

TNO-rapport

2005-BCS-R0245

Verbeterde (semi) gesloten kas

Datum 25 november 2006
Auteur(s) ir. E.G.O.N. Janssen
ir. N.R. Bootsveld
ing. B. Knoll
dr. H.F. de Zwart (WUR Glastuinbouw)

Exemplaarnummer
Oplage
Aantal pagina's 65
Aantal bijlagen 4
Opdrachtgever Produktschap Tuinbouw
Mevr. A. Jolman
Postbus 280
2700 AG Zoetermeer

Produktschap  Tuinbouw

Ministerie van LNV
Leo Oprel
Postbus 482
6710 BL Ede



Projectnaam verbeterde (semi) gesloten kas
Projectnummer 006.53337/01.01

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksovereenkomsten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

Samenvatting

Doelstelling

Met een stijgende gasprijs en een toenemend milieubewustzijn van de samenleving als drijfveren is de glastuinbouwsector op zoek naar energiebesparende maatregelen om het verbruik van fossiele brandstoffen terug te dringen.

Bij traditionele kassen wordt in de winter gas verstoekt om de kas op temperatuur te houden. Terwijl in de zomermaanden juist veel geventileerd wordt om het overschot aan warmte weg te krijgen. Het gesloten kassysteem is een alternatief dat in de zomer met behulp van een luchtbehandelingsysteem de overtollige warmte afvoert en ondergronds opslaat om deze in de winter te gebruiken voor het verwarmen van de kas. Bijkomende effecten van dit systeem is dat de luchtvochtigheid en de CO₂ concentratie beter kunnen worden gecontroleerd. Een nadeel van het systeem is dat voor het koelen van de kas een grote (piek)capaciteit nodig is. Tevens is er aandrijfenergie benodigd (elektriciteit) om het koelwater en lucht door de kas te transporteren. Het gesloten kassysteem heeft tenslotte ook forse investeringskosten.

In dit onderzoek wordt gekeken op welke manieren het mogelijk is het concept van de gesloten kas te verbeteren en welke aanpak kan leiden tot de gewenste verbeteringen. Om dit te bereiken zijn in dit rapport de volgende twee doelstellingen uitgewerkt

1. Een inschatting maken van het besparingspotentieel ten opzichte van de referentie gesloten kas. Hiertoe zijn enkele theoretische besparingsopties gesimuleerd.
2. Met behulp van een quickscan en een technologische roadmap inventariseren welke componenten beschikbaar zijn om het besparingspotentiaal te bereiken.

Met behulp van de resultaten van dit onderzoek is het mogelijk om de meest interessante combinatie van besparingsoptie samen te stellen en deze verder uit te werken.

Referentie kas

Om de efficiëntie van de verschillende besparingsopties te kunnen analyseren wordt het energieverbruik vergeleken met een referentie kas. Aangezien het gesloten kassysteem voortdurend in ontwikkeling is, is het niet eenvoudig een duidelijke referentie te kiezen. Er is gekozen voor een referentiesysteem met de volgende eigenschappen:

1. WKK voor warmte en elektriciteitslevering
2. CO₂ levering vanuit WKK
3. COP van 3.7
4. Aquifer, luchtbehandelingskasten
5. Warmte en koude vraag gebalanceerd door zowel gesloten als open afdelingen op te nemen in de kas.

Bij dit systeem wordt in het gesloten gedeelte van de kas meer warmte opgeslagen dan dat het in de koude periode nodig heeft. Om ervoor te zorgen dat de energiebalans over het jaar heen gelijk blijft wordt de warmte ook gebruikt om een deel van een niet gesloten kas te verwarmen. Dit is het geval als de verhouding gesloten tot open kas 1 staat tot 4.9 is en in deze situatie wordt er gedurende het jaar 34.4 m³/m² gas verbruikt. In vergelijking met een conventionele tomatenkas is dit een besparing van 28% per eenheid product.

Besparingsvarianten

Tijdens dit onderzoek zijn 6 verschillende varianten op de referentiekas ontwikkeld. Voor iedere variant is gekeken wat het energieverbruik is, hierbij is de verhouding gesloten en open kas iedere keer zodanig aangepast dat de energiebalans over het gehele jaar neutraal is. Ook is gekeken naar de energie-efficiëntie, hierbij is de conventionele tomatenkas genomen als uitgangspunt.

Verhogen isolatiewaarde dekmateriaal

Gekeken is naar het effect van een hogere U-waarde (isolatiegraad) van de kas door het aanbrengen van een dubbel kasdek. Hierdoor neemt de warmtevraag in de gehele kas sterk af, het warmteoverschot in de gesloten kas is iets hoger dan bij de referentiekas. Een nadeel van een geïsoleerd dek is dat in het niet gesloten deel van de kas meer ontvochtigd moet worden.

Het blijkt dat 90% van het bedrijf open zal moeten zijn om de overtollige warmte van het gesloten deel op te maken. Het gasverbruik van deze variant is met $28,9 \text{ m}^3/\text{m}^2$ fors lager. Wanneer gekeken wordt naar de energie efficiëntie is deze variant 10% zuiniger in vergelijking met de referentiekas.

Overstappen naar semi-gesloten kas

In het gesloten gedeelte van de referentiekas wordt alle overtollige warmte door het luchtbehandelingssysteem afgevoerd. Om ook de pieken op te kunnen vangen is een grote capaciteit vereist en wordt er meer warmte geogst dan dat voor het gesloten gedeelte nodig is. Als alternatief hiervoor is de semi-gesloten kas ontwikkeld. In deze variant wordt slechts een gedeelte van de overtollige warmte geogst, gedurende de pieken wordt de kas op de conventionele manier gekoeld door middel van ventilatie. In de situatie waarin het gesloten gedeelte evenveel warmte oogst als dat het verbruikt is het energieverbruik $33,9 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Dit is een fractie zuiniger dan de referentiekas. Desondanks is de energie efficiëntie circa 2% minder dan de referentiekas. Dit komt omdat de semi-gesloten kas een productiestijging heeft die lager ligt dan de productiestijging van de referentiekas. Daar tegenover staat dat de investeringskosten van de semi-gesloten kas aanzienlijk lager zijn dan de investeringskosten van een volledig gesloten kas.

Vergroten van verwarmend oppervlak

Bij de warmtewisselaar gaat veel energie zitten in het rondpompen van de grote hoeveelheden water. Wanneer het verwarmend oppervlak van de wisselaar wordt vergroot heeft dit een positief effect op de COP waarde. Wanneer de COP van de warmtewisselaar 6 zou zijn zou het totale gasverbruik van de kas $30,7 \text{ m}^3/\text{m}^2$ zijn met een extra verhoging van de energie efficiëntie van 8% ten opzichte van de referentiekas.

Energiezuiniger luchtverplaatsing

In de afgelopen jaren is het elektriciteitsverbruik van de luchtbehandeling al aanzienlijk gedaald, van 75 kWh naar 40 kWh per m^2 sinds 2001. Er is gekeken naar het effect van een verdere verbetering van het verbruik. Bij een efficiëntie van $20 \text{ kWh}/\text{m}^2$ is het totaalverbruik van het complex (verhouding 1:4,5) $33,7 \text{ m}^3/\text{m}^2$ per jaar. De energie efficiëntie is dan 2% efficiënter dan de referentiekas.

Aansluiten op externe CO₂-bron








In zowel het gesloten als het niet gesloten gedeelte van de referentiekas is het gedoseerde CO₂ afkomstig uit de rookgassen van de WKK. De vrijkomende restwarmte wordt gebufferd en ingezet voor invulling van de warmtevraag. Wanneer gekozen

wordt voor een externe CO₂-bron kan bij een gelijkblijvende warmtevraag 533 MJ extra worden ingevuld door de warmtepomp. Hierdoor wordt de verhouding gesloten niet gesloten 1:2,9 en de gasbehoefte wordt gereduceerd tot 28.4 m³/m². Door het grotere aandeel van de gesloten kas is de energie efficiëntie van deze variant zelfs 13% efficiënter.

Verminderen koelbehoefte d.m.v. spectraal selectieve kasbedekking

Bij de referentiekas wordt veel (aandrijf)energie verbruikt bij het afvoeren van de overtollige warmte. Bekeken is of het rendabel is om door middel van de kasomhulling een deel van de warmte buiten te houden. Dit kan gedaan worden door het selectief filteren van de zonlicht. 50% van de energie van het zonlicht bestaat uit het, voor planten belangrijke, PAR licht. Van de overige 50% is het grootste gedeelte warmtestraling (NIR en FIR) In het onderzoek is gekeken naar het effect van een filter dat 50% van het NIR en FIR reflecteert (25% van de totale instraling). Hierdoor is er een kleiner gedeelte nodig met een niet geloten kas en het totale gasverbruik is 33.9 m³/m². De energie efficiëntie van deze variant is 2% extra zuinig in vergelijking met de referentiekas.

tabel 1 Vermindering energieverbruik van de verschillende verbeteropties voor de gesloten kas

	Energieverbruik		Energie efficiency		kosten
	Reductie tov conventionele tomatenkas (45.8m ³ /m ²)	reductie t.o.v gesloten referentiekas	Reductie tov. conventionele tomatenkas	Reductie t.o.v gesloten referentiekas	
Gesloten referentiekas	25%	0%	28%	0	
Verhoging isolatiewaarde (gelijkblijvende lichttransmissie)	37%	12%	38%	10%	
Semi gesloten kas	24%	-1%	26%	-2%	
groter verwarmend opp.	33%	8%	36%	8%	
Efficiëntere luchtverplaatsing	27%	2%	30%	2%	
Aansluiting externe CO ₂	38%	13%	41%	13%	
Selectief kasdek	26%	1%	30%	2%	

Aanbevelingen bij de verbeteropties

- Een combinatie van de onderzochte maatregelen zal tot betere resultaten leiden. Zo zorgt de aansluiting op een zuivere CO₂ bron ervoor dat er meer warmte geleverd kan worden met de warmtepomp. Een verbeterde warmtewisselaar komt dan ook beter tot z'n recht (een groter deel van de geleverde warmte komt ook daadwerkelijk uit de verbeterde warmtewisselaar). Door ook een selectief kasdek op te nemen wordt het koelvermogen verminderd, waardoor verwarming en koeling beter in balans zijn en minder conventionele kassen nodig zijn.
- Uit de simulaties volgt dat koude schaarser is dan warmte. Dit is in deze studie opgelost door een aandeel conventionele kassen op te nemen die verwarmd worden met de restwarmte van het gesloten gedeelte. Door in de winter de koude bron extra te vullen met koude uit de buitenlucht kan een groter areaal gesloten blijven. Daarnaast kan de warmtepomp efficiënter ingezet worden.
- Door gebruik te maken van elektriciteit van het net kan ook een groter aandeel van de warmtevraag ingevuld worden met de warmtepomp.
- Een andere mogelijke verbeteroptie is een tussenwarmtewisselaar in de luchtbehandelingkast (LBK). Een tussenwarmtewisselaar hergebruikt koude uit al afgekoelde lucht om aangevoerde warme lucht af te koelen. Dit is een wezenlijk verschil met de nu gangbare luchtbehandelingkast van gesloten kassen. Daarin moet namelijk de hele afgekoelde luchtstroom na ontvochtiging weer worden opgewarmd door de warmtepomp. Dit kost veel energie. Met name bij ontvochtiging van de kas levert de tussenwarmtewisselaar energiebesparing op.

Quickscan componenten

In de quickscan zijn verschillende kasinstallaties met elkaar vergeleken om te kijken welke geschikt zouden kunnen zijn in voor het uitwerken van de verschillende varianten. De componenten zijn onderverdeeld in 7 verschillende functies. Binnen deze functies zijn de voor en nadelen van de verschillende componenten op een rijtje gezet.

1. Verwarmen
2. Koelen
3. Ontvochtigen
4. CO₂ bemesten
5. Omhullingsmateriaal
6. Warmteopslagsysteem
7. Zonlicht regelingen

Aanbevelingen langere termijn

Op basis van de verbeteropties en de huidige stand van techniek is gekeken welke verdere ontwikkelingen gewenst zijn. Om te komen tot een verbeterde (semi)gesloten kas moet met name de gespecialiseerde kennis die momenteel al aanwezig is met elkaar geïntegreerd worden. Daarnaast zijn doorbraken op de volgende gebieden noodzakelijk:

- Voor het opslaan van de overtollige energie in de zomer wordt vaak gebruik gemaakt van een aquifer. Dit is echter een vrij kostbare oplossing en werkt met een gering temperatuurverschil. Er moeten nieuwe opslagsystemen ontwikkeld worden met een groter temperatuurverschil en een hoog rendement om de kostprijs om laag te krijgen
- Ook het rendement van de warmtewisselaars moeten worden verbeterd. Er gaat veel energie verloren aan het rondpompen van de grote hoeveelheden water en in het bijzonder van lucht. De FiWiHEX heeft al voor een grote verbetering gezorgd. Deze techniek lijkt op nu maximaal te zijn benut, voor verdere verbeteringen zou gekeken moeten worden naar nieuwe technieken als

bijvoorbeeld druppelsystemen of lage temperatuursystemen zoals het Flowdeck.

- Voor de energieconversie van laagwaardige naar hoogwaardige warmte wordt een warmtepomp gebruikt. Deze apparaten verbruiken elektrische energie. Door verbeteringen kan het gebruik van fossiele brandstoffen teruggebracht worden.
- Om het warmte overschot in de zomer te verminderen zou een kasomhulling die alleen het PAR licht doorlaat een oplossing kunnen bieden. In de winter gaat in de huidige kassen nog veel energie verloren door de lage isolatiewaarde van de ruiten. Verhoging van de isolatiewaarde kan een grote besparing opleveren.
- Een hoge CO₂-concentratie is van belang voor een goede teelt, om dit te bereiken wordt momenteel de CO₂ van de rookgassen van de ketel en WKK gebruikt. Wanneer de kas geen fossiele brandstoffen meer gebruikt moet de CO₂ ergens anders vandaan komen, hierbij kan gedacht worden aan levering van derden of winning uit de buitenlucht.
- Belichting is sterk in opkomst om de productie te verhogen, er gaat veel van deze energie verloren door de efficiëntie van de lamp, het armatuur en de verdeling van et licht in de kas. Een technische doorbraak is nodig om een groter deel van het licht te benutten.

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	9
1.1	Doelstelling.....	9
1.2	Leeswijzer.....	9
2	Verbeterde semi gesloten kasconcept.....	10
2.1	Definitie.....	10
2.2	Achtergronden.....	11
2.2.1	Glami / Kyoto doelstellingen.....	11
2.2.2	Gebruik van fossiele brandstoffen.....	11
2.2.3	Systeemgrenzen.....	12
3	Gesloten referentie kas.....	14
3.1	Conventionele kassen.....	14
3.2	De essentie van het gesloten kassysteem.....	14
3.3	Uitgangspunten.....	15
3.4	Energieberekeningen gesloten referentiekas.....	15
3.5	Conclusie.....	19
4	Besparingspotentieel gesloten kasconcept.....	20
4.1	Inleiding.....	20
4.2	Verhoging van de isolatiewaarde van het dekmateriaal.....	21
4.3	Overstap naar semi gesloten telen.....	21
4.4	Vergroting van het VO van het verwarmingssysteem.....	22
4.5	Effect efficiëntieverbetering van luchtbehandeling.....	25
4.6	Aansluiting op externe CO ₂ -bron.....	25
4.7	Verminderen koelbehoefte dmv spectraal selectieve kasbedekking.....	25
4.8	Conclusies.....	26
4.8.1	Resultaten besparingspotentieel.....	28
5	Quickscan componenten.....	30
5.1	Inleiding.....	30
5.2	Verwarmen.....	30
5.2.1	Fossiele brandstoffen – ketel.....	30
5.2.2	Fossiele brandstoffen – WKK installatie.....	31
5.2.3	Biomassa.....	31
5.2.4	Aardwarmte.....	32
5.2.5	Opwaarderen van warmte (warmtepompen).....	32
5.2.6	Restwarmte van derden.....	32
5.3	Koelen.....	32
5.3.1	Kasdeksproeiers.....	33
5.3.2	Ventilatie.....	33
5.3.3	Mattenkoeling.....	33
5.3.4	Water verneveling.....	33
5.3.5	Warmtewisselaars.....	33
5.3.6	Koudebronnen.....	34
5.4	Ontvochtigen.....	34
5.4.1	Uitkoelen van vocht.....	35
5.4.2	Hygroscopisch systeem.....	35
5.5	CO ₂ bemesten.....	35

5.5.1	Rookgassen	35
5.5.2	Zuivere CO ₂	35
5.6	Omhuilingsmateriaal.....	36
5.7	Warmte opslag systeem	36
5.7.1	Lange termijn opslag	36
5.7.2	Korte termijn opslag	36
5.7.3	Phase change materials	36
5.7.4	Waterbekkens	37
5.7.5	Energiepalen	37
5.8	Zonlicht regelingen	37
5.8.1	Krijt.....	37
5.8.2	Schermen	37
5.9	Morfologisch diagram.....	37
6	Conclusies en aanbevelingen.....	39
6.1	Inleiding	39
6.2	Conclusies.....	39
6.3	Aanbevelingen korte termijn.....	39
6.4	Aanbevelingen langere termijn.....	40
7	Literatuur	41
7.1.1	Publicaties.....	41
7.1.2	Internet.....	43
7.1.3	Persoonlijke mededelingen	43
7.1.4	Partners	46
	Bijlage(n)	
	A Verwarmen	
	B Koelen	
	C Ontvochtigen	
	D CO ₂ bemesten	
	E Omhuilingsmaterialen	
	F Warmte opslag systemen	
	G Regelen zonlicht	

1 Inleiding

Traditionele kassen zijn voor een groot deel van de klimaatbeheersing (verwarmen, koelen en ontvochtigen) afhankelijk van ventilatie door middel van luchtramen en verwarming met de ketel / WKK. In de zomers gaan zo grote hoeveelheden warmte verloren, in de winters moet er veel gas gestookt worden om de kas op temperatuur te houden. Ventilatie met luchtramen heeft ook het grote nadeel dat ziektes naar binnen kunnen komen en dat de CO₂ ontsnapt.

Gesloten kassen staan sterk in de belangstelling. Het idee dat overmatig hoge temperaturen in de zomer kunnen worden voorkomen, de luchtvochtigheid beter in de hand gehouden kan worden spreekt tuinders zeer aan. Bovenal is het echter aantrekkelijk jaarrond een hoge CO₂-concentratie aan te kunnen houden zonder dat hier grote hoeveelheden CO₂ gedoseerd hoeven te worden.

Om de kas gesloten te kunnen houden moet er echter een grote hoeveelheid warmte via een luchtbehandelingssysteem aan de kaslucht worden onttrokken. Dit luchtbehandelingssysteem verbruikt veel elektriciteit. Bovendien moeten er grote hoeveelheden koelwater worden rondgepompt en worden opgeslagen in het ondergronds energieopslagsysteem. Ook hiervoor is elektriciteit nodig. Gelukkig kan de geogste warmte in de winter als duurzame warmtebron worden gebruikt. Hierbij moet gebruik worden gemaakt van een warmtepomp. De benutting van deze duurzame energie leidt ertoe dat de gesloten kas, ondanks de aanzienlijke hoeveelheid extra elektriciteit toch tot een energiebesparing kan leiden. Dit onderzoek richt zich op een verbetering van het gesloten kasconcept, door een slimme combinatie van diverse besparingsmaatregelen te nemen.

1.1 Doelstelling

De doelstelling van dit onderzoek is drieledig:

1. Een inschatting maken van het besparingspotentieel ten opzichte van de referentie gesloten kas. Hiertoe worden enkele theoretische besparingsopties gesimuleerd. Als referentie dient de het gesloten kassysteem zoals beschreven in hoofdstuk 3.
2. Met behulp van een quickscan en een technologie roadmap inventariseren welke componenten beschikbaar zijn om het besparingspotentieel te bereiken
3. Bepalen van de meest interessante combinatie van besparingsopties en nader uitwerken van deze variant.

1.2 Leeswijzer

Het rapport is als volgt opgebouwd:

1. In hoofdstuk 2 wordt het verbeterde semi gesloten kasconcept toegelicht
2. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 de referentie gesloten kas beschreven.
3. In hoofdstuk 4 wordt een analyse gemaakt van het besparingspotentieel van het gesloten kas principe door het nemen van zes afzonderlijke maatregelen
4. Daarna wordt in hoofdstuk 5 een quickscan gemaakt van beschikbare componenten om de verbeterde (semi) gesloten kas samen te stellen
5. Tenslotte wordt in paragraaf 6.1 door middel van een technologie roadmap aangegeven welke zaken onderzocht dienen te worden

2 Verbeterde semi gesloten kasconcept

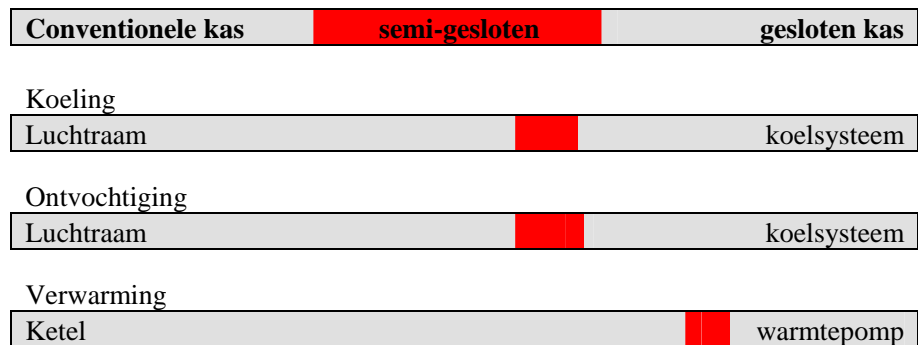
2.1 Definitie

In de conventionele kas wordt het koelen en ontvochtigen gerealiseerd met de luchtramen. Het volledig gesloten kassysteem gebruikt hiervoor een water/lucht koel en ontvochtigingssysteem. Nadeel hiervan is dat er gedurende een korte periode hoge piekbelastingen zijn voor dit systeem. Door semi gesloten te werken wordt voornamelijk bewerkstelligd dat deze piekcapaciteit omlaag kan. Hierdoor zijn er minder investeringen nodig in de luchtbehandelingssystemen. Doordat de kas niet te allen tijde gesloten is, kan de productie iets teruglopen ten opzicht van een gesloten kas. Hierdoor gaat mogelijk de energie efficiency index omlaag. Deze index geeft een verhouding tussen de gebruikte hoeveelheid primaire energie per kilo product. De situatie die bij het opstellen van deze index in 1980 gangbaar was is op 100 gesteld. Het semi gesloten kasconcept is dus een geconditioneerde kas, waarbij een economisch optimum is gezocht tussen gesloten houden en openen van de luchtramen bij hoge instraling.

Het omlaag brengen van de piekbelasting kan door verschillende technieken:

1. Gebruiken van de luchtramen bij hoge koel/ontvochtigingsbehoefte. Dit heeft consequenties voor de opbrengst voor die perioden, aangezien het verhoogde CO₂ niveau niet kan worden gehandhaafd bij geopende ramen. De opbrengsten zijn in die perioden vaak ook lager door het grotere aanbod op de markt.
2. Beperken van de instraling gedurende bepaalde perioden. Gedacht kan worden aan nieuwe typen buitenschermen, regelbare coatings of filteren van NIR. Door de ontwikkeling van de gesloten kassystemen komt het buitenscherm opnieuw in de belangstelling, aangezien hiermee de capaciteit van de installaties kan worden verkleind, terwijl de kas wel gesloten kan blijven.

In feite is de semi gesloten kas een combinatie van een conventionele en een gesloten kas. In Figuur 1 wordt gevisualiseerd hoe de semi gesloten kas gebruik maakt van de mogelijkheden van de conventionele en de gesloten kas. De rode blokjes geven aan in hoeverre de semi gesloten kas neigt naar een conventionele of naar een gesloten kas. In de volgende paragraaf zullen de achtergronden bij deze definitie worden verklaard.



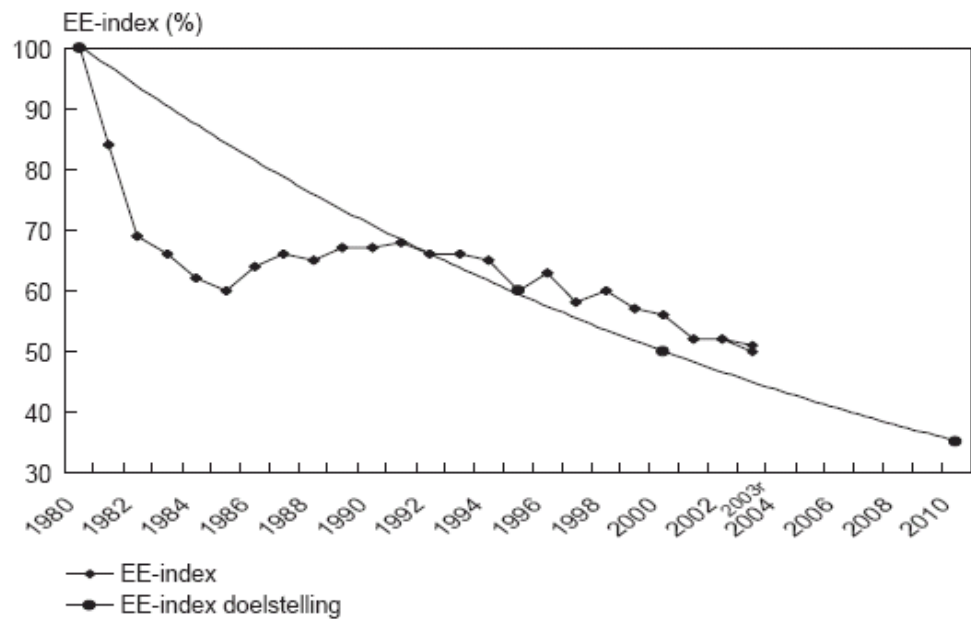
Figuur 1 Verhoudingen tussen conventioneel, gesloten en semi-gesloten telen.

2.2 Achtergronden

2.2.1 *Glami / Kyoto doelstellingen*

De sector is momenteel in discussie of en wanneer er overgestapt gaat worden op de Kyoto doelstellingen en hoe dat dan gemeten moet worden. Medio 2006 wordt op dit vlak een uitspraak verwacht. Verwacht wordt dat de CO₂ uitstoot fors beperkt moet worden. De toelaatbare CO₂ uitstoot is afhankelijk van het totale areaal glastuinbouw. Bij een areaal tot 10500 ha. mag er 6,5 Miljoen ton CO₂ (komt overeen met 34,9 m³ aardgas per m² kasoppervlak) geproduceerd worden en bij een areaal tot 11000 ha. mag er 7,1 Miljoen Ton CO₂ (komt overeen met 36,4 m³ aardgas per m² kasoppervlak) geproduceerd worden (Bot, 2005).

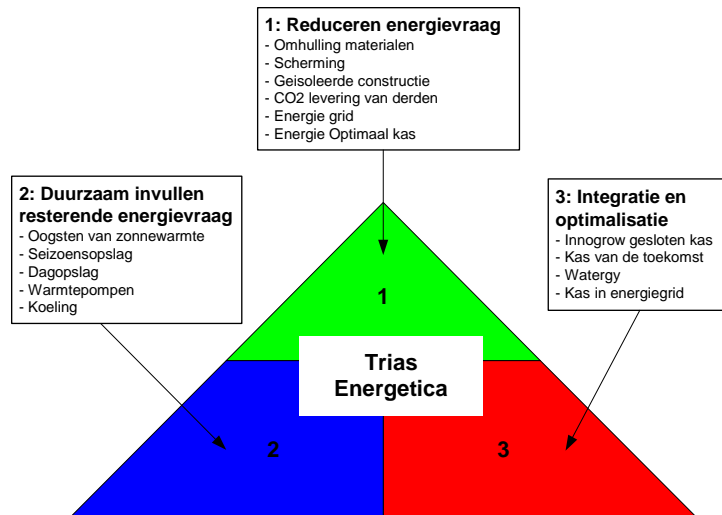
Voor het bereiken van de GlaMI doelstellingen moet in 2010 de energie-index verlaagd zijn tot 65% ten opzichte van 1980.



figuur 2 Energie Efficiency index en doelstellingen vanaf 1980. Bron: LEI

2.2.2 *Gebruik van fossiele brandstoffen*

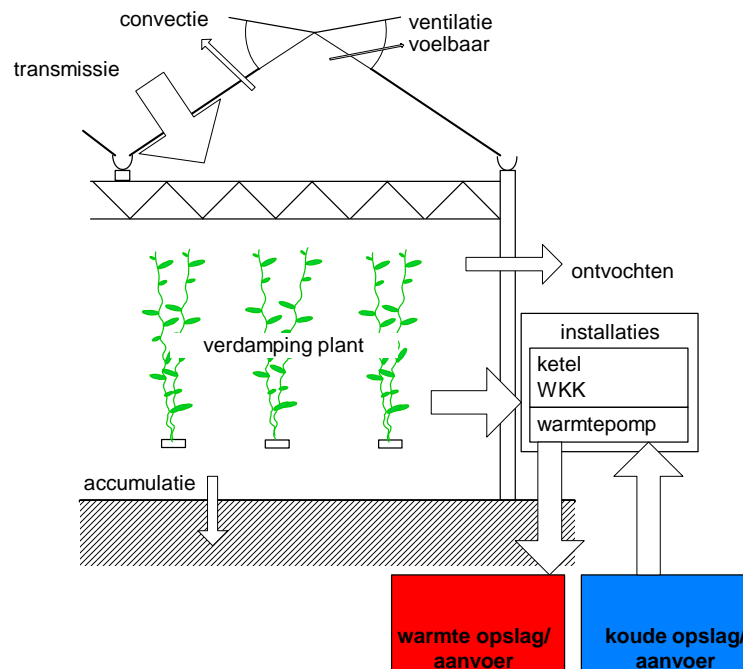
Om te komen tot een optimaal ontwerp van de semi gesloten kas moet wordt gestreefd naar een minimalisatie van de input van fossiele brandstoffen. Wanneer de werkwijze van de Trias Energetica gevolgd wordt moet er onder andere gezocht worden naar input van duurzame energiebronnen. Veel van deze opties worden al toegepast, en zijn uitgewerkt in het project Energie Optimaal Kas (Glastuinbouw en Milieu, 2000). Het minimaliseren van het gebruik van fossiele brandstoffen blijft cruciaal voor het verminderen van de CO₂ uitstoot.



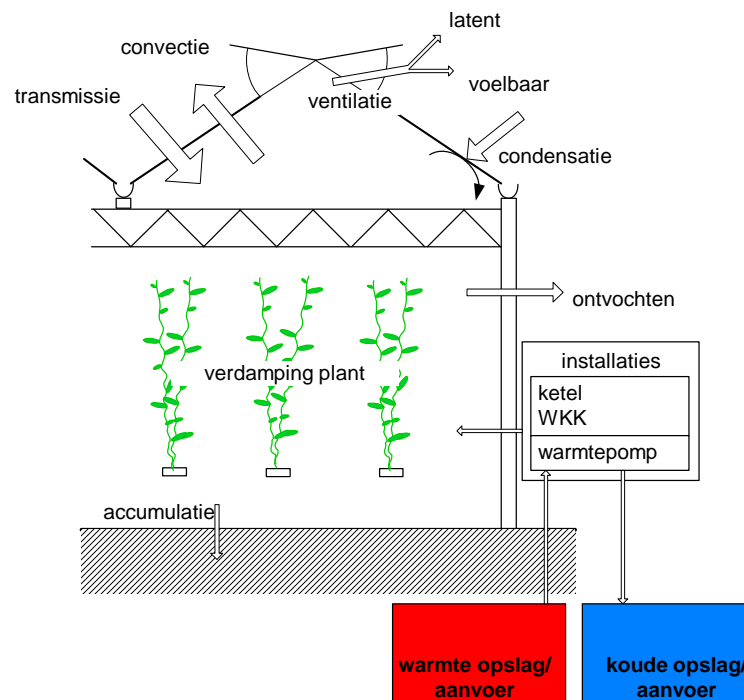
figuur 3 Energie De Trias energetica

2.2.3 *Systeemgrenzen*

Aan de hand van het onderzoek van (Dueck et al., 2004) wordt inzichtelijk gemaakt hoe de energiestromen in een tomaten kas eruit zien. In figuur 4 en 5 zijn de energiestromen schematisch weergegeven voor een zomerse en een winterse dag. Hierbij wordt uitgegaan van een onbelichte teelt. Onder de schema's staat een verklarende woordenlijst



Figuur 4 Schematische weergave van de energiestromen in de zomer.



Figuur 5 Schematische weergave van de energiestromen in de winter.

- Transmissie: Netto warmte-instraling door de zon.
 Convectorie: Warmteoverdracht door het glas aan de lucht.
 Voelbaar: Temperatuurverandering door ventilatie
 Latent: Verdamping door ventilatie.
 Accumulatie: Opwarming bodemmassa en constructie

3 Gesloten referentie kas

3.1 Conventionele kassen

Gangbare kassen zijn uitgerust met regelbare ventilatieopeningen om warmteoverschotten die ontstaan door instraling van de zon af te voeren. Ook worden deze ramen gebruikt om droge buitenlucht binnen te laten wanneer de luchtvochtigheid in de kas te hoog oploopt. In de winter en 's nachts wordt de kas verwarmd. De warmtebehoefte die daaruit voort komt hangt sterk af van de teelt. Een moderne tomatenteelt in een kas met een beweegbaar scherm gebruikt voor de verwarming op jaarbasis ongeveer 1450 MJ en een Fresiateelt niet veel meer dan 500 MJ.

De hoeveelheid warmte die uit de kas moet worden afgevoerd om het temperatuurniveau op een voor het gewas gunstig niveau te houden is veel groter dan de warmtevraag. In de tomatenteelt wordt via de ramen ongeveer 1800 MJ afgevoerd en in de Fresiateelt moet ruim 2300 MJ worden afgevoerd (deels via grondkoeling).

3.2 De essentie van het gesloten kassysteem

Idee achter de gesloten kas is om de overtollige warmte in de zomer niet middels uitwisseling met buitenlucht af te voeren, maar via luchtbehandelingssystemen te onttrekken en op te slaan. Zo zou vernietiging van warmte worden voorkomen en wordt een energiebesparing mogelijk. Vanuit de optiek van tuinders is niet alleen de energiebesparing interessant, maar geeft de sluiting van de kas grote mogelijkheden in de vermindering van de ziekte- en plagendruk, een verbeterde luchtvochtigheidsbeheersing en biedt het de mogelijkheid om continu een hoge CO₂-concentratie aan te houden.

Het koelen van de kaslucht met luchtbehandelingssystemen vereist echter de inzet van veel elektriciteit. Dit omdat een grote hoeveelheid lucht moet worden verplaatst en omdat veel koelwater moet worden rondgepompt. Het overgrote deel van deze elektriciteit wordt in de vorm van warmte teruggevonden in het warmteoverschot van de kas. Als deze elektriciteit ook nog met een WKK wordt geproduceerd komt ook de afvalwarmte van de WKK terug in de vorm van een warmteoverschot.

Het feitelijke warmteoverschot van een gesloten kassysteem is dus niet alleen afkomstig van het verschil tussen ingestraalde zonne-energie en eigen gebruik voor de verwarming van de kas, maar wordt vergroot ten gevolge van het elektriciteitsverbruik. Vooral bij gebruik van een WKK als productiesysteem voor deze elektriciteit is het feitelijke overschot al gauw 20 tot 30% meer dan het oorspronkelijke warmteoverschot van de kas.

Gegeven het feit dat het warmteoverschot, zelfs los van het elektriciteitsverbruik, groter is dan de warmtevraag, houdt een gesloten kas op jaarbasis altijd warmte over. Dit overschot kan worden vernietigd, maar het kan ook bijdragen in de verwarming van een andere kas(afdeling). Vanuit het oogpunt van energiebesparing verdient deze tweede optie uiteraard de voorkeur. In dat geval ontstaat er bij vergelijking van verschillende uitvoeringsvormen van gesloten kassen een variatie in het relatief oppervlak van het

gesloten gedeelte ten opzichte van het open gedeelte. De voordelen ten aanzien van het kasklimaat (productiestijging) zijn dan beperkt tot het kleinere, gesloten oppervlak. Daarom wordt in alle berekeningen niet alleen ingegaan op de daling van het energieverbruik per m² kas, maar ook op het specifiek verbruik (het verbruik per eenheid product).

3.3 Uitgangspunten

In dit rapport passeert een aantal verbeteropties voor het gesloten kassysteem de revue. Al deze opties worden afgezet tegenover de gesloten referentiekas. Er kan echter nauwelijks worden gesproken van een gesloten referentiekas omdat er in de praktijk slechts enkele gesloten kassystemen zijn, waaraan nog doorlopend aanpassingen worden verricht. Er is gekozen om te kiezen voor een conservatieve configuratie, zodat de potentie van de verschillende verbeteropties goed inzichtelijk wordt gemaakt. De referentiekas is gebaseerd op een inschatting van het Innogrow systeem zoals dat in eerste instantie bij Themato is geïnstalleerd. Inmiddels is het Innogrow systeem verder verfijnd en verbeterd en niet meer vergelijkbaar met de referentiekas.

3.4 Energieberekeningen gesloten referentiekas.

De basis voor berekeningen aan een gesloten kas is de warmtevraag van de kas en het zomerse warmteoverschot. Met nadruk wordt gesproken over het zomerse warmteoverschot want er wordt aan een gesloten kas ook warmte onttrokken tijdens de ontvochtiging. Hierop wordt verderop nader ingegaan. Een moderne tomatenkas met energiescherm heeft een warmtevraag van ongeveer 1450 MJ* en een zomers warmteoverschot van ongeveer 1800 MJ. Van de warmtevraag is 180 MJ gerelateerd aan de ontvochtiging via ventilatie. Dit verbruik ontstaat tijdens het ventileren op vocht. Uitgaande van een gemiddelde verhouding van 1 op 1 tussen latente en voelbare warmteafvoer gaat deze 180 MJ verloren bij de afvoer van 80 kg vocht per m² per jaar.

Bij ontvochtiging met luchtbehandelingskasten zal de verhouding tussen latente en voelbare warmteonttrekking iets minder gunstig liggen. Er wordt gerekend met 46% latent en 54% voelbaar, wat betekent dat er per eenheid latente warmte 1.2 eenheden voelbare warmte worden afgevoerd. Hierdoor neemt de warmtevraag van de gesloten referentiekas toe naar 1486 MJ/m². Tijdens de ontvochtiging wordt de 180 MJ latente warmte aan het koelwater toegevoegd plus de 180*1.2=216 MJ voelbare warmte. Het uiteindelijke warmteoverschot van een kas die zowel bij koeling als bij ontvochtiging gesloten wordt gehouden wordt daarmee 1800+396 = 2196 MJ/m² per jaar.

Het elektriciteitsverbruik van de luchtbehandelingssystemen en de pompen bedraagt in de huidige uitvoeringsvorm van de gesloten referentiekas ongeveer 40 kWh per m² per jaar*, waarvan 90% voor rekening komt van de luchtbehandelingskasten. Naar schatting 80% van dit elektriciteitsverbruik wordt ingezet op momenten van koeling en 20% tijdens warmtebehoefte. Het elektriciteitsverbruik van de luchtbehandelingskasten zal de kaslucht verwarmen en het verbruik van de pompen zal voor de helft het water verwarmen en voor de helft verloren gaan in de motorkoeling. Deze overwegingen

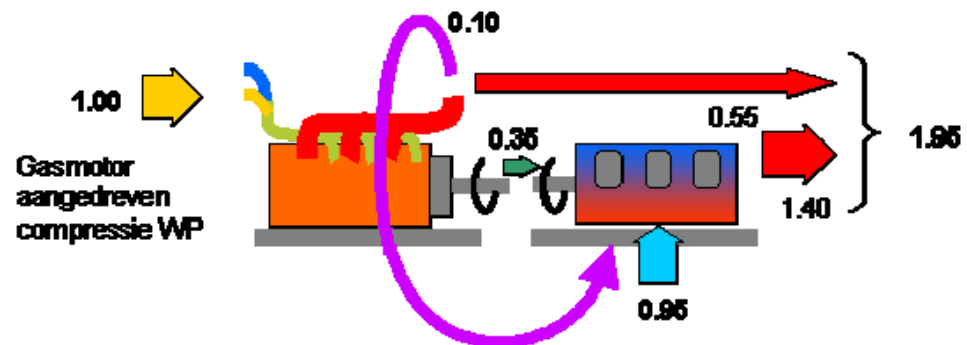
* In het eindrapport "Telen in een gesloten tuinbouwkas; praktijkexperiment", Schoonderbeek et al., Ecofys, 2003, wordt van een veel grotere warmtevraag uitgegaan. Dit komt doordat in betreffend experiment geen energiescherm was opgenomen.

* Dit elektriciteitsverbruik is bijna de helft van het verbruik dat in het rapport "Telen in een gesloten tuinbouwkas; praktijkexperiment" wordt genoemd.

resulteren in een kleine daling van de uiteindelijke warmtevraag met 27 MJ naar 1459 MJ. De zomerse koelbehoefte stijgt hierdoor met 109 MJ.

In de referentiekas wordt gebruik gemaakt van een WKK ter invulling van de elektriciteitsbehoefte. In de periode waarin de kas moet worden verwarmd kan de afvalwarmte van de WKK prima worden gebruikt. In de zomerperiode, waarin 32 kWh nodig is voor de aandrijving van de ventilatoren en de pompen, zal de bij de WKK vrijkomende afvalwarmte niet kunnen worden benut en zal deze zorgen voor een verdere toename van het warmteoverschot. Bij een elektrisch rendement van 38% en een thermisch rendement van 55% bedraagt de warmteopname in het motorcoolwater $32 \cdot 3.6 / 38 \cdot 55 = 167$ MJ, zodat de totale warmteproductie van de full-scale gesloten kas op 2474 MJ/m^2 uitkomt. Overigens zal het gasverbruik van de WKK tijdens warme dagen zodanig zijn dat met de rookgassen ongeveer 10 gram CO_2 per m^2 kas per uur vrijkomt. Dit is ruim voldoende om een hoog producerend gewas, met een maximale opname van zo'n 8 tot 9 gram CO_2 per m^2 uur, van CO_2 te voorzien.

Een deel van het zomerse warmteoverschot zal de gesloten referentiekas zelf weer gebruiken voor de verwarming van de kas. Wanneer deze verwarming plaatsvindt met een elektrisch aangedreven koelmachine, waarbij het aandrijfvermogen wordt voortgebracht middels een WKK dan zal bij een $\text{COP}=3.7$ elke eenheid afgegeven warmte voor 49% onttrokken worden aan het ondergronds opslagsysteem en voor 51% afkomstig zijn uit primaire energie. Dit blijkt uit figuur 6.



figuur 6 Verdeling primaire en duurzame energie bijverwarming met een WKK aangedreven verwarming

Bij een warmtevraag van 1459 MJ zou de gesloten referentiekas dus theoretisch met 740 MJ primaire energie verwarmd kunnen worden (22 m^3 aardgas), waarbij er 719 MJ aan het ondergronds opslagsysteem zou worden onttrokken. Hiervoor zou de warmtepomp echter op het piekvermogen moeten worden gedimensioneerd, wat in economische zin erg ongunstig zou zijn. Daarom zal ook een deel van de warmtevraag door een standaard ketel worden ingevuld. Wanneer dit op 10% van de totale warmtebehoefte wordt gesteld (en waarvoor de ketel 4.6 m^3 aardgas zal verbruiken) blijft er nog 1314 MJ over. Naast de warmteproductie van de ketel tijdens pieken in de verwarmingsbehoefte is er ook nog 42 MJ afvalwarmte uit de WKK in verband met de elektriciteitsproductie voor de luchtbehandeling en het aandrijven van pompen in de winterperiode.

Al met al kan de warmtepomp in de gesloten referentiekas niet meer dan 1272 MJ invullen. Hiervan zal $0.49 \cdot 1272 = 622$ MJ van het warmteoverschot gebruikt worden voor de verwarming. De aandrijving van de warmtepomp vergt 650 MJ, waarmee een

gasverbruik van 20.5 m^3 gemoeid is. Het gasverbruik voor de verwarming van de gesloten referentiekas bedraagt dan dus $4.6 + 20.5 = 25.1 \text{ m}^3$ aardgas per m^2 per jaar. De aandrijving van pompen en ventilatoren verhoogt het winterse gasverbruik met 2.4 m^3 naar 27.5 m^3 .

In de warme periode is er (vrijwel) geen warmtevraag, maar de aandrijving van pompen en ventilatoren in de zomer vraagt een duidelijke hoeveelheid elektriciteit (32 kWh). Uitgaande van een elektrisch rendement van 38% en een thermisch rendement van 55% is hiervoor 9.6 m^3 aardgas nodig. Het totale gasverbruik van het gesloten deel van de referentiekas komt dan op 37.1 m^3 . (in de spreadsheet hierna is het gasverbruik voor de elektriciteitsproductie onderverdeeld naar winter en zomergebruik)

De berekening gaat ervan uit dat de restwarmte van de WKK in de winter wordt ingezet voor verwarming en in de zomer wordt gekoeld (geogst in de aquifer). Het is ook mogelijk dat een andere afnemer is voor de zomerse restwarmte. In dat geval kan het gesloten aandeel kassen groter worden.

De hiervoor beschreven redenering kan worden teruggevonden in de tabel op de volgende pagina.

Uitgangspunten van de teelt		
Warmtevraag	1450 MJ =	45.8 m ³
Ontvochtiging tijdens warmtevraag	80 kg	181
Zomers CO ₂ -gebruik	30 kg	
Meerproductie gesloten gedeelte	22 %	

Uitgangspunten hardware	
COP Warmtepomp	3.7
Thermisch rendement WKK	55%
Elektrisch rendement WKK	38%

Kentallen luchtbehandeling gesloten kas			
Elektriciteit klimatisering	40 kWh	→ primaire energie WKK	379 MJ
Aandeel luchtbehandeling	90%	afvalwarmte WKK	208 MJ
Fractie el. gebruik in winter	20%		
Voelbaar/latent verhouding	1.2	zomer 167	winter 42

Warmte en energiestromen

	Gesloten deel per m ²	Niet gesloten deel per m ²
Warmtevraag	1486	1450
Af: El. warmte input bij verw.	-27 +	0 +
Verwarmingsbehoefte	1459	1450
Af: 10% ketelw. bij pieken	-145 MJ = 4.6 m ³	-145 MJ = 4.6 m ³
Afvalwarmte WKK in winter	-42	0
Warmte door CO ₂ dosering	0 +	-533 + 16.9 m ³
In te vullen warmtevraag door WP	1272	772
Aandeel uit primaire energie	650 MJ = 20.5 m ³	394 MJ = 12.5 m ³
Aandeel duurzame energie	622	377
Prim. energ voor luchtbeh. winter	76 MJ = 2.4 m ³ +	0 0.0 m ³ +
Totaal primaire energie winter	27.5	33.9

Koelen in gesloten fractie

Zomerse Koelbehoefte	1800
Bij: Warmte ontvochtigen	398
El. warmte input bij koelen	109
Zomerse WKK warmte	167 +
Totale Koelbehoefte	2474
Prim. energie voor luchtbeh. zomer	303 MJ = 9.6 m ³
Totaal prim. energie verbruik	gesloten deel 37.1 niet gesloten deel 33.9

Warmteoverschot in aquifer voor niet gesloten deel 1852 MJ
 ha open per ha gesloten 4.9

Energiegebruik t.o.v. standaard kas van 5.9 ha:	75%	Gemiddeld
Energieefficiency t.o.v. standaard kas	72%	gasverbruik: 34.4 m³

Naast de warmtestromen in het gesloten gedeelte toont het rekenschema ook de warmtestromen in het niet-gesloten gedeelte. In dat gedeelte van de kas ondervindt de warmtepomp een grote concurrentie van de warmte die vrijkomt bij de productie van CO₂. De CO₂-productie van de WKK ten behoeve van de aandrijving van de ventilatoren in het gesloten deel is namelijk bij lange na niet voldoende om aan de veel grotere vraag in het open gedeelte tegemoet te komen.

Voor een gemiddelde tomatenteelt kan gesteld worden dat er ongeveer 45 kg CO₂ voor de CO₂-dosering wordt gebruikt waarvan zo'n 30 kg in de zomerperiode zal vallen. Wanneer deze CO₂ met de ketel wordt gemaakt ontstaat hierbij een warmteproductie

van 533 MJ. Deze warmte kan niet ook nog eens met de warmtepomp worden geproduceerd, waardoor de warmtevraag die potentieel door de warmtepomp aan het niet gesloten gedeelte geleverd kan worden niet meer is dan 772 MJ (1450 MJ – 145 MJ piekverwarming door de ketel – 533 MJ in verband met CO₂ dosering).

Middels dezelfde berekening die voor het gesloten gedeelte gebruikt is, kan worden bepaald dat de warmtepomp voor de levering van deze warmte 394 MJ primaire energie nodig heeft (12.5 m³ aardgas) en dat deze daarvoor 377 MJ aan het ondergrondse energieopslagsysteem onttrekt. Het niet-gesloten deel van de kas heeft hierdoor een primair energieverbruik van 12.5 m³ voor de warmtepomp, 16.9 m³ aardgas voor de CO₂-dosering en 4.6 m³ aardgas voor piekwarmtevraag. In totaal is dit 33.9 m³.

Om alle warmte die door het gesloten deel van de kas in het ondergrondse energieopslagsysteem wordt gebracht te benutten voor de verwarming van de kas laat het rekenschema zien dat er per hectare gesloten kas 4.9 ha niet gesloten kas nodig is. Dit volgt uit de deling van het warmteoverschot in het opslagsysteem (2474 MJ – 622 MJ, het eigen gebruik van de gesloten referentiekas) door de onttrekking van warmte door de warmtepomp in het niet gesloten gedeelte (377 MJ). Het totale gemiddelde gasverbruik van een kas, bestaande uit 1 ha gesloten kas en 4.9 ha niet gesloten kas komt daarmee op 34.4 m³ gas per m² per jaar, wat 25% minder is dan de 45.8 m³ die als referentie is genomen.

De meerproductie van de totale kas is in dit geval $22\%/5.9 = 3.72\%$. De formule waarmee de energie-efficiencyindex kan worden berekend, en waarmee energiebesparing en productietoename samen worden genomen komt op grond van bovenstaande resultaten op een efficiencyindex van 72. Het energieverbruik per eenheid product in de referentiekas leidt tot een theoretisch maximaal haalbare energiebesparing van 25% en een verlaging van het verbruik per eenheid product met 28%.

Tot slot wordt nog opgemerkt dat bovenstaande berekening ook geldt wanneer er sprake is van een gesloten en een niet gesloten bedrijf (in een oppervlakteverhouding van 1 op 4.9) die onderling warmte en koude uitwisselen.

3.5 Conclusie

De referentiekas leidt tot een theoretisch maximaal haalbare energiebesparing van 25% en een verlaging van het verbruik per eenheid product met 28%. Deze besparingen zullen per praktijkgeval verschillen

4 Besparingspotentieel gesloten kasconcept

4.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is de gesloten referentiekas beschreven. In dit hoofdstuk worden enkele verbeteropties voor de referentiekas besproken. Bij alle verbeteropties wordt de verhouding tussen gesloten en open kas zodanig aangepast dat de kas op jaarbasis energetisch in balans is. Dit betekent dat voor iedere doorgerekende verbeteroptie de gesloten fractie anders is. De verbeteringsopties die in dit rapport worden besproken, worden beoordeeld op hun effect op het besparingspercentage per m² kasoppervlak, maar ook op het effect op specifiek verbruik (het verbruik per eenheid product). Alleen op die laatste wijze kan het effect van de productievermeerdering, die middels het sluiten van de kas kan worden gerealiseerd, worden meegenomen.

De vraag die in dit rapport centraal staat is of de hierboven genoemde besparingsgetallen verbeterd kunnen worden door technische verbeteringen aan het gesloten kassysteem. Daartoe worden een 6-tal verbeteringsopties beoordeeld.

1. Verhoging isolatiewaarde dekmateriaal
2. Overstap naar semi gesloten kas
3. Vergroting van verwarmend oppervlak
4. Energiezuiniger luchtverplaatsing
5. Aansluiting externe CO₂-bron
6. Verminderen koelbehoefte dmv spectraal selectieve kasbedekking

In de eerste plaats wordt gekeken naar het effect van een hogere isolatiegraad van de kas in de vorm van een dubbel kasdek. Hierdoor neemt het warmteoverschot van het gesloten deel van de kas belangrijk toe en de warmtevraag van de kas sterk af.

Bij de tweede verbeteringsoptie is gekeken naar het effect van het afstappen van een volledig gesloten kas. Wanneer de kas zodanig gekoeld zou worden dat elke m² precies evenveel koude gebruikt als het in de winter bij gebruik van de warmtepomp produceert dan is de semi gesloten kasfractie gelijk 1.

In de derde plaats is een inschatting gemaakt van het effect van een zodanige vergroting van het verwarmend oppervlak van het verwarmingssysteem dat de COP van de warmtepomp op 6 uitkomt. Het gevolg hiervan is dat verhoudingsgewijs een groter deel van de kas gesloten kan worden. Daarnaast kan de COP ook verhoogd worden door de bronzijde van de warmtepomp te optimaliseren.

In de vierde plaats is gekeken naar het effect van een zuiniger luchtverplaatsingssysteem. Aangenomen wordt dat deze van 40 kWh per m² af kan nemen naar 20 kWh/m².

Als vijfde is gekeken naar het effect van de invulling van de CO₂-behoefte van het open deel van de gesloten referentiekas door een externe bron (bijvoorbeeld CO₂ uit de Botlek). Hierdoor kan een groter deel van het bedrijf gesloten worden uitgevoerd.

Ten slotte wordt gekeken of de instraling in de kas verminderd kan worden. Door de kas minder warm te laten worden is er minder koelbehoefte en hoeft er minder energie

gestoken te worden in het actief koelen van de kas. Het verminderen van de instraling kan bijvoorbeeld door middel van spectraal selectief glas, dit laat het gedeelte van het licht wat nodig is voor de groei naar binnen, maar filtert het gedeelte wat alleen verwarmt (NIR).

4.2 Verhoging van de isolatiewaarde van het dekmateriaal

Wanneer de isolatiewaarde van de kas verhoogd wordt neemt de warmtevraag van de kas af en het warmteoverschot van het gesloten deel toe. Daarnaast neemt het aantal momenten waarop moet worden gelucht om het overtollig vocht af te voeren toe. Dit komt doordat er minder vocht tegen het koude kasdek condenseert. Toch zal de totale hoeveelheid vocht die op momenten dat er ook warmtevraag is moet worden afgevoerd niet veel toenemen. Dit omdat er door het verminderde warmteverlies vaker een warmteoverschot optreedt. Deze twee effecten tegen elkaar afwegend wordt de inschatting gemaakt dat onder een dubbel kasdek 90 kg vocht moet worden afgelucht tijdens verwarmingsbehoefte.

Door de toepassing van een dubbel dekmateriaal daalt de warmtevraag van een kas naar schatting van 1450 MJ/(m² jaar) naar 1150 MJ/(m² jaar) (een besparing van 20%). De koelbehoefte wordt verondersteld te stijgen naar 2000 MJ/(m² jaar).

Wanneer deze gegevens in het rekenschema van pagina 8 worden ingevuld blijkt dat het niet-gesloten deel dat nodig is om de kou voor het gesloten deel te maken oploopt tot 90% van het bedrijf. Het gasverbruik daalt evenwel fors naar 28.9 m³, waardoor de toepassing van een dubbel dek de energiebesparing van de gesloten referentiekas op 37% brengt (van 45.8 m³ enkel dek standaard naar 28.9 m³/(m² jaar) voor een dubbeldeks kas waarvan 10% gesloten is). Indien het dubbele kasdek even veel licht zou doorlaten als het enkele kasdek (zoals bij zigzag kasdekmateriaal) dan is de verbetering op basis van specifiek verbruik 38%, dus 1 %-punt hoger dan het verbruik per m². Als het dubbele kasdek tot minder licht leidt zal de besparing op specifiek energieverbruik ondanks de gesloten kas kleiner worden dan de besparing op basis van verbruik per m².

Het is goed om op dit punt aan te geven dat het dubbele kasdek bij een gesloten kas in absolute termen slechts 5.5 m³ extra besparing oplevert. Dit betekent dat de additionele jaarkosten van een dubbel kasdek bij de huidige marktprijzen in de orde van 50 cent per m² moeten liggen alvorens de toepassing van zo'n dekmateriaal voor gesloten kassen interessant zou zijn. Voor standaard kassen is zo'n dek al aantrekkelijk bij extra jaarkosten in de orde van 80 cent per m².

4.3 Overstap naar semi gesloten telen

In paragraaf 3.3 is reeds naar voren gekomen dat het gebruik van het luchtbehandelingssysteem voor de ontvochtiging meer verwarmingsenergie vergt dan het ventileren op vocht middels buitenlucht. Dit kan gemakkelijk worden ingezien uit het feit dat in een luchtbehandelingskast vochtige kaslucht wordt vervangen door koude lucht met vrijwel 100% RV, terwijl bij ventilatie met buitenlucht vrijwel altijd lucht met een lagere RV wordt uitgewisseld. 's Nachts is er voor de CO₂ dosering geen belang bij de sluiting van de kas zodat er 's nachts gemakkelijk met ramen ontvochtigd zou kunnen worden.

Ook als het overdag somber en koud is zou een kiertje lucht geen probleem zijn omdat het CO₂-verlies dan zou kunnen worden gecompenseerd door de rookgas-CO₂ uit de WKK die dan de warmtepomp aandrijft. De toename van de warmtevraag die bij de gesloten referentiekas naar voren komt zal bij een semi-gesloten kas dus niet optreden.

Het belangrijkste verschil tussen een gesloten en een semi gesloten kas is dat bij de tweede ervoor kan worden gekozen om een balans na te streven tussen de hoeveelheid warmte die in de zomer via de kaskoeling wordt verzameld en de hoeveelheid koude die in de winter middels de warmtepomp wordt geproduceerd. Wanneer deze balans tot stand is gebracht is de semi-gesloten kas fractie gelijk aan 1. De consequentie hiervan is dat de zomerse koeling veel lager komt te liggen. De warmteonttrekking per m² kas komt dan veel lager te liggen en het elektriciteitsverbruik voor de luchtbehandeling in de zomer daalt ook fors.

Al itererend in het rekenschema in paragraaf 3.3 is geconstateerd dat een evenwicht tussen koudeproductie en koudegebruik kan worden gevonden bij een jaarlijkse kaskoeling van 352 MJ. Hierbij is er tevens rekening mee gehouden dat met het verminderen van de koelcapaciteit ook het elektriciteitsverbruik, dat in verband staat met het ventileren, fors zal afnemen tot 8 kWh per m² semi gesloten kas.

De warmteonttrekking zal echter niettemin tot een beperking van het ventilatieverlies leiden waardoor er met minder rookgas CO₂ (ingeschat op 5 kg minder) toch een duidelijke meerproductie behaald kan worden. Deze meerproductie wordt hier ingeschat op 3%.

Het overall effect blijkt onder deze aannamen een iets lagere energiebesparing dan met de referentiekas gerealiseerd kan worden (11.9 m³ aardgas in plaats van 11.4 m³). Het effect op de energie-efficiëntie is (per definitie) zeer sterk afhankelijk van gerealiseerde productietoename. Hierover is tot nu toe, voor de vruchtgroentegewassen, nog geen informatie beschikbaar. Wordt er echter uitgegaan van de bovengenoemde 3% productiestijging dan komt het specifiek verbruik van de semi gesloten kas op 74% ten opzichte van de referentie. De semi-gesloten kas zou in dat geval 2 %-punten minder scoren dan de referentiekas.

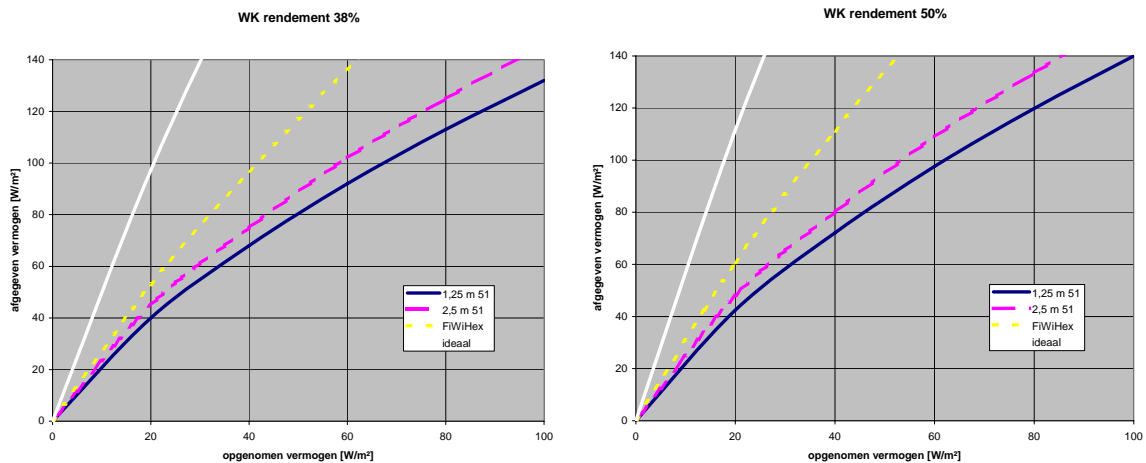
4.4 Vergroting van het VO van het verwarmingssysteem

In het rekenschema is te zien dat de warmte die middels een gasmotor aangedreven warmtepomp aan een kas wordt geleverd voor grofweg de helft bestaat uit duurzame energie en voor de andere helft afkomstig is uit fossiele energie. Wanneer deze verhouding meer ten gunste van duurzame energie zou komen te liggen zou de primaire energiebesparing van de kas kunnen oplopen. Bij een verdubbeling van het VO stijgt de gemiddelde COP van de warmtepomp van 3.7 naar 5.

Zoals getoond in de figuur op pagina 13 is de warmte uit een warmtepomp altijd slechts voor een deel afkomstig uit de laagwaardige bron en voor het overige deel uit hoogwaardige energie. Zoals beschreven is deze verhouding afhankelijk van de COP. Deze is afhankelijk van de benodigde aanvoertemperatuur.

Nu is de relatie tussen aanvoertemperatuur en afgegeven vermogen geheel afhankelijk van het verwarmend oppervlak (VO) en de daarbij geldende warmteoverdrachtscoëfficiënt. Naarmate het VO en/of de warmteoverdrachtscoëfficiënt van een kasverwarmingssysteem groter worden zal het primaire energiegebruik per

eenheid afgegeven warmte bij gebruik van een warmtepomp afnemen. In onderstaande figuur zijn een aantal karakteristieken van deze relatie weergegeven.



figuur 7 Verband tussen opgenomen primaire energie en afgegeven warmte bij verschillende WKK rendementen en verschillende afgiftesystemen.

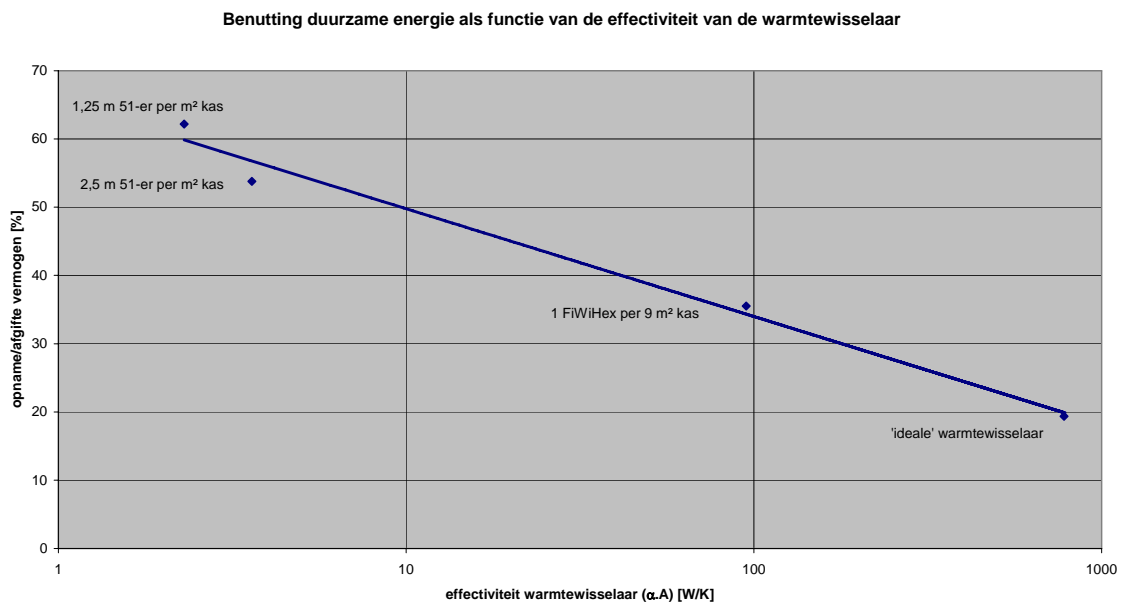
Figuur 7 laat zien dat voor een verwarmingsvermogen van 100 W/m^2 met een standaard buisverwarmingssysteem (1,25 meter 51-er per m^2 kas) en een warmtepomp die wordt aangedreven door een standaard WKK ongeveer 70 W primaire energie nodig is. Bij een hoge warmtevraag is het aandeel duurzame energie met dat verwarmingssysteem dus 30%. Een verdubbeling van het VO (2,5 m 51-er per m^2 kas) doet het aandeel duurzame energie bij deze warmtevraag toenemen naar 40%. Indien gebruik zou worden gemaakt van een dunne-draad warmtewisselaar (FiWiHex) als verwarmingssysteem (in de configuratie zoals op dit moment wordt voorzien in “de Energieproducerende Kas”, verder beschreven in paragraaf 5.5.6), dan kan 100 W verwarmingsvermogen worden geleverd met slechts 40 W primaire energie. Op basis van energetische beschouwingen van de referentiekas (pagina 18) is af te leiden dat met de referentiekas 100 W verwarmingsvermogen kan worden geleverd met circa 44 W primaire energie. Dit is meer dan bij de dunne-draadwisselaar, maar beduidend minder dan bij de dubbele 51'ers

In principe moet de warmteoverdracht nog verder kunnen worden verbeterd, zodat met circa 20 W primaire energie kan worden volstaan om 100 W warmte te leveren. De lijn voor zo'n 'ideale' warmtewisselaar is eveneens in de grafiek gegeven. Opgemerkt wordt dat dit wel economisch haalbaar dient te gebeuren. Bij de FiWiHex is het VO vergroot door gebruik te maken van zeer kleine koperen buisjes, het is de vraag of dit nog economisch interessant is. Een mogelijke verbetering is uitwijken naar een ander principe, bijvoorbeeld naar druppel- of misttechnieken. De 'ideale' warmtewisselaar is afgeschat aan de hand van een miststelsel. Hierbij wordt in plaats van buizen gebruik gemaakt van kleine druppels (water of olie). Hiermee is eenvoudiger een groter VO te behalen. Dit systeem dient niet verward te worden met de gangbare nevelsystemen, die zijn namelijk gebaseerd op verdampingskoeling.

Bij toename van het asrendement van de WKK komen alle lijnen wat steiler te lopen. Er is dan dus nog minder primaire energie nodig per eenheid afgegeven warmte. De curve voor het FiWiHex-systeem gaat een stuk steiler lopen, omdat deze niet alleen

elektriciteit voor de warmtepomp, maar ook voor de ventilator gebruikt en dus dubbel profiteert van een beter WKK rendement.

De lijnen lopen ook in het beginstuk overal steiler dan verderop in de curven. Dit betekent dat het aandeel duurzame energie in de verwarming afneemt naarmate het gevraagde verwarmingsvermogen toeneemt.



Figuur 8 Behoefte aan primaire energie als functie van de effectiviteit van de warmtewisselaar (=warmteoverdrachtscoëfficiënt × uitwisselende oppervlakte)

Indien het VO of de warmteoverdracht zodanig zou worden verhoogd dat de kas met een aanvoertemperatuur van 29 °C zou kunnen worden verwarmd dan zou de COP op kunnen lopen naar 6. Het verwarmen van de kas met zulke lage aanvoertemperaturen zal evenwel tot een groter elektriciteitsverbruik leiden. De aandrijfenergie zal naar verwachting toenemen aangezien grotere debieten dienen te worden rond gepompt en/of wordt gekozen voor gedwongen convectie.

Bij de kwantificering van het effect van een COP van 6 middels het rekenschema van pagina 8 is daarom bij de doorrekening van het effect van een hoge COP niet alleen het COP-getal verhoogd van 3.7 naar 6, maar ook het elektriciteitsverbruik (van 40 kWh naar 50 kWh per m²). Bovendien is een iets grotere fractie van het verbruik naar de winter gelegd (De variabele “Fractie el. gebruik in winter” is van 20% naar 25% gebracht).

Het meest in het oog springende resultaat van het vergroten van de COP naar 6 is dat de gesloten fractie aanzienlijk groter wordt (van 17% gesloten in de referentiesituatie naar 22% in de situatie met COP =6). Dit komt doordat een warmtepomp met een hogere COP meer koude per eenheid geleverde warmte kan maken, zodat er minder warmte vragend kasoppervlak nodig is om voldoende kou voor de gesloten referentiekas te maken.

Het geringere primair energieverbruik door de hogere COP verhoogt de energiebesparing per m² kas van 25% naar 33%. Daarnaast verbetert de energie-efficiency per eenheid product van 28% naar 36%.

4.5 Effect efficiëntieverbetering van luchtbehandeling

De luchtbehandeling in de gesloten referentiekas heeft een elektriciteitsverbruik van 40 kWh per m² per jaar. Wanneer deze door verdere verbeteringen aan de vermindering van de energieverliezen zou afnemen naar 20 kWh/m² dan blijkt dat de energiebesparing met 2 %-punten toeneemt naar 27%. Het geringer elektriciteitsverbruik leidt tot een kleiner warmteoverschot in het ondergronds energieopslagsysteem zodat er tegenover een hectare gesloten kas 4.5 ha open kas moet komen te staan om op een energiezuinige wijze voldoende koude voor de zomer te kunnen maken. De toename van de gesloten kasfractie is echter te klein (van 17 naar 18%) om tot een duidelijke meerproductie te leiden. De besparing in termen van energieverbruik per eenheid product stijgt daarom met dezelfde 2 %-punten naar 30%.

In vergelijking met de vorige optie blijkt het effect van verbeteringen aan de warmtepomp dus veel groter dan het effect van verbeteringen aan het luchtbehandelingssysteem.

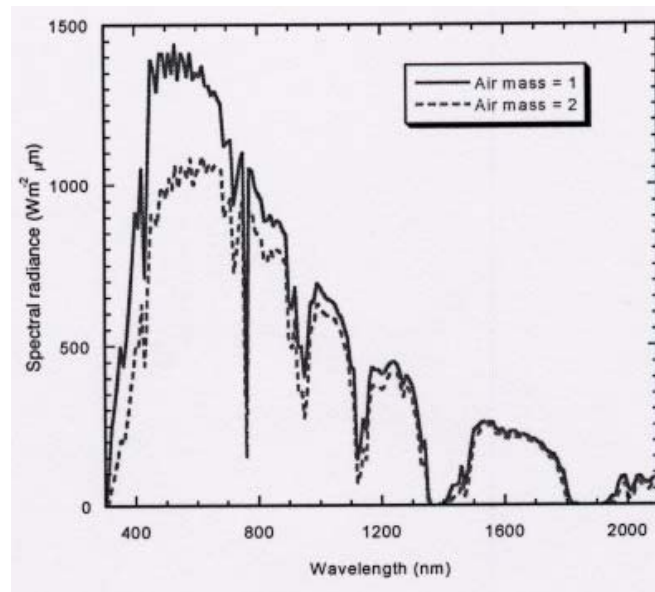
4.6 Aansluiting op externe CO₂-bron

Uit het rekenschema in paragraaf 3.3 blijkt dat het gasverbruik dat samenhangt met de CO₂-dosering een forse beperking oplevert voor de hoeveelheid warmte die de warmtepomp in het niet gesloten gedeelte van de kas kan leveren. Hierdoor is er een groot oppervlak niet gesloten kas nodig, waardoor de positieve invloed van de gesloten fractie van de kas op de productie wordt beperkt. Bovendien wordt de energiebesparing beperkt omdat in relatief mindere mate gebruik wordt gemaakt van het verzamelde warmteoverschot.

Indien de het gesloten gedeelte wordt aangesloten op een externe CO₂-bron of geheel gebruik zou maken van zuivere CO₂ dan zou de warmtevraag van het niet gesloten gedeelte van de kas die door de warmtepomp kan worden ingevuld toenemen met 533 MJ. In het rekenschema stijgt dan de koudeproductie per m² niet gesloten kas, zodat het benodigde oppervlak waarmee koude wordt geproduceerd terugloopt van 4.9 ha (gesloten referentiekas) naar 2.9 ha. De energiebesparing neemt hierdoor toe naar 38 % en de besparing per eenheid product neemt toe naar 41%. Hieruit blijkt dat het gebruik van een externe CO₂ bron de meest perspectiefvolle optie is om de prestaties van de gesloten referentiekas te verbeteren. Overigens wordt bij de GeslotenKas bij Themato van Innogrow mede om deze reden zuivere CO₂ gedoseerd. Dit heeft ook te maken met de aanwezigheid van CO₂ infrastructuur (OCAP).

4.7 Verminderen koelbehoefte dmv spectraal selectieve kasbedekking

In het gesloten gedeelte van een kas wordt veel energie gebruikt voor het afvoeren van warmte. Door het opwekken van de benodigde energie met een WKK wordt weer extra warmte geproduceerd. Er zou dus veel energie bespaard kunnen worden door de koellast te verlagen. Dit kan door spectraal selectieve kasdekmaterialen te ontwikkelen. Het meest ideaal zou een materiaal zijn wat alleen het PAR licht uit het spectrum door laat. In figuur 9 is te zien hoe de energie van zonnestraling over het spectrum verdeeld is.



figuur 9 Spectrale verdeling van het zonlicht. Airmass 1 is op de evenaar en Airmass 2 in Noord Europa

Uit figuur 9 blijkt dat circa de helft van de energie van het licht bestaat uit zichtbaar licht (400 tot 700 nm). Theoretisch kan de koelbehoefte dus worden verminderd met 50% als alle overige straling wordt gereflecteerd. Daarnaast kan overwogen worden om (voor sommige gewassen) een gedeelte van het PAR licht weg te filteren op momenten dat de straling te hoog is. Vooral nog zijn er nog geen selectieve filterende materialen die alle instraling buiten het PAR wegfilteren en het PAR licht ongehinderd doorlaten. In deze studie wordt uitgegaan van een filtering van 25% van de instraling, waarbij zoveel mogelijk IR en NIR wordt gefilterd. Dit kan d.m.v. een selectieve coating, buitenscherm of vloeistof. Op deze manier kan worden kan de koelbehoefte dus omlaag. Ingeschat wordt dat hierdoor de aandrijfenergie voor de koeling in de zomer gereduceerd wordt van 9,6 m³ naar 7,5 m³ aardgasequivalent. Tevens kan een groter aandeel gesloten uitgevoerd worden. Aangenomen wordt dat deze verhouding verbetert van 1:4,9 tot 1:4. Hierdoor wordt er over een groter aandeel van de kas een meerproductie behaald.

4.8 Conclusies

In dit hoofdstuk zijn 6 verbeteropties besproken voor de gesloten referentiekas. De gesloten referentiekas bespaart ten opzichte van een conventionele tomatenkas (45.8 m³/(m² jaar)) 25% energie en het specifiek verbruik (de energie efficiëntie index) verbetert met 28%.

Een grote verbetering van de energiebesparing wordt gerealiseerd door de plaatsing van een isolerend kasdek. De energiebesparing neemt dan met 5 m³/(m² jaar) toe en komt dan op 37% ten opzichte van een niet gesloten standaard tomatenkas (met scherm). In absolute zin bedraagt de toename van de besparing door de plaatsing van een dubbele dek 5 m³/(m² jaar). Deze bescheiden toename in absolute zin heeft een grote weerslag op de rentabiliteit van de omvangrijke investering voor een dubbel kasdek.

Door de kleinere warmtevraag die bij gebruik van een dubbel dek ontstaat kan de gesloten fractie in zo'n kas niet meer dan 10% bedragen. Het specifiek energieverbruik

zal (bij gelijk blijvende lichttransmissie van de kas) dan ook slechts 1 %-punt meer verbeteren dan de energiebesparing per m²

Vervolgens is ook gekeken naar het effect van de toepassing van een semi-gesloten kas. Hierbij wordt over het gehele kasoppervlak niet meer gekoeld dan er in de winter door de warmtepomp aan koude wordt geproduceerd. De semi-gesloten kas blijkt onder de gestelde aannamen tot een iets lager besparingspercentage te leiden dan de uitvoering van de gesloten referentiekas.

De semi gesloten kas komt in de hier berekende situatie op een besparingspercentage van 24% en een verbetering van het specifiek verbruik met 26%.








Ten opzichte van de prestaties van de gesloten referentiekas kunnen een aantal verbeteringen worden aangebracht. Wanneer het verwarmend oppervlak zodanig zou worden vergroot dat de warmtepomp met een COP van 6 zou kunnen werken (waarvoor de aanvoertemperatuur voor de verwarming niet hoger dan 29 °C mag komen) dan stijgt de energiebesparing naar 33% en de verbetering van het specifiek verbruik naar 36%. Het gasverbruik van het tuinbouwbedrijf is, bij sluiting van 22% van het bedrijfsoppervlak, dan nog slechts 30.8 m³/(m² jaar).

Indien de luchtbehandelingsinstallatie bij de gesloten referentiekas zodanig zou worden verbeterd dat het elektriciteitsverbruik voor de luchtbehandeling zou halveren dan daalt het gasverbruik van het bedrijf, dat dan voor 18% gesloten is, naar 33.5 m³/(m² jaar). Dit betekent een energiebesparing van 27% en een verbetering van het specifiek verbruik met 30% ten opzichte van een volledig natuurlijk geventileerde kas.

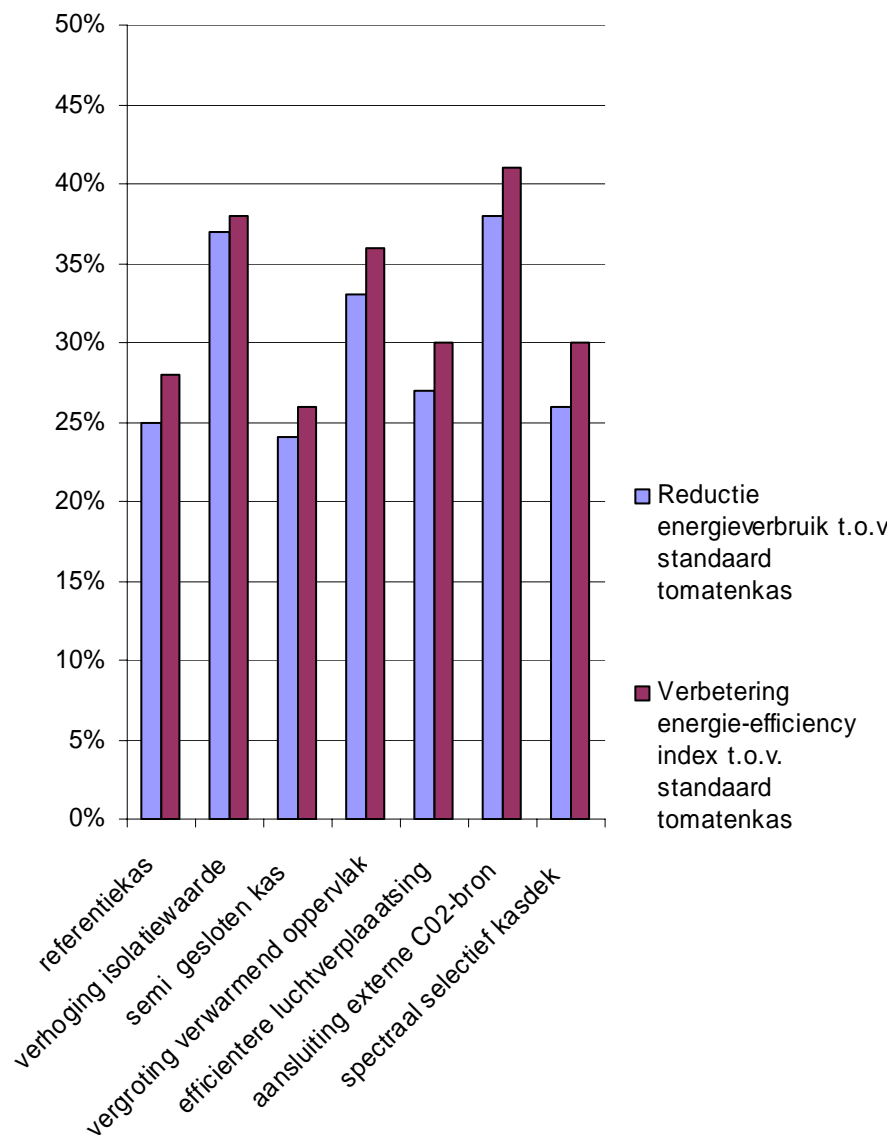
Een zeer grote verbetering wordt gerealiseerd wanneer de kas zou worden aangesloten op een externe CO₂ bron. In dat geval wordt de warmtepomp niet langer in de weg gezeten door de afvalwarmte die vrijkomt bij de productie van rookgas CO₂. Het gasverbruik daalt dan naar 28.6 m³/(m² jaar) en het gesloten kasoppervlak bedraagt dan 26%. De energiebesparing die dan wordt gerealiseerd bedraagt 38% ten opzichte van een natuurlijk geventileerde kas met rookgas CO₂ en door het grote aandeel gesloten kas verbetert het specifiek verbruik met 41%.

4.8.1 Resultaten besparingspotentieel

In de onderstaande tabel en grafiek staan de resultaten weergegeven van de diverse beschouwde opties:

	Energieverbruik		Energie efficiency		kosten
	Reductie tov conventionele tomatenkas (45.8m3/m2)	reductie t.o.v gesloten referentiekas	Reductie tov. conventionele tomatenkas	reductie t.o.v gesloten referentiekas	
Gesloten referentiekas	25%	0%	28%	0	
Verhoging isolatiewaarde (gelijkblijvende lichttransmissie)	37%	12%	38%	10%	
Semi gesloten kas	24%	-1%	26%	-2%	
groter verwarmend opp.	33%	8%	36%	8%	
Efficiëntere luchtverplaatsing	27%	2%	30%	2%	
Aansluiting externe CO2	38%	13%	41%	13%	
Selectief kasdek	26%	1%	30%	2%	

tabel 2 Vermindering energieverbruik van de verschillende verbeteropties voor de gesloten kas



figuur 10 Energieverbruik en efficiency van de verbeteropties

Op basis van bovenstaande tabel kan gesteld worden dat er voldoende interessante besparingsopties zijn voor het gesloten kasconcept. Gestreefd dient te worden naar een slimme combinatie van bovenstaande maatregelen, waarbij een optimum dient te worden gezocht tussen energiebesparing, investering en productie.

Een aantal opties die niet beschouwd is in deze studie zijn:

- Een combinatie van de onderzochte opties
- De inkoop van elektriciteit. Hierdoor wordt de koelbehoefte van het gesloten gedeelte minder waardoor een groter aandeel van de kas gesloten kan worden.
- Extra koude oogsten in de winter om een groter aandeel kas gesloten te kunnen houden en om de efficiëntie van de warmtepomp te verbeteren (kleiner temperatuurverschil over de warmtepomp)

5 Quickscan componenten

5.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk zijn enkele verbeteropties van de huidige gesloten kas besproken. De theoretisch te behalen winstpercentages (verlaging primaire energiegebruik en verlaging energie-efficiency-index) zijn per verbeteroptie berekend. In dit hoofdstuk wordt bekeken hoe deze verbeteropties technisch in te vullen zijn. Er wordt gekeken naar welke componenten al op de markt zijn of binnenkort gaan komen.

Deze componenten worden ingedeeld per functie. De ventilatie van conventionele kassen is een belangrijk aspect omdat dit meerdere functies vervult. Zo wordt ventilatie in conventionele kassen gebruikt om vocht af te voeren, te koelen maar ook om de CO₂ concentratie in de kas weer op hetzelfde niveau te krijgen als de buitenlucht. Wanneer de ventilatie geminimaliseerd wordt moet er gezocht worden naar actieve methoden om deze functies te kunnen vervullen. Voor het verbeterde (semi) gesloten kasconcept worden de volgende functies / componenten onderscheiden:

1. Verwarmen
2. Koelen
3. Ontvochtigen
4. CO₂ bemesten
5. Omhullingsmateriaal
6. Warmteopslagsysteem
7. Zonlicht regelingen

In de volgende paragrafen zullen de functies en de componenten die deze functies kunnen vervullen worden besproken. Uitgebreide informatie over de componenten staat in de bijlagen.

5.2 Verwarmen

Met name in de winter is er sprake van een verwarmingsbehoefte. Uiteraard is dit in grote mate afhankelijk van de buitenluchttemperatuur, de hoeveelheid zonlicht die in de kas valt en de temperatuurinstelling voor verwarming. Ook de transpiratie van het gewas is van grote invloed op de verwarmingsbehoefte. Hoe meer vocht er in de te verwarmen lucht aanwezig is (hoe hoger de relatieve luchtvochtigheid) hoe hoger de warmtebehoefte om een gewenste temperatuur te handhaven, vanwege toegenomen condensatie op het kasdek. Hieronder worden verschillende componenten genoemd die warmte kunnen leveren.

5.2.1 *Fossiele brandstoffen – ketel*

Een ketelinstallatie voor de glastuinbouw werkt het zelfde als in de normale woningbouw. Het rendement van de verwarmingsinstallatie kan verbeterd worden door gebruik te maken van een rookgascondensator (Glastuinbouw en Milieu, 2000). Hiermee worden de rookgassen verder afgekoeld en wordt de vrijkomende warmte benut. In tabel 3 is het gemiddelde rendement van een ketel te zien ten opzichte van de verschillende technieken.

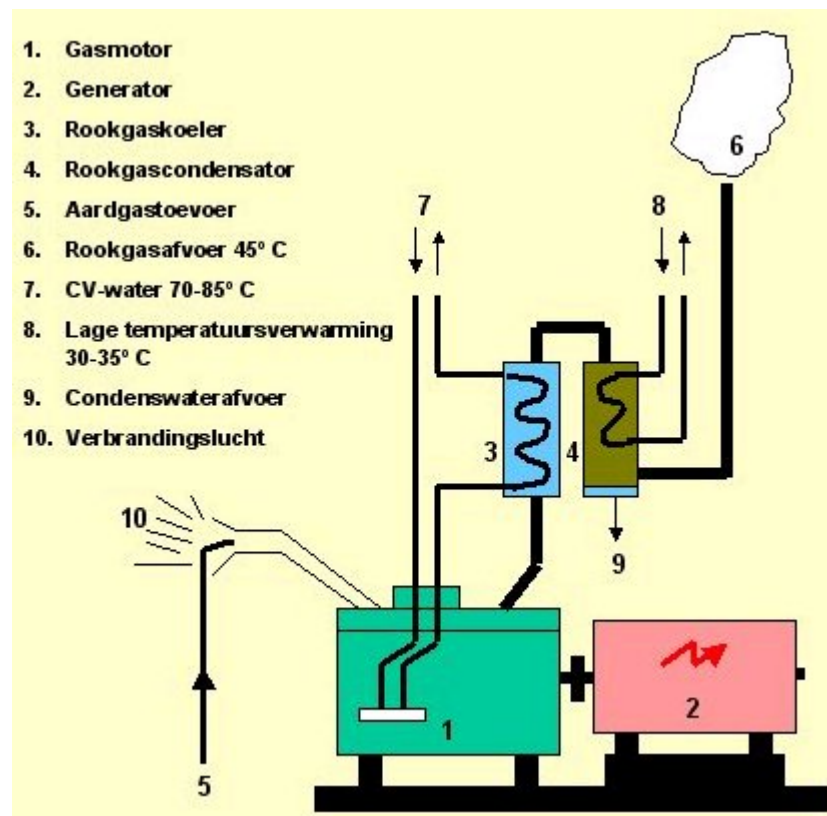
Type ketel	Ketelrendement (%)
Zonder condensor	92,3
Enkelvoudige condensor op de retour	95,6
Enkelvoudige condensor op een apart net	99,8
Combicondensor	102,4

tabel 3 Gemiddelde ketelrendementen bij toepassing verschillende technieken (van der Knijff, 2003).

5.2.2 Fossiele brandstoffen – WKK installatie

Warmtekrachtinstallaties (WKK) zijn verbrandingsmotoren die meerdere functies binnen het bedrijf vervullen.

- Produceren elektriciteit (voor eigen bedrijf of derden)
- Produceren warmte (via koelsysteem)
- Produceren CO₂ (indien gas of olie gestookt wordt)



figuur 11 Schematische voorstelling van een WKK

5.2.3 Biomassa

Het gebruik van biomassa in verwarmingsinstallaties is een mogelijkheid om op een duurzame wijze de kaslucht te verwarmen. De hogere prijs van biomassa t.o.v. gas (in €/GJ) maakt biomassa met name interessant voor het invullen van de piekvraag. Hierdoor kan bezuinigd worden op het gascontract. De volgende mogelijkheden zijn te gebruiken voor een toepassing in de glastuinbouw (Glastuinbouw en Milieu, 2000):

- Het verstoken van biomassa in een WKK installatie (interessant door de MEP vergoeding),
- Het verstoken van biomassa in een verwarmingsinstallatie,
- Het laten vergisten van biomassa voor de gasproductie.

Uit het onderzoek van de Ruijter (2003) blijkt dat biomassa met name interessant kan zijn bij het invullen van de piek belastingen van de verwarmingsinstallatie. Een nadeel van biomassa is de hoge prijs en de problemen rondom de distributie (Glastuinbouw en Milieu, 2000).

5.2.4 *Aardwarmte*

Warm water (afhankelijk van de diepte tot 90°C) uit de bodem is op te pompen en is direct te gebruiken in het verwarmingsnet van de kas. Nadelen van aardwarmte zijn:

- De boringen zijn zeer kostbaar
- Er zijn bovendien grote risico's aanwezig bij het boren zodat de uiteindelijke kosten niet goed vooraf te begroten zijn en achteraf hoger kunnen uitvallen
- Aardwarmte is hierdoor met name geschikt voor de basislast. Door slimme buffering zou de toepassing vergroot kunnen worden
- Het water uit de bron is vaak zeer zout. Hierdoor is een gesloten systeem benodigd met een warmtewisselaar en kan het water niet geloosd worden.
- Hoge investeringen en gebruikskosten van pompen en leidingnet
- Zout water maakt leidingen kwetsbaar voor corrosie

5.2.5 *Opwaarderen van warmte (warmtepompen)*

Een warmtepomp kan het beste vergeleken worden met een omgekeerde koelkast. Er bestaan twee soorten warmtepompen: een compressiewarmtepomp en een absorptiewarmtepomp. De compressiewarmtepomp kent nog een onderverdeling in elektrisch aangedreven warmtepompen en gasgestookte warmtepompen

De COP geeft de verhouding aan tussen de hoeveelheid energie die de warmtepomp gebruikt en de hoeveelheid energie die hij levert (coëfficiënt of performance). De COP is voornamelijk afhankelijk van de temperatuur die bereikt moet worden. Indien er grote temperatuurverschillen te overbruggen zijn wordt het rendement erg laag. Pieken in de warmte- of koelbehoefte kunnen dus beter met goedkopere methoden opgevangen worden. Om te voorkomen dat de COP van de warmtepomp te laag wordt, wordt doorgaans 70% - 80% van de warmtevraag door de warmtepomp vervuld. De rest van de benodigde warmtevraag wordt door de (gas) gestookte ketel geleverd

5.2.6 *Restwarmte van derden*

Restwarmte komt voornamelijk van elektriciteitscentrales en zogenaamde STEG installaties (stoom en gasturbine unit). Het warme koelwater wordt via een warmwaternet naar de afnemers gedistribueerd (Glastuinbouw en Milieu, 2000).

5.3 Koelen

Met name in de zomer is er een grote koelbehoefte in de kas. Voor het koelen van de kas valt er onderscheid te maken tussen koelen door ventilatie en actieve koelmethode. Wanneer de ventilatie geminimaliseerd wordt (gesloten kas) dan moet er gebruik gemaakt worden van actieve koelmethode. In de volgende paragrafen worden enkele koelmethode besproken.

5.3.1 Kasdeksproeiers

Wanneer koud water over het dek stroomt neemt dit water warmte van het dek op. De kas zal hierdoor afkoelen. Bij een enkellaags kasdek heeft dit een goed effect. Bij een geïsoleerd dek is dit veel minder.

5.3.2 Ventilatie

In conventionele kassen wordt door middel van ventilatie de overtollige warmte afgevoerd uit de kas. Dit kan gedaan worden door de luchtramen te openen. Het grote nadeel van deze methode is dat er ook CO₂ verloren gaat.

5.3.3 Mattenkoeling

Dit systeem berust op het principe dat lucht gekoeld wordt door de verdamping van vocht. Door de lucht door een natte mat te zuigen is het in staat om vocht te verdampen en zo af te koelen. Nadelen van dit systeem zijn:

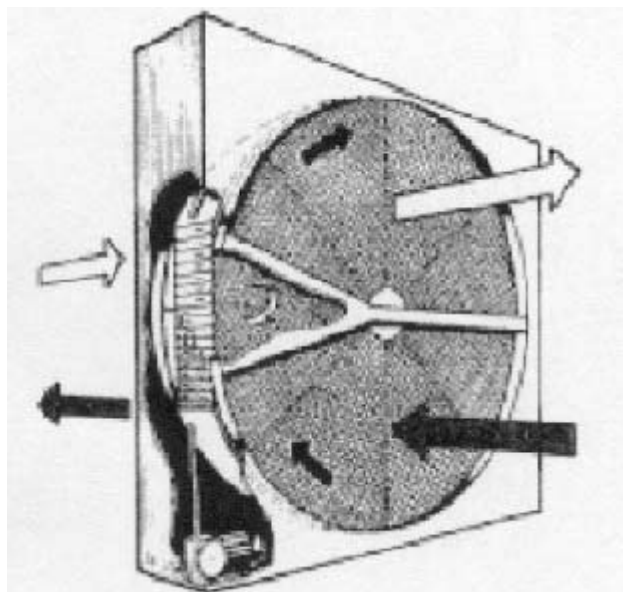
- Slechts goed toepasbaar in droge klimaten
- Weg naar de mat mag niet te lang zijn
- Toename waterverbruik.

5.3.4 Water verneveling

De lucht in de kas kan ook gekoeld worden door water te vernevelen in de kas. Dit kan gedaan worden door het water bij de luchtramen te vernevelen. Er moet echter wel op gelet worden dat er geen water op het gewas valt en dat de lucht voldoende droog is om vocht op te kunnen nemen (Hanan, 1998).

5.3.5 Warmtewisselaars

Warmte en kou kunnen op drie verschillende manieren worden overgedragen in een warmtewisselaar: direct, regeneratief en recuperatief (van Esch, 2004). Bij een regeneratieve warmtewisselaar vindt het warmtetransport plaats via een tussenmedium. Hierdoor kunnen de verschillende media op verschillende tijdstippen stromen. Voorbeelden hiervan zijn het warmtewiel (zie figuur 12) en de bodemwarmtewisselaar

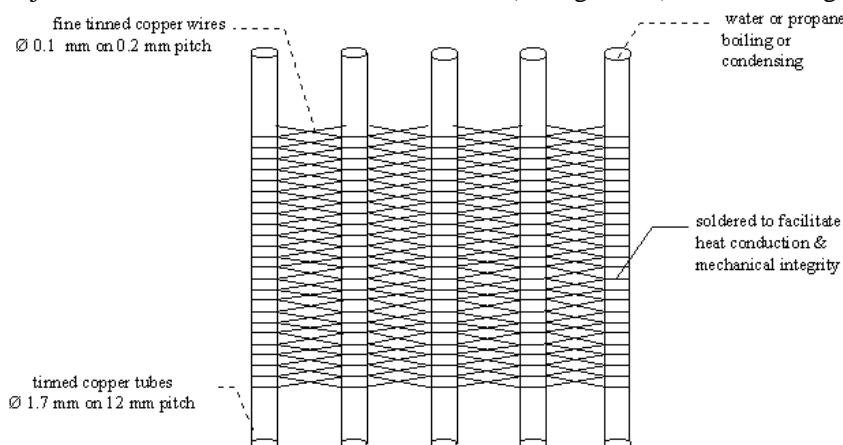


figuur 12 Werking van een warmtewiel.

Warmtewielen bestaan uit een draaiende schijf luchtdoorlatend materiaal. Bij de warme luchtstroom wordt het materiaal opgewarmd waarna het zijn warmte afstaat aan de koude luchtstroom (Bootsveld, 2006).

Bij de bodemwarmtewisselaar doet de bodem dienst als opslagmedium, er worden waterslangen doorheen gelegd en afhankelijk van de vraag wordt het water in de slangen opgewarmd of afgekoeld.

Bij recuperatieve warmtewisselaars worden de beide media altijd door een wand gescheiden. Om de warmte-uitwisseling zo groot mogelijk te maken moet er voor gezorgd worden dat het oppervlak zo groot mogelijk is. Bij de FiwiHex warmtewisselaar (de Zwart, 2003). Wordt dit gedaan door dunne draadjes tussen een groot aantal dunne buisjes te vlechten en de zo ontstane “matten” (zie figuur 13) samen te voegen.



figuur 13 Een schematische weergave van een FiwiHex warmtewisselaar (www.FiwiHex.nl)

5.3.6 Koudebronnen

Voor een warmtewisselaar is een koudebron nodig dit enkele voorbeelden:

- Buitenlucht, dit is afhankelijk van de buitenluchttemperatuur en het rendement van de warmtewisselaar. Voordeel: laag energiegebruik. Nadeel: beperkt bruikbaar in de zomer. Koude uit de buitenlucht opslaan in een lange termijn opslag kan een oplossing zijn.
- Door buitenlucht adiabatisch (door middel van bevochtiging) voor te koelen wordt een groter rendement gehaald. Nadeel: het waterverbruik stijgt.
- Dauwpuntskoeling is een andere vorm van indirecte adiabatistische koeling, hierbij koelt de buitenlucht nog één of twee graden verder af.
- Koude uit de bodem (aquifer).
- Omdat een warmtepomp ook een koud oppervlak heeft kan deze gebruikt worden als koudebron. Nadeel: aandrijving kost veel energie die in de vorm van warmte weer aan de lucht wordt afgegeven.

5.4 Ontvochtigen

Omdat bij een te hoog vochtgehalte het gewas niet meer in staat is om zichzelf te koelen door middel van transpiratie is het belangrijk het vochtgehalte in de kas op peil te houden. Ten gevolge van het ontbreken van de transpiratie zal er geen vochtstroom uit de wortels komen wat weer tot gevolg heeft dat er geen nutriënten aangevoerd kunnen worden. In conventionele kassen wordt vocht veelal afgevoerd door ventilatie en door

condensatie tegen het kasdek, er zijn echter ook actieve ontvochtigingsmethoden. Deze actieve ontvochtigingsmethoden worden steeds belangrijker naarmate de (semi) gesloten kassen en geïsoleerde kasdekken meer toegepast worden.

5.4.1 *Uitkoelen van vocht*

Bij uitkoelen van vocht condenseert vocht tegen een koud oppervlak. Voor het uitkoelen van vocht is het belangrijk dat er een koudebron beschikbaar is. De in de vorige paragraaf besproken koudebronnen zijn beschikbaar. Wanneer het uitkoelen van vocht gebruikt wordt als middel om de kaslucht te ontvochtigen dan kan dit in de volgende systeemsamenstellingen gebeuren (Bootsveld, 2006):

- Compressorkoeler
- Compressorkoeler met tussenwarmtewisselaar
- warmtewisselaar met buitenlucht,
- warmtewisselaar met buitenlucht en adiabatische koeler,
- warmtewisselaar met buitenlucht en koelmachine

5.4.2 *Hygroscopisch systeem*

Door vochtige kaslucht langs een hygroscopisch materiaal te leiden neemt dit materiaal vocht op uit de kaslucht. Door het hygroscopische materiaal daarna te verwarmen wordt het mogelijk om het materiaal her te gebruiken. Ongeveer 90% van de energie die daarbij gebruikt wordt kan uiteindelijk door middel van warmtewisselaars weer terug gevoerd worden naar de kas (Campen et al., 2003).

5.5 CO₂ bemesten

Aangezien CO₂ onmisbaar is voor de fotosynthese, is het belangrijk dat er een voldoende hoge CO₂ concentratie aanwezig is. Bij een toename van de CO₂ concentratie kan de opbrengst toenemen (Heuvelink, 1996).

5.5.1 *Rookgassen*

De meeste CO₂ voor glastuinbouw wordt in Nederland geproduceerd door het verbranden van aardgas in de ketel of WKK. Wanneer er andere systemen (bijvoorbeeld een warmtepomp) fossiele brandstoffen verbranden kunnen deze ook gebruikt worden. Voordelen:

- Het is goedkoop te produceren,
- Er wordt naast CO₂ ook warmte geproduceerd.

Dit laatste kan ook als een nadeel beschouwd worden wanneer er geen vraag naar warmte is. Op het moment vind een praktijktest plaats met het opslaan van CO₂. wordt het mogelijk om de CO₂ die bij warmteproductie vrijkomt te bufferen en naar wens in te zetten.

5.5.2 *Zuivere CO₂*

Voordelen van zuivere CO₂ zijn

- Minder afhankelijkheid van de verbrandingsinstallaties.
- Hoge zuiverheid
- Constante beschikbaarheid

In het verleden was zuivere CO₂ duurder dan zelf geproduceerde CO₂. Door de stijgende gasprijzen wordt het verschil snel kleiner.

5.6 Omhullingsmateriaal

In de moderne glastuinbouw heeft het omhullingsmateriaal twee functies: het doorlaten van zoveel mogelijk zonlicht en het beperken van het energieverlies. Er is een groot aantal omhullingsmaterialen beschikbaar, glas is nog steeds de belangrijkste. In de onderstaande tabel zijn enkele materialen met elkaar vergeleken [Janssen 2006].

	PAR _{dir} (%)	PAR _{dif} (%)	U (W m ⁻² k ⁻¹)	Levensduur (J)	Prijs (€m ⁻²)
Glas	89-91	82	7,2	25	5
AR Glas	95	88	7,2	25	-
Hortiplus glas	84	69	6,0	25	10
PMMA	89	76	5,8	15	20-25
Zigzag	90	80	5,6	15	32
ETFE	93-94	88	-	15-20	10-12

tabel 4 Technische specificaties van een aantal omhullingsmaterialen.

5.7 Warmte opslag systeem

Om de energieoverschotten gedurende de dag en het seizoen op te slaan kan deze energie opgeslagen kan worden. Deze systemen kunnen onderverdeeld worden in lange termijn opslag en korte termijn opslag. In de korte termijn opslag kan warmte opgeslagen worden die ontstaat bij de productie van CO₂

5.7.1 Lange termijn opslag

Een aquifer is een watervoerende laag in de bodem. Door water uit deze lagen door een warmtewisselaar te pompen kan warmte en of koude uit de kas onttrokken worden en opgeslagen worden in de bodem. Een ondiepe aquifer kan ongeveer 50 m³ tot 100 m³ water per uur leveren. Voor een hoger debiet moeten er meerdere putten geslagen worden (van de Braak et al., 2001).

5.7.2 Korte termijn opslag

Een warmtebuffer kan gebruikt worden op momenten dat er geen of weinig warmtevraag is, bijvoorbeeld wanneer de verwarmingsinstallatie gebruikt wordt om CO₂ te doseren. Tevens worden deze buffers gebruikt bij de gesloten kas om een efficiënter gebruik te kunnen maken van de aquifer (voorkomen van pieklasten)

5.7.3 Phase change materials

Phase change materials zijn materialen die ontwikkeld zijn om warmte op te slaan in een faseovergang. In vergelijking met een gelijk volume aan water kan zo meer warmte worden opgeslagen. Het omslagpunt voor de warmte-inhoud ligt in de orde van een delta T van 50°C voor water, want PCM's hebben een smeltwarmte in de orde van 200 kJ/kg. Ze kunnen worden onderverdeeld in twee groepen: organische en anorganische Phase change materials. Anorganische hebben een grotere warmteopslagcapaciteit per volume eenheid. Ze kunnen echter niet in microcapsules toegepast kunnen worden. (capsules met een zeer kleine diameter en een kapseling van hard plastic). Microcapsules hebben twee belangrijke voordelen:

- Door de kleine diameter/groot relatief oppervlak veel warmte-uitwisseling,
- Door de kleine diameter kunnen de capsules rondgepompt worden.

Bij de huidige prijzen zijn phase change materials niet economisch rendabel. Er zijn ook belangrijke technische en energetische bezwaren, omdat de inpassing in een installatie lastig is: tussen laden en ontladen daalt het beschikbare temperatuurniveau al snel met 10°C, hetgeen te veel is in het gesloten kassysteem.

5.7.4 *Waterbekkens*

Een waterbekken kan op verschillende manieren uitgevoerd worden. Een probleem bij opslag in water is dat er een grote hoeveelheid water benodigd is wanneer de opslag gebruikt moet worden voor lange termijn.

5.7.5 *Energiepalen*

Een energiepaal is een speciaal soort heipaal met kunststof slangen in de lengte richting van de paal aangebracht. Behalve als fundering dienen energiepalen ook om warmte uit de bodem te halen of in de bodem op te slaan.

5.8 Zonlicht regelingen

Het regelen van het zonlicht kan gewenst zijn om een aantal redenen.

- Manipuleren daglengte om bepaalde planten tot knopvorming te brengen
- Temperen van de lichthoeveelheid om verbranding te voorkomen
- Energie besparing (Tussen 20% en 35% bij gesloten schermen [Hemming et al., 2004]).
- Splitsen van het zonlicht. In sommige gevallen is bijvoorbeeld wel het PAR licht gewenst, maar niet de warmte-instraling

5.8.1 *Krijt*

Het krijt bestaat voornamelijk uit fijn gemalen kalk met toevoeging van lijmverbindingen. Een nadeel van het gebruik van krijt is dat het een (semi)-permanente oplossing is, het is niet aan te passen bij snel veranderende weersomstandigheden.

5.8.2 *Schermen*


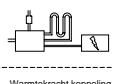

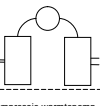
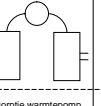





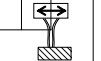




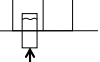
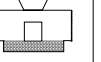



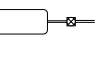
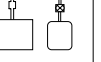



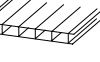




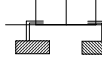


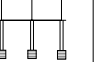



Naast de verschillende uitvoeringsvormen van schermen wordt er een verschil gemaakt tussen schermen aan de buitenzijde en aan de binnenzijde van de kas. Een voordeel van een scherm aan de buitenzijde is dat de geabsorbeerde zoninstraling die in warmte wordt omgezet buiten de kas gehouden wordt.

Over het algemeen worden de schermen gemaakt van gealuminiseerde kunststoffolie stroken, die afgewisseld kunnen worden met open stroken. De zonweringschermen zijn te koop in verschillende zonweringpercentages variërend tussen 40% en 85%.

Verduisteringsschermen hebben echter een veel hoger zonweringpercentage omdat het belangrijk is dat deze nagenoeg lichtdicht zijn. Veelal zijn deze schermen wit of gealuminiseerd aan de dekszijde om het zonlicht zoveel mogelijk te reflecteren. Met beweegbare verduisteringsschermen kan tussen 20% en 30% energie bespaard worden.

5.9 Morfologisch diagram

Op de volgende pagina is een morfologisch diagram weergegeven waarin op iedere rij een functie is geplaatst. De kolommen zijn gevuld met de diverse opties voor de desbetreffende functie. Het diagram kan gebruikt worden voor het ontwerpen van een kassysteem, aangezien snel diverse varianten bepaald kunnen worden, die vervolgens beoordeeld kunnen worden.

Morfologisch schema Componenten						
Verwarmen kaslicht	 Verwarmingsetel	 Warmtekracht koppeling	 Aardwarmte	 Compressie warmtepomp	 Absorptie warmtepomp	 Warmte van derden
Koelen kaslicht	 Ventilatie	 Kasdek sproeier	 Water verneveling	 Mattenkoeling	 Warmtewisselaar / buitenlucht / bodemopslag	 Warmtewisselaar / bodem Warmtewisselaar / warmtepomp
Onvochtig kaslicht	 Ventilatie	 Uitkoelen + buitenlucht	 Uitkoelen + warmtepomp	 Uitkoelen + bodem	 Hygroscopisch	
CO2 bemesten	 Ventilatie	 Rookgassen	 Rookgassen + opslag	 Zuiver	 Rookgassen / zuiver optimalisatie	
Dopgraten zonnisch energiezuinig	 Enkel glas	 Anti reflectie glas	 Hortiplus glas	 Kanaal plaat	 Zigzag	 Folie EVA  ETFE
Opslaan warmte	 Korte termijn opslag	 Lange termijn opslag	 Phase change materials	 Waterbekken	 Energiepalen	
Regelen zonlicht	 Binnen	 Buiten	 Wit kalk			

figuur 14 Morfologisch schema van de energie nul kas

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Inleiding

In de voorafgaande hoofdstukken zijn enkele verbeteropties besproken voor het gesloten kasconcept en er is een overzicht gemaakt van beschikbare componenten om een verbeterd (semi) gesloten kasconcept samen te stellen.

6.2 Conclusies

- Aan de hand van theoretische rekenmodellen is gekeken wat het effect is van de verschillende gesloten kas varianten op het energie verbruik. Vooral de het verhogen van de isolatiewaarde van het dek en het gebruik van een externe CO₂ voorziening hebben een grote potentie om het gebruik van fossiele brandstoffen verder terug te dringen. Een andere optie is het verbeteren van het verwarmende oppervlak van de warmte wisselaars. De FiWiHex is hiervan een goed voorbeeld, maar voor verdere verbeteringen zullen nieuwe technieken gebruikt moeten worden.
- Door verschillende verbeteropties te combineren kan een grotere winst geboekt worden. Dit is in dit onderzoek niet onderzocht.
- Op de korte termijn is de semi gesloten kas een interessant alternatief voor de volledig gesloten kas. Doordat de benodigde capaciteit van de installaties lager is, zijn de investeringskosten vele male lager dan bij de gesloten kas, waardoor de drempel lager wordt.

6.3 Aanbevelingen korte termijn

- Een combinatie van de onderzochte maatregelen zal tot betere resultaten leiden. Zo zorgt de aansluiting op een zuivere CO₂ bron ervoor dat er meer warmte geleverd kan worden met de warmtepomp. Een verbeterde warmtewisselaar komt dan ook beter tot z'n recht (een groter deel van de geleverde warmte komt ook daadwerkelijk uit de verbeterde warmtewisselaar). Door ook een selectief kasdek op te nemen wordt het koelvermogen verminderd, waardoor verwarming en koeling beter in balans zijn en minder conventionele kassen nodig zijn.
- Uit de simulaties volgt dat koude schaarser is dan warmte. Dit is in deze studie opgelost door een aandeel conventionele kassen op te nemen die verwarmd worden met de restwarmte van het gesloten gedeelte. Door in de winter de koude bron extra te vullen met koude uit de buitenlucht kan een groter areaal gesloten blijven. Daarnaast kan de warmtepomp efficiënter ingezet worden.
- Door gebruik te maken van elektriciteit van het net kan ook een groter aandeel van de warmtevraag ingevuld worden met de warmtepomp.
- Een andere mogelijke verbeteroptie is een tussenwarmtewisselaar in de luchtbehandelingkast (LBK). Een tussenwarmtewisselaar hergebruikt koude uit al afgekoelde lucht om aangevoerde warme lucht af te koelen. Dit is een wezenlijk verschil met de nu gangbare luchtbehandelingkast van gesloten kassen. Daarin moet namelijk de hele afgekoelde luchtstroom na ontvochtiging weer worden opgewarmd door de warmtepomp. Dit kost veel energie. Met name bij ontvochtiging van de kas levert de tussenwarmtewisselaar energiebesparing op (Bootsveld 2006).

6.4 Aanbevelingen langere termijn

Op basis van de verbeteropties en de huidige stand van techniek is gekeken welke verdere ontwikkelingen gewenst zijn. Om te komen tot een verbeterde (semi)gesloten kas moet met name de gespecialiseerde kennis die momenteel al aanwezig is met elkaar geïntegreerd worden. Daarnaast zijn doorbraken op de volgende gebieden noodzakelijk:

- Voor het opslaan van de overtollige energie in de zomer wordt vaak gebruik gemaakt van een aquifer. Dit is echter een vrij kostbare oplossing en werkt met een gering temperatuurverschil. Er moeten nieuwe opslagsystemen ontwikkeld worden met een groter temperatuurverschil en een hoog rendement om de kostprijs om laag te krijgen
- Ook het rendement van de warmtewisselaars moeten worden verbeterd. Er gaat veel energie verloren aan het rondpompen van de grote hoeveelheden water en in het bijzonder van lucht. De FiWiHEX heeft al voor een grote verbetering gezorgd. Deze techniek lijkt op nu maximaal te zijn benut, voor verdere verbeteringen zou gekeken moeten worden naar nieuwe technieken als bijvoorbeeld druppelsystemen of lage temperatuursystemen zoals het Flowdeck.
- Voor de energieconversie van laagwaardige naar hoogwaardige warmte wordt een warmtepomp gebruikt. Deze apparaten verbruiken elektrische energie. Door verbeteringen kan het gebruik van fossiele brandstoffen teruggebracht worden.
- Dekmateriaal met lage warmteverliezen, selectieve (regelbare) lichttransmissie en hoge PAR transmissie. Om de energiebehoefte van het systeem te minimaliseren is verlaging van de verliezen in de winter een primaire voorwaarde. Gezocht wordt naar een combinatie van maximale PAR lichttransmissie, regelbare IR transmissie, hoge isolatiewaarde en lage kosten. Een doorbraak op het gebied van een goed isolerend materiaal met hoge lichttransmissie ofwel een regelbaar materiaal is wenselijk om de totaaldoelstelling te bereiken.
- Een hoge CO₂-concentratie is van belang voor een goede teelt, om dit te bereiken wordt momenteel de CO₂ van de rookgassen van de ketel en WKK gebruikt. Wanneer de kas geen fossiele brandstoffen meer gebruikt moet de CO₂ ergens anders vandaan komen, hierbij kan gedacht worden aan levering van derden of winning uit de buitenlucht.
- Belichting is sterk in opkomst om de productie te verhogen, er gaat veel van deze energie verloren door de efficiëntie van de lamp, het armatuur en de verdeling van et licht in de kas. Een technische doorbraak is nodig om een groter deel van het licht te benutten.

7 Literatuur

7.1.1 Publicaties

Appelman W.A.J., de Boer P.D.M., Henstra B., Heslinga D.C. en van der Welle R. (2004) *CO₂ buffering in de glastuinbouw, economische haalbaarheid voor een paprikabedrijf*. TNO rapport, 29 pagina's.

Bootsveld N.R. en van Wolferen J. (2006) *Ontvochtiging van kassen met bestaande technieken uit de utiliteitsbouw*. TNO rapport 2006-A-R0070/B, 71 pagina's.

Bot G.P.A. (2001) *Developments in indoor sustainable plant production with emphasis on energy saving*. Computers and Electronics in Agriculture. Pagina 151-165.

Bot G.P.A., van de Braak N., Challa H., Hemming S., Rieswijk Th., van Straten G. and Verloot I. (2004) *The Solar Greenhouse: state of the art in energy saving and sustainable energy supply*.

Bot G.P.A., Verloot I., Hemming S., van de Braak N., Challa H., van Straten G. en Rieswijk T. (2004) *De zonnekas. Gewasproductie zonder fossiele energie*. Eindverslag project EETK96084, 55 pagina's.

van de Braak N.J., Kempkes F.L.K., Knies P., Lokhorst A. en Vernooij C.J.M. (2001) *Toepasbaarheid van aquifers in de glastuinbouw voor aardwarmtewinning en warmteopslag*. IMAG rapport, 75 pagina's.

Campen J.B., Bot G.P.A. (2002) *Dehumidification in greenhouses bij condensation on finned pipes*. Biosystems Engineering 82 (2), pagina 177-185.

Campen J.B., de Zwart H.F., van de Braak N.J., Kool H.D.M. en Janssen E.G.O.N. (2001) *Koeling en ontvochtiging in de Floriadekas*. IMAG rapport, 38 pagina's.

Campen J.B., Bot G.P.A. en de Zwart H.F. (2003) *Dehumidification of greenhouses at northern latitudes*. Biosystems Engineering 86 (4), pagina 487-493.

Campen J.B., Swinkels G.L.A.M., van de Braak N.J., Sonneveld P.J. en Bot G.P.A. (2003) *Vocht afvoeren uit tuinbouwkassen met warmteterugwinning*. IMAG rapport, 39 pagina's.

Dueck T, Elings A., Kempkes F., Knies P., van de Braak N., Garcia N., Heij G., Janse J., Kaarsemaker R., Korsten P., Maaswinkel R., Ruijs M., Reijnders C. en van der Meer R. (2004) *Energie in kengetallen: zoek naar een nieuwe balans*. Plant Research International B.V., 38 pagina's.

Dueck T, Elings A., Kempkes F., Knies P., van de Braak N., Garcia N., Heij G., Janse J., Kaarsemaker R., Korsten P., Maaswinkel R., Ruijs M., Reijnders C. en van der Meer R. (2004) *Energie in kengetallen: zoek naar een nieuwe balans*. Plant Research International B.V., Basisdocument 104 pagina's.

van Esch B.P.M. (2004) *Procestechnische constructies 1*. Collegedictaat Technische Universiteit Eindhoven.

Glastuinbouw en Milieu (2000) *Handboek milieumaatregelen glastuinbouw editie 2000*. Glastuinbouw en Milieu, 151 pagina's.

Goodall D.W. (1999) *Greenhouse ecosystems*. Ecosystems of the world, 432 pagina's.

Hanan J.J. (1998) *Greenhouses: advanced technology for protected horticulture*. 684 pagina's.

't Hart H., Janssen E.G.O.N., van der Knaap L.M.P. en van der Laan B. (2004) *Gesloten kasconcept*. TNO-rapport 2004-BC-R0019, 47 pagina's.

Hemming S., Waaijenberg D., Bot G., Sonneveld P., de Zwart F., Dueck T., van Dijk C., Dieleman A., Marissen N., van Rijssel E. en Houter B. (2004) *Optimaal gebruik van natuurlijk licht in de glastuinbouw*. A&F rapport, 155 pagina's.

Heuvelink E. (1996) *Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis*. Proefschrift Wageningen Universiteit. 326 pagina's.

Janssen E.G.O.N., Oversloot H., Wiel W.D. van der, Zonneveldt L. (2006) *Optimaal kasdek*. TNO rapport 2004-BC-R0060

Jongebreur A.A. (2000) *Strategic themes in agricultural and bioresource engineering in the 21st century*. Journal of agricultural engineering. Pagina 27-236.

van der Knijff A. en Benninga J. (2003) *Energie in de glastuinbouw van Nederland*. LEI Rapport. 65 pagina's.

van den Kroonenberg H.H. en Siers F.J. (1998) *Methodisch ontwerpen*. 207 pagina's.

LTO Nederland (2003) *Eindrapportage Kas van de Toekomst*. LTO Rapport. 17 pagina's.

Raaphorst M. (2005) *Optimale teelt in gesloten kas. Teeltkundig verslag van de Gesloten Kas bij Themato in 2004*. PPO rapport, 58 pagina's.

de Ruijter J.A.F. (2002) *Kansen voor lage-temperatuurwarmte in combinatie met warmtepompen en ondergrondse energieopslag bij (bijna) gesloten kassen*. KEMA rapport, 149 pagina's.

de Ruijter J.A.F. (2003) *Inzet bio-olie en -vetten in de glastuinbouw*. KEMA rapport, 92 pagina's.

Schoonderbeek, G.G. et.al, 2003, *Telen in een gesloten tuinbouwkas; praktijkexperiment*", Ecofys, Utrecht, downloadable via [http://www.tuinbouw.nl/website/ptcontent.nsf/vwAllOnID/71C980B7A3D03F35C1256DA200377594/\\$File/EindrapportPPO.pdf](http://www.tuinbouw.nl/website/ptcontent.nsf/vwAllOnID/71C980B7A3D03F35C1256DA200377594/$File/EindrapportPPO.pdf)

Sims R.E.H. (2004) *Renewable energy: a response to climate change*. Solar energy 76. Pagina 9-17.

Spoorenberg H.H.R., Oversloot H.P., Nijboer C.A.J. en Naron D.J. (2005) *Nieuwe materialen voor warmteopslag bij tuinbouwkassen*. TNO rapport, 31 pagina's.

Stichting Innovatie Glastuinbouw (2004) *Energie-WEB. Glastuinbouw in een duurzaam regionaal energienetwerk*. 20 pagina's.

Strauch K.H. (1985) *A Closed system greenhouse with integrated solar desalination for arid regions*. Acta Horticulturae. 13 pagina's.

Swinkels G.L.A.M., Sonneveld P.J. en Bot G.P.A. (2001) *Improvement of greenhouse insulation with restricted loss through Zigzag covering material*. Structures and Environment. Pagina 91-97.

de Zwart H.F. (2003) *Verwarmings-, koel- en ontcochtigingscapaciteit van Fiwihex warmtewisselaars*. A&F rapport, 20 pagina's.

de Zwart H.F. (2004a) *Praktijkexperiment duurzame energieverzameling door middel van daksproeiers*. A&F rapport, 49 pagina's.

de Zwart H.F. (2004b) *Praktijkexperiment naar online CO₂ optimalisatie in de tomatenteelt*. A&F rapport, 35 pagina's.

7.1.2 Internet

Agrotechnology & Food Innovations, 2005. ZigZag kasdek materiaal, <http://www.agrotechnologyandfood.wur.nl/nl/Onderzoek/Track+record/ZigZag+kasdek+materiaal.htm> (Beschikbaar op 1 april 2005)

Centraal Bureau voor de Statistiek, 2005. Statline Database, <http://statline.cbs.nl/StatWeb/start.asp?LA=nl&DM=SLNL&lp=Search/Search> (Beschikbaar op 4 april 2005)

FiwiHex, 2005. De dunnedraad warmtewisselaar, <http://www.fiwiHex.nl> (Beschikbaar op 6 mei 2005)

Innogrow, 2005. De Gesloten Kas, http://www.innogrow.nl/nl/1_00geslotenkas.html (Beschikbaar op 4 april 2005)

Productschap tuinbouw, 2005. Exportcijfers van de Nederlandse tuinbouw, <http://www.tuinbouw.nl/website/ptcontent.nsf/0/EE54B7CF731BFF97C1256F6A00499FCB?OpenDocument§or=GehTu&firstnav=4B673A741A1F7513C1256F80003D0842> (Beschikbaar op 1 april 2005)

7.1.3 Persoonlijke mededelingen

Bot.

A Technologie roadmap

Mede in het kader van het project verbeterde semi gesloten kas is een technologie roadmap opgezet. Het doel van de roadmap is om aan te geven welke zaken uitgevoerd dienen te worden om het doel te bereiken. Hieronder wordt de roadmap inhoudelijk beschreven, vervolgens is de roadmap weergegeven. De roadmap is opgebouwd uit de volgende lagen:

1. Markt, welke ontwikkelingen treden op aan de vraagzijde (afzetorganisatie en consument)
2. Organisatie, Hier worden de stappen weergegeven die nodig zijn op het organisatorisch gebied om de doelstelling te bereiken
3. Omgeving, bedoeld worden externe factoren die invloed hebben
4. Kennis, Hiermee wordt de specifiek te ontwikkelen kennis bedoeld

A.1 Markt

Kostprijs is een aandachtspunt van de Nederlandse glastuinbouw, vanwege hoge uurlonen en grondprijzen. Sterke punten zijn de sturing van de teelt op kwaliteit en de hoge productie door de goede teelttechnieken. Hierbij wordt gescoord met niche producten, waarbij het overigens nog steeds over omvangrijke arealen per niche kan gaan. Vanuit de markt is er in toenemende mate sprake van ketengestuurde productie: de producenten moeten in staat zijn de gewenste kwantiteit en kwaliteit op het juiste moment te leveren.

A.2 Organisatie

Het kennisniveau binnen de tuinbouwsector en het onderzoek is internationaal vooraanstaand en hoort tot de top van de wereld, maar er is vernieuwing en investering nodig om deze positie te behouden. De overheid en het bedrijfsleven hebben de laatste jaren enigszins los van elkaar geopereerd bij het aansturen van kennis en innovatie in de (glas)tuinbouw. De relatie tussen innovatie, kennis en beleid vraagt om vernieuwende consortia als de tuinbouw internationaal voorop wil blijven lopen met innovaties.

Dat vraagt een voortdurende vernieuwing van samenwerking tussen de relevante onderzoeksinstituten, de marktpartijen en de ondernemers. Om hiervoor mogelijkheden te realiseren wordt binnen de sector gewerkt aan het opzetten van een tuinbouwcluster innovatiefonds, gericht op het verstrekken van risicodragend kapitaal voor kansrijke innovaties.

A.3 Omgeving

De huidige meerjarenafspraken energie zijn gericht op het verbeteren van het energieverbruik (hoeveelheid fossiele energie per eenheid product) tot 35 % ten opzichte van 1980. Voor de langere termijn zullen energetisch sterk verbeterde productiesystemen moeten worden ontwikkeld die de onafhankelijkheid van fossiele brandstof (doelstelling Tuinbouwsector 2020) mogelijk maken. De sector wil hiermee een duurzame en

concurrerende tuinbouw realiseren en anticiperen op de verwachte verdere aanscherping van de CO₂ emissiedoelen voor de komende decennia. Hierbij moeten stappen gemaakt worden die veel verder reiken dan uitsluitend optimalisatie van de huidige kassystemen.

A.4 Kennis

De deelenkennis m.b.t. glastuinbouwcomponenten is in Nederland van een hoog niveau. Op het gebied van integratie tot volledige duurzame en energiearme productiesystemen is nog een kennisslag op het terrein van systeemontwikkeling nodig om te komen tot een verbeterde (semi) gesloten kas. De ambitie van de sector is om een volledig concept voor een verbeterd (semi) gesloten kassysteem te ontwikkelen. Dit zou een kas zijn die ofwel enkel duurzame energie gebruikt, ofwel een combinatie van duurzame en fossiele energie verbruikt maar op jaarbasis evenveel (duurzame) energie levert voor extern gebruik. Uitgangspunt voor het systeem is de door de tuinbouwgewassen gestelde randvoorwaarden ten aanzien van licht, temperatuur, vocht en CO₂.

Om deze doelstelling te bereiken zijn doorbraken op de volgende gebieden noodzakelijk:

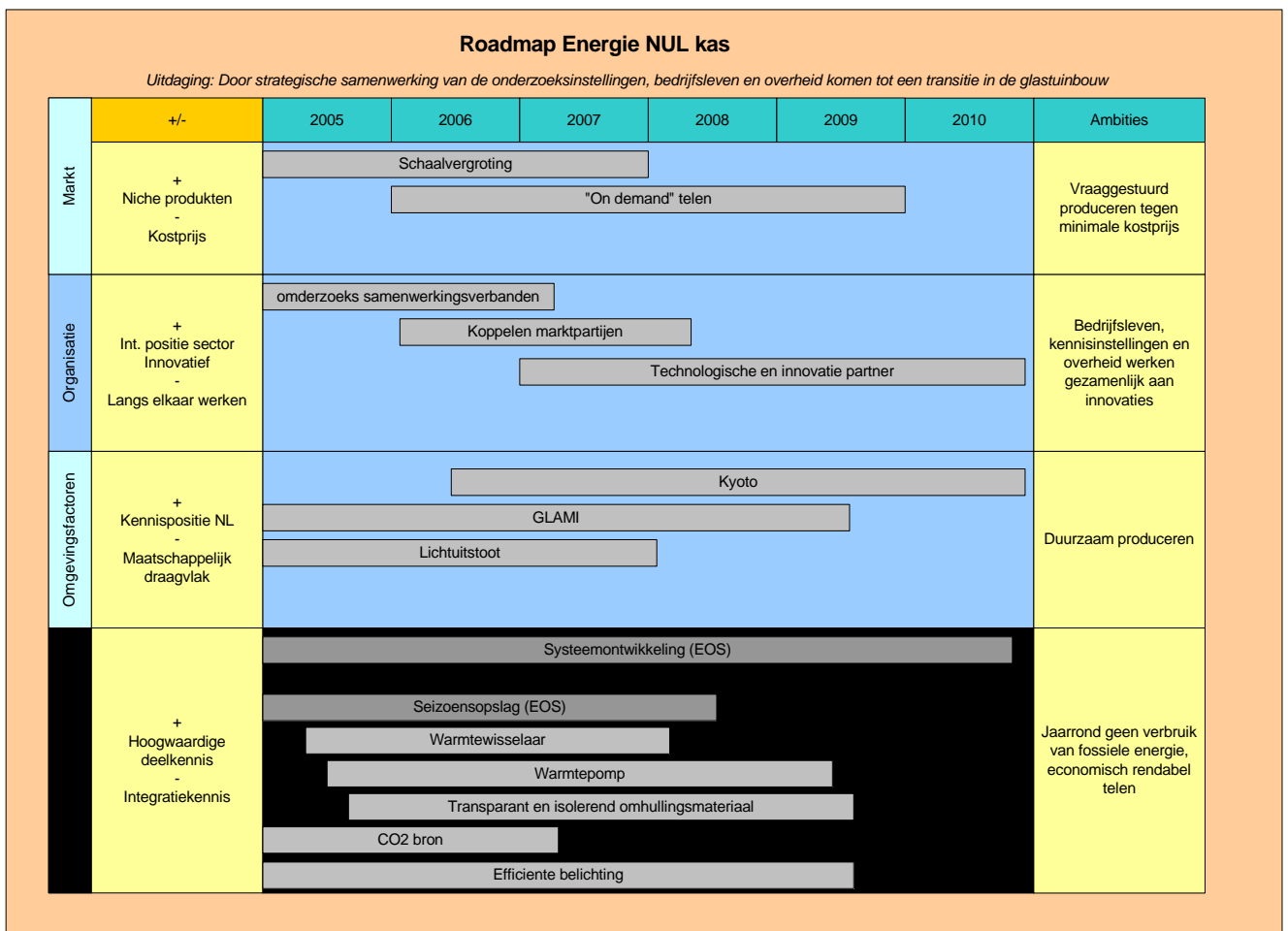
1. Energieconversie – en opslag. Het concept van de verbeterde (semi) gesloten kas gaat uit van het opslaan van de aanwezige condities in het buitenmilieu en het verschuiven hiervan in de tijd. Hiervoor is lange termijn opslag nodig. Huidige technieken beperken zich tot warmteopslag middels aquifers en energiepalen. Deze zijn echter vrij kostbaar en werken met geringe temperatuurverschillen. Door andere opslagtechnologieën te ontwikkelen (bv. met grotere temperatuurverschillen, lagere verliezen en hogere rendementen) wordt het behalen van de doelstelling eenvoudiger.
2. Een hoog rendement luchtzijdige warmtewisselaar / koeling- en ontvochtigingssysteem is een cruciaal onderdeel in de verbeterde (semi) gesloten kas. Gestreefd dient te worden naar een zo efficiënt mogelijke warmteoverdracht in combinatie met zo min mogelijk aandrijfenergie voor de wisselaar en het noodzakelijke luchttransport. De FiWiHEX lijkt het optimum als uitgegaan wordt van verkleinen van de buisdiameters en vergroten van het oppervlak. Hier is een doorbraak gewenst op het gebied van een ander overdrachtsprincipe, bijvoorbeeld druppelwarmtewisselaars.
3. Warmtepomp. De warmtepomp wordt gebruikt om laagwaardige warmte op te waarden, zodat het bruikbaar wordt om de kas te verwarmen of te koelen.
4. Dekmateriaal met lage warmteverliezen, selectieve (regelbare) lichttransmissie en hoge PAR transmissie. Om de energiebehoefte van het systeem te minimaliseren is verlaging van de verliezen in de winter een primaire voorwaarde. Gezocht wordt naar een combinatie van maximale lichttransmissie, hoge isolatiewaarde en lage kosten. Een doorbraak op het gebied van een goed isolerend materiaal met hoge lichttransmissie ofwel een regelbaar materiaal is wenselijk om de totaaldoelstelling te bereiken.
5. CO₂ bron. In de situatie dat het fossiele energiegebruik is gereduceerd tot 0 is een alternatief noodzakelijk voor de CO₂ voorziening van de plant. Om de doelstelling te behalen zal een alternatieve bron ontwikkeld moeten worden die kan voldoen aan de geminimaliseerde behoefte (in de situatie met een gesloten kas) Routes die worden onderzocht binnen de conceptvorming zijn o.a. levering door derden (afval CO₂) en CO₂ winning uit buitenlucht.
6. Belichting. Belichting is sterk in opkomst om de productie te verhogen en de sturing te verbeteren. Gezien de lage efficiëntie van de huidige lampen en de

grote hoeveelheid licht die niet benut wordt door de plant is een technische doorbraak op dit gebied wenselijk. Daarnaast wordt de lichtuitstoot naar de omgeving steeds minder geaccepteerd.

Deze deelgebieden worden gecombineerd binnen de integrale systeemontwikkeling die cruciaal is om de energiedoelstelling te bereiken. De koppeling van de verschillende componenten tot een totaalsysteem kan namelijk grote invloed hebben op de benodigde capaciteiten van de deelcomponenten en de totale prestatie van het systeem.

7.1.4 Partners

De roadmap is opgezet door de onderzoeksinstituten TNO en Wageningen UR. Hieronder is de voorgestelde roadmap weergegeven.

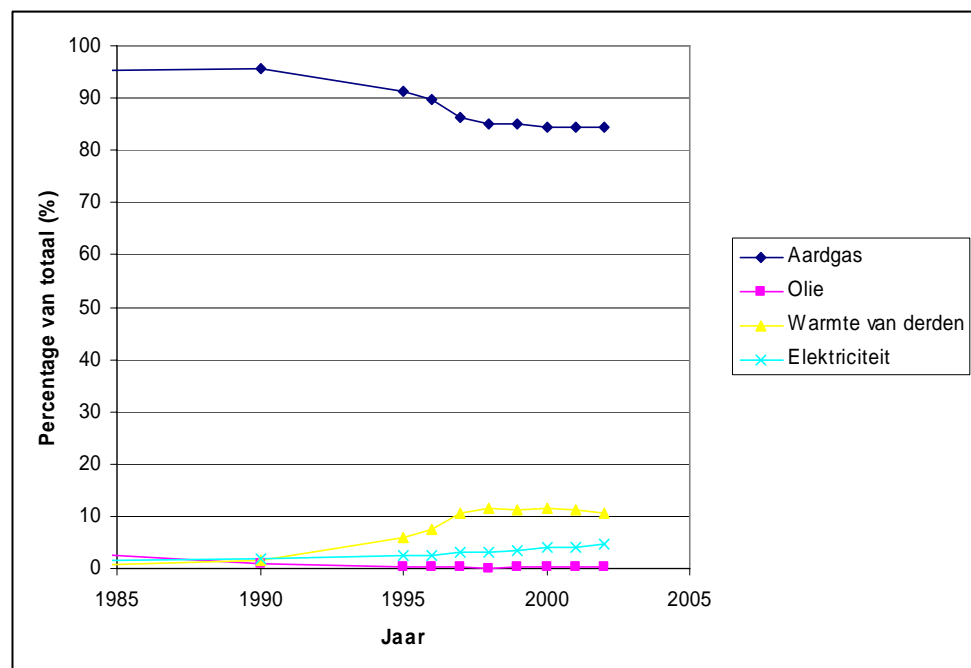


B Verwarmen

De verwarming van kassen is belangrijk om de gewenste temperatuur voornamelijk in de wintermaanden te kunnen bereiken. Grofweg kan gesteld worden dat 50% van de verwarmingsbehoefte door de zon geleverd kan worden (Bot, 2001). De andere 50% komt voor rekening van het verwarmingssysteem. Momenteel zijn er een aantal verschillende systemen te benoemen die warmte kunnen produceren of leveren aan de glastuinbouw. De belangrijkste daarvan is nog steeds de ketelinstallatie die gevoed wordt met fossiele brandstoffen of biomassa (voornamelijk aardgas). Tegenwoordig zijn er ook systemen in gebruik die gebruik maken van restwarmte van andere bedrijven of bedrijfstakken. Op kleine schaal wordt er geëxperimenteerd met water dat opgewarmd wordt diep in de bodem; dit wordt ook wel aardwarmte genoemd.

B.1 Fossiele brandstoffen

De totale aardgasconsumptie van de Nederlandse glastuinbouw is ongeveer 12,5% van de totale Nederlandse aardgasconsumptie (Bot, 2001). Aardgas wordt voornamelijk gebruikt voor de verwarming van ketel installaties en WKK installaties (warmtekracht koppeling). Omdat olie in Nederland duurder is dan aardgas wordt er nagenoeg geen gebruik meer gemaakt van olie voor de verwarming van kassen. In figuur 15 is de ontwikkeling van de consumptie van de afzonderlijke fossiele brandstoffen in de glastuinbouw te zien.



figuur 15 Energiegebruik per energiedrager als percentage van het totaal in de glastuinbouw (van der Knijff, 2003).

In figuur 15 is te zien dat het gebruik van olie in de loop van de tijd minimaal is als brandstof voor de verwarming. Ook het percentage aardgas neemt af ten gevolge van het gebruik van restwarmte van derden, maar aardgas blijft verreweg de meest gebruikte

fossiele brandstof. De toename van elektriciteit wordt voornamelijk veroorzaakt door de toename van de assimilatiebelichting.

Een ketel installatie verwarmt de kas door het verwarmde water rond te pompen in de kas. De warmwater leiding heeft een temperatuur van maximaal 90°C, de retourleiding heeft een temperatuur van ongeveer 70°C. De stromingssnelheid van het water is meestal 0,9 m/s (Hanan, 1998). Het rendement van de verwarmingsinstallatie kan verbeterd worden door gebruik te maken van een rookgascondensor (Glastuinbouw en Milieu, 2000). Hiermee worden de rookgassen verder afgekoeld en wordt de vrijkomende warmte benut voor de verwarming van de kassen. Het rendement van een verwarmingsketel kan beschreven worden door het stooktechnisch rendement en het waterzijdig rendement. Het verschil hiertussen is dat er bij berekening van het waterzijdig rendement alleen rekening wordt gehouden met de hoeveelheid warmte die door het water wordt opgenomen.

De rendementen van een verwarmingsketel zijn te omschrijven volgens (zakboek, 2002):

$$\eta_s = \frac{Q_s}{H * V} \quad (\text{Vergelijking 1})$$

η_s = stooktechnisch rendement,

Q_s = opgewekte warmte minus schoorsteenverlies (kW),

H = toegevoegde warmte via het gas $\left(\frac{kW}{m^3}\right)$,

V = volumestroom van het gas $\left(\frac{m^3}{s}\right)$.

$$\eta_w = \frac{Q_w}{H * V} \quad (\text{Vergelijking 2})$$

η_w = waterzijdig rendement,

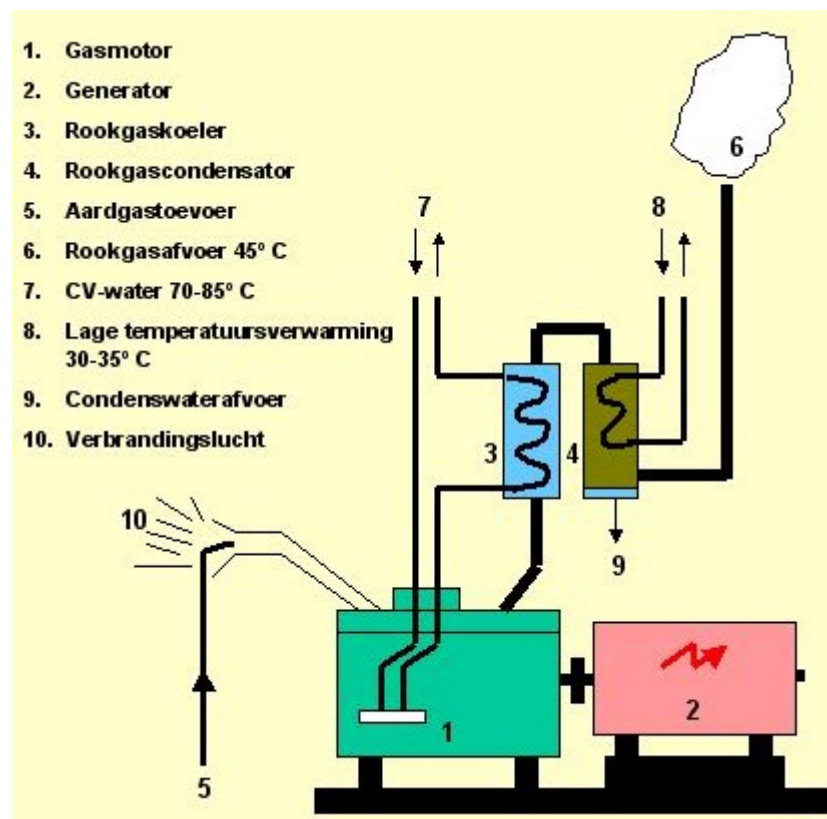
Q_w = hoeveelheid warmte afgegeven aan het water (kW).

Door de in de rookgassen aanwezige waterdamp te condenseren met een rookgascondensor komt er ook condensatiewarmte vrij. De toepassing van een of meerdere condensoren heeft een belangrijke verbetering van het rendement tot gevolg. In tabel 3 is het gemiddelde rendement van een ketel te zien bij verschillende condensortechnieken.

Type ketel	Ketelrendement (%)
Zonder condensor	92,3
Enkelvoudige condensor op de retour	95,6
Enkelvoudige condensor op een apart net	99,8
Combicondensor	102,4

tabel 5 Gemiddelde ketelrendementen bij toepassing van de verschillende technieken (van der Knijff, 2003).

Warmtekrachtinstallaties (WKK) zijn verbrandingsmotoren die gebruikt worden voor de opwekking van zowel elektriciteit als warmte op het bedrijf. Het principe van de WKK berust op het gebruik van het koelwater om de kas te verwarmen. In figuur 16 is een schematische voorstelling van een WKK te zien. In deze figuur wordt een gasmotor gebruikt voor de opwekking van elektriciteit. Het koelwater in combinatie met een rookgascondensator en een rookgaskoeler worden gebruikt voor de verwarming van de kas .



figuur 16 Een schematische voorstelling van een WKK.

De motor kan elektriciteit aan het nutsbedrijf (nutoptie) of aan het bedrijf zelf leveren (Glastuinbouw en Milieu, 2000). Deze elektriciteit kan gebruikt worden voor de assimilatiebelichting of voor de aandrijving van andere systemen die elektriciteit nodig hebben.

B.2 Biomassa

Het gebruik van biomassa in verwarmingsinstallaties is een mogelijkheid om op een duurzame wijze de kaslucht te verwarmen. De volgende mogelijkheden zijn te gebruiken voor een toepassing in de glastuinbouw (Glastuinbouw en Milieu, 2000):

- Het verstoken van biomassa in een WKK installatie,
- Het verstoken van biomassa in een verwarmingsinstallatie,
- Het laten vergisten van biomassa voor de gasproductie.

In het onderzoek van de Ruijter (2003) wordt een mogelijke toepassing van bio-oliën en -vetten besproken. Het blijkt dat dit met name interessant kan zijn bij het invullen van de piek belastingen van de verwarmingsinstallatie omdat bij gebruik van aardgas op deze momenten ook een hogere prijs betaald moet worden. Verder is het gebruik van deze duurzame energie aantrekkelijk omdat het niet wordt bijgeteld bij het totale energieverbruik (duurzame energie). Op deze manier is er dus een hogere energie-efficiënte te behalen. Een nadeel blijft echter wel de hoge prijs van de biomassa (in €/GJ) en de problemen rondom de distributie van deze energie naar bedrijven (Glastuinbouw en Milieu, 2000).

B.3 Aardwarmte

Op grotere diepte in de bodem is warmte aanwezig, die voor het verwarmingssysteem in kassen te gebruiken is. De temperatuur van de warmwaterbron varieert met de diepte van de bron en kan oplopen tot 90°C. Deze warmte is direct te gebruiken in het verwarmingsnet van de kas. Momenteel wordt er een eerste aardwarmteproject gestart voor de glastuinbouw in Bleiswijk. Ook wordt het gebruikt voor stadsverwarming. Er is ook een aantal nadelen op te noemen bij het gebruik van geothermie (Hanan, 1998):

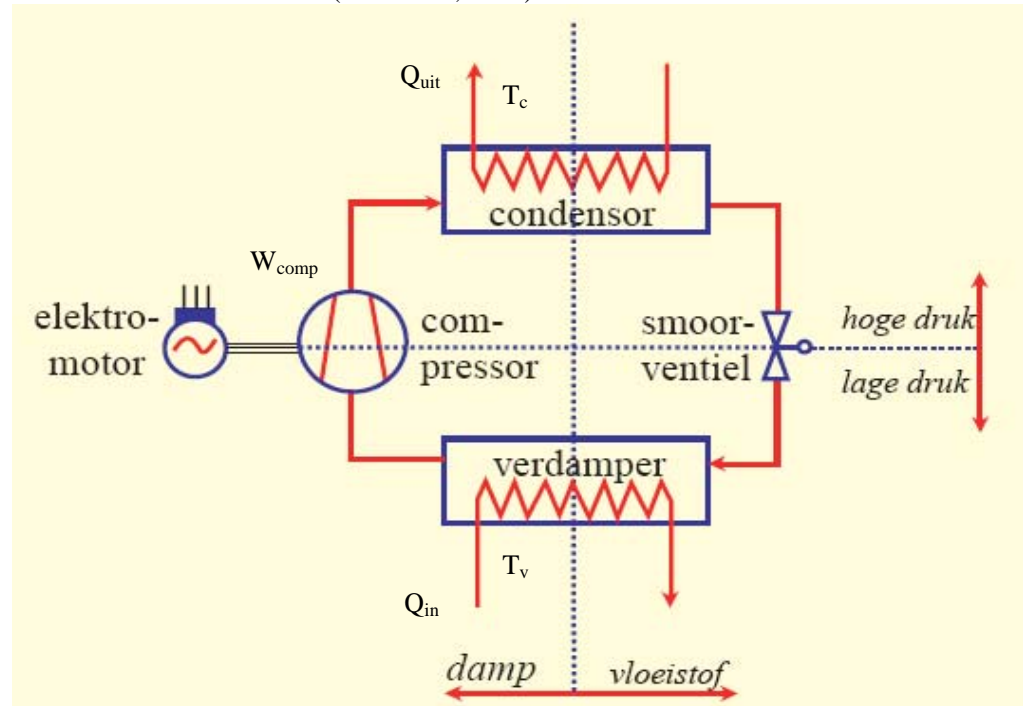
- Het water uit de bron is vaak zeer zout. Dit zorgt ervoor dat het water niet direct te gebruiken is als irrigatiewater en het kan ook niet zomaar geloosd worden,
- In het geval van diepe bronnen moeten er putten geslagen worden en leidingen gelegd worden. Ten gevolge van het zoute water hebben deze leidingen last van corrosie,
- Het water moet altijd opgepompt worden. Het oppompen van het water brengt kosten met zich mee.

B.4 Opwaarderen van warmte (warmtepompen)

Een warmtepomp kan het beste vergeleken worden met een omgekeerde koelkast. In het geval van een koelkast wordt een warmtepomp gebruikt om te koelen maar een warmtepomp kan ook gebruikt worden om bijvoorbeeld een kas te verwarmen. Er bestaan twee soorten warmtepompen: een compressiewarmtepomp en een absorptiewarmtepomp. De compressiewarmtepomp kent nog een onderverdeling in elektrische aangedreven warmtepompen en gasmotor gedreven warmtepompen (de Zwart, 2004).

Bij een compressiewarmtepomp wordt een vloeistof in een verdamper verdampt. De warmte die hiervoor nodig is wordt onttrokken aan de lucht, die daardoor in temperatuur daalt (denk aan een koelkast). De vloeistof wordt vervolgens geleid door een compressor die de druk verhoogt. Door deze hoge druk wordt het mogelijk om de damp weer vloeibaar te maken bij een hogere temperatuur in de condensor. In de condensor komt de in de verdamper opgenomen warmte weer vrij samen met de door

de compressor toegevoegde energie. Vervolgens stroomt de vloeistof van de condensor via een expansieventiel weer terug naar de verdamper zodat het proces weer opnieuw kan beginnen (zie figuur 17). Met de warmte die in de condensor vrijkomt kan de kaslucht verwarmd worden. (Bootsveld, 2004).



figuur 17 Een schematische weergave van een warmtepomp

Om de verhouding aan te geven tussen de hoeveelheid energie die de warmtepomp gebruikt en de hoeveelheid energie die hij levert wordt er gebruik gemaakt van de COP (coëfficiënt of performance). De COP is van verschillende zaken afhankelijk; de belangrijkste is de temperatuur die bereikt moet worden. Indien er grote temperatuurverschillen bereikt moeten worden, wordt de COP erg laag. (Bot, 2005). Wanneer gekeken wordt naar de ingangsgrootheden (figuur 17) dan voldoet de COP van een compressiewarmtepomp aan de volgende vergelijking (zakboek, 2002):

$$COP = \frac{Q_{uit}}{W_{comp}} = \frac{W_{comp} + Q_{in}}{W_{comp}} = 1 + \frac{Q_{in}}{W_{comp}} \quad (\text{Vergelijking 3})$$

Q_{uit} = hoeveelheid energie die geleverd wordt (J),

W_{comp} = hoeveelheid arbeid die door de compressor geleverd wordt (J),

Q_{in} = hoeveelheid energie die in de warmtepomp gaat (J).

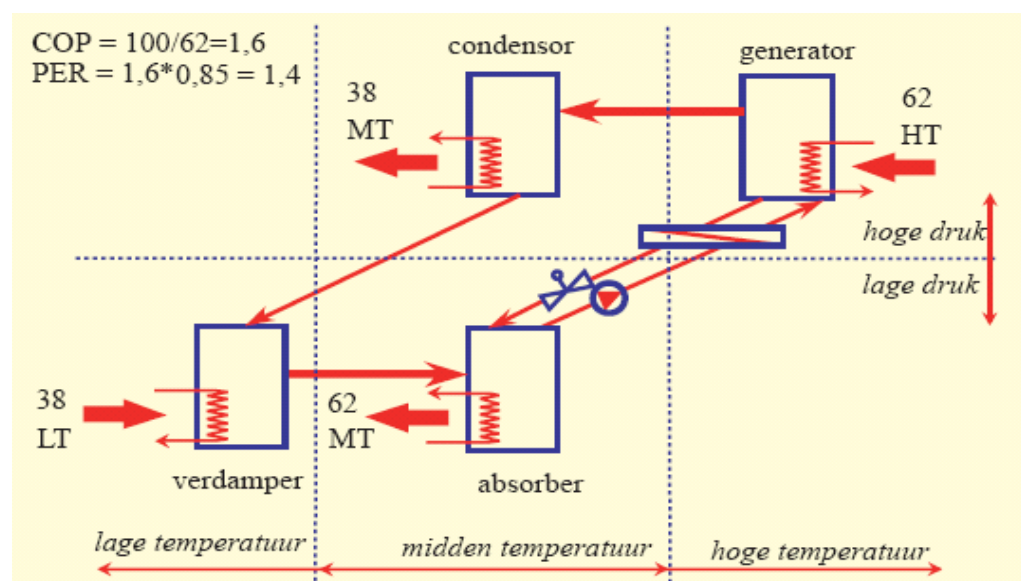
In een ideaal, theoretisch kringproces van een warmtepomp, is het maximaal mogelijk rendement het carnot rendement. Dit is te bepalen volgens de volgende formule:

$$Carnot = \frac{T_c}{(T_c - T_v)} \quad (\text{Vergelijking 4})$$

T_c = temperatuur in de condensor (K),

T_v = temperatuur in de verdamper (K).

De absorptiewarmtepomp werkt volgens een ander principe dan de compressiewarmtepomp. De damp, die in de verdamper ontstaat, stroomt door drukverschil naar de absorber. Daar absorbeert/condenseert de damp de absorptievloeistof en de condensatiewarmte komt vrij. De absorptievloeistof met een vloeistofpomp vanuit de absorber naar de generator die op een hogere druk werkt. Daar wordt met behulp van (rest)warmte het koelmiddel weer uitgedampt op deze hogere druk. Deze damp wordt vervolgens weer vloeibaar gemaakt in de condensor. Het vloeibare koelmiddel gaat weer terug naar de verdamper via een expansieventiel. De geconcentreerde absorptievloeistof gaat vanuit de generator weer terug naar de absorber. (zie figuur 18)



figuur 18 schematische weergave van een absorptiewarmtepomp

Bij de absorptiewarmtepomp komt er zowel warmte vrij in de condensor als in de absorber. De aandrijving van het proces gaat door middel van warmte (Bootsveld, 2004). Indien er gas of olie gebruikt wordt voor om die warmte te produceren kunnen de rookgassen weer gebruikt worden voor CO₂ bemesting.

In de glastuinbouw is het vaak niet optimaal om de volledige warmtevraag met de warmtepomp in te vullen (de Ruijter, 2002). Daarom wordt het systeem vaak dusdanig ingesteld dat de warmtepomp een dekking heeft van ongeveer 70% - 80%. De rest van de benodigde warmtevraag wordt door de (gas) gestookte ketel geleverd. Op deze manier wordt voorkomen dat de COP van de warmtepomp te laag wordt.

B.5 Restwarmte van derden

In figuur 15 is te zien dat het gebruik van restwarmte vanaf 1990 sterk toe begin te nemen. Onder deze restwarmte wordt voornamelijk verstaan de distributie van koelwater van elektriciteitscentrales en zogenaamde STEG (stoom en gasturbine unit). De warmte wordt via een warmwaternet naar de afnemers gedistribueerd (Glastuinbouw

en Milieu, 2000). In 2002 kwam 10,7% (tegen 11,3% in 2001) van de totale energiebehoefte bij derden vandaan. Deze afname wordt voornamelijk veroorzaakt door de liberalisering van de energie markt (de STEG draaien niet meer constant) en de hogere piekwaarden van de gasprijs (wanneer er bijgestookt moet worden) (Van der Knijff, 2003).

C Koelen

Met name in de zomer is het (in Nederland) belangrijk dat de temperatuur van de kaslucht verlaagd wordt om te voorkomen dat het klimaat schadelijk wordt voor het gewas. Momenteel wordt dat in Nederland op grote schaal gedaan door te ventileren met buitenlucht. Het grote nadeel daarvan is dat er veel CO₂ verloren gaat. Met de moderne gesloten kas principes is het juist de bedoeling dat de luchtramen zoveel mogelijk gesloten blijven zodat er gezocht moet worden naar andere koeltechnieken. Voorbeelden van deze technieken zijn het omzetten van voelbare warmte in latente warmte met behulp van matten koeling of water verneveling. Ook het gebruik van kasdeksproeiers (de Zwart, 2004a) kan een verlaging van de temperatuur van de kaslucht geven. Om de warmte niet verloren te laten gaan, kan er ook gebruik gemaakt worden van warmtewisselaars die de kaslucht koelen en de warmte afvoeren naar een opslag medium.

C.1 Kasdeksproeiers

Omdat het dakoppervlak van een kas relatief warm is zou dit goed gebruikt kunnen worden voor de koeling van de kas. Wanneer koud water over het dek stroomt neemt dit water warmte van het dek op. Hierbij moet er wel rekening gehouden worden met de buitenluchttemperatuur en de (geringe) verdamping van de waterfilm over het dek (Campen et al., 2001). Wanneer volgens Campen et al. (2001) het systeem wordt gebruikt bij enkelglas kassen dan is sprake van een goed koelsysteem. Bij dubbel glas is het effect veel minder groot omdat de opwarming van de buitenste glaslaag dan veel minder groot zal zijn.

Voor een berekening die gemaakt is voor een gemiddelde Nederlandse situatie wordt er aan de binnenkant van de kas ongeveer $134 \text{ W/m}^2_{\text{kas}}$ warmte onttrokken. Aan de buitenkant wordt er echter relatief weinig warmte aan de buitenlucht onttrokken ($3 \text{ W/m}^2_{\text{kas}}$) ten gevolge van de verdamping van het water en het warmteverlies via langgolvlige straling aan de buitenlucht.

C.2 Ventilatie

In conventionele kassen wordt door middel van ventilatie de overtollige warmte afgevoerd uit de kas. Dit kan gedaan worden door de luchtramen te openen vervolgens kan de warme lucht dan met behulp van natuurlijke ventilatie afgevoerd worden. Het grote nadeel van deze methode is dat er veel CO₂ verloren gaat op momenten dat de luchtramen geopend zijn.

C.3 Mattenkoeling

Dit systeem berust op het principe dat lucht gekoeld wordt door de verdamping van vocht. Dit kan bereikt worden door de lucht met behulp van een ventilator door een natte mat te zuigen; in de mat is de lucht in staat om vocht te verdampen. Er moet bij dit

systeem echter wel rekening gehouden worden met de mogelijkheid van de lucht om vocht op te nemen (Hanan, 1998). Daarom kan dit systeem goed gebruikt worden in droge klimaten zoals rond de Middellandse zee en is minder geschikt voor Nederland. Een nadeel van dit systeem is dat de weg naar de mat niet te groot mag zijn om een goede koeling van de kas te kunnen bereiken. Ook de toename van het watergebruik is een nadeel. Verder is ventilatie noodzakelijk om het proces op gang te houden, zodat CO₂ verloren gaat.

C.4 Water verneveling

De lucht in de kas kan ook gekoeld worden door water te vernevelen in de kas. Dit kan gedaan worden door het water bij de luchtramen te vernevelen. Er moet echter wel op gelet worden dat er geen water op het gewas valt en dat de lucht voldoende droog is om vocht op te kunnen nemen (Hanan, 1998). Verder is ventilatie noodzakelijk om het proces op gang te houden, zodat CO₂ verloren gaat.

C.5 Koudebronnen

Er kan gekoeld worden met buitenlucht over een warmtewisselaar. Dit is in sterke mate afhankelijk van de buitenluchttemperatuur en het rendement van de warmtewisselaar. In de zomer is dit een beperkend aspect maar in voor- en naseizoenen niet. Het energieverbruik is constant en wordt bepaald door het verbruik van de ventilatoren als gevolg van de drukval over de componenten.

Door de buitenlucht adiabatisch (door middel van bevochtiging) voor te koelen wordt een ten opzichte van het koelen met buitenlucht een groter rendement gehaald. Deze methode staat bekend als indirecte adiabatistische koeling. Het extra vocht komt dus niet in de kas, maar de toevoerlucht wordt wel gekoeld. Normaal zorgen de planten voor een belangrijke bijdrage aan de koeling door het verdampen van meer water bij hogere kastemperaturen en een groter vochtdeficit. Omgekeerd kan daardoor het nadeel van het waterverbruik voor de koeling, min of meer gecompenseerd worden door een lagere verdamping via de planten. Dit zou ook een teelttechnisch voordeel kunnen zijn. In hoeverre het totale waterverbruik (planten + indirecte adiabatistische koeling) toeneemt zal nader onderzocht moeten worden.

Dauwpuntskoeling is een andere vorm van indirecte adiabatistische koeling. Hierbij koelt de buitenlucht nog iets verder af. Onder ongunstige buitenomstandigheden (28°C, 50% RV) kan nog een inblaastemperatuur van 18 à 19°C worden behaald, tegen circa 22 à 23°C bij gewone indirecte verdampingskoeling. Er is dan aanzienlijk minder ventilatie nodig. Bij dauwpuntskoeling wordt géén vocht toegevoegd aan de inblaaslucht.

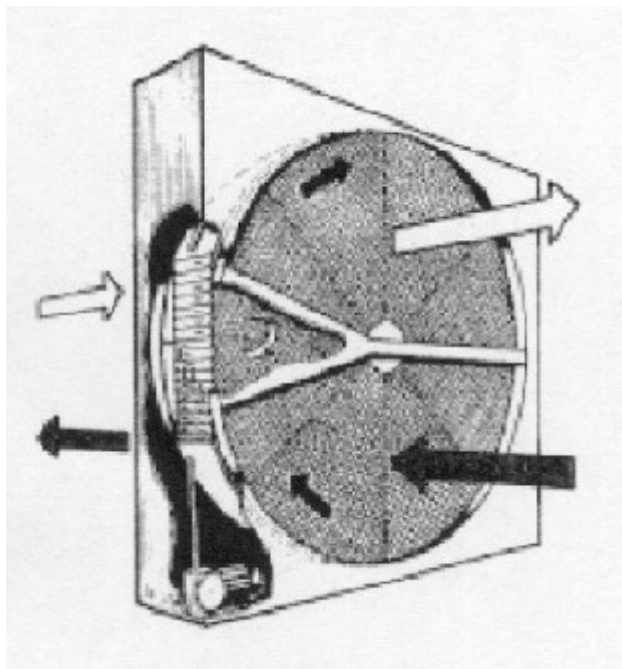
Koude uit de bodem kan met behulp van een aquifer of een bodemwarmtewisselaar gebruikt worden als koudebron. In feite is hier eerder sprake van koudeopslag dan van een koudebron: omgevingskoude of koude uit een warmtepomp worden opgeslagen voor gebruik in de zomer. Zo kan de bovengenoemde warmtewisselaar naar de buitenlucht in de winter gebruikt worden om koude te oogsten en in de andere seizoenen om rechtstreeks te koelen tegen de buitenlucht.

Omdat een warmtepomp ook een koud oppervlak heeft kan deze gebruikt worden als koudebron (koelkast). Een nadeel van dit systeem is dat de warmtepomp in de winter functioneert en de koude in de zomer nodig is. Koudeopslag is dan nodig.

C.6 Warmtewisselaar

In de vorige paragraaf zijn een aantal koudebronnen besproken die gebruikt kunnen worden om met behulp van een warmtewisselaar de lucht te koelen. Warmte kan op drie verschillende manieren worden overgedragen in een warmtewisselaar: direct, regeneratief en recuperatief (van Esch, 2004). Bij directe warmte-uitwisseling wordt het ene medium direct door het andere medium geleid. Een voorbeeld hiervan is een koeltoren, waarin een vloeistofnevel naar beneden valt en door een opwaartse luchtstroom wordt gekoeld. Dit type warmtewisselaar wordt naast het genoemde voorbeeld niet veel gebruikt.

Bij een regeneratieve warmtewisselaar vindt het warmtetransport plaats via een tussenmedium. Hierdoor kunnen de verschillende media op verschillende tijdstippen en plaatsen stromen. Een goed voorbeeld hiervan is een warmtewiel (zie figuur 19).



figuur 19 De werking van een warmtewiel.

Warmtewielen bestaan uit een draaiende schijf luchtdoorlatend materiaal, waar beide luchtstromen doorheen stromen. Bij de warme luchtstroom wordt het materiaal opgewarmd waarna het zijn warmte afstaat aan de koude luchtstroom (Bootsveld, 2004). Aangezien een warmtewiel warmte en vocht overdraagt kunnen er drie verschillende soorten rendementen bepaald worden (zakboek, 2002):

- Voelbare warmte,
- Vocht,
- Warmte en vocht.

Het rendement van de voelbare warmte voldoet aan de vergelijking:

$$\eta_v = \frac{T_1 - T_u}{T_i - T_u}$$

(Vergelijking 5)

T_1 = temperatuur na het wiel (K),
 T_u = temperatuur voor het wiel (K),
 T_i = temperatuur in het wiel (K).

Het rendement van het warmtewiel op vocht voldoet aan de vergelijking:

$$\eta_{\text{vocht}} = \frac{X_1 - X_u}{X_i - X_u} \quad (\text{Vergelijking 6})$$

X_1 = Absolute vochtigheid na het wiel $\left(\frac{g}{kg}\right)$,

X_u = Absolute vochtigheid voor het wiel $\left(\frac{g}{kg}\right)$,

X_i = Absolute vochtigheid in het wiel $\left(\frac{g}{kg}\right)$.

Het rendement van het warmtewiel op enthalpie voldoet aan de vergelijking:

$$\eta_e = \frac{H_1 - H_u}{H_i - H_u} \quad (\text{Vergelijking 7})$$

H_1 = Enthalpie na het wiel $\left(\frac{KJ}{kg}\right)$,

H_u = Enthalpie voor het wiel $\left(\frac{KJ}{kg}\right)$,

H_i = Enthalpie in het wiel $\left(\frac{KJ}{kg}\right)$.

Een ander voorbeeld van een regeneratieve warmtewisselaar is een bodemwarmtewisselaar. Bij dit principe worden er slangen door de bodem gelegd waardoor water stroomt. De bodem is op dit moment het opslagmedium en afhankelijk van de vraag wordt het water in de slangen opgewarmd of afgekoeld.

Recuperatieve warmtewisselaars worden gekenmerkt doordat de beide media altijd door een wand van elkaar gescheiden worden. De warmte wordt bij dit principe getransporteerd door een combinatie van convectie en geleiding door de wand. Om de warmte-uitwisseling zo groot mogelijk te maken moet er voor gezorgd worden dat het oppervlak zo groot mogelijk is. Het rendement van een recuperatieve warmtewisselaar voldoet aan de volgende formule (zakboek, 2002):

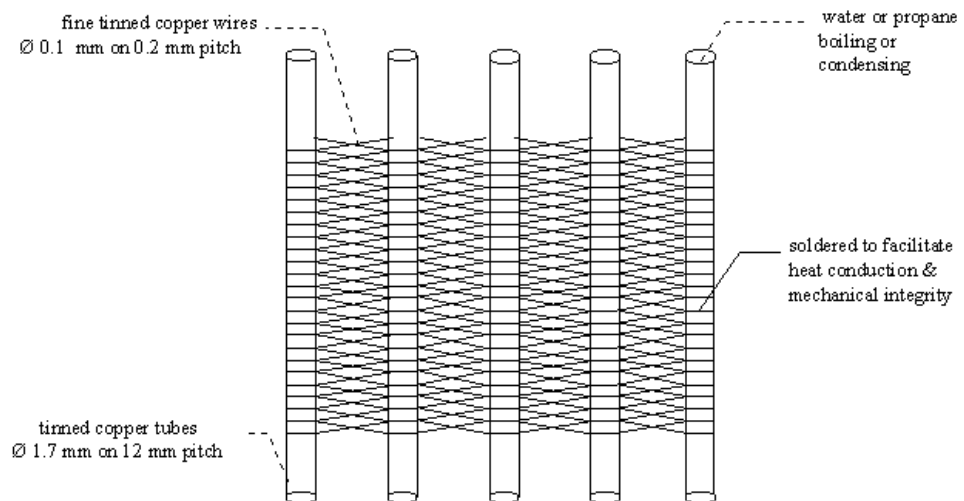
$$\eta_{\text{recuperatief}} = \frac{T_1 - T_u}{T_i - T_u} \quad (\text{Vergelijking 8})$$

T_1 = temperatuur na de warmtewisselaar (K),

T_u = temperatuur voor de warmtewisselaar (K),

T_i = temperatuur in de warmtewisselaar (K).

In het onderzoek van Campen et al. (2003) wordt een aantal mogelijke uitvoeringsvormen beschreven die het mogelijk maken om warmte terug te winnen uit ventilatielucht. Een bijzondere vorm van een recuperatieve warmtewisselaar is de Fiwihex warmtewisselaar (de Zwart, 2003). Deze warmtewisselaar bestaat uit een groot aantal dunne buisjes (zie figuur 20).



figuur 20 Een schematische weergave van een Fiwihex warmtewisselaar (www.Fiwihex.nl).

Tussen deze buisjes zijn dunne draadjes gespannen zodat er een soort matten ontstaan. Wanneer een groot aantal van deze matten in een warmtewisselaar samengevoegd wordt dan ontstaat er een groot contactoppervlak. Aan de hand van het onderzoek van de Zwart (2003) kan geconcludeerd worden dat het mogelijk is om een goed klimaat in een kas te verkrijgen. Er moeten dan ongeveer één Fiwihex per 4 of 5 m² kasoppervlak gebruikt worden.

D Ontvochtigen

Het vochtgehalte van de lucht heeft invloed op de groei en ontwikkeling van het gewas. Aangezien het gewas zelf vocht transpireert is het belangrijk dat dit afgevoerd wordt. In conventionele kassen wordt dit veelal afgevoerd door ventilatie en door condensatie tegen het kasdek. Er zijn echter ook actieve ontvochtigingsmethoden. Deze actieve ontvochtigingsmethoden worden steeds belangrijker naarmate de (semi) gesloten kassen meer toegepast worden. Ook de verdere ontwikkeling van een dubbel kasdek vereist een goed ontvochtigingssysteem omdat condensatie op het koude kasdek onmogelijk wordt. In de loop van de tijd zijn verschillende onderzoeken verricht met als doel technieken te ontwikkelen voor het ontvochtigen van kassen. Zo zijn er technieken ontwikkeld die het mogelijk maken dat vocht tegen koude oppervlakken condenseert (Campen et al., 2002). Ook zijn er technieken waarbij er wordt ontvochtigd met behulp van een warmtewisselaar (Campen et al., 2003) of met behulp van hygroscoopische systemen. In het onderzoek van Bootsvelde (2004) worden technieken besproken voor het

ontvochtigen van lucht die gebruikt worden in de utiliteitsbouw. In de volgende paragrafen zullen de belangrijkste systemen verder besproken worden.

D.1 Uitkoelen van vocht

Bij uitkoelen van vocht condenseert vocht tegen een koud oppervlak. Voor het uitkoelen van vocht is het belangrijk dat er een koudebron beschikbaar is. Over het algemeen zijn de volgende manieren van koelen, welke besproken zijn in de vorige paragraaf, beschikbaar (Bootsveld, 2004):

- Buitenlucht,
- Adiabatische koeling,
- Dauwpuntskoeling,
- Bodem als koudebron,
- Warmtepomp.

Wanneer het uitkoelen van vocht gebruikt wordt als middel om de kaslucht te ontvochtigen dan kan dit in de volgende systeemsamenstellingen gebeuren (Bootsveld, 2004):

- Met compressorkoeler,
- Met warmtewisselaar met buitenlucht,
- Met warmtewisselaar met buitenlucht en adiabatische koeler,
- Met koelmachine (en warmtewisselaar met buitenlucht).

Bij het uitkoelen van vocht door middel van een compressorkoeler wordt de ontvochtiging verzorgd door de compressorkoeler. Bij dit systeem wordt wel veel elektriciteit gebruikt. Wanneer er echter een voorgeschakelde warmtewisselaar gebruikt wordt dan kan het elektriciteitsverbruik met 50% verminderd worden (Bootsveld, 2004). Voor de circulatie en de aandrijving van het systeem is de vereiste hoeveelheid energie is afhankelijk van de luchthoeveelheden en de weerstand in het systeem. Alle verbruikte elektriciteit en condensatiewarmte die vrijkomt bij het condenseren in het systeem komt uiteindelijk als warmte vrij in de kas.

Bij het uitkoelen van vocht door middel van een warmtewisselaar met buitenlucht wordt de ontvochtiging verzorgd door de warmtewisselaar. Hiervoor moet een warmtewisselaar gebruikt worden met een hoog rendement met een vorstbeveiliging. Dit systeem moet uitgerust worden met een zogenaamde by-pass. Op deze manier wordt de lucht die nog behandeld moet worden langs de reeds ontvochtigde lucht geleid met als doel om deze lucht op te warmen. Tevens wordt de nog te ontvochtigen lucht al voorgekoeld en ontvochtigd. Voor de circulatie van beide luchtstromen is energie nodig, de hoeveelheid energie is afhankelijk van de hoeveelheid lucht en de weerstand in het systeem. De verbruikte elektriciteit komt uiteindelijk deels als warmte vrij in de kas. Dit systeem kan worden uitgebreid met een systeem dat de lucht voorcoelt met behulp van adiabatische koeling. De mogelijkheden en beperkingen van dit systeem worden voornamelijk bepaald door de eisen aan het klimaat in de kas in de zomer. Omdat de buitenluchttemperatuur met maximaal 8 - 10°C verlaagd kan worden kan er een zeer grote circulatievoud nodig zijn om de kas te koelen en te ontvochtigen (Bootsveld, 2004). In dit systeem kan ook nog gebruik gemaakt worden van een koelmachine. Op deze manier kan er ontvochtigd worden bij lagere temperaturen waardoor er een geringere circulatievoud nodig is in de kas. Hierbij moet wel rekening gehouden worden met de extra energieconsumptie van de koelmachine.

In Campen et al. (2002) wordt besproken hoe een koel- en ontvochtigingssysteem geïntegreerd kan worden in de kasconstructie. De ontvochtiging wordt op deze manier verzorgd door koud water uit de bodem door een gevinde tralieligger te pompen. Een nadeel van dit systeem is dat de tralieligger 3% licht onderschept. Voor de verdere ontwikkeling van dit systeem was dit onacceptabel. Ook moest nog worden aangetoond of dit systeem energievriendelijker is dan ventilatie.

D.2 Hygroscopisch systeem

Met behulp van hygroscopische systemen is het ook mogelijk om de kaslucht te ontvochtigen. Door de vochtige kaslucht langs het hygroscopische materiaal te leiden neemt dit materiaal vocht op uit de kaslucht. Door het hygroscopische materiaal daarna te verwarmen wordt het mogelijk om het materiaal her te gebruiken. Ongeveer 90% van de energie die daarbij gebruikt wordt kan uiteindelijk door middel van warmtewisselaars weer terug gevoerd worden naar de kas (Campen et al., 2003). In Israël is een bijzonder systeem ontwikkeld dat een zoutoplossing gebruikt als hygroscopisch materiaal (Goodall, 1999). De vochtige lucht wordt langs het hygroscopische materiaal geblazen waardoor het vocht condenseert, hierna stroomt de lucht weer ontvochtigd en gefilterd in de kas. De concentratie zout in de zoutoplossing wordt vervolgens weer verhoogd in een generator, waarna het gecondenseerde water weer uit het systeem stroomt. Ontvochtiging met behulp van hygroscopisch materiaal is alleen te gebruiken wanneer de energie die vrijkomt tijdens de absorptie van het vocht direct te gebruiken is in de kas (Campen et al., 2003).

E CO₂ bemesten

Het doseren van CO₂ in kassen gebeurt voornamelijk door het injecteren van de rookgassen van de bestaande verwarmingsketels. In dit geval is CO₂ een nevenproduct van de opgewekte warmte. De verwarmingsketel wordt ook gebruikt voor opwekking van CO₂ op momenten dat er geen warmtevraag is. De warmte die dan vrijkomt wordt opgeslagen voor later gebruik. Om de vernietiging van warmte te voorkomen kan er gebruik gemaakt worden van zuivere CO₂. Er zijn studies uitgevoerd voor het optimaal gebruik van zuivere CO₂ (de Zwart, 2004b). Om het probleem van warmte vernietiging op te lossen is er onderzoek verricht naar het opslaan van CO₂ (Appelman et al., 2004) voor gebruik op een ander moment.

E.1 Rookgassen

Bij het produceren van CO₂ kunnen verschillende brandstoffen gebruikt worden. In Nederland wordt meestal aardgas gebruikt. Wat in de verwarmingsketel verstoekt wordt. Wanneer er andere systemen (bijvoorbeeld een warmtepomp) fossiele brandstoffen verbranden kunnen deze ook gebruikt worden. Het gebruik van rookgassen heeft een aantal voordelen (Hanan, 1998):

- Het is goedkoop te produceren,
- Er kan ook warmte geproduceerd worden.

Dit laatste kan ook als een nadeel beschouwd worden wanneer er geen vraag naar warmte is. Een oplossing voor dit probleem zou zijn om de vrijgekomen CO₂ op te slaan maar dat is volgens Appelman et al. (2004) economisch niet rendabel.

E.2 Zuivere CO₂

Door het gebruik van zuivere CO₂ wordt het mogelijk om minder afhankelijk te zijn van de verbrandingsinstallaties. Voordelen bij het gebruik van zuivere CO₂ zijn een hoge zuiverheid en een constante beschikbaarheid die alleen wordt beperkt door de maximale doseercapaciteit van het systeem (Appelman et al., 2004). Een groot nadeel van het gebruik van zuivere CO₂ zijn de relatief hoge kosten. Volgens Appelman et al. (2004) komen deze neer op 0,10 – 0,14 euro/kg terwijl CO₂ van rookgassen 0,07 euro/kg kost. Aan de hand van het onderzoek van de Zwart (2004b) kan geconcludeerd worden dat het gebruik van zuivere CO₂ goed gebruikt kan worden naast CO₂ van rookgassen. In dit geval wordt het in de meest optimale situatie gebruikt.

F Omhullingmaterialen

In de moderne glastuinbouw heeft het omhullingmateriaal twee functies: het doorlaten van zoveel mogelijk zonlicht en het beperken van het energieverlies. In de loop van de tijd zijn er een groot aantal verschillende omhullingmaterialen op de markt gekomen. Voor de Nederlandse glastuinbouw is glas nog steeds de belangrijkste. Wel zijn er in de loop van de tijd een aantal nieuwe glassoorten beschikbaar geworden. Zo wordt er bijvoorbeeld gebruik gemaakt van glas met een anti reflectie (AR) coating die voorkomt dat zonlicht reflecteert op het glas. In de glastuinbouw wordt ook gebruik gemaakt van kunststoffen, die weer opgedeeld worden in harde kunststoffen en folies.

F.1 Glas

Momenteel is glas het meest gangbare omhullingsmateriaal. Meestal wordt er gebruik gemaakt van blank glas met een dikte van 4 mm. Voor glas zijn een aantal belangrijke voordelen te noemen (Hemming et al., 2004):

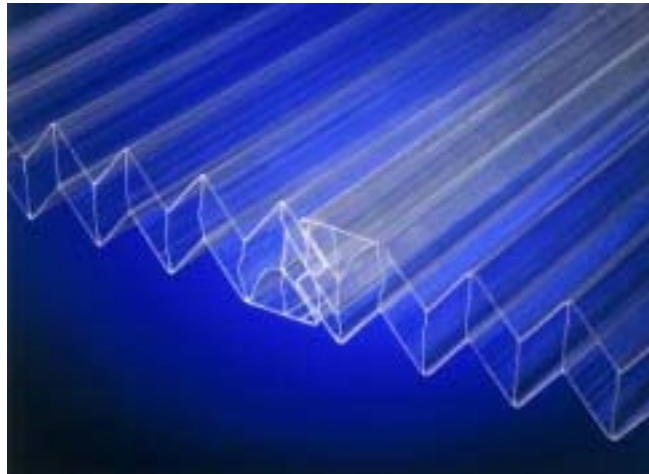
- Een goede stabiliteit en weersbestendigheid,
- Een goede en stabiele lichtdoorlatendheid,
- Goede dampdichtheid,
- Goede bevochtigingseigenschappen,
- Ondoorlaatbaar voor warmtestraling,
- Hard oppervlak,
- Lage prijs.

Tegenwoordig is er wel een aantal variaties op de markt die er voor kunnen zorgen dat de lichtdoorlatendheid toeneemt (wit glas) of dat er minder zonlicht gereflecteerd wordt (AR coating). Ook kan er gebruik gemaakt worden van gehard glas wat veel sterker is dan gewoon glas. Om het energieverbruik te verlagen is in het verleden Hortiplus glas ontwikkeld. Dit is glas met een zogenaamde lage emissie coating die de warmtedoorgang door het glas reduceert. Een nadeel van deze coating is dat de lichttransmissie afneemt (zie tabel 6).

F.2 Kunststoffen

De mechanische en optische eigenschappen van kunststoffen kunnen in tegenstelling tot die van glas aangepast worden aan de gebruikersdoeleinden. Hierdoor is er een groot aantal verschillende kunststoffen op de markt gekomen. In Nederland worden veelal dubbelwandige platen toegepast omdat deze een grotere stevigheid hebben en omdat

deze platen een aanmerkelijk lagere U-waarde hebben (tabel 6) zodat er veel energie bespaard kan worden. Als dubbelwandige plaat heeft PMMA (plexiglas) de hoogste lichtdoorlatendheid voor loodrecht invallend licht (ongeveer 89% tegenover bijvoorbeeld polycarbonaat: 80%). Wanneer de polycarbonaat als dubbelwandige plaat gebruikt wordt (een zogenaamde Zigzag plaat) in de vorm zoals deze in figuur 21 te zien is, dan is de lichtdoorlatendheid te vergroten tot ongeveer 90%. Dit wordt veroorzaakt doordat een aanzienlijk deel van het gereflecteerde licht alsnog wordt ingevangen door de zigzag structuur.



figuur 21 De Zigzagplaat.

	PAR _{dir} (%)	PAR _{dif} (%)	U (W m ⁻² k ⁻¹)	Levensduur (J)	Prijs (€m ⁻²)
Glas	89-91	82	7,2	25	5
AR Glas	95	88	7,2	25	-
Hortiplus glas	84	69	6,0	25	10
PMMA	89	76	5,8	15	20-25
Zigzag	90	80	5,6	15	32
EVA	90-91	82	-	4-5	0,7-0,9
ETFE	93-94	88	-	15-20	10-12

tabel 6 Technische specificaties van verschillende omhullingmaterialen

G Warmte opslag systemen

Om de energieoverschotten gedurende de dag en het seizoen op te slaan kan er gebruik gemaakt worden van systemen waarin de energie opgeslagen kan worden. Deze systemen kunnen onderverdeeld worden in lange termijn opslag en korte termijn opslag. De lange termijn opslag zal zich voornamelijk richten op aquifers en de korte termijn opslag zal zich voornamelijk richten op water tanks. Er kan ook gebruik gemaakt worden van phase change materials waarbij er gebruik gemaakt wordt van de smelt- en stollingsenergie van stoffen (Spoorenberg et al., 2005). Wanneer een kas gebouwd

wordt in een waterbergingsgebied kan een waterbekken dienen als een energieopslag medium. Wanneer er gebruik gemaakt wordt van energiepalen kan de relatief warme of koude ondergrond dienen om energie in op te slaan.

G.1 Lange termijn opslag

In een watervoerende laag die tussen twee niet doorlatende bodemlagen ligt, kan warmte en koude opgeslagen worden. Deze aquifers komen bijna overal in Nederland op diepten tussen 10 m en 200 m voor. In het algemeen worden er twee bronnen aangelegd welke gebruikt worden als een koude en warme bron (Glastuinbouw en Milieu, 2000). Het warme water wordt via een productieput omhoog gepompt en gaat via een warmtewisselaar weer terug naar de aquifer, via de tweede put. Afhankelijk van de vraag naar koude of warmte kan de stromingsrichting omgekeerd worden (figuur 22). De diepte van een aquifer is afhankelijk van de diepte van de watervoerende lagen en de hoeveelheid energie die opgeslagen moet worden. Met behulp van de volgende vergelijkingen is de diepte globaal te bepalen.

$$V = \frac{E}{\rho c_p * \Delta T} \quad (\text{Vergelijking 9})$$

E = hoeveelheid energie opgeslagen in de aquifer (J),

ρc_p = warmtecapaciteit van de aquifer $\left(\frac{J}{m^3 K}\right)$,

ΔT = temperatuurverschil van het water (K).

Omdat een aquifer bestaat uit water en zand wordt de warmtecapaciteit ook bepaald door de fractie water en zand in de aquifer. De warmtecapaciteit van de aquifer is als volgt te bepalen:

$$(\rho c_p)_{\text{aquifer}} = (1 - f_{\text{zand}})(\rho c_p)_{\text{water}} + f_{\text{zand}}(\rho c_p)_{\text{zand}} \quad (\text{Vergelijking 10})$$

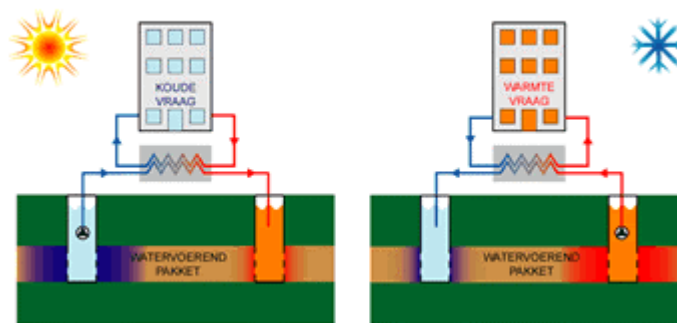
f_{zand} = de fractie van het zand in de aquifer (-).

Wanneer een aquifer voor ongeveer 40% bestaat uit zand en voor de rest uit water dan is met behulp van de vergelijking te bepalen dat de warmtecapaciteit van de aquifer voldoet aan:

$$(\rho c_p)_{\text{aquifer}} = (1 - 0,4)(4,2 * 10^6) + 0,4(2,0 * 10^6) = 3,3 * 10^6 \left(\frac{J}{m^3 K}\right)$$

Wanneer er vervolgens 10 m^3 AE per vierkante meter kasoppervlak opgeslagen moet worden met een temperatuurverschil van $10 \text{ }^\circ\text{C}$ dan is er een opslag volume nodig van:

$$V = \frac{3,5 * 10^8}{(3,3 * 10^6) * 10} = 10,6 \text{ m}^3 \text{ per vierkante meter kasoppervlak.}$$



figuur 22 Een schematische voorstelling van een aquifer met twee putten.

Door middel van de warmtewisselaar wordt de warmte (of koude) afgestaan aan het verwarmingsnet van de kas. Het terug pompen van het koude water is noodzakelijk omdat het water uit de aquifer niet op het oppervlaktewater geloosd mag worden vanwege het hoge zout gehalte en omdat de aquifer op deze manier een voldoende hoge druk behoudt. Een ondiepe aquifer kan ongeveer 50 m³ tot 100 m³ water per uur leveren. Wanneer er een hoger debiet nodig is dan moeten er meerdere putten geslagen worden (van de Braak et al., 2001).

G.2 Korte termijn opslag

Een warmtebuffer kan gebruikt worden op momenten dat er geen of weinig warmtevraag is, bijvoorbeeld wanneer de verwarmingsinstallatie gebruikt wordt om CO₂ te doseren. De vrijkomende warmte die anders verloren zou gaan wordt tijdelijk in een buffertank opgeslagen (zie figuur 23).



figuur 23 Voorbeeld van een watertank als opslagbuffer.

Op momenten dat er warmtevraag is kan het tekort aan warmte in de kas in eerste instantie worden aangevuld vanuit de buffertank. Dit is meestal in de nacht en vroege ochtend het geval.

G.3 Phase change materials

Phase change materials zijn mogelijk interessant bij het gebruik als opslag medium omdat gedurende de opwarming van het materiaal een grote hoeveelheid energie kan worden geabsorbeerd die bij afkoeling weer vrijkomt. In vergelijking met een gelijk

volume aan water kan op deze manier meer energie opgeslagen worden zodat een kleiner opslagvolume benodigd is (Spoorenberg, 2005).

Phase change materials worden op basis van hun chemische eigenschappen onderverdeeld in twee groepen: organische en anorganische phase change materials. Het grootste verschil tussen deze twee principes is dat anorganische materialen een grotere warmteopslagcapaciteit per volume eenheid hebben. Een nadeel is echter wel dat deze stoffen niet in microcapsules toegepast kunnen worden. Microcapsules zijn capsules met een zeer kleine diameter en een kapseling van hard plastic. Het gebruik van microcapsules heeft twee belangrijke voordelen bij een mogelijke toepassing in de glastuinbouw:

- Door de kleine diameter is het relatieve oppervlak optimaal voor warmte-uitwisseling,
- Door de kleine diameter kunnen de capsules rondgepompt worden.

Aan de hand van het onderzoek van Spoorenberg et al. (2005) kan geconcludeerd worden dat voor een economisch rendabel opslagsysteem met phase change materials in de glastuinbouw de materialen veel goedkoper moeten worden. Ook moet het gebruik van de buffer geoptimaliseerd worden

G.4 Waterbekken

Een waterbekken kan op verschillende manieren uitgevoerd worden. Een probleem bij opslag in water is dat er een grote hoeveelheid water nodig is wanneer de opslag gebruikt moet worden voor lange termijn opslag. Dit kan duidelijk gemaakt worden met hetzelfde voorbeeld als van de aquifer. Wanneer er 10 m^3 AE opgeslagen moeten worden met een temperatuurverschil van 10°C ., dan is het volgende volume per vierkante meter kasoppervlak nodig:

$$V = \frac{3,5 * 10^8}{(4,2 * 10^6) * 10} = 8,3 \text{ m}^3$$

Daarom zijn waterbekkens alleen geschikt voor de opslag op korte termijn. Voor lange termijn opslag zouden te grote opslagvolumes nodig zijn. Er kan ook gebruik gemaakt worden van een systeem van een kas op palen dat in een waterbergingsgebied staat. Wanneer er veel water beschikbaar is kan de energie daarin opgeslagen worden.

G.5 Energiepalen

Een energiepaal is een speciaal soort heipaal. Behalve als fundering dienen energiepalen ook om warmte uit de bodem te halen of in de bodem op te slaan, vandaar de naam "energiepalen". Om dit te kunnen doen worden tijdens de productie van de heipaal kunststof slangen in de lengte richting in de palen aangebracht; de draagkracht van de paal blijft uiteraard behouden. Door gekoeld of verwarmd water door die slangen te laten stromen kan warmte aan de omringende bodem worden onttrokken en worden toegevoerd. In feite is het oppervlak van de heipaal dus uitgevoerd als een soort warmtewisselaar.

H Regelen zonlicht

Met behulp van schermen en het kalken van de omhulling is het mogelijk om het niveau van de zoninstraling overdag te verminderen. Het regelen van het zonlicht kan gewenst zijn omdat enerzijds de daglengte gemanipuleerd moet worden en anderzijds kan er tussen 20% en 35% energie bespaard worden wanneer de schermen gesloten zijn (Hemming et al., 2004). Het regelen van de daglengte wordt gebruikt omdat op deze manier bepaalde planten tot knopvorming kunnen worden aangezet. Over het algemeen worden er schermen gebruikt voor het regelen van zonlicht en voor sommige teelten wordt er gebruik gemaakt van krijt.

H.1 Krijt

Het krijt bestaat voornamelijk uit fijn gemalen kalk met toevoeging van lijmverbindingen. Het gebruik van het soort krijt is voornamelijk afhankelijk van de lengte van de tijd dat het op het dak moet blijven zitten. Een nadeel van het gebruik van krijt is dat het ook warmte tegenhoudt terwijl het juist belangrijk is dat dit zoveel mogelijk in de kas komt.

H.2 Schermen

Naast de verschillende uitvoeringsvormen van schermen wordt er een verschil gemaakt tussen schermen aan de buitenzijde en aan de binnenzijde van de kas. Een voordeel van een scherm aan de buitenzijde van de kas is dat de geabsorbeerde zoninstraling die in warmte wordt omgezet buiten de kas gehouden wordt. Dit is met name aantrekkelijk wanneer de kaslucht gekoeld moet worden. In combinatie met het (semi) gesloten kasconcept heeft dit als extra voordeel dat de kas langer gesloten kan blijven, voordat de grens van de koelinstallatie bereikt wordt.

Over het algemeen worden de schermen gemaakt van gealuminiseerde kunststoffolie stroken, die afgewisseld kunnen worden met open stroken. De mate van zonwering van de schermen wordt bepaald door de materiaaleigenschappen van de stroken en de verhouding tussen de open stroken en de kunststoffolie stroken. De zonweringschermen zijn te koop in verschillende zonweringpercentages variërend tussen 40% en 85%. Verduisteringsschermen hebben echter een veel hoger zonweringpercentage omdat het belangrijk is dat deze nagenoeg lichtdicht zijn. Veelal zijn deze schermen wit of gealuminiseerd aan de dekszijde om het zonlicht zoveel mogelijk te reflecteren. Met beweegbare verduisteringsschermen kan tussen 20% en 30% energie bespaard worden.