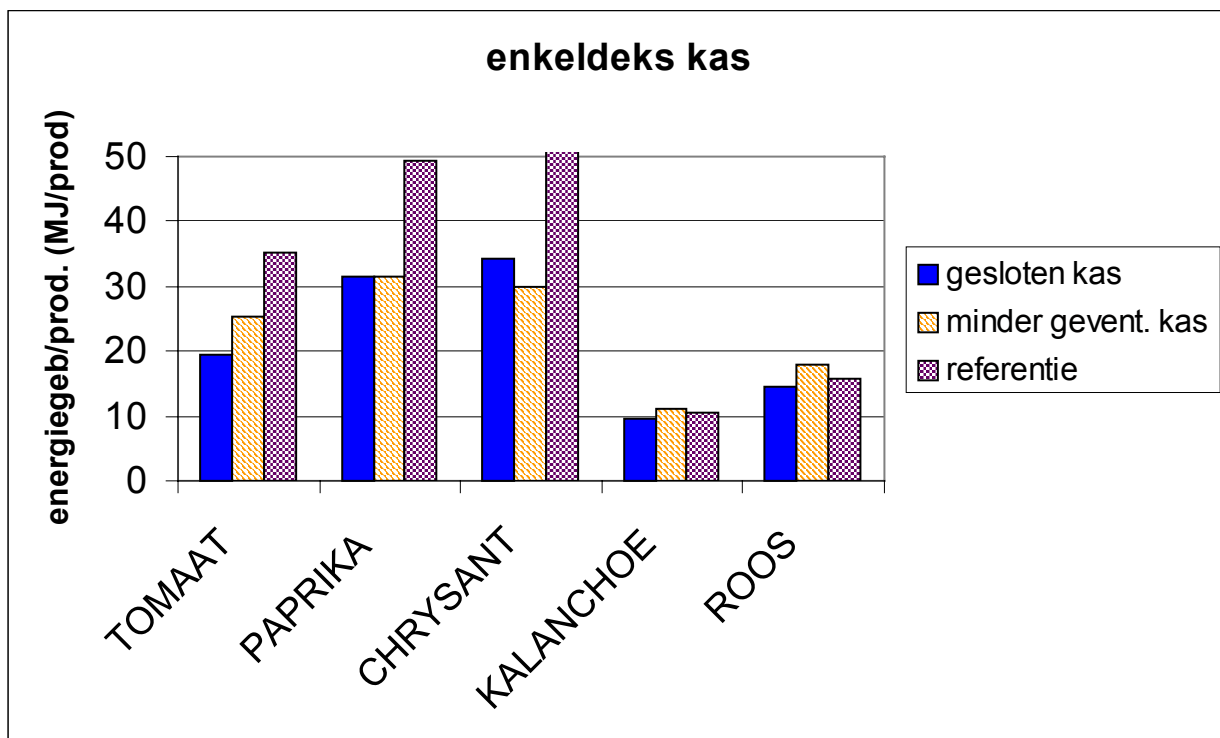
Gesloten kas

De gesloten kas levert voor onbelichte teelten energiebesparingen tussen de 9 en $26 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{jaar}$ (24-35%) bij enkeldek en 32-48% bij dubbeldek. Voor belichte teelten levert de gesloten kas net als de minder geventileerde kas geen of nauwelijks energiebesparing. Door het inzetten van luchtbehandelingskasten (voor verwarming en ontvochtiging) die veel hulpenergie vragen is het energiegebruik bij deze teelten ook groter dan in de referentiesituatie.

Ondanks het hoger primair energiegebruik is er bij belichte teelten, door de productiestijging in de gesloten kas, wel een kleine verlaging van het energiegebruik per eenheid product.

Enkeldeks kas

Voor onbelichte teelten tomaat en paprika in een enkeldeks kas heeft de gesloten kas een lager energiegebruik per eenheid product dan de minder geventileerde kas (zie Figuur 10). Bij chrysant is het energiegebruik per eenheid product bij de gesloten kas iets hoger dan bij de minder geventileerde kas.

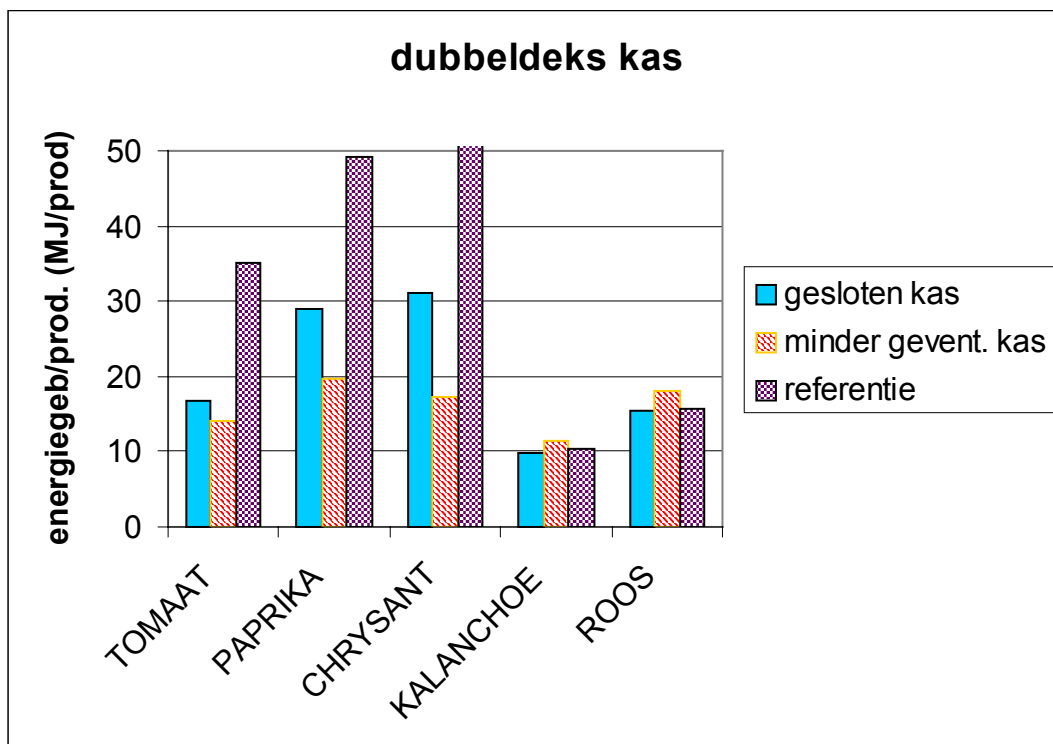


Figuur 10 - Energiegebruik per eenheid product voor de enkeldekskas ten opzichte van de referentiekas

Bij belichte teelten geeft het toepassen van een warmtepomp voor beide type kassen een hoger energiegebruik omdat de gasmotor al voor de volledige warmtedekking zorgt. Door de verwachte toegenomen productie in de gesloten kas (door een hoger CO₂-gehalte) is het energiegebruik per eenheid product wel lager dan in de referentie situatie. Dit is in de minder geventileerde kas niet het geval.

Dubbeldeks kas

Bij onbelichte teelten in dubbeldeks kassen heeft de minder geventileerde kas een lager energiegebruik en ook een lager energiegebruik per eenheid product (zie Figuur 11). Het energiegebruik van de gesloten kas is hoger bij een dubbel dek omdat hierin meer ontvochtigd moet worden dan bij enkel dek. Dit vergt extra hulpenergie van de luchtbehandelingskasten, terwijl in de minder geventileerde kas zonder extra energiegebruik de ramen geopend kunnen worden.



Figuur 11 - Energiegebruik per eenheid product voor de dubbeldekskas ten opzichte van de referentiekas

Voor belichte teelten is door de productiestijging die in de gesloten kas behaald wordt (door een hoger CO₂-gehalte) een lager energiegebruik per eenheid product te behalen dan in de referentie ondanks het hogere energiegebruik. In de minder geventileerde kas is het energiegebruik ook hoger dan in de referentie, maar de productiestijging is niet groot genoeg om hiervoor te compenseren, zodat de energie-efficiency slechter is dan in de referentie.

6.1.2 Bedrijfseconomie

Voor sommige teelten en kasconcepten zijn de berekende terugverdientijden te beschouwen als hoopvol. Aangezien het bij ontvochtiging gaat om een nieuwe techniek met grote investeringen met de hierbij gepaard gaande risico's wordt echter niet verwacht dat de concepten op korte termijn en op grote schaal zullen worden toegepast. Wel is uit praktijkproeven gebleken dat nog niet alle aspecten van het ontvochtigen geoptimaliseerd zijn en er dus nog veel verbeteringen mogelijk zijn.

Vruchtgroentegewassen lijken het meest geschikt om de techniek toe te passen. Bij de tomaat en paprika zijn nu al terugverdientijden van 7 tot 10 jaar berekend.

6.2 Sterke en zwakke punten

In deze paragraaf worden de genoemde discussiepunten en conclusies samengevat in sterke en zwakke punten.

Algemeen

Sterke punten
Hoge energiebesparing
Hogere productie door hoger CO₂-niveau
Betere beheersing van het kasklimaat

Zwakke punten
Niet geschikt voor belichte teelten
Vergunning voor aquifer nodig
Nog niet rijp voor grootschalige toepassing
Hogere productie valt vooral in de zomer bij veelal lagere prijsvorming

Minder geventileerde kas

Sterke punten
21-30% energiebesparing bij enkel dek
Relatief lage investering
Iets hogere productie

Zwakke punten
Gemiddeld iets minder rendabel dan gesloten kas

Gesloten kas

Sterke punten
24-35% energiebesparing bij enkel dek
Veel hogere productie
Terugwinning water
Insecten en schimmelsporen worden geweerd
Door betere dimensionering kunnen benodigde hulpenergie en investeringskosten nog verlaagd worden
Overschot aan laagwaardige warmte kan ook benut worden

Zwakke punten
Hoge investering
Nieuwe technologie
Moeilijk in te passen bij grondteelten

6.3 Aanbevelingen

Gedurende dit project zijn vele ervaringen uitgewisseld die tot een beter inzicht in de optimalisatie van systeemontwerpen hebben geleid. In de loop der tijd zijn de twee ontwerpen ook steeds meer naar elkaar gegroeid. Verder onderzoek kan uitwijzen of deze optimalisaties er toe leiden dat de ontwerpen in de praktijk grootschalig kunnen worden toegepast. Dit geldt met name voor het onderzoek naar de dimensionering van de luchtbehandelingskasten en de te behalen COP en de invloed hiervan op het bedrijfseconomisch resultaat.

Door de warmte-oogst van beide concepten ontstaat (met name bij het gesloten kasconcept) een overschot aan laagwaardige warmte. Uitbreiding van toepassingen van deze laagwaardige warmte, zoals verwarmingssystemen met een verhoogd verwarmend oppervlak, zullen de concepten rendabeler maken.

Ondanks de veelbelovende resultaten uit deze evaluatie worden nog geen grootschalige toepassingen in de praktijk verwacht. Dit komt door de benodigde grote investeringen en de vele onzekerheden. Kleinschalige praktijkproeven kunnen de toepassing optimaliseren en veel onzekerheden wegnemen. Gedacht kan worden aan een demo-bedrijf.

Literatuur

Bakker et.al. Greenhouse climate control an integrated approach, 1995, p.201

Bakker, J.C., J.C.J. Ammerlaan, H.D.M. Kool, J.J.G. Opdam, D. Snijkers, W.F.S. Duffhues, E.P.G. Snoeks, B. Wegman, 1998. Kas van de toekomst; Samenvatting en aanbevelingen. IMAG, PBG, TNO Bouw, Ecofys, ECN, Duklis, ENW en WLTO/STIVAS, Wageningen, 22 pp.

Boot, H, J Nies, M.J.E. Verschoor en J.B. de Wit, 1998, Handboek industriële warmtepompen, Kluwer bedrijfsinformatie Deventer.

Campen, J.B., 2001, Koeling en ontvochtiging in de floriadekas, IMAG Rapport 2001-xx (nog niet verschenen)

Gasunie, Ontwerpregels voor inpassing warmte/kracht in CV-systemen nov. 1995 p.51

Novem, Energieopslag in aquifers, 1997 (tekst DWA)

Opdam., J.J.G. , G.G. Schoonderbeek, R.Jonker, Klimaatbeheersing en energievoorziening in een volledig gesloten glastuinbouwkas. Een technische en bedrijfseconomische analyse, Ecofys, Utrecht, januari 2000.

Ruijs, M.N.A, Kramer, K.J., Paassen, R.A.F. van, Woerden, S.C. van, 2000. Milieukundige en economische analyse van geïntegreerde teelt- en bedrijfssystemen. Rapport 235, Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, Naaldwijk, pp. 58.

Schoonderbeek, G.G., R.G.J.H. Voskens, C.A.M. Stap, K.Blok, Verkenning haalbaarheid zeer energiezuinige tuinbouwkas, Ecofys, Utrecht, oktober 1995.

Schoonderbeek, G.G., J.J.G. Opdam, K.Blok, Concept voor klimaatbeheersing en energievoorziening in een volledig gesloten tuinbouwkas, Ecofys, Utrecht, september 1999.

Swinkels, G.L.A.M., J.P.G. Huijs en H.F. de Zwart, 2000, Standaard teelten, IMAG Nota P 2000-85

Woerden, S.C. van, J.P. Bakker, 2000. Kwantitatieve Informatie voor de Glastuinbouw 2000-2001. Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, Naaldwijk

Zwart, H.F. de, 2001, Energiezuinige vochtregulatie door middel van warmtepompen, IMAG Rapport 2001-xx (nog niet verschenen)

Bijlage 1. Teeltsystemen en kasklimaat

Tomaat

Productiesysteem

De tomaten worden op steenwol geteeld in een kas van 4 hectare. De plantdatum is 22 november en de oogst duurt tot 13 november, waarna de teeltwisseling plaatsvindt. De verwarmingsbuizen liggen als buisrail 10 cm boven de grond.

Stooktemperatuur

22-11(wk 47) tot 3-01 (wk 1): dag 19.5 °C, nacht 18.5 °C

3-01 (wk 1) tot 13-11 (wk 46): dag 18.5 °C, nacht 18 °C

13-11 (wk 45) tot 22-11(wk 47): teeltwisseling

De stooklijn waarop het kasklimaat wordt geregeld, is gebaseerd op de dag- en nachtsetpoints, waarbij de helling bij de overgangen tussen deze setpoints op 1 °C/uur gesteld is. De stijging naar het dagsetpoint wordt op een zodanig moment ingezet dat de dagwaarde bij zonsopkomst bereikt is. De verlaging wordt ingezet bij zonsondergang. Er wordt geen lichtafhankelijke setpointverhoging gehanteerd.

Rond deze blauwdruk wordt temperatuurintegratie toegepast met een bandbreedte van 14°C tot 25°C.

Hierbij wordt het aantal graaduren afwijking zowel naar boven als naar beneden begrensd op 200.

Bovendien mag de gemiddelde dagtemperatuur niet meer dan 8°C hoger of 2°C lager zijn dan de gemiddelde nachttemperatuur (DIF).

Ventilatie

De ventilatielijn ligt in principe 1 °C boven de stooklijn. Daarbovenop wordt zolang de temperatuurintegraal minder is dan de maximale afwijking de ventilatielijn verhoogd naar de bovengenoemde waarde

Streefniveau CO₂

Gestreefd wordt naar een CO₂-niveau van 1200 ppm. De begrenzingen van het CO₂-doseren wordt bij de tomaat gesteld op 180 kg/(ha uur), wat overeenkomt met de verbranding van 100 m³ aardgas/(ha uur).

Schermb

Voor de tomatenteelt wordt geen scherm verondersteld.

Assimilatiebelichting

De tomatenteelt wordt zonder assimilatiebelichting beschouwd.

Paprika

Productiesysteem

kasoppervlak: 4 hectare,

teeltsysteem: substraat met steenwol

buisligging: buisrailsysteem, geen groeibuis

teeltduur: plantdatum, 22 november; einde oogst, 6 november

Stooktemperatuur

22-11 (wk 47) tot 20-12 (wk 51): dag 22.5 °C, nacht 22.5 °C

20-12 (wk 51) tot 10-01 (wk 02): dag 22.5 °C, nacht 20 °C

10-01 (wk 02) tot 31-01 (wk 05): dag 22 °C, nacht 18 °C

31-01 (wk 05) tot 06-11 (wk 45): dag 21 °C, nacht 19 °C

- De overgangen tussen de stooklijnen van de dag en de nacht zijn gelijk aan die van de tomaat.
- Het setpoint wordt overdag met 2 °C verhoogd over het zonstralingstraject van 100 tot 300 W/m² (buiten de kas gemeten).
- Temperatuurintegratie wordt toegepast met een bandbreedte van 16°C tot 28°C. Het aantal graduren afwijking en de DIF is gelijk aan die van de tomaat.
- Er wordt geen rekening gehouden met het sluiten van het scherm bij een hoge globale straling (>700 W/m²)

Ventilatie

Als bij tomaat.

Scherf

Er wordt een transparant beweegbaar scherm gebruikt dat gesloten wordt als de buitentemperaturen onder de volgende waarden liggen:

22-11 (wk 47) tot 20-12 (wk 51): dag 10 °C, nacht 10 °C

20-12 (wk 51) tot 10-01 (wk 02): dag 10 °C, nacht 10 °C

10-01 (wk 02) tot 31-01 (wk 05): dag 5 °C, nacht 10 °C

31-01 (wk 05) tot 06-11 (wk 45): dag 0 °C, nacht 10 °C

CO₂-dosering

Als bij tomaat

Roos met assimilatiebelichting

Productiesysteem

4 hectare rozen op steenwol in een jaarrondteelt

Acht 51'ers buizen per 6,40 meter kap.

Stooktemperatuur

30-08 (wk 35) tot 06-03 (wk 10): dag 19 °C, nacht 19 °C

06-03 (wk 10) tot 24-04 (wk 17): dag 20 °C, nacht 20 °C

24-04 (wk 17) tot 05-06 (wk 23): dag 20 °C, nacht 20 °C

05-06 (wk 23) tot 30-08 (wk 35): dag 20 °C, nacht 19 °C

- De overgangen tussen de stooklijnen van de dag en de nacht zijn gelijk aan die van de tomaat.
- Het setpoint wordt overdag met 2 °C verhoogd over het zonstralings-traject van 100 tot 300 W/m² (buiten de kas gemeten).
- Temperatuurintegratie wordt toegepast met een bandbreedte van 16°C tot 26°C. Het aantal graduren afwijking moet tussen de -100 en de +100 blijven. De maximale DIF wordt gelijk gesteld aan die van de tomaat.

Ventilatie

Voor de berekening van het temperatuurverloop in de standaardkas wordt de ventilatielijn in de winter (van 16 februari tot 7 november) 2 °C boven de stooklijn gehouden. In de rest van het jaar ligt de ventilatielijn slechts 0.5 °C boven de stooklijn.

Hier bovenop komt de ventilatielijn verhoging ten gevolge van het temperatuur-integratie-algoritme tot het genoemde maximum

Voor het overige als bij tomaat.

Scherm

Er wordt een beweegbaar energiescherm toegepast. Het scherm wordt gesloten indien de buitentemperatuur onder de volgende waarden ligt:

30-08 (wk 35) tot 06-03 (wk 10): dag -5 °C, nacht 10 °C

06-03 (wk 10) tot 24-04 (wk 17): dag -5 °C, nacht 5 °C

24-04 (wk 17) tot 05-06 (wk 23): dag -5 °C, nacht 5 °C

05-06 (wk 23) tot 30-08 (wk 35): dag -5 °C, nacht 10 °C

Assimilatiebelichting

Assimilatiebelichting vindt plaats met SON-T lampen (63 W/m² elektrisch opgenomen vermogen (7400 lux/m²)). Het gehele jaar vindt de belichting plaats indien de globale straling buiten < 125 W/m². De belichting is per etmaal vier uur geblokkeerd (van 20:00 tot 24:00).

CO₂-dosering

Het setpoint voor de CO₂-concentratie bedraagt 1200 ppm. CO₂-dosering vindt plaats bij globale stralingsintensiteit vanaf 10 W/m². De CO₂-doseringcapaciteit wordt begrensd op 120 kg per ha per uur.

Chrysant zonder assimilatiebelichting

Productiesysteem

4 hectare chrysantenteelt in een jaarronde teelt in de grond waarbij de verschillende kasafdelingen allemaal in een verschillend groeistadium verkeren. Er liggen 8 buizen per 6.40 meter kap tussen het gewas.

Stooktemperatuur

jaarrond 17,5 °C overdag en 18 °C 's nachts.

Gewasverwarming

De temperatuur van de gewasverwarming (dunne buizen in het gewas) bedraagt dag en nacht 40 °C. In het zonstralingstraject 100 tot 300 W/m² wordt de buistemperatuur afgebouwd naar de actuele kastemperatuur. Rond deze blauwdruk wordt temperatuurintegratie toegepast met een bandbreedte van + en - 2 °C en een maximale gecumuleerde afwijking van + en - 200 graaduren.

Ventilatie

De ventilatielijn staat 0.5 °C boven de stooklijn.

Verder als bij tomaat

Schermen

Het scherm in een chrysantenkas is in de eerste plaats een verduisteringsscherm. Hiermee kunnen de planten die in het groeistadium zijn waarbij ze een korte dag moeten ondergaan om tot bloei te komen, aan het eind van de dag donker worden gezet. De periode waarin de natuurlijke dag te lang is, en er dus moet worden geschermd, loopt van 1 maart tot 25 september. In die periode worden de afdelingen waar het gewas in het betreffende groeistadium is (70% van het beteelde oppervlak) van 18:00 tot 07:00 verduisterd. Om te voorkomen dat de temperaturen te hoog oplopen of de RV te hoog oploopt wordt er 's nachts bij een buitentemperatuur boven de 10°C een kier in het scherm getrokken. In de winter wordt het verduisteringsscherm ook als energiescherm gebruikt als de buitentemperatuur 's nachts onder de 10 °C zakt.

CO₂-dosering

De CO₂-doseringcapaciteit wordt begrensd op 120 kg per ha per uur.

Het setpoint voor de CO₂-concentratie bedraagt 1200 ppm

CO₂-dosering vindt plaats bij globale stralingsintensiteit vanaf 10 W/m².

Kalanchoë

Productiesysteem

3 hectare potplanten op rolcontainers jaarrond geteeld.

Temperatuursetpoints

20 °C overdag en 20 °C 's nachts.

Ventilatie

De ventilatielijn staat 1 °C boven de stooklijn
Verder als bij tomaat.

Schermb

Als chrysant.

Assimilatiebelichting

Voor de assimilatiebelichting worden SON-T 400 W lampen toegepast (opgenomen vermogen 38 W/m²). De belichting wordt het hele jaar toegepast als er weinig zonlicht is (globale straling < 75 W/m²), maar is een aantal uren per etmaal geblokkeerd. In de teeltafdelingen met een gewas in de langedagfase is de belichting 6 uur uit, gerekend vanaf het tijdstip van zonsondergang. In de teeltafdelingen waar het gewas een korte dag ondergaat (85% van het kasoppervlak) is de belichting 13 uur geblokkeerd, en wel van 18:00 tot 07:00.

CO₂-dosering

De CO₂-doseringscapaciteit wordt begrensd op 80 kg per ha per uur.

Het setpoint voor de CO₂-concentratie bedraagt 1200 ppm

CO₂-dosering vindt plaats bij globale stralingsintensiteit vanaf 10 W/m², dus ook gedurende de periode dat de belichting ingeschakeld is.

Bijlage 2. Energievoorziening referentiekas

In onderstaande lijst is per gewas aangegeven wat het energiegebruik per vierkante meter is in de referentiekas. De warmtevernietiging wordt veroorzaakt door de CO₂-behoefte of de elektriciteitsbehoefte van de assimilatiebelichting. Over het algemeen wordt deze warmte vernietigd door een minimum buis in combinatie met geopende luchtramen. De energiegebruiksgegevens zijn berekend met het rekenmodel Kaspro.

	<i>Roos</i>	<i>Tomaat</i>	<i>Paprika</i>	<i>Chrysant</i>	<i>Kalanchoë</i>
Gasverbruik (m ³)	115.7	55.7	39.1	36.5	52.3
CO ₂ uit ketel (kg)	0.2	37.0	34.3	27.0	10.8
CO ₂ uit WKK (kg)	44.8				13.7
Warmtevernietiging (m ³)	32.7	6.3	4.5	5.6	5.3
Elektriciteitslevering (m ³)	17.1	-1.6	-1.6	-1.5	0.1
Productie [Ruijs et. al.]	205	52	26	220	164

Bijlage 3. Kengetallen installaties

Tabel i - Rendementen

<i>INSTALLATIES</i>		<i>Rendementen op Onderwaarde</i>
HR ketel	(60-40°C)	100%
	(90-70°C)	90%
Gasmotor	elektrisch	35%
	thermisch	55%
	koelwater (80°C)	
	restgas (80°C)	15%
	restgas (45°C)	5%
Elektrische warmtepomp	COP	50% /49% van Carnotrendement
Dagbuffer	LT < 30°C	95%
	HT > 60°C	90%
Aquifer	COP (jaarcyclus) bij dT=10	20.8
	bij dT=12	25
Warmtewisselaars, temperatuurverschil		3°C

Tabel ii - Investeringskosten per teelt

gesloten kas 1 ha	TOMAAT		PAPRIKA		CHRYSANT		KALANCHOE		ROOS	
	e	d	e	d	e	d	e	d	e	d
energie-installatie (GM, EWP, bron, buffers)	fi 933,246	fi 872,459	fi 831,132	fi 820,272	fi 889,844	fi 847,137	fi 1,229,463	fi 1,246,637	fi 1,553,807	fi 1,569,633
ontvochtigings- installatie (LBK)	fi 540,000	fi 540,000	fi 540,000	fi 540,000	fi 540,000	fi 540,000	fi 540,000	fi 540,000	fi 540,000	fi 540,000
minderkosten (ketel, ramen)	fi 142,900-	fi 142,900-	fi 142,900-	fi 142,900-	fi 142,900-	fi 142,900-	fi 142,900-	fi 142,900-	fi 142,900-	fi 142,900-
TOTAAL INVESTERING	fi 1,330,346	fi 1,269,559	fi 1,228,232	fi 1,217,372	fi 1,286,944	fi 1,244,237	fi 1,626,563	fi 1,643,737	fi 1,950,907	fi 1,966,733
jaarkosten	fi 199,552	fi 190,434	fi 184,235	fi 182,606	fi 193,042	fi 186,636	fi 243,984	fi 246,560	fi 292,636	fi 295,010

minder geventileerde kas 1 ha	TOMAAT		PAPRIKA		CHRYSANT		KALANCHOE		ROOS	
	e	d	e	d	e	d	e	d	e	d
energie-installatie (GM, EWP, bron, buffers)	fi 240,670	fi 288,309	fi 273,390	fi 422,916	fi 285,566	fi 402,547	fi 662,998	fi 675,787	fi 967,565	fi 979,803
ontvochtigings- installatie (LBK)	fi 60,000	fi 60,000	fi 60,000	fi 60,000	fi 60,000	fi 60,000	fi 60,000	fi 60,000	fi 60,000	fi 60,000
minderkosten (ketel, ramen)	fi 62,900-	fi 62,900-	fi 62,900-	fi 62,900-	fi 62,900-	fi 62,900-	fi 62,900-	fi 62,900-	fi 62,900-	fi 62,900-
TOTAAL INVESTERING	fi 237,770	fi 285,409	fi 270,490	fi 420,016	fi 282,666	fi 399,647	fi 660,098	fi 672,887	fi 964,665	fi 976,903
jaarkosten	fi 35,666	fi 42,811	fi 40,573	fi 63,002	fi 42,400	fi 59,947	fi 99,015	fi 100,933	fi 144,700	fi 146,536

Bijlage 4. Bedrijfseconomische analyse

Gewas:		Tomaat					
	eenheid	Referentie	Dubbel dek		Enkel dek		
			Gesloten	Min. Vent.	Gesloten	Min. Vent.	
Gas	m3/m2	55.7	30	21.6	37.4	41.2	
Elektra	kwh/m2	8.4	0	13.3	0	17.4	
extra CO2	kg/m2		2.5	41.7	1.4	29.8	
Extra investeringen kas	f/m2		41.5	41.5	16.2	16.2	
Extra jaarkosten kas	%		15	15	15	15	
Productie	stuks/m2	51.4	59.6	54.7	60.9	56.2	
Productieverschil	stuks/m2		8.20	3.30	9.50	4.80	
Prijs	f/stuk	2.03	2.02	2.03	2.02	2.03	
Geldopbrengst	f/m2	104.5	120.30	111.30	122.95	114.25	
Geldopbrengstverschil	f/m2		15.80	6.80	18.45	9.75	
Extra productiekosten	f/m2		3.45	1.40	4.00	2.00	
Verschil na productiekosten	f/m2		12.35	5.40	14.45	7.75	
Energie en CO2							
Gas	f/m2	22.25	12.00	8.60	14.95	16.45	
Elektra	f/m2	1.25	0.00	1.95	0.00	2.60	
extra CO2	f/m2		0.60	10.40	0.35	7.45	
Totaal energie en CO2 (teeltkosten)	f/m2	23.50	12.60	20.95	15.30	26.50	
teeltkostenverschil	f/m2		-10.90	-2.55	-8.20	3.00	
Verschil na variabele kosten	f/m2		23.25	7.95	22.65	4.75	
Extra jaarkosten kas	f/m2		6.20	6.20	2.40	2.40	
Investeringsruimte per jaar	f/m2		17.05	1.75	20.25	2.35	
Jaarkosten installatie	f/m2		19.05	4.30	19.95	3.55	
Saldo netto bedrijfsresultaat	f/m2		-2.00	-2.55	0.30	-1.20	
Investeringskosten installatie	f/m2		127	29	133	24	
Terugverdientijd	Jaar		7	16	7	10	

Gewas:		Paprika				
		Referentie	Dubbel dek		Enkel dek	
	eenheid		Gesloten	Min. Vent.	Gesloten	Min. Vent.
Gas	m3/m2	39.1	27.6	14.7	30.1	25.4
Elektra	kwh/m2	8.4	0	12.4	0	14.4
extra CO2	kg/m2		1.3	38.8	0.6	27.3
Extra investeringen kas	f/m2		41.5	41.5	16.2	16.2
Extra jaarkosten kas	%		15	15	15	15
Productie	stuks/m2	26	30.1	27.8	30.4	28.6
Productieverschil	stuks/m2		4.10	1.80	4.40	2.60
Prijs	f/stuk	3.52	3.54	3.53	3.53	3.53
Geldopbrengst	f/m2	91.5	106.60	98.00	107.40	101.00
Geldopbrengstverschil	f/m2		15.10	6.50	15.90	9.50
Extra productiekosten	f/m2		2.65	1.15	2.80	1.65
Verschil na productiekosten	f/m2		12.45	5.35	13.10	7.85
Energie en CO2						
Gas	f/m2	15.60	11.00	5.85	12.00	10.15
Elektra	f/m2	1.25	0.00	1.85	0.00	2.15
extra CO2	f/m2		0.30	9.70	0.15	6.80
Totaal energie en CO2 (teeltkosten)	f/m2	16.85	11.30	17.40	12.15	19.10
teeltkostenverschil	f/m2		-5.55	0.55	-4.70	2.25
Verschil na variabele kosten	f/m2		18.00	4.80	17.80	5.60
Extra jaarkosten kas	f/m2		6.20	6.20	2.40	2.40
Investeringsruimte per jaar	f/m2		11.80	-1.40	15.40	3.20
Jaarkosten installatie	f/m2		18.25	6.30	18.40	4.05
Saldo netto bedrijfsresultaat	f/m2		-6.45	-7.70	-3.00	-0.85
Investeringskosten installatie	f/m2		122	42	123	27
Terugverdientijd	Jaar		10	-	8	8

Gewas:		Chrysant				
	eenheid	Referentie	Dubbel dek		Enkel dek	
			Gesloten	Min. Vent.	Gesloten	Min. Vent.
Gas	m3/m2	36.5	25.8	12.1	28.7	22.3
Elektra	kwh/m2	10	0	11	0	13
extra CO2	kg/m2		4	30	3.6	25.6
Extra investeringen kas	f/m2		41.5	41.5	16.2	16.2
Extra jaarkosten kas	%		15	15	15	15
Productie	stuks/m2	220	263	230	265	238
Productieverschil	stuks/m2		43.00	10.00	45.00	18.00
Prijs	f/stuk	0.47	0.45	0.45	0.45	0.45
Geldopbrengst	f/m2	103.4	117.40	104.20	118.40	107.40
Geldopbrengstverschil	f/m2		14.00	0.80	15.00	4.00
Extra productiekosten	f/m2		9.80	2.15	10.30	4.05
Verschil na productiekosten	f/m2		4.20	-1.35	4.70	-0.05
Energie en CO2						
Gas	f/m2	14.60	10.30	4.80	11.45	8.90
Elektra	f/m2	1.50	0.00	1.65	0.00	1.95
extra CO2	f/m2		1.00	7.50	0.90	6.40
Totaal energie en CO2 (teeltkosten)	f/m2	16.10	11.30	13.95	12.35	17.25
teeltkostenverschil	f/m2		-4.80	-2.15	-3.75	1.15
Verschil na variabele kosten	f/m2		9.00	0.80	8.45	-1.20
Extra jaarkosten kas	f/m2		6.20	6.20	2.40	2.40
Investeringsruimte per jaar	f/m2		2.80	-5.40	6.05	-3.60
Jaarkosten installatie	f/m2		18.70	6.00	19.25	4.25
Saldo netto bedrijfsresultaat	f/m2		-15.90	-11.40	-13.20	-7.85
Investeringskosten installatie	f/m2		125	40	128	28
Terugverdiëntijd	Jaar		45	-	21	-

Gewas:		Kalanchoë				
	eenheid	Referentie	Dubbel dek		Enkel dek	
			Gesloten	Min. Vent.	Gesloten	Min. Vent.
Gas	m3/m2	52.3	62.3	63.2	60	62.1
Elektra	kwh/m2	6.2	0	0.18	0	0
extra CO2	kg/m2		0	5	0	3.9
Extra investeringen kas	f/m2		41.5	41.5	16.2	16.2
Extra jaarkosten kas	%		15	15	15	15
Productie	stuks/m2	164	167	173	167	179
Productieverschil	stuks/m2		3.00	9.00	3.00	15.00
Prijs	f/stuk	1.31	1.35	1.30	1.35	1.26
Geldopbrengst	f/m2	214.8	225.45	225.45	225.45	225.45
Geldopbrengstverschil	f/m2		10.65	10.65	10.65	10.65
Extra productiekosten	f/m2		1.90	1.90	1.90	1.90
Verschil na productiekosten	f/m2		8.75	8.75	8.75	8.75
Energie en CO2						
Gas	f/m2	20.90	24.90	25.25	24.00	24.80
Elektra	f/m2	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00
extra CO2	f/m2		0.00	1.25	0.00	0.95
Totaal energie en CO2 (teeltkosten)	f/m2	21.80	24.90	26.50	24.00	25.75
teeltkostenverschil	f/m2		3.10	4.70	2.20	3.95
Verschil na variabele kosten	f/m2		5.65	4.05	6.55	4.80
Extra jaarkosten kas	f/m2		6.20	6.20	2.40	2.40
Investeringsruimte per jaar	f/m2		-0.55	-2.15	4.15	2.40
Jaarkosten installatie	f/m2		24.70	10.10	24.40	9.90
Saldo netto bedrijfsresultaat	f/m2		-25.25	-12.25	-20.25	-7.50
Investeringskosten installatie	f/m2		165	67	163	66
Terugverdientijd	Jaar		-	-	39	28

Gewas:		Roos				
	eenheid	Referentie	Dubbel dek		Enkel dek	
			Gesloten	Min. Vent.	Gesloten	Min. Vent.
Gas	m3/m2	115.7	110.6	117	105.6	115.6
Elektra	kwh/m2	11.5	0	0	0	0
extra CO2	kg/m2		0	7.9	0	6.6
Extra investeringen kas	f/m2		41.5	41.5	16.2	16.2
Extra jaarkosten kas	%		15	15	15	15
Productie	stuks/m2	205	226	206	228	211
Productieverschil	stuks/m2		21.00	1.00	23.00	6.00
Prijs	f/stuk	0.74	0.72	0.73	0.72	0.73
Geldopbrengst	f/m2	151.7	162.90	149.65	164.00	153.65
Geldopbrengstverschil	f/m2		11.20	-2.05	12.30	1.95
Extra productiekosten	f/m2		3.10	0.15	3.40	0.90
Verschil na productiekosten	f/m2		8.10	-2.20	8.90	1.05
Energie en CO2						
Gas	f/m2	46.25	44.20	46.80	42.20	46.20
Elektra	f/m2	1.70	0.00	0.00	0.00	0.00
extra CO2	f/m2		0.00	1.95	0.00	1.65
Totaal energie en CO2 (teeltkosten)	f/m2	47.95	44.20	48.75	42.20	47.85
teeltkostenverschil	f/m2		-3.75	0.80	-5.75	-0.10
Verschil na variabele kosten	f/m2		11.85	-3.00	14.65	1.15
Extra jaarkosten kas	f/m2		6.20	6.20	2.40	2.40
Investeringsruimte per jaar	f/m2		5.65	-9.20	12.25	-1.25
Jaarkosten installatie	f/m2		29.50	14.65	29.25	14.45
Saldo netto bedrijfsresultaat	f/m2		-23.85	-23.85	-17.00	-15.70
Investeringskosten installatie	f/m2		197	98	195	96
Terugverdiëntijd	Jaar		35	-	16	-

Toelichting bij de 5 schema's voor productie, geldopbrengsten en extra kosten

Opbrengsten

De fotosynthese gegevens zijn per week van het IMAG verkregen voor de 4 verschillende mogelijkheden (Dubbel dek en enkel dek waarbij bij beiden een gesloten en een minimum ventilatie is aangehouden).

De fotosynthese gegevens zijn gemiddeld per periode (4 weken).

Omdat de fysieke opbrengsten later komen dan dat de fotosynthese heeft plaatsgevonden is steeds 1 periode opgeschoven.

Er is vanuit gegaan dat de fotosynthese volledig wordt omgezet in fysieke productie behalve bij Kalanchoë. Voor tomaat en paprika uit zich dit in meer kg productie, bij roos in meer stelen per m2 en voor chrysant in meer takken door meer stekken per m2 te planten (hierbij wordt voor de gesloten kas over de grens van de maximum plantdichtheid per m2 gegaan).

Voor potplanten (Kalanchoë) geldt dat CO₂ nauwelijks een teeltversnelling geeft maar wel een iets betere prijs. Met deze uitgangspunten is verder gerekend.

Voor de prijs van de producten (per 4 weken) is uitgegaan van de KWIN en het rapport 1209, deze prijs is bij roos en chrysanten niet gelijk. In de berekeningen is uitgegaan van het grootste verschil tussen de geldopbrengsten ten opzichte van de standaard situatie.

Extra kosten

Indien er een hogere productie is zijn er een aantal kosten die mee veranderen. De arbeidskosten van de extra productie voor oogsten en sorteren (taaktijden die gebruikt zijn voor arbeidsbehoefte KWIN). De extra afzetkosten van verpakking en veilingprovisie zijn genomen uit KWIN.

Ook de kosten voor extra plantmateriaal zijn verkregen uit KWIN.

Energiegebruik

Het energie verbruik in de standaard kas is aangeleverd door het IMAG. De prijs voor aardgas is voor dit onderzoek vastgesteld op 40 cent per m³.

Voor elektra is het verbruik uit rapport 1209 genomen, de prijs voor elektriciteit is voor dit onderzoek vastgesteld op 15 cent per kWh.

Het energie verbruik voor de 4 verschillende opties is aangeleverd door Ecofys.

Er is met dezelfde prijzen gerekend als voor het energiegebruik in de standaard kas.

Wanneer van het verschil in geldopbrengsten de extra kosten en de energiekosten verschillen zijn gehaald blijven er bedragen over (positief en negatief) die gebruikt kunnen worden voor de extra kosten die gemaakt worden door de extra investeringen.

Ten eerste geldt dit voor de extra investeringen van de kas, zowel voor dubbel dek als enkel dek.

De extra investering bedraagt voor de dubbel dek kas f 40/ m² en voor de enkel dek kas f 12,50 per m².

Bedragen komen van IMAG en TNO.

Bij jaarkosten van 15% zijn de extra jaarkosten resp. f 6 en f 1,90 per m².

Wat nu nog overblijft is beschikbaar voor de investeringen in ontvochtiging.

De investeringsbedragen voor de 4 verschillende mogelijkheden zijn aangeleverd door Ecofys.

Omdat er nu met een kleinere ketel kan worden volstaan is er gerekend met een verlaging van het investeringsbedrag van f 100.000.-

Voor de jaarkosten (afschrijving, rente en onderhoud) is een percentage van 15% genomen van het totale investeringsbedrag.

De terugverdientijd wordt bepaald door het investeringsbedrag te delen door het bedrag dat beschikbaar is voor de investeringen van de installatie.