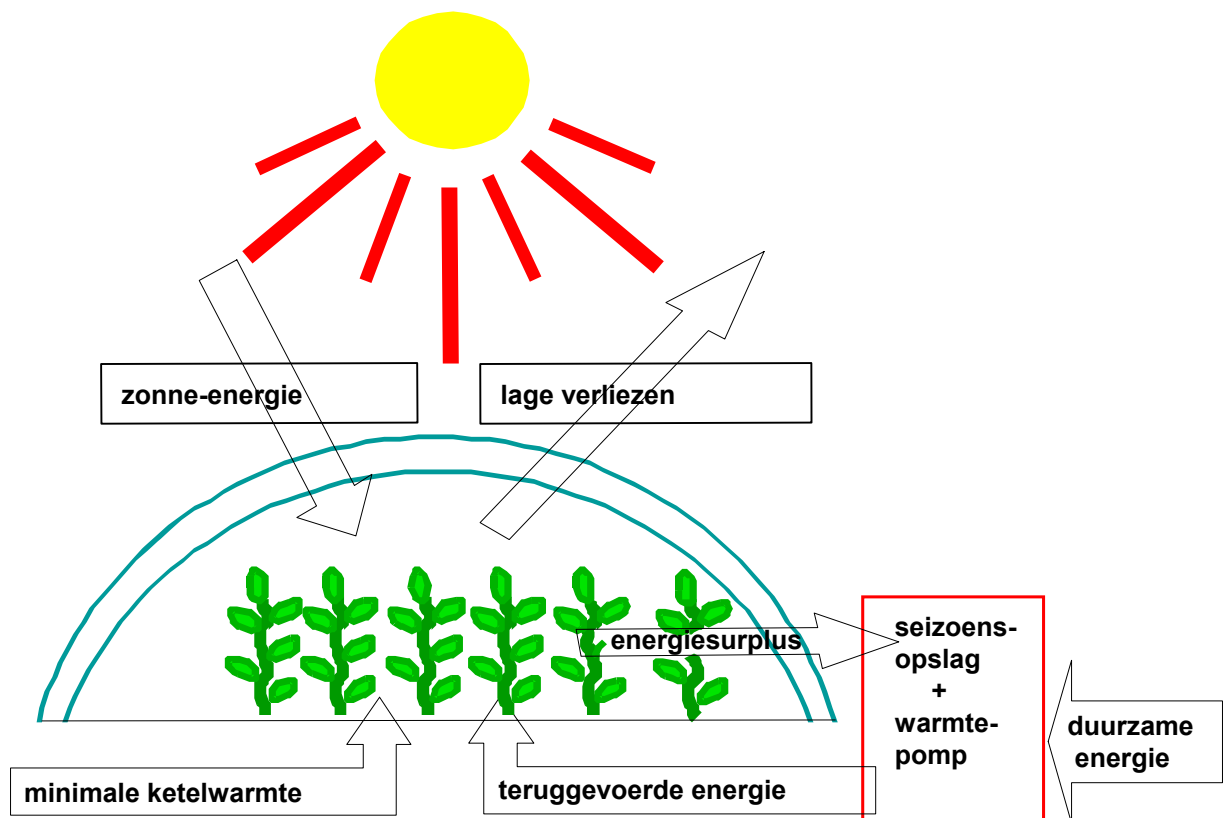


Eindverslag project EETK96084

De Z●nnekas:

gewasproductie zonder fossiele energie



Wageningen Universiteit

Hyplast

Priva Hortimation

A&F(IMAG)

Gerard Bot, Wageningen Universiteit, projectleider
Ingeborg Verlodt, Hyplast, deelprojectleider 1a materiaalonderzoek
Silke Hemming, A&F, deelprojectleider 1b kasconstructie
Nico van de Braak, A&F, deelprojectleider 1c klimatisering en 2a energievoorziening
Hugo Challa (†), Wageningen Universiteit, deelprojectleider 2b tolerantie gewas
Gerrit van Straten, Wageningen Universiteit, deelprojectleider 3a optimale regeling
Theo Rieswijk, Priva Hortimation, deelprojectleider 3b praktijkimplementatie

Summary

The Solar Greenhouse project aimed at the development of a greenhouse system for high value crop production with sustainable energy supply. The project meets the EET goal to substantially increase contribution of sustainable energy in energy supply. Moreover CO₂ emission is reduced considerably.

The research contained three themes:

1. Decrease of the energy demand of the greenhouse system
2. Matching the time patterns of sustainable energy supply and greenhouse energy demand
3. Optimal control of the designed greenhouse system

In **theme 1**, decreasing the energy demand, the three partial projects 1a, 1b and 1c can be distinguished. In *partial project 1a* the materials were developed to realize a high insulating greenhouse cover in combination with high light transmission. The emphasis was on plastic foils. The first promising material in study was TPU (Thermoplastic Poly-Urethane) due to its longevity and superior optical properties. The research was aimed at decreasing the too high elongation and creep. The resulting TPU had good properties at room temperature but at higher levels of about 60 °C creep was still too high. While this can be a local temperature it is not acceptable. Having no perspectives for further improvement TPU development was stopped. The research for improvement of another plastic foil, PVDF (Poly-Vinylidene Di-Fluoride) was successful on both the mechanical and the optical properties. Resulting light transmission was 91 and 96% for diffuse light and for perpendicular direct light respectively. This allows the composition of an insulating double layer cover with light transmission equal to that of single glass. Other simple plastic materials had no perspective for large-scale economical application. Furthermore the improvement of the conventional and cheap greenhouse plastics like PE (Poly-ethylene) was investigated. Coating with anti-reflective layers is too expensive. Another option is multi-layer extrusion with successive layers having low and high refraction. Therefore the change of the index of refraction by additives was investigated. Adding pigments or nano-particles proved to have no perspective. Generating micro-porosity seems promising but needs further research. Linked to this, research was successful to improve longevity of conventional PE being by about 10-30% by applying better UV stabilizers. Besides improving light transmission in the short wave region it was also investigated to increase reflection in the thermal infrared region by adding special pigments, thereby improving insulation. Unfortunately improvements were linked to a decrease of short wave light transmittance that cannot be accepted.

Partial project 1b aimed at the constructional aspects of the Solar Greenhouse with double layer plastic cover. Total light transmission, integration of plastic foil and construction and homogeneity of greenhouse climate were important aspects. After surveying different design approaches the most promising design was specified. The spatial distribution was calculated applying CFD. This has led to adaptations of the design optimising homogeneity of greenhouse climate. This prevents hot and cold spots, so decreases pressure of plagues and diseases preventing chemical crop protection.

Partial project 1c was aimed at climatisation of the Solar Greenhouse for optimal growth conditions at low energy consumption. A major problem is dehumidification while water removal via condensation against the well-insulated cover will be low. Water input due to crop transpiration has to be removed at an acceptable level of relative humidity (RH). Various options for energy friendly dehumidification were investigated. Absorption by hygroscopic materials and regeneration is an option but was considered to introduce environmental risks linked to the applied hygroscopic materials. The next option is condensation to a surface cooled by a heat pump. It was concluded from analysis of the absorbed latent and sensible energy and comparison to ventilation that ventilation is less

energy consuming. The absorbed energy can be harvested cheaper in summer (partial project 2a). Regeneration of sensible energy was technically feasible but the needed equipment is not economical applicable. Regaining sensible heat can decrease the energy consumption for dehumidification by ventilation. Finally this proved to be the best option. This research will be described in a PhD thesis (Campen, 2004).

Furthermore in this partial project the models were build not only for the spatial climate distribution (partial project 1b and 1c) but also the dynamic greenhouse models for the greenhouse system including energy supply, energy storage, indoor climate and crop growth, for year round simulations of systems performance allowing analysis of various options in partial projects 2a and 2b.

In **theme 2** it was investigated how the time patterns of relevant sustainable energy options (solar and wind energy) and of greenhouse energy demand can be matched. The improved greenhouse itself is a high efficient solar collector and solar energy should cover the low energy demand. Day-night mismatches can be solved partially by allowing variations in greenhouse climate in both temperature and RH. This is possible due to the crop tolerance for these variations. Crop tolerance linked to the allowable climate variations were investigated in *partial project 2b*. The results show an achievable energy saving of about 25%. This research is described in a PhD thesis (Körner, 2003)

Matching of seasonal variations was investigated in *partial project 2a*. This is possible by subtracting summer heat, storing this in an aquifer at relatively low temperature level (about 15-18 °C) and using this heat for winter heating by a heat pump recharging the aquifer at low temperature (about 5 °C). For the nowadays best realisable greenhouse with double cover and thermal screen the energy demand is decreased by about 40%. By applying seasonal solar energy storage and a heat pump, energy demand is again decreased by 40%, resulting in a Solar Greenhouse possible nowadays with energy demand of 37% compared to a conventional greenhouse. In future further improvements of cover materials will be possible leading to lower energy demand. Applying fossil fuels driving the heat pump already results in substantial reduction of CO₂ emission. If sustainable energy is used to drive the heat pump the real Solar Greenhouse is realised. It was investigated how this sustainable energy can be collected. Wind energy and biomass are attractive options, photovoltaic solar energy will be feasible if costs are reduced substantially.

In **theme 3** the optimal systems control was investigated. Research in *partial project 3a* was aimed at the tools for optimal control of the greenhouse system including energy storage and supply with the components developed in partial projects 1c and 2a. While the design of the Solar Greenhouse could realise homogeneous greenhouse climate, control of climate distribution had not to be covered in partial project 3a. Applying conventional control algorithms is not attractive due to the large number of rules and corrections already implemented and the restricted power of set point control with feed back. Controlling complex systems asks for implementation of systems knowledge. Therefore dedicated dynamical models were developed and model based control is realised achieving the goals. This will be described in a PhD thesis (Van Ooteghem 2004)

Partial project 3b aimed at implementation of control algorithms in practice. The software environment (greenhouse simulator) was created to link control equipment as used in practice to the developed control algorithms enabling fast tests without risk under practical conditions.

Concluding: the project has resulted in a greenhouse system design with energy demand at about one third of conventional greenhouses by combining low energy demand with seasonal energy storage and heat pump. Further cover material developments enable even lower demands. This low energy demand can be covered by sustainable energy.

Samenvatting

Het project Zonnekas was gericht op de ontwikkeling van een kassysteem voor hoogwaardige gewasproductie met energievoorziening door duurzame energie. Het project sluit aan bij de EET doelstelling om te komen tot een substantiële inzet van duurzame energie. Bovendien wordt hierdoor een aanzienlijke reductie van de CO₂ uitstoot bereikt. Het project was opgebouwd uit drie thema's:

- 1 Verlagen van de energiebehoefte van een kas.
- 2 Op elkaar afstemmen van de patronen van energiebehoefte van de kas en aanbod van duurzame energie.
- 3 Optimaal sturen van het resulterende complexe productiesysteem.

In **thema 1**, verlagen van de energiebehoefte, zijn de drie deelprojecten 1a, 1b en 1c uitgevoerd. In *deelproject 1a* zijn materialen ontwikkeld waarmee een hoge isolatiewaarde voor de kas kan worden bereikt in combinatie met een hoge lichtdoorlatendheid. De nadruk heeft daarbij op kunststoffolies gelegen. Als eerste veelbelovende folie is TPU (Thermoplastisch Poly-Urethaan) verder ontwikkeld vanwege de lange levensduur en zeer goede optische eigenschappen. Door onderzoek is getracht de te hoge rek en kruip te verbeteren. Dit heeft TPU opgeleverd met goede eigenschappen bij kamertemperatuur en lager, evenwel bij hogere temperatuur (60 °C) was de kruip nog te hoog. Omdat deze temperatuur lokaal kan voorkomen is dit niet acceptabel. Omdat de leverancier van de grondstof geen verder perspectief zag ter verbetering, is verdere ontwikkeling van TPU gestopt. Het onderzoek naar een andere kunststof, PVDF (Poly-Vinylideen Di-Fluoride) heeft wel goede resultaten opgeleverd: goede mechanische eigenschappen en lichtdoorlatendheid van 91% diffuus en 95% loodrecht. Hiermee kan een dubbele folie worden samengesteld met dezelfde lichtdoorlatendheid als enkel glas en dubbele isolatiewaarde. Andere enkelvoudige kunststoffen met hoge lichttransmissie boden geen perspectief voor grootschalige, economische verwerking. Hiernaast is onderzocht of traditionele, goedkope materialen als PE (poly-ethyleen) kunnen worden verbeterd. De optische eigenschappen hiervan kunnen worden verbeterd door multi-layer uitvoering met afwisselende lagen met hogere en lagere brekingsindex. Hiervoor is verder onderzoek nodig. De levensduur kan worden verlengd door betere UV stabilisatoren en hiervoor zijn mogelijkheden gevonden. Het coaten om de optische eigenschappen te verbeteren biedt voor folies geen perspectief door de te dure opbrengtechniek.. Er is verder onderzocht hoe de brekingsindex door toevoegingen kan worden beïnvloed. Toevoeging van pigmenten en nanodeeltjes bleek geen perspectief te hebben. Het genereren van microporositeit is veelbelovend, hiervoor zal verder diepgaand onderzoek nodig zijn. Er is ook getracht door speciale toevoegingen de emissiecoëfficiënt in het thermisch IR te verlagen om hierdoor de isolatiewaarde te verbeteren. Dit ging evenwel gepaard met verlaging van de lichtdoorlatendheid wat onacceptabel is.

In *deelproject 1b* is de constructie van een isolerende kas met dubbele kunststoffolie omhulling ontwikkeld met veel aandacht voor totale lichtdoorlatendheid, integratie van folie en constructie en een zo homogeen mogelijk klimaat in de kas. Na verkenning van verschillende mogelijkheden is het meest belovende ontwerp uitgewerkt. Met behulp van computational fluid dynamics (CFD) is de ruimtelijke klimaatverdeling berekend en is het kasontwerp geoptimaliseerd naar een homogeen klimaat. Hierdoor kan ziekte- en plaagdruk worden verminderd (geen warme of koude plekken), zodat het gebruik van chemische gewasbeschermingsmiddelen zo veel mogelijk kan worden voorkomen.

In *deelproject 1c* is de klimatisering onderzocht en ontwikkeld, gericht op optimale groeicondities voor het gewas en op een homogeen klimaat met lage ziekte- en plaagdruk (samen met deelproject 1b). Een knelpunt in een goed geïsoleerde kas is de vochtafvoer omdat condensatie tegen het geïsoleerde dek sterk is verminderd. Het door het gewas

—
verdampte water zal moeten worden afgevoerd bij een voor het gewas aanvaardbaar niveau van de relatieve luchtvochtigheid (RV). Energiezuinige vochtafvoer is onderzocht. Absorptie door hygroscopische materialen en regeneratie hiervan is technisch mogelijk maar introduceert met deze materialen een milieu-risico. Verder vereist het een technisch gecompliceerde installatie. Condensatie op een door een warmtepomp koud gehouden oppervlak is gemakkelijker uitvoerbaar maar gebruikt door de opname van voelbare warmte aan het koude oppervlak meer energie dan vochtafvoer door ventilatie. Het voordeel van teruggewonnen warmte valt weg als bedacht wordt dat warmte goedkoop in de zomer kan worden geogst (deelproject 2a). Het bleek technische goed mogelijk de voelbare warmte terug te winnen voordat het aan het koude oppervlak wordt opgenomen, het hiervoor benodigde apparaat is echter te duur voor toepassing. Het energiegebruik voor vochtafvoer door ventilatie kan ook worden verminderd door terugwinning van de voelbare warmte. Dit bleek uiteindelijk energetisch de beste optie.

In deelproject 1c zijn niet alleen de CFD modellen ontwikkeld voor de ruimtelijke klimaatverdeling maar ook de dynamische simulatiemodellen om jaarrond het energiegebruik te kunnen berekenen en evalueren van verschillende uitvoeringen van de Zonnekas. De modelberekeningen zijn in deelproject 2a en 2b ingezet.

In **thema 2** is nagegaan hoe het in de tijd variërende aanbod van relevante vormen van duurzame energie (zonne- en windenergie, aardwarmte) en de in de tijd variërende energiebehoefte van de kas op elkaar kunnen worden afgestemd. De sterk verbeterde kas werkt daarbij zelf primair als hoog-rendements zonnecollector, waarin vooral zonne-energie in de lage eigen energiebehoefte voorziet. Dag-nacht variaties kunnen al voor een deel worden opgevangen door de tolerantie van het gewas voor afwijkingen in omgevingscondities (deelproject 2b). Door hierbij zowel temperatuur- als vochtoleranties te betrekken is een energiebesparing van ca 25% mogelijk. Dit onderzoek is beschreven in een proefschrift (Körner, 2003).

Seizoensvariaties kunnen door lange termijn energie- en koudeopslag in een aquifer worden vereffend (deelproject 2a). De opgeslagen zonnewarmte uit de zomer is beschikbaar bij een relatief laag temperatuurniveau (ca 15-18 °C). Daarom wordt een warmtepomp ingezet om deze warmte voor verwarming van de kas in te kunnen zetten. Voor de huidige best te realiseren situatie (dubbel dek met scherm) wordt de energiebehoefte met ca 40% verminderd. Door gebruik van opgeslagen zomerwarmte en inzet van een warmtepomp wordt het energiegebruik nogmaals met ca 40% verlaagd zodat nu een Zonnekas met een energiegebruik van ca een derde van die van huidige kassen kan worden gerealiseerd. Als deze energie als duurzame energie wordt ingezet is geen fossiele energie meer nodig. Ook bij inzet van fossiele energie is de energiebesparing en daarmee de reductie van CO₂ uitstoot substantieel. In de toekomst kunnen door verder materiaalonderzoek nog betere kasdekmaterialen beschikbaar komen en worden verdergaande reducties mogelijk.

In thema 1 en 2 kwam de dimensionering van de systeemelementen aan de orde; in **thema 3** de dynamische regeling hiervan. In *deelproject 3a* zijn de gereedschappen ontwikkeld om het gewas in de zonnekas optimaal te kunnen sturen naar een opbrengst met een hoge kwaliteit. Hierbij moeten ook energievraag en -aanbod dynamisch op elkaar af worden afgestemd, met inbegrip van de buffering. Door het ontwerp van de Zonnekas (deelproject 1b) is de verdeling van het kasklimaat homogeen zodat dit aspect niet meer in de regeling hoeft te worden opgenomen. Regeling met nu in de praktijk gebruikte algoritmen is niet aantrekkelijk. Het nu al hoge aantal instellingen en (weersafhankelijke) correcties daarop zou verder moeten worden uitgebreid. Ook de gebruikte setpointregeling met terugkoppeling biedt beperkte mogelijkheden. De regeling van complexe systemen vereist dat kennis van het systeemgedrag in de regeling wordt ingebouwd. Voor deze systeemkennis zijn dynamische modellen ontwikkeld met voldoende nauwkeurigheid.

Zodoende is model voorspellend optimaal regelen gerealiseerd waarmee de doelstelling is gehaald. Het onderzoek uit deelproject 3a wordt weergegeven in een proefschrift (Van Ooteghem, 2004).

Deelproject 3b was er op gericht de te ontwikkelen regelingen in de toekomst ook daadwerkelijk te kunnen implementeren. Daarvoor is een software omgeving gebouwd (kassimulator) waar de in de praktijk gebruikte regelapparatuur op kan worden aangesloten. De kassimulator vervangt zodoende een fysieke kas zodat nieuwe regelalgoritmen onder semi-praktijk condities snel en zonder risico voor het productieproces kunnen worden getest.

Concluderend: het project heeft geresulteerd in een totaal ontwerp voor een kassysteem met gewasproductie onder optimale klimaatomstandigheden. De nu realiseerbare energiebehoefte is ongeveer een derde is van die van huidige kassen door de combinatie van lage energiebehoefte en energievoorziening met behulp van seizoensopslag en warmtepomp. De resterende lage energiebehoefte kan door duurzame energie worden gedekt.

Inhoudsopgave

Summary	1
Samenvatting	3
Inhoudsopgave.....	6
1 Inleiding.....	8
1.1 Algemeen	8
1.2 Energiegebruik in de glastuinbouw	10
1.3 Doel van het project.....	11
1.4 Algemeen projectoverzicht met indeling deelprojecten	12
2 Inhoudelijke rapportage	15
2.1 Deelproject 1a: Materiaaltechnologie	15
2.1.1 Basismaterialen	15
2.1.2 Alternatieven	16
2.1.3 Verlaging emissiecoëfficiënt	18
2.1.4 Rapportage en publiciteit	19
2.2 Deelproject 1b: Kasconstructie	19
2.2.1 Ontwerp.....	19
2.2.2 Rapportage en publiciteit	22
2.3 Deelproject 1c: Klimatisering	23
2.3.1 Ontvochtiging	23
2.3.2 Ruimtelijke klimaatverdeling	26
2.3.3 Modelvorming:	26
2.3.4 Klimaat- en energieberekeningen.....	26
2.3.4 Rapportage en publiciteit	27
2.4 Deelproject 2a: Energieafstemming.....	28
2.4.1 Seizoensafstemming.....	28
2.4.2 Energiebehoefte.....	29
2.4.3 Rapportage en publiciteit	31
2.5 Deelproject 2b: Gewastolerantie.....	31
2.5.1 Inleiding.....	31
2.5.2 Aanpak	32
2.5.3 Resultaten	33
2.5.4 Rapportage en publiciteit	35
2.6 Deelproject 3a: Besturingstechniek	35
2.6.1 Inleiding.....	35
2.6.2 Aanpak	36
2.6.3 Modellering	36
2.6.4 Optimale regeling.....	38
2.6.5 Adaptieve regeling voor de zonnekas.....	40
2.6.6 Implementatie van RHOC bij Priva Hortimation	41
2.6.7 Rapportage en publiciteit	41
2.6.8 Referenties.....	42
2.7 Deelproject 3b: Implementatie in praktische klimaatregeling	43
2.7.1 Doelstellingen	43
2.7.2 Activiteiten	43

–	2.7.3 Resultaat.....	44
	2.7.4 Uitvoering van het project.....	47
	2.7.5 Perspectief	47
	2.7.6 Eindconclusie.....	47
	2.7.7 Rapportage en publiciteit	47
	2.7.8 Literatuur.....	47
	2.8 Duurzame energiedekking	47
	2.9 Conclusies.....	48
3	Behalen van de doelstellingen op het gebied van economie, ecologie en technologie	50
	3.1 Doelstellingen op het gebied van economie	50
	3.2 Doelstellingen op het gebied van ecologie	50
	3.3 Doelstellingen op het gebied van technologie	51
4	Gerezen problemen	52
5	Octrooiaanvragen.....	52
6	Commerciële vooruitzichten.....	52
7	Samenwerking partners	53
8	Publicaties	53

1 Inleiding

1.1 Algemeen

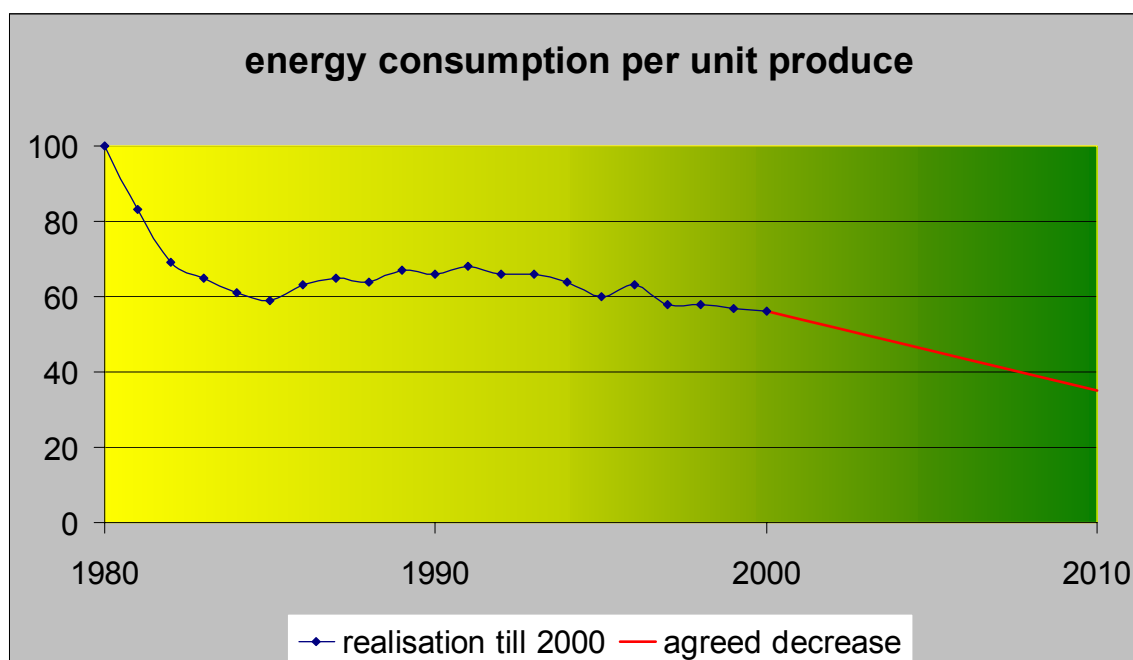
De kastuinbouw kan als voorbeeld worden beschouwd van uitmuntend Nederlands ondernemerschap met een sterke concurrentiepositie en met goede vooruitzichten. Door het gematigde Nederlandse klimaat met zijn relatief koele zomers en milde winters kan er jaarrond worden geproduceerd waardoor de randvoorwaarden voor een hoge jaarlijkse productie aanwezig zijn. Door het hoge niveau van vakmanschap en de snelle implementatie van innovaties kunnen deze hoge producties worden gerealiseerd. Verbonden aan de primaire kastuinbouw heeft zich ook een sterk toeleverende bedrijfsleven ontwikkeld dat internationaal toonaangevend is. Daarnaast heeft Nederland een sterke positie in de handel en verwerking van kastuinbouwproducten op wereldniveau verworven. De kastuinbouwsector levert door dit alles een grote bijdrage aan de Nederlandse economie.

Om een hoge productie met grote toegevoegde waarde te kunnen behalen moeten ziekten en plagen worden voorkomen of bestreden, moet de watergift en plantenvoeding optimaal zijn evenals de groeiomstandigheden (kasklimaat). Voorheen vroeg dit een hoog niveau van inputs, zoals gewasbeschermingsmiddelen, nutriënten en fossiele energie. De hierdoor veroorzaakte hoge belasting van het milieu werd al in de jaren negentig niet alleen maatschappelijk niet meer getolereerd, ook de op deze manier geteelde producten werden steeds minder gewaardeerd door de consument. Om de productie maatschappelijk aanvaardbaar te maken en de producten aantrekkelijk te maken voor de consument is daarom door de sector in de jaren negentig een ontwikkeling in gang gezet waarbij de niveaus van de inputs omlaag gebracht werden en de emissies naar water, bodem en atmosfeer sterk werden verminderd. Een en ander werd gestimuleerd door regelgeving van de overheid en afspraken die tussen overheid en bedrijfsleven over het terugbrengen van de emissies zijn gemaakt.

Bij het terugdringen van de emissies van gewasbeschermingsmiddelen en nutriënten naar het milieu werden bij de aanvang van het project Zonnekas (1997) reeds zeer goede resultaten geboekt:

- Om het gebruik van gewasbeschermingsmiddelen te verminderen werd biologische bestrijding van plagen breed toegepast en werd onderzoek verricht naar selectief gebruik, verbeterde dosering en optimale toediening van nog benodigde middelen. Dit resulteerde toen al in het reduceren van het middelengebruik tot de helft van het oude verbruik en een verdere reductie is sinds toen gerealiseerd.
- De milieubelasting door weglekkende nutriënten wordt voorkomen door het concept van gesloten watergeefsystemen met hierop aangepaste dosering van de benodigde meststoffen. Hierbij wordt het water dat niet door het gewas wordt opgenomen, opgevangen, gereconditioneerd en hergebruikt. In het jaar 2000 was vrijwel 100% van het areaal hierop overgestapt.
- Om het fossiele energiegebruik terug te dringen zijn begin jaren negentig afspraken door overheid en bedrijfsleven gemaakt om de hoeveelheid energie per eenheid product terug te dringen (Meerjarenafpraak Energie Glastuinbouw ofwel MJA). De doelstelling hiervan was een verlaging van dit energiegebruik per eenheid product in het jaar 2000 met een factor twee ten opzichte van dit gebruik in het referentiejaar 1980. Aan deze verlaging wordt vooral bijgedragen door intensivering van de productie en daarmee gepaard gaande productieverhoging. Daarnaast waren kassystemen energiezuiniger geworden. Omdat het areaal verwarmde kassen was uitgebreid van 7.767 ha in 1980 naar 9.560 ha

in 1994, was het absolute energiegebruik door de sector glastuinbouw echter gestegen van 3.4 miljard m³ in 1980 naar 4.2 miljard m³ aardgas in 1994. Dit is sindsdien zelfs toegenomen naar een huidig stabiel niveau van 4.8 miljard m³. Het energiegebruik per eenheid product (EPE) ten opzichte van 1980 wordt in onderstaande figuur geïllustreerd.



Figuur 1.1 Relatief energiegebruik per eenheid product ten opzichte van het referentiejaar 1980

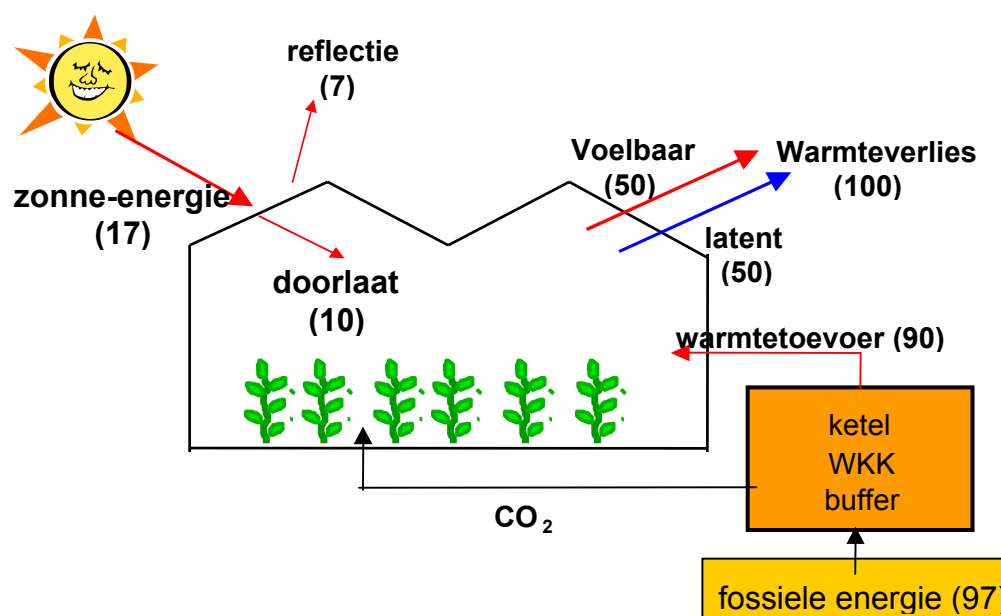
Rond 1997, bij de aanvang van het Zonnekasproject, bewoog de EPE zich rond de 60%. In 2000 werd een niveau van 56 % gerealiseerd. In een nieuwe afspraak tussen bedrijfsleven en overheid is vastgelegd dat de EPE in 2010 moet zijn gereduceerd naar 35%, dat betekent een reductie van bijna 40% ten opzichte van het jaar 2000. Om dit te bereiken zullen nieuwe wegen moeten worden ingeslagen.

Om de glastuinbouw te ecologiseren moeten de emissies naar bodem, water en atmosfeer vergaand worden gereduceerd. Hierbij heeft het de hoogste prioriteit om het absolute gebruik van fossiele energie drastisch te reduceren en te vervangen door duurzame energie. Daarmee wordt tevens een economisch doel gediend. Bij het huidige lage niveau van de energieprijzen zijn de energiekosten toch nog ongeveer een kwart van de totale productiekosten. Een stijging van de energiekosten is voor de sector zeer bedreigend. Verlaging van de afhankelijkheid van fossiele energie en overschakeling op duurzame energie is dus ook van strategisch belang. In de huidige kassystemen kan het fossiele energiegebruik nog slechts enkele tientallen procenten omlaag worden gebracht en kan de rol van fossiele energie niet worden overgenomen door duurzame energie. Om de energiebehoefte zo veel mogelijk door duurzame energie te dekken zal het fossiele energiegebruik substantieel omlaag gebracht moeten worden en zullen nieuwe kassystemen moeten worden ontwikkeld waarbij deze combinatie mogelijk is. Hiervoor zijn technologische doorbraken nodig die door fundamenteel onderzoek mogelijk zijn.

1.2 Energiegebruik in de glastuinbouw

In de glastuinbouw wordt per jaar ruim 4 miljard m³ aardgas verbruikt op een verwarmd areaal van circa 9500 ha. Dit is 12.5 % van het nationale aardgasverbruik. Hieraan is een emissie van ruim 7.2 miljoen ton CO₂ per jaar gekoppeld.

Het hoge verbruik van gemiddeld ongeveer 40 m³ aardgas per m² kasoppervlak wordt veroorzaakt doordat in de kas ook bij lage buitentemperaturen de temperatuur op 18 à 20 °C wordt gehouden. Daarbij is de kas een gebouw met een slechte warmte-isolatie en wordt een deel van de toegevoerde warmte door het gewas via verdamping omgezet in latente warmte. In onderstaande figuur wordt de warmtehuishouding in een kas schematisch weergegeven voor een wintersituatie met weinig zonnestraling, waarbij flink moet worden bijgestookt.



Figuur 1.2 Warmtehuishouding van een kas in een typische wintersituatie

Om het gewas te laten produceren is licht nodig als drijvende kracht voor de fotosynthese, de lichtdoorlatendheid van het kasdek moet daarom zo hoog mogelijk zijn. Het kasdek van een standaard Nederlandse kas is voorzien van één laag glas, het aanbrengen van meerdere lagen verhoogt weliswaar de isolatiewaarde maar vermindert de lichttransmissie. De waarde van de hierdoor gederfde productie is veel hoger dan die van de bereikte energiebesparing. Toepasbaarheid van een kasdek met een hoge isolatiewaarde hangt af van de productiewaarde die eronder bereikt kan worden en hangt dus sterk af van de hiermee te realiseren lichtdoorlatendheid.

Het energiegebruik wordt, zoals eerder opgemerkt, niet alleen bepaald door de lage isolatiewaarde van het gebouw maar ook door de gewasverdamping. Hierin verschilt een kas zeer sterk van andere gebouwen. Het door het gewas onderschepte zonlicht wordt voor het grootste gedeelte omgezet in latente warmte door de gewasverdamping. De met het verdampte water meegevoerde latente warmte wordt direct afgevoerd door ventilatie of door condensatie aan het relatief koude kasdek. Zodoende wordt een groot deel van de zonne-energie niet benut voor de ruimteverwarming en moet worden bijgestookt. Daarnaast absorbeert het gewas de door het verwarmingssysteem ingebrachte warmtestraling (is ongeveer de helft van het verwarmingsvermogen) en zet deze voor een groot deel om in gewasverdamping.

Door de gewasverdamping wordt ook een hoge relatieve luchtvochtigheid in de kas gecreëerd. Deze luchtvochtigheid wordt begrensd door de genoemde condensatie, bij onvoldoende vochtafvoer wordt extra geventileerd. Door vocht af te voeren via ventilatie gedurende perioden dat in de kas de temperatuur hoger is dan buiten wordt ook voelbare warmte afgevoerd. Dit is gedurende een groot deel van het jaar het geval. Een hoge luchtvochtigheid moet worden vermeden omdat zij niet alleen een negatieve invloed op de gewasgroei heeft maar ook omdat hierdoor een hoge ziektedruk wordt veroorzaakt. Daarbij moet bedacht worden dat de temperatuur in de kas geregeld wordt op een gemiddeld niveau. Doordat de temperatuur lokaal hoger of lager kan zijn (lokale afwijkingen van 5°C zijn niet exceptioneel) zal bij een hoge relatieve luchtvochtigheid bij de gemiddelde temperatuur, de relatieve luchtvochtigheid op de koude plekken zo hoog zijn dat daar zelfs condensatie kan optreden (natslaan). Deze vochtige en natte plekken zijn zeer gevoelig voor infecties door schimmelziekten en dergelijke. Een tuinder vermijdt dit door in zijn klimaatregeling een veilige marge in te bouwen die extra energie kost. Op de relatief warme plekken zal juist de ontwikkeling van schadelijke insecten versneld worden waardoor een plaag kan uitbreken. Door bij de klimatisering ook de ruimtelijke verdeling van het kasklimaat te beheersen kan dus zowel de ziekte- als de plaagdruk laag worden gehouden bij optimaal energiegebruik.

Door over te schakelen op duurzame energie wordt het aardgasverbruik en daarmee de CO₂ emissie substantieel verminderd. Door dit te combineren met een productiewijze waarbij de ziekte- en plaagdruk laag wordt gehouden (zodat biologische bestrijding goed inzetbaar is en geen of zeer weinig gewasbeschermingsmiddelen behoeven te worden ingezet) en gebruik te maken van gesloten watergeefsystemen, wordt een productiewijze verkregen die maatschappelijk gewenst en consumentgericht is. Onder de Nederlandse gematigde klimaatomstandigheden met koele zomers en milde winters is dit zeer goed mogelijk. Hierdoor wordt een groot concurrentievoordeel verkregen ten opzichte van productiecentra met een inherent hoge ziekte- en plaagdruk, zoals die in Zuid-Europa, waar terugdringen van het gebruik van gewasbeschermingsmiddelen veel moeilijker is.

1.3 Doel van het project

Zoals in 1.2 is uiteengezet was het hoge absolute energiegebruik van de sector glastuinbouw het grootste probleem bij het terugdringen van emissies naar bodem, water en atmosfeer. Dit is het trouwens bij beëindiging van het project nog steeds. Daarom was het doel van dit project de ontwikkeling van de concepten van een kasproductiesysteem waarin in Nederland met duurzame energie gewassen onder optimale groeiomstandigheden kunnen worden geteeld op een milieuvriendelijke en economische wijze. De resultaten waren op de lange termijn implementatie gericht.

Het project is gericht op een substantieel gebruik van duurzame energie in de kastuinbouw zodat in het concept vrijwel geen fossiele energie meer nodig zal zijn. Het richt zich daarmee op het EET thema duurzame energie. In het project is het onderzoek uitgevoerd als basis voor het totaalconcept. In dit concept wordt het gebruik van duurzame energie geïntegreerd met de klimaatbeheersing om optimale teeltomstandigheden te kunnen realiseren en wordt een lage ziekte- en plaagdruk als belangrijke nevenvoorwaarde voor milieuvriendelijk functioneren beschouwd. Omdat de resultaten van het buiten dit project verrichte onderzoek naar gesloten watergeefsystemen al toepasbaar zijn, zijn deze in het voorgestelde systeem zonder meer opgenomen. Zodoende zal ook vanuit de wortelzone van de geteelde gewassen een zeer lage, aanvaardbare emissie naar het milieu optreden. Het project voldoet daarmee ook aan de EET doelstelling om de milieubelasting door proceswater

substantieel te verminderen. De productiewijze in het voorgestelde kassysteem is daardoor gericht op de ecologische doelstellingen, is maatschappelijk aanvaardbaar en het hierin geteelde kwaliteitsproduct zal een hoge waardering krijgen op de consumentenmarkt. Dit, evenals de sterk afgenomen afhankelijkheid van fossiele energie, zal de concurrentiepositie van de Nederlandse glastuinbouw verbeteren.

De ontwikkeling van een dergelijk kassysteem kost veel tijd. Het benodigde onderzoek levert de concepten waarvan al onderdelen op laboratoriumschaal worden beproefd en geschikt gemaakt voor praktijkimplementatie. Dit kan worden beschouwd als de eerste fase van de bedoelde ontwikkeling. Daarna is een fase nodig waarin het concept op systeemniveau moet worden beproefd. Omdat de uitvoering van het concept sterk zal verschillen van de huidige kassystemen zal de bruikbaarheid van het systeem ook moeten worden gedemonstreerd. Door de deelname van het bedrijfsleven wordt al op deze volgende fase ingespeeld.

De resulterende wetenschappelijke en technische kennis ligt op de gebieden materiaal-technologie, constructietechniek, klimatisering, gewaswetenschappen, energietechniek en meet- en regeltechniek en op de integratie hiervan in een totaalsysteem voor de efficiënte productie van kasgewassen.

Er is niet alleen aangesloten op de wetenschappelijke en technische kennis op de genoemde gebieden die bij de partners al is ontwikkeld, maar ook op die kennis die elders is ontwikkeld voor andere toepassingen en kan worden vertaald naar de hier gewenste. De specificaties waaraan het kassysteem vanuit de gewasproductie moet voldoen, vereisen op de verschillende gebieden eigen ontwikkelingen.

1.4 Algemeen projectoverzicht met indeling deelprojecten

Om een kassysteem mogelijk te maken dat in haar energiebehoefte voornamelijk voorziet door duurzame energie, is het project in drie hoofdlijnen van onderzoek uitgevoerd:

- 1 Verlagen van de energiebehoefte van het kassysteem in samenhang met de klimatisering.
- 2 Afstemmen van het patroon van de energiebehoefte aan het patroon van het aanbod aan duurzame energie.
- 3 De sturing van het productiesysteem.

Deze hoofdlijnen worden hieronder aangegeven met de hierin geformuleerde deelprojecten als inleiding op de rapportage vanuit de deelprojecten.

- 1 In de eerste hoofdlijn wordt, omdat duurzame energie schaars is, de energiebehoefte van het productiesysteem sterk verlaagd en wordt in samenhang hiermee de klimatisering ontwikkeld waarmee de warmte- en vochthuishouding afzonderlijk kunnen worden beheerst. Zoals eerder beschreven speelt de vochthuishouding een sleutelrol in het energiegebruik van een kas. Een extra aandachtspunt is hierbij de mogelijkheid de ruimtelijke verdeling van het klimaat te beheersen om zo de ziekte- en plaagdruk te minimaliseren.
 - 1a Om de energiebehoefte sterk te verlagen zijn in **deelproject 1a** door Hyplast in samenwerking met IMAG materialen ontwikkeld die bruikbaar zijn om een isolerende omhulling met hoge lichtdoorlatendheid te realiseren. Omdat hiervoor goede aanknopingspunten waren bij reeds bekende materialen werden deze als uitgangspunt gebruikt en naar de gewenste specificaties verder ontwikkeld.
 - 1b De isolerende omhulling is in **deelproject 1b** geïntegreerd in het gebouwo ontwerp, waarbij vorm en oriëntatie van het dek en minimalisering van niet-lichtdoorlatende constructiedelen moeten bijdragen aan de lichtdoorlatendheid van het systeem. Verder

- zijn in het ontwerp andere functies geïntegreerd zoals ventilatie en kasinrichting. Dit onderzoek is uitgevoerd door IMAG en is beschreven onder
- 1c Het gebouwontwerp staat in directe interactie met het onderzoek naar de beheersing van de warmte- en vochthuishouding (binnenklimaat). Het onderzoek is uitgevoerd in **deelproject 1c**.
Het binnenklimaat in goed geïsoleerde kassen verschilt vooral voor wat betreft de vochthuishouding sterk van die in de huidige kassen. Het door het gewas verdampte vocht wordt in huidige kassen voor een deel afgevoerd door condensatie tegen het (relatief) koude kasdek en voor een ander deel door ventilatie. Bij goed geïsoleerde kassen zal minder condensatie tegen het dan warmere kasdek optreden zodat de ventilatie zal moeten toenemen om het vocht af te voeren. Dit gaat dit gepaard met hoge energieverliezen omdat niet alleen latente maar ook voelbare warmte wordt afgevoerd. Er zijn daarom energievriendelijke vochtbeheersingsmethoden onderzocht. Uitgangspunt waren klimatiseringsprincipes die decentraal kunnen worden toegepast, geen geforceerde circulatie vereisen (zou aandrijfenergie vereisen) en die geschikt zijn om de ruimtelijke verdeling van het klimaat te beheersen. In dit onderzoek is veel aandacht aan fysische modelbouw en laboratoriumexperimenten geschonken. Het was gepland om te worden uitgevoerd door 2 AIO's bij Wageningen Universiteit in samenwerking met IMAG. Door problemen bij het aantrekken van de AIO's is na goedkeuring van EET besloten het onderzoek door IMAG uit te laten voeren.
- 2 In de tweede hoofdlijn is onderzocht hoe het in de tijd variërende aanbod van relevante vormen van duurzame energie en de in de tijd variërende energiebehoefte van de kas op elkaar kunnen worden afgestemd. De sterk verbeterde kas met hoge isolatiewaarde en hoge lichtdoorlatendheid werkt daarbij zelf primair als hoog-rendements zonnecollector, waarin naast zonne-energie ook andere vormen van duurzame energie in de lage eigen energiebehoefte kunnen voorzien. Verder is onderzocht hoe het energie-bufferend vermogen van het gewas kan worden gebruikt om de faseverschillen tussen energie-aanbod en -vraag te minimaliseren. Verder is onderzocht hoe overblijvende faseverschillen door korte en lange termijn energieopslag kunnen worden vereffend.
- 2a Er is in **deelproject 2a** eerst onderzocht hoe de energiebehoefte van het systeem in de tijd verloopt (zowel op dag- als seizoensbasis) voor het in hoofdlijn 1 ontwikkelde systeem. Daarbij kon in het begin worden uitgegaan van een systeem met de gewenste ideale eigenschappen. Daarnaast is onderzocht hoe het aanbod is van relevante vormen van duurzame energie (zonne- en windenergie, aardwarmte). Vervolgens is onderzocht hoe de energiebehoefte en het aanbod van duurzame energie optimaal op elkaar kunnen worden afgestemd waarbij korte en lange termijn energiebuffering in de optimalisatie is betrokken. Dit onderzoek is uitgevoerd door IMAG.
- 2b Het gewas speelt een centrale rol in het patroon van de energievraag door de koppeling met het kasklimaat. Daarom is in **deelproject 2b** onderzocht hoe het patroon van gewenste groeicondities kan worden beïnvloed door gebruik te maken van de tolerantiegrenzen van de gewasproductie voor temperatuur en luchtvochtigheid. Op deze manier kan het gewas als het ware als buffer voor energie en vocht worden gebruikt. Hierbij zijn ook de risico's voor ziekten en plagen en fysiogene afwijking beschouwd. Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Universiteit.
- 3 In de derde lijn worden de gereedschappen ontwikkeld om het gewas in de zonnekas optimaal te kunnen sturen naar een opbrengst met een hoge kwaliteit. Hierbij moeten ook energievraag en -aanbod dynamisch op elkaar af worden afgestemd, met inbegrip van de

— buffering. In lijn 1 en 2 komt de dimensionering van de systeemelementen aan de orde; in lijn 3 de dynamische regeling hiervan. De klimaatsturing zal tevens worden gericht op een homogene verdeling van het kasklimaat. Hierdoor kan een lage ziekte- en plaagdruk worden gerealiseerd, zodat het gebruik van chemische gewasbeschermingsmiddelen zoveel mogelijk wordt vermeden.

3a In **deelproject 3a** is door Wageningen Universiteit in samenwerking met IMAG het onderzoek uitgevoerd naar de concepten voor de klimaat besturing en het energiemangement. Hierin speelt implementatie van modellen een belangrijke rol.

3b Om de te ontwikkelen regelingen in de toekomst ook daadwerkelijk te kunnen implementeren, moeten de nu in de praktijk toegepaste regelsystemen fundamenteel worden gewijzigd. Het onderzoek dat hiervoor nodig is zal worden uitgevoerd door Priva Hortimation en is beschreven onder **projectdeel 3b**.

-

2 Inhoudelijke rapportage

De inhoudelijke rapportage wordt per deelproject gegeven (2.1 tmt 2.7) waarna op projectniveau wordt afgesloten.

2.1 Deelproject 1a: Materiaaltechnologie

2.1.1 Basismaterialen

In het project Zonnekas is er van uitgegaan dat kunststoffolies goede mogelijkheden bieden om isolerende kasdekken met hoge lichtdoorlatendheid te realiseren. Bovendien werd er al onderzoek verricht aan de verbetering van andere kasdekmaterialen zoals glas en harde kunststof. Zodoende is in het project het materiaalonderzoek gericht op kunststoffolies. Tijdens de eerste periode van het project is het werk vooral toegespitst op het polymeer **TPU** (Thermoplastisch Poly-Urethaan). Dit polymeer heeft de intrinsiek zeer interessante eigenschap een zeer lange levensduur te hebben (+/- 10 jaar). Ook de mechanische eigenschappen (treksterkte en Elmendorf scheurweerstand) zijn heel hoog. Bovendien heeft het een hoge lichtdoorlatendheid (92 % loodrechte transmissie in het zichtbaar gebied), en een sterk thermisch karakter (nauwelijks 5% verliezen aan langgolvig infrarood). Dit zijn waarden die bij de huidige kasfolies op basis van polyethyleen niet haalbaar zijn. TPU is dus een sterk alternatief voor duurzame kasbedekking.

Eerdere metingen hebben echter aangetoond dat het huidige beschikbare TPU ook een paar nadelen heeft. Ten eerste heeft TPU een zeer hoge kruip (180%), terwijl standaard kasbedekkingsfolies aan een kruip van maximum 20% moeten voldoen. Ten tweede is de E-modulus te laag, m.a.w. is de folie te soepel, vooral bij hoge temperaturen.

Onderzoek heeft een verbeterde versie TPU opgeleverd met minder kruip en goede optische eigenschappen. De kruip van deze nieuwe TPU versie is kleiner dan 10% bij kamertemperatuur na 100 uren, hetgeen een lagere waarde is dan polyethyleen. Bij 50°C bedraagt de kruip van de nieuwe TPU echter nog 65%. Deze waarde is nog te hoog. Polyethyleen heeft bij deze temperatuur een kruip van 25%. De E-modulus van de nieuwe TPU versie is ook verbeterd voor temperaturen van 20°C tot 50°C. Om zeker te zijn dat er op de kas geen ballooning optreedt, moet de folie echter een vaste en hoge E-modulus behouden tot een temperatuur van 60°C. De conclusie is dat de nieuwe versie TPU reeds een hele stap vooruit is, maar dat de kruip en de E-modulus nog verbeterd moeten worden, zonder de levensduur negatief te beïnvloeden. De leverancier van het TPU basismateriaal zag geen verder mogelijkheden ter verbetering zodat het onderzoek toen is beëindigd. Aangezien de laatste versie nog niet bruikbaar was, kan TPU niet verder gebruikt worden voor het project.

Er is daarnaast gewerkt met **PVDF** (Poly-Vinylideen Di-Fluoride). Dit polymeer heeft, net als TPU, het voordeel een lange levensduur te hebben, zonder gebruik van UV stabilisatoren. Bovendien heeft het een lage brekingsindex en dus hoge lichttransmissie (standaardmateriaal 92.5 % loodrechte transmissie in het zichtbaar gebied), hoge absorptie (vergelijkbaar met glas) in het thermisch IR, goede mechanische eigenschappen, is vlamdovend, en is extrudeerbaar op blaasfolielijnen.

Met PVDF is een extrusieproef uitgevoerd. Daarvoor is gekozen voor een nieuwe grondstof, een PVDF co-polymeer, met als doel de eigenschappen van de folie te verbeteren t.o.v. een

eerder gekende standaard PVDF. De gecoëxtrudeerde folie had een dikte van 145 μm . De metingen van lichttransmissie hebben de verwachte hoge waarden opgeleverd: 91% diffuus en 95% loodrechte lichttransmissie (gemeten op een standaard spectrofotometer met directe instraling en integratiebol). De thermiciteit is zoals verwacht heel laag (0.44%), wat betekent dat de transmissie in het thermisch IR laag is (serre-effect). Bovendien is de folie transparant voor de UV straling. De mechanische eigenschappen van PVDF zijn zeer goed, behalve de scheurweerstand die kritisch is en problemen kan geven van doorscheuren in de machine richting. De metingen op de laatste extrusie (met het PVDF co-polymer) geven een waarde van 8.3 g/ μm en 20.9 g/ μm in respectievelijk machine en dwarsrichting, wat voldoende hoog is om problemen van doorscheuren te vermijden. Met de nieuwe grondstof is het dus mogelijk een goede scheurweerstand te behalen met behoud van de andere positieve eigenschappen van PVDF, zoals hoge lichttransmissie, lage verliezen in FIR en goede mechanische eigenschappen.

Bij PVDF waren er oorspronkelijk wat problemen bij de extrusie voor wat betreft de overgang van andere polymeren naar PVDF en omgekeerd. Om dit op te lossen, is er een specifieke spoelprocedure opgesteld met een compatibiliser. Het enige knelpunt bestaat erin dat er voldoende tijd en materiaal moet worden voorzien voor de overgangen, en dat er dus niet willekeurig van het ene op het andere materiaal overgegaan kan worden.

Verder waren er aanvankelijk problemen met de sturing van de breedte van de ballon tijdens de PVDF extrusie door de lage lichtreflectie. Deze zijn opgelost dankzij het gebruik van een ultrasoon systeem in plaats van met zichtbaar licht (zoals aanvankelijk en zoals gebruikelijk bij andere materialen).

De gladheid van PVDF vereist speciale voorzieningen om de folie goed in te klemmen. Daarom is hiernaar in deelproject 1b speciaal onderzoek verricht.

Verder is er nog gezocht naar andere polymeren met zeer hoge lichttransmissie. Enkele materialen zoals bij voorbeeld Lexan (van GE) zijn niet extrudeerbaar op een blaasfolielijn, waardoor de toepassing van de folie als kassenfolie uitgesloten blijft. Het materiaal ETFE is wel als folie te verwerken en heeft een zeer hoge lichttransmissie (93.8 % loodrechte transmissie). Dit zou als alternatief voor PVDF kunnen worden toegepast.

2.1.2 Alternatieven

Ook met conventionele materialen kan de lichtdoorlatendheid worden verhoogd door deze als een composiet van vele dunne lagen te fabriceren (multi-layer) waarbij de lagen afwisselend een hoge en lage brekingsindex hebben. Voor toepassing zal dan tevens de levensduur moeten worden verlengd. Daarom is zowel onderzoek uitgevoerd naar beïnvloeding van de brekingsindex als naar verlenging van de levensduur van LDPE (low density polyethyleen) folie.

Om de brekingsindex te veranderen kunnen nanodeeltjes worden toegevoegd. Daarom is een proef uitgevoerd waarbij nanodeeltjes SiO_2 (Fumed silica van 0.007 μm) toegevoegd werden aan een enkellaags folie in een concentratie van 2%, respectievelijk 4%. Er is gekozen voor deze nanodeeltjes omdat dit de enige betaalbare en verwerkbaar vorm is van nanodeeltjes die toen beschikbaar was. Het inbrengen van de heel fijne poeder in folie gaf moeilijkheden. Daarom is in eerste instantie de poeder gewoon toegevoegd aan een gesmolten en plat gewalst plaatje PE. Hierbij waren er duidelijk aggregaten gevormd door de nanodeeltjes. Daarom is er besloten de proef opnieuw uit te voeren.

Bij de nieuwe proef zijn er enkellaags folie gemaakt, waaraan respectievelijk de metaaloxides TiO_2 , SiO_2 , ZrO_2 , toegevoegd zijn, in een concentratie van 1%, een zonder,

en een met extra hars (concentratie 0.2%). Daarnaast zijn er twee referentie folies gemaakt uit het pure basis materiaal polyethyleen (LDPE), en één met LDPE, waaraan enkel hars aan toegevoegd is (concentratie 0.2%). Op deze folies zijn metingen uitgevoerd van lichttransmissie, infrarood-transmissie en bepaling van refractie-index. Hieruit blijkt dat de toevoeging van de SiO₂ nanodeeltjes de refractie-index te weinig beïnvloedt om het beoogde effect te behalen. De TiO₂ en ZrO₂ toevoegingen hebben een groter effect op de refractie-index, maar verlagen de lichttransmissie te veel. Daarom werd geconcludeerd dat deze techniek geen toekomst heeft binnen dit project.

Daarom is verder gezocht naar andere mogelijkheden om de refractie-index te beïnvloeden. Ditmaal is er gezocht naar een verlaging b.v. door het materiaal microporeus te maken. Het voordeel van een de brekingsindexverlaging is dat een gewone co-extrusie reeds lichtwinst kan opleveren. Om deze mogelijkheid te onderzoeken is een literatuuronderzoek uitgevoerd door het Polymeer Service Center in Groningen. Hieruit zijn verschillende interessante artikelen geselecteerd, die ten eerste methodes beschrijven om microporeuze membranen te maken, en ten tweede methodes beschrijven om de poriegrootte te beïnvloeden. Om de uitvoerbaarheid van deze methodes te testen in het toepassingsgebied van tunnelfolies is vervolgonderzoek nodig.

Om de levensduur te verlengen is onderzoek gestart met nieuwe **UV stabilisatoren**. Deze nieuwe UV stabilisatoren zijn efficiënter, waardoor lagere concentraties kunnen gebruikt worden, maar ze zijn vooral veel minder gevoelig voor pesticiden. Dit is namelijk het cruciale punt bij de stabilisatie, en dus ook de levensduur, van standaard folies. Vooral de chloor- en zwavel houdende pesticiden tasten de werking van de UV stabilisatoren aan, en gaan daarmee de levensduur van de folie gevoelig negatief beïnvloeden. Door de nieuwe stabilisatoren toe te voegen in standaard tunnelfolies op basis van de standaard polymeren (PE en EVA), is het mogelijk de levensduur van deze folies te verlengen. Daarna kunnen deze folies als basis voor verdere verbeteringen van de lichttransmissie gebruikt worden. Er zijn twee nieuwe types UV stabilisatoren getest: de eerste is toegevoegd aan de standaard thermische tunnelfolie Hytithermic in 200 µm, de tweede in verschillende thermische tunnelfolies. Na 6000 uren in de Atlas heeft de Hytithermic 200 µm folie met de nieuwe UV stabilisator nog steeds een elongatie van 412%, wat nog steeds hoger is dan 50% van de initiële elongatie (m.a.w. vóór veroudering, deze was 543%). Deze 6000 uren stemmen overeen met 480 kly, of zes jaren expositie in Benelux. De referentie folie (met standaard UV stabilisator) heeft in dezelfde dikte een levensduur van 400 kly.

Ook de versnelde veroudering van de Kool Lite Plus TH AC AD E UVT folie (220 µm, thermisch en UV transparant) heeft positieve resultaten opgeleverd. De grens van 50% van de oorspronkelijke elongatie is behaald na 7280 uren in het Atlas verouderingstoestel, wat overeenstemt met 582 kLy. Met een standaard stabilisatie pakket behaalt dezelfde folie 450 kLy.

De versnelde veroudering van de Thermilux folie (180 µm dik, thermisch en UV transparant) is ook positief afgelopen. De grens van 50% van de oorspronkelijke elongatie is behaald na 4815 uren in het Atlas verouderingstoestel, welk overeenstemt met 385 kLy. Met een standaard stabilisatie pakket behaalt dezelfde folie 350 kLy.

De conclusie is dus dat door gebruik te maken van deze nieuwe UV stabilisatoren het mogelijk is de levensduur van de folies significant te verlengen. Door het gebruik van de nieuwe UV stabilisator kan een 10 tot 30% langere levensduur voor de standaardfolie worden gegarandeerd wat de duurzaamheid hiervan verbetert..

2.1.3 Verlaging emissiecoëfficiënt

Parallel is er ook gewerkt aan een tweede deel van het materiaalonderzoek met als doel de emissie te verlagen, om zodoende de **stralingsverliezen in het thermisch infrarood te verminderen**. De eerder geteste polymeren TPU en PVDF hadden beide een voor kunststoffen uitzonderlijke thermiciteit, wat overeenkomt met een zeer hoge absorptie in het langgolvig infrarood. Daardoor is het mogelijk het broeikaseffect van glas met folie te evenaren. Een hoge absorptie betekent echter dat de folie zelf dan als zwart stralingsscherm fungeert en zelf hoge stralingsverliezen heeft. Deze zijn uiteraard wel lager zijn dan de oorspronkelijke verliezen. Om de eigen uitstraling, dus de werking als stralingsscherm te verbeteren, is eerst onderzocht of het aanbrenge van een emissieverlagende coating mogelijkheden biedt. Een enkele coating voor verlaagde emissie in het thermisch infrarood zal altijd verlaging van de lichttransmissie voor het kortgolvlige zonlicht veroorzaken. Om het gecombineerd effect te bereiken van verlaagde emissie en geen negatief effect op de lichttransmissie, moet er een meerlagige coating op de folie aangebracht worden, waarbij de verschillende lagen afwisselend een hoge en lage brekingsindex hebben. Door de juiste keuze van de brekingsindexen is het mogelijk de warmtestralen (met golflengte tussen 5.000 en 50.000 nm) te reflecteren en het zonnenspectrum (met golflengte tussen 200 en 3.000 nm) door te laten. Dankzij de samenwerking met IMAG, die over het nodige softwarepakket beschikte (Essential Macleod pakket) was het mogelijk een aantal simulaties uit te voeren uitgaande van verschillende diëlektrische en metaal coatings. Hieruit bleek dat hoe meer lagen er aangebracht kunnen worden hoe beter de eigenschappen van de totale coating, en hoe meer kans om het gestelde doel te behalen. Een meerlagige coating aanbrenge op een folie is echter heel duur en kan tot nu toe enkel op smalle breedtes. De techniek is dus goed technisch mogelijk maar nog niet haalbaar voor een grootschalige toepassing als bedekkingmateriaal voor kassen.

Er is daarom verder onderzoek uitgevoerd naar een goedkopere oplossing, namelijk het toevoegen van metaaloxides aan de folie zelf. Hierdoor verhoogt de refractie-index van de folie, of in het geval van een meerlagenfolie, verhoogt enkel de refractie-index van de laag waaraan de metaaloxides toegevoegd zijn. Zoals bij de coating is het uiteindelijke doel een opeenvolging te krijgen van verschillende lagen met een hogere of lagere refractie-index. Door een groot aantal lagen in de folie aan te brengen (b.v. 32) zou het mogelijk zijn om het gecombineerde effect van verlaagde emissie en geen negatief effect op de lichttransmissie te bereiken. Via een standaard co-extrusie installatie is het niet mogelijk een folie met een dergelijk groot aantal lagen te produceren. Het zou echter mogelijk moeten zijn door een speciaal systeem. Hierbij wordt uitgegaan van een tweelaagsfolie waarvan één van de lagen een hoge en de andere een lage refractie-index heeft. Elke laag wordt in de vloeibare fase gedeeld door middel van een statische mixer en bovenop de bestaande laag gebracht, waardoor het aantal lagen verdubbeld wordt. Door deze bewerking verschillende malen te herhalen kan er door deze "multilayer" techniek vrij snel een groot aantal lagen samengesteld worden.

Tin oxide is in dat verband gekozen om een test uit te voeren. Het pigment is toegevoegd aan de folie. Als basispolymeer is polypropyleen (PP) gekozen omdat dit helder en doorlatend is in het IR gebied. De folie is geproduceerd met vlakextrusie omdat door de schokkoeling kleinere kristallen gevormd worden en de folie dus een hogere lichttransmissie heeft. De resultaten tonen aan dat reeds een klein gehalte tin oxide de lichttransmissie sterk doet dalen, zowel in folie (100-130 μm) als in plaat (622 μm). Bij voorbeeld, daalt de

lichttransmissie van de PP folie van 91.5% naar 65.4% en 43.9% bij toevoeging van respectievelijk 2% en 4% tinoxide. De toevoeging heeft daarenboven nauwelijks invloed op de verliezen in het ver infrarood (FIR) gebied. De verliezen (ook thermiciteit genoemd) blijven gelijk bij toevoeging van 2% tinoxide aan de folie en dalen van 56% naar 49.2% door toevoeging van 4% tinoxide. Deze verschillen zijn te klein om van een positief effect te spreken, zeker als men vaststelt dat de lichttransmissie veel sterker daalt. Er is daarom besloten niet verder te werken op deze weg.

2.1.4 Rapportage en publiciteit

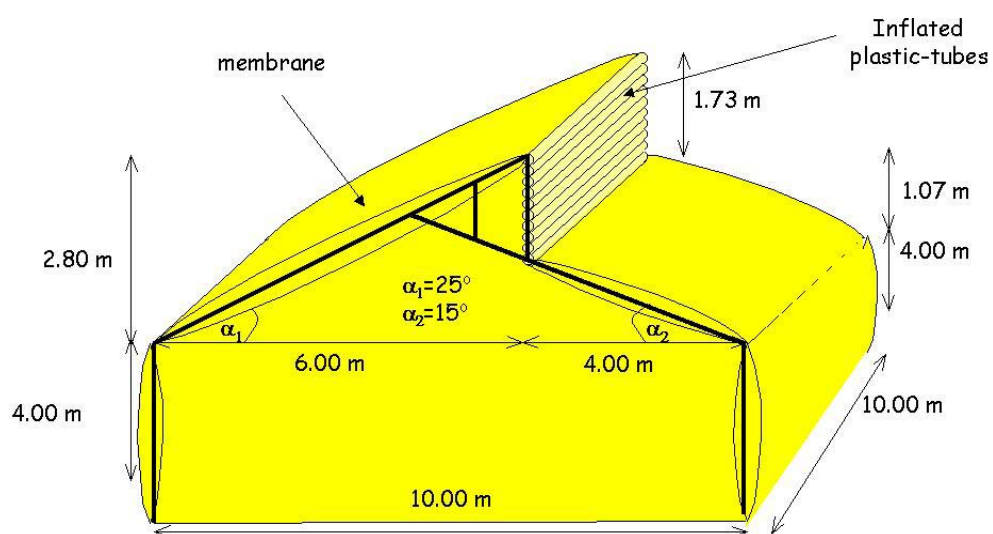
- Verlody, I. & D. Waaijberg. 1999 - Folie om de kas doet niet meer onder voor glas. De Boomkwekerij 43 (1999), p. 13-15.
- Verlody, I. & D. Waaijberg. 1999 - Folie om de kas doet niet meer onder voor glas. Vakblad voor de Bloemisterij, no 47, 26 november 1999, p. 42-43.
- Waaijberg, D. & I. Verlodt. 1999 - Polyethleen folie als kasomhullingsmateriaal. Groenten en Fruit, Glasgroenten 12 november 1999, p. 18-19.
- Verlody, I. en D. Waaijberg, 1999, Folie om de kas doet niet meer onder voor glas, De Boomkwekerij, no. 43, 29-10-1999, p. 13 – 15.
- Waaijberg, D en I. Verlodt, 2000, Additives make greenhouse films universally effective, FlowerTech, 2000, vol.3, no. 7, p. 8-11
- Hemming, S en D. Waaijberg, 2001, Herausforderung für moderne Folien, Gärtnerbörse – Das Magazin für Zierpflanzenbau, 101. Jahrgang, no. 19, 13-10-2001, p. 43-45
- Hoffmann, S., 2000, UV-straling in de kas: mogelijkheden en grenzen, Vakblad voor de Bloemisterij, 55 (25), P. 44-46.
- Hoffmann, S, 2001, Ultraviolet radiation in the greenhouse, FloraCulture International, 11 (5), p. 18-27.

2.2 Deelproject 1b: Kasconstructie

2.2.1 Ontwerp

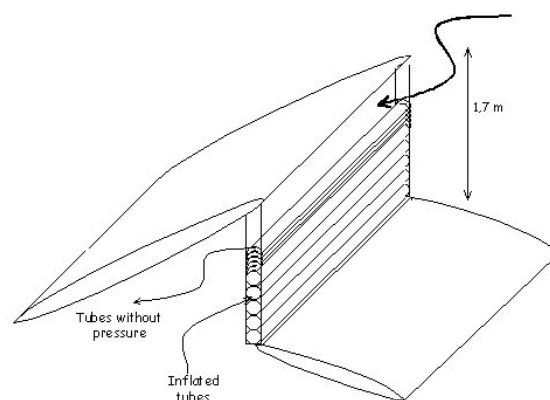
Bij het onderzoek naar een optimale constructie moesten kunststoffoliematerialen worden toegepast in een kas met hoge isolatiewaarde en lichtdoorlatendheid, waarbij aan de normen voor kassenbouw moet worden voldaan. Om de consequenties van de kasconstructiedelen en het omhullingsmateriaal op de lichtdoorlatendheid gemakkelijk te kunnen bepalen is een rekenprogramma geschreven voor alle mogelijke kasvormen en materialen gebaseerd op ray tracing (Swinkels, 1999). Ook is een database opgezet om in het verleden uitgevoerde meetresultaten van o.a. de lichttransmissie, vast te leggen. Hierin zullen ook alle toekomstige metingen worden vastgelegd. Deze database kan zodoende goed gebruikt worden als informatiebron bij het zoeken naar perspectiefvolle materialen. Ter voorbereiding van het ontwerpproces van de zonnekas zijn ventilatietechnieken en – openingen geïnventariseerd (IMAG nota P 2000-42) en tevens is er een inventarisatie uitgevoerd van traditionele kasconstructies naast geavanceerde constructievormen, zoals die gebruikt worden in andere sectoren van de bouw. Als voorbeelden kunnen membraan- en pneumatische (opgeblazen) constructies genoemd worden. Uit een tiental kasvormen zijn er vijf ontwerpen gekozen die verder uitgewerkt zijn in dit project. De inventarisatie is vastgelegd in IMAG-nota 2000-09. De uitwerking is gebeurd ten aanzien van de sterkte, de lichtdoorlatendheid, het verwachte klimaat in de kas en het materiaalverbruik. Het resultaat

is vastgelegd in IMAG-nota P 2001-69. Omdat de gewenste isolatiewaarde alleen bereikt kan worden met meerlaags dekken is tevens de inklemming van meerlaags foliesystemen onderzocht. Hierbij werd speciaal aandacht besteed aan de lage wrijving die hoog doorlatende foliematerialen vertonen. Dit is vastgelegd in Van Doremaele, 1998. Als meest perspectiefvol kastype is het kasontwerp met zaagtand dakvorm geselecteerd (zie fig 2.2.1)



Figuur 2.2.1. Moduul van eindontwerp

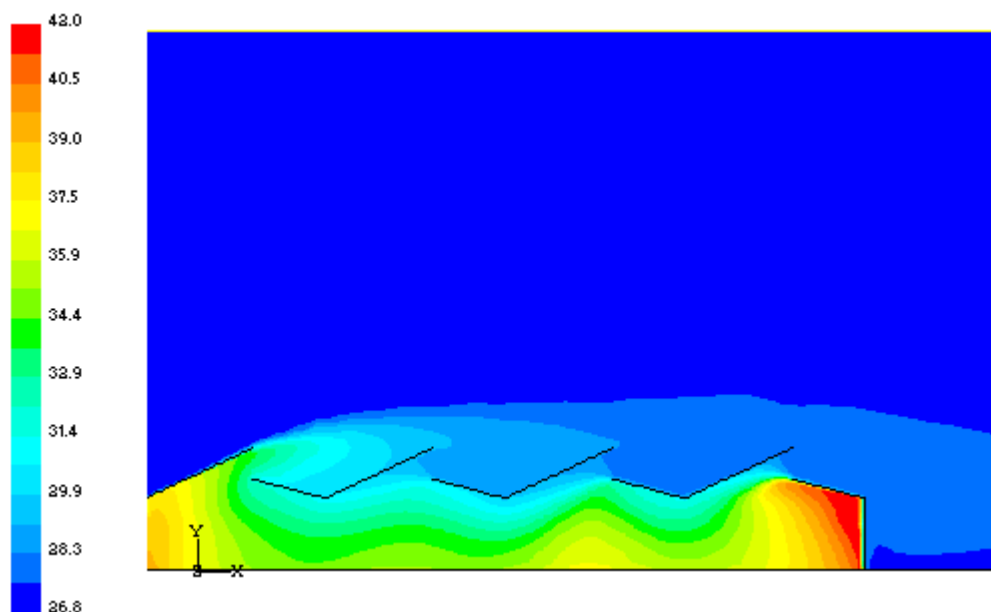
Dit ontwerp kenmerkt zich door een lichttransmissie van 77%, een staalconstructie die 2x zo licht is als traditioneel en waarbij de regeling van de ventilatieopeningen plaatsvindt d.m.v. het leeglaten en opblazen van luchtslurven. (zie fig 2.2.2)



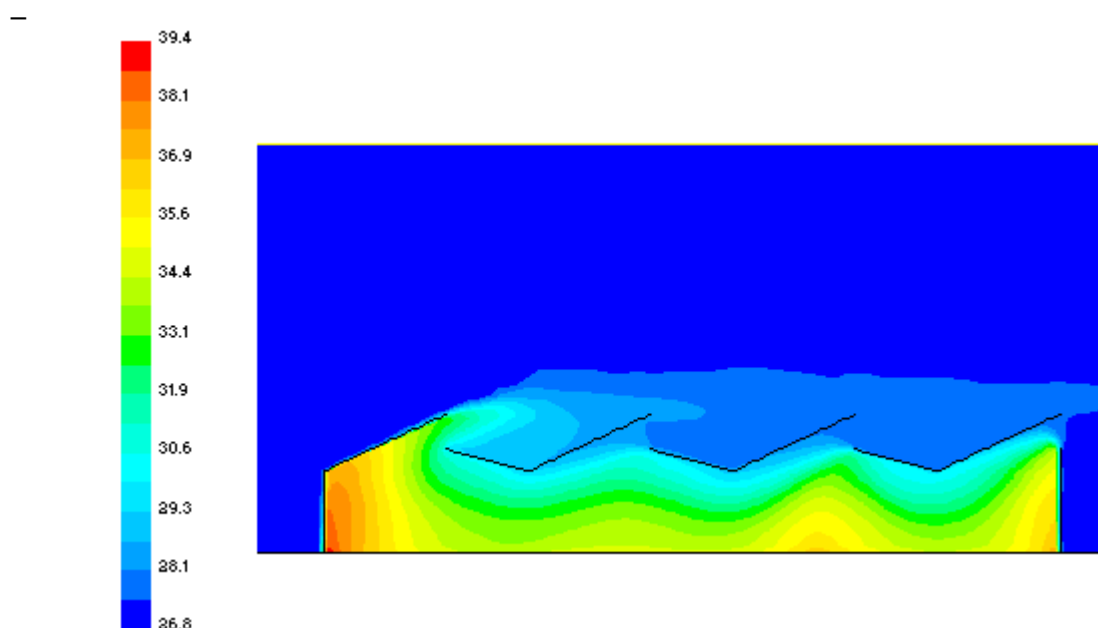
Figuur 2.2.2 ontwerp ventilatiesysteem

Gekozen is voor een kas met een natuurlijk ventilatiesysteem. Berekeningen van de lichtdoorlatendheid en het binnenklimaat (invloed ventilatiesysteem) hebben aangetoond dat

de zaagtandvorm het beste uitgevoerd kan worden met dakhellingen van 30° (i.p.v. 25° zoals in fig 2.2.1) voor het linker dakvlak en 20° (i.p.v. 15° zoals in fig 2.2.1) voor het rechter dakvlak bij een spantoverspanning van 10 m, waarbij een doorgaande ventilatieopening ontstaat in het verticale vlak met een hoogte van ca. 2 m. De kasmoduul kan in beide richtingen uitgebreid worden tot een groot aanéengesloten kasoppervlak (repeteerbaar). Aangezien de ventilatieopeningen éézijdig georiënteerd zijn is de invloed van de windrichting groot, hetgeen blijkt uit de simulatieberekeningen van het binnenklimaat. Deze berekeningen zijn ook gebruikt om de homogeniteit van het klimaat in het ontwerp na te gaan. In het oorspronkelijke ontwerp bleek vooral onder de eerste kap een verhoogde temperatuur te ontstaan (zie fig 2.2.3)



Figuur 2.2.3 Temperatuurverdeling in een 3-kaps zonnekas



Figuur 2.2.4 Temperatuurverdeling in de 3 kaps aangepaste Zonnekas.

Door kleine aanpassingen aan de eerste kap kon het klimaat voldoende homogeen worden gemaakt. (fig 2.2.4)

Het aantal lagen is van belang voor de isolatiewaarde. Een 4-laagse folieomhulling geeft voor het beste folie (deelproject 1a) te veel lichtverlies. De in hoge mate isolerende kas heeft een dakbedekking van 2 lagen (zie deelproject 1a) of in de toekomst met betere materialen een 3-laagse foliebedekking, die via overdruk continu op afstand gehouden worden, waardoor een isolerende luchtsouw ontstaat. Een 2-laags uitvoering kan worden gecombineerd met een energiescherm zodat s' nachts de isolatiewaarde van een 3-laags systeem wordt verkregen en overdag vrijwel de lichtdoorlatendheid van een 2-laags systeem. De principes van het gekozen Zonnekas-ontwerp, de kasconstructie, het te verwachten klimaat in de kas en de optimale vorm zijn vastgelegd in IMAG-nota P 2002-19. Aangezien bij dit kasontwerp sprake is van gespannen kabels en opgeblazen 2- of 3-laagse kunststoffolies is door IMAG voor het berekenen van de sterkte en verplaatsingen (doorbuigingen) van de constructie + omhulling gebruik gemaakt van twee Amerikaanse 3-dimensionaal rekenprogramma's van Birdair ('Membrane Cablenet Modeler' en 'Membrane Cablenet Analysis Program'). Met deze programma's zijn de vereiste afmetingen voor staalprofielen en kabels geoptimaliseerd en vastgelegd. De berekeningen zijn ook uitgevoerd om te garanderen dat de Zonnekas voldoet aan de normen voor de bouw van kassen.

2.2.2 Rapportage en publiciteit

Doremale, R.G.M.E. van, 1998. Foliebevestigingssytemen, onderzoek naar bevestigingsmogelijkheden van folie. MSc thesis Wageningen Universiteit

Swinkels, G.J., 1999. MatLight, een model voor de berekening van de lichttransmissie van alternatieve kasdekken en kasdekmaterialen. IMAG Nota 99-119, 34p

Waaijenberg, D., 2000, Natuurlijke ventilatiemogelijkheden in kassen, IMAG Nota no. P

- 2000-42, 44 p.
- Waaijberg, D en S. Hoffmann, 2000, Constructievormen en omhullingsmaterialen voor tuinbouwkassen – inventarisatie en nieuwe mogelijkheden, IMAG rapport no. 2000-09, 70 p.
- Hoffmann, S. en D. Waaijberg, 2001, Das optimale Gewächshausklima – eine Herausforderung für moderne Gewächshausfolien, paper bij GKL-Frühjahrstagung 'Kunststoffe im Gewächshausbau und in der Gewächshausnutzung', Erfurt (D), 25 en 26 april 2001, gepresenteerd door S. Hoffmann.
- Huseby, C., S. Hoffmann, J.B. Campen en D. Waaijberg, D., 2001, The design of an Advanced Sustainable Crop Production System – An interaction of construction, climate and light condition, IMAG Nota P 2001-69, 58 p.
- Waaijberg, D en S. Hoffmann, 2001, persberichten n.a.v. verschijnen van IMAG-rapport 2000-09 in Cobouw (d.d. 17-3-2001: blad + Internet: Sierteeltkassen in de toekomst van kunststof); Vakblad voor de Bloemisterij, no. 12, 23-3-2001 (IMAG onderzoekt energiekas van de toekomst); Groenten en Fruit, Glasgroenten, 30-3-2001 (Folie frustrereert radicale verbetering milieubelasting); Oogst, tuinbouw, 23-3-2001 (IMAG onderzoekt vijf nieuwe kasontwerpen), WB, 29-3-2001 (interview: Kas van folie en luchtmatrassen) en in Agrarisch Dagblad, 16-3-2001 (Onderzoekers IMAG: kas in toekomst milieuvriendelijker
- Waaijberg, D, 2001, Entwicklungen im niederländischen Gewächshausbau, lezing bij KTBL-Arbeitstagung 'Technik im Gartenbau', Bad Waldsee (D), 24 september 2001
- Hemming, S., D Waaijberg en J.B. Campen, 2002, EET-Zonnekas: Crop production system with sustainable energy, Part 1b: Greenhouse construction, light transmittance and insulation, IMAG-Nota, no. P 2002-19, 65 p.

2.3 Deelproject 1c: Klimatisering

In dit deelproject waren in het projectplan bij Wageningen Universiteit twee AIO projecten geformuleerd (ruimtelijke verdeling en ontvochtiging) die in samenwerking met IMAG zouden worden uitgevoerd. Doordat het niet mogelijk bleek binnen redelijke tijd AIO's aan te trekken is na goedkeuring door het EET programmabureau besloten het onderzoek in dit deelproject geheel door IMAG uit te laten voeren. Door de moeilijkheden bij het aantrekken van AIO's heeft het project vertraging opgelopen die tot aanpassing van de einddatum heeft geleid.

2.3.1 Ontvochtiging

Zoals in de inleiding uiteengezet, is bij de klimatisering van een goed geïsoleerde kas energiezuinige ontvochtiging essentieel. De verschillende mogelijkheden hiervoor zijn eerst geïnteriseerd, waarbij ontvochtiging met terugwinning van latente warmte en het zoveel mogelijk gesloten houden van de energiekringloop centraal stonden. Twee meest belovende varianten zijn onderzocht: en vergeleken met ventilatie voor ontvochtiging: (1) ontvochtigen aan hygroscopische stoffen en regeneratie hiervan; (2) ontvochtigen aan een koud oppervlak in een warmtepomp gedreven kringloop.

Ontvochtigen aan hygroscopische stoffen is technisch mogelijk en regeneratie kan energievriendelijk als dit in meerdere trappen gebeurt bij een laagste condensatietemperatuur van ca. 80 °C zodat de latente warmte in het verwarmingssysteem van de kas kan worden opgenomen. Afgezien van de benodigde hoge investering bleek dat

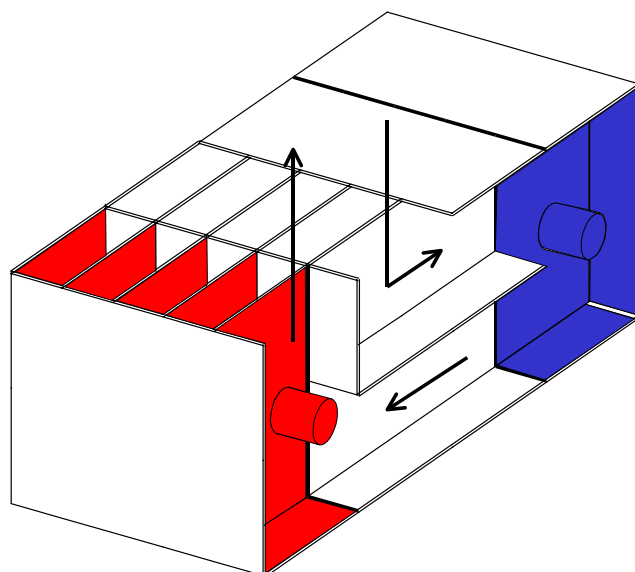
— grote hoeveelheden hygroscopische stoffen moeten worden rondgepompt waarbij deze stoffen bij lekkage een groot milieurisico vormen. Daarom is deze optie als niet wenselijk voor een duurzaam kassysteem beoordeeld.

Condensatie aan koude oppervlakken is in meerdere varianten onderzocht.

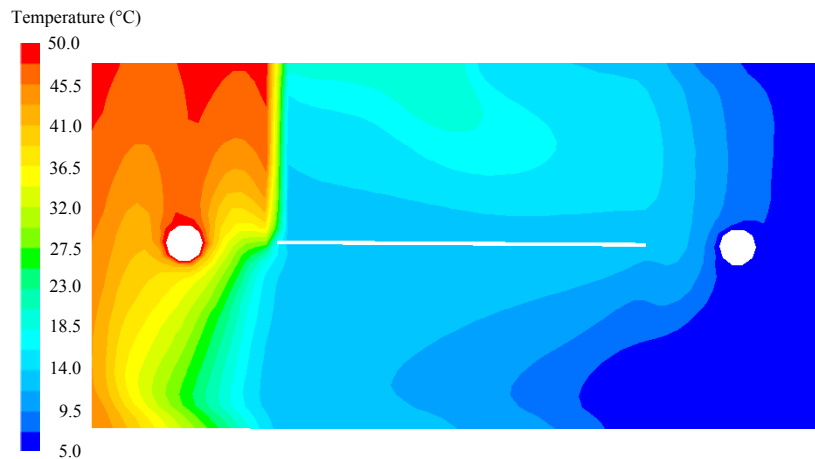
Als meest eenvoudige uitvoering is een systeem bestaande uit een gekoelde ribbenbuis als condensatieoppervlak met een hieraan gekoppelde warmtepomp voor de koeling getest in een kascompartiment op het IMAG terrein. Hoofddoel van de experimenten was het in kaart brengen van de voelbare en latente warmtestromen bij ontvochtiging in een kassituatie en kalibreren van de hiervoor ontwikkelde simulatiemodellen. Het experiment is beschreven in een publicatie (Campen en Bot, 2002) en in verschillende vakbladartikelen.

De berekeningen en analyses leveren de volgende conclusies op:

- De energie die verloren gaat in de vorm van latente warmte, als alleen vocht wordt afgevoerd bij te hoge RV (dus zonder verlies van voelbare warmte), is kleiner dan we tot nu toe dachten, namelijk tussen 130 en 360 MJ/m² per jaar, ofwel 4-10 m³aardgas per m² per jaar afhankelijk van het teeltregime. Voor goed geïsoleerde kassen is dit evenwel een redelijk tot behoorlijk deel van de energiebehoefte.
- Bij ontvochtigen met koude vlakken (zoals in het ribbenbuis experiment) wordt uiteraard behalve waterdamp (latente warmte) ook altijd voelbare warmte onttrokken. Deze hoeveelheid voelbare warmte is echter voor de meeste uren van een gemiddeld jaar groter dan de voelbare warmte die via ventilatie, die voor ontvochtiging wordt ingezet, verdwijnt waarbij de ventilatie dezelfde hoeveelheid vocht afvoert. Zodoende is een belangrijke en ietwat verrassende conclusie dat zonder nadere voorzieningen ventilatie meestal energievrindelijker is dan vochtonttrekking aan een door een warmtepomp gekoeld oppervlak!
- Omdat de voelbare warmte een groot deel van de energieverliezen bij ontvochtigen uitmaakt is verder gezocht naar mogelijkheden de voelbare warmteverliezen te beperken. In de combinatie met condensatie aan een koud oppervlak is een apparaat (de convectorput, fig 2.3.1 en 2) ontworpen waarbij de voelbare warmte wordt teruggewonnen. Hiervoor is octrooi aangevraagd (Campen, 1999) en het concept is gepubliceerd (Campen en Bot, 2001).



Figuur 2.3.1: Convectorput met koude sectie voor ontvochtiging (rechts) en warme sectie voor aandrijving circulatie (links) met warmteterugwinning tussen ingaande en uitgaande lucht



Figuur 2.3.2 Temperatuurverdeling in de convectorput berekend met CFD (temperatuurschaal tussen 5.0 en 50.0 °C)

Technisch fungeert de convectorput uitstekend. Omdat uitgangspunt was dat de luchtcirculatie door natuurlijke convectie moest worden gedreven, moet evenwel aan de warme kant extra thermische energie worden ingebracht om de natuurlijke circulatie op gang te houden. Hierdoor is er een koppeling tussen ontvochtiging en verwarming. De convectorput kan dus alleen met voordeel worden ingezet bij een hoge warmtevraag. Hieruit kan worden geconcludeerd dat ontvochtigen met een koud oppervlak, met of zonder terugwinning van voelbare warmte energetisch geen in het oog springende voordelen biedt. Met koelen (en ontvochtigen) wordt evenwel ventilatie voorkomen zodat de CO₂-concentratie langer hoog gehouden kan worden. De opgenomen warmte kan voor verwarming worden gebruikt (mbv warmtepomp) eventueel na warmteopslag. De koeler moet dan wel kunnen functioneren als er moet worden ontvochtigd zonder warmtevraag. De convectorput lijkt daarom zonder aanpassing niet geschikt.

- Als alternatieve optie is onderzocht hoe voelbare warmte kan worden teruggewonnen uit ventilatielucht. Daarbij is gemikt op een zo gunstig mogelijke verhouding van latente en voelbare warmteonttrekking en ontkoppeling van ontvochtiging en verwarming. Eerst is dit principe verkend (Speetjens, 2001) en daarna verder onderzocht (IMAG Rapport P2003-35). Het blijkt goed mogelijk ventilatie voor ontvochtiging en warmteterugwinning te combineren. Omdat voor ontvochtiging maar een relatief klein ventilatiedebiet nodig is kunnen de installaties beperkt blijven en is weinig aandrijfenergie nodig. Daarom is deze optie in het Zonnekasconcept geïntegreerd. De vergelijking van verschillende ontvochtigingstechnieken is neergelegd in een publicatie (Campen et al., 2003). Over ontvochtigingsprincipes zijn verder verschillende vakbladartikelen geschreven om de tuinders te informeren over de resultaten van het onderzoek.

2.3.2 Ruimtelijke klimaatverdeling

De ruimtelijke klimaatverdeling is onderzocht met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD). Hierbij worden de partiële differentiaalvergelijkingen voor dichtheid, snelheid, temperatuur en eventueel concentratie van waterdamp en CO₂ numeriek opgelost. De CFD modelberekeningen zijn experimenteel getoetst op een bestaande situatie. Daarna is het model gebruikt om in nieuwe kasconcepten de klimaatverdeling te evalueren en via verbeteringen aan het ontwerp aan te passen. Dit heeft bijgedragen aan het kasontwerp (zie deelproject 2b, fig. 2.2.3 en 4)

2.3.3 Modelvorming:

Van de verschillende componenten uit de mogelijke configuraties voor de energievoorziening (aquifer, warmtepomp, warmteogst, ontvochtiging) zijn de karakteristieke eigenschappen bepaald. Met behulp van deze eigenschappen is een mathematische beschrijving van het fysische gedrag van de component gemaakt die vervolgens is gebruikt om een computer(deel)model te maken.

In een eerste fase van het deelproject (uitgevoerd door WU) is een eenvoudig statisch model gebouwd m.b.v het MATLAB-pakket op basis van de energie- en massabalansen over de kas waarin urinegegevens over het buitenweer kunnen worden ingebracht als randvoorwaarde. Dit MATLAB-model is met behulp van bovengenoemde deelmodellen uitgebouwd tot een vereenvoudigd energiebehoeftemodel ten behoeve van het gewaskundig onderzoek (deelproject 2b) om globaal de energie-effecten van verschillende teeltregimes te kunnen analyseren.

De ontwikkelde deelmodellen voor de verschillende componenten van de energievoorziening zijn geïntegreerd in het IMAG simulatiemodel voor het kasklimaat KASPRO. Dit is een virtuele kas waarin de fysische processen zijn gemodelleerd en waarmee betrouwbaar het kasklimaat en de verschillende energie- en massastromen in een naar behoefte samengesteld kassysteem dynamisch kunnen worden berekend. Door dit model te koppelen met meteorologische jaarbestanden kunnen kassystemen worden geëvalueerd. Op deze manier is de interactie van gewenst kasklimaat, energiebehoefte, beschikbaarheid van duurzame energie, korte en lange termijn energieopslag, inzet van warmtepompen en kasconfiguratie bepaald als totaalbeeld over een geheel jaar. Zodoende kan het ontwerp van de Zonnekas worden geoptimaliseerd.

2.3.4 Klimaat- en energieberekeningen

Om in deelproject 2b, gewastolerantie, een schatting te kunnen maken van het effect van de temperatuurgrenzen voor temperatuurintegratie is het energiebesparend effect hiervan met behulp van modelsimulatie nagegaan. Het gaat daarbij dus vooral om het effect op het energiegebruik van het verruimen van de klimaatgrenzen. Het onderzoek is uitgevoerd voor tomaten. Belangrijke parameters zijn hierbij de bandbreedte van de temperatuurvariatie en de temperatuursom. De temperatuursom kan worden bepaald over een etmaal of over enkele dagen waarbij ook weer een bandbreedte hoort.

Voor de berekeningen is een prototype TI-regelaar gebruikt om het effect van de bandbreedte en temperatuursom op het energieverbruik te bepalen. Het bandbreedte-effect blijkt bij kleine bandbreedtes groot te zijn maar neemt snel af bij toenemende bandbreedte. Het effect van de temperatuursom is vrijwel lineair maar in verhouding tot het effect van de bandbreedte gering. Deze berekeningen zijn richtinggevend geweest voor het gewasonderzoek in deelproject 2b.

2.3.4 Rapportage en publiciteit

- Braak, N.J. van de, J.B. Campen & J.C. Bakker. 1998 - Zonnekas, Deelproject 1c
Klimaatbeheersing. Tussenrapportage: 9-7-98, 20 pp.
- Campen, J.B. en J.C. Bakker. 1998 - Ontvochtigingssysteem in kas kan energie besparen.
Groenten en Fruit/Glasgroenten, 1998(44), p.32-22.
- Campen, J.B. en J.C. Bakker. 1998 - Warmte terugwinnen uit ventilatie in nieuw type kas.
Groenten en Fruit/Glasgroenten, 1998 (44), p.13.
- Breuer, J.J.G., H.F. de Zwart & G.P.A. Bot. 1999 - Aspecten warmtepompen. Wageningen,
IMAG Nota 99 - 130, 37 pp.
- Campen, J.B. 1999 - Met ontvochtiger blijft warmte binnen. Groenten en Fruit, 9 april, p. 17.
- Climent, J.M. 1999 - Long term energy storage for greenhouses; greenhouse energy saving
with a long term energy cycle. Landbouwniversiteit Wageningen, Thesis, Applied
physics; A550-713, 79 pp.
- Zwart, H.F. de. 1999 - Warmte opslag en ontvochtiging met een warmtepomp in kassen. In:
Duurzame energie: met het oog op morgen. Conferentieboek Nederlandse Duurzame
Energie Conferentie, 25 & 26 november 1999 te Noordwijkerhout, p. 330-331.
- Saye, A., van Loon, W.K.P., Bot, G.P.A. and de Zwart, H.F., 2000. The solar greenhouse: a
survey of energy saving methods. Acta Hort. 534, p 131-138
- Campen, J.B., N.J. van de Braak, G.P.A. Bot & H.F. de Zwart. 2000 - Ontvochtigen via
ventilatie of condensatie? Vakblad voor de Bloemisterij 55 (32), p. 36-37.
- Campen, J.B., Bot, G.P.A., 2000, New dehumidifying system for greenhouses. Acta
Hort.534, p 255-262
- Bot, G.P.A., 2000, Imagineering for sustainable greenhouse production. Proc. CIGR World
congress 2000, Tsukuba, Japan, Invited lecture. CD ROM
- Campen, J.B., G.P.A. Bot, 2001, Design of a low-energy dehumidifying system for
greenhouses. J.agric. Engng. Res 78 p 65-73
- Bot, G.P.A., 2001, Developments in indoor sustainable plant production with emphasis on
energy saving. Computers and Electronics in Agriculture (30), p 151-165
- Bot, G.P.A., 2001. Energy efficiency and ventilation. Invited lecture Int workshop on
Greenhouse design and Crop Engineering. Vieste, Italy, 13-15 Sept 2001
- Bot, G.P.A., 2001. The solar greenhouse, technology for low energy consumption. Int
congress NTV 2001, Acta Hort. 611, p 61-71
- Bruin, J. de. 2001 - Warmteterugwinning uit ventilatielucht van kassen. Wageningen, IMAG-
nota V 2001-32, 60 p.
- Campen, J.C., Bot, G.P.A., 2001. Dehumidification in greenhouses by condensation on
finned pipes. Biosystems Engineering 82(2), p177-185
- Knies, P., N.J. van de Braak, F.L.K. Kempkes, H.F. de Zwart & G.P.A. Bot. 2001 - Effecten
van temperatuurintegratie op energiegebruik. Deelproject 1C, Wageningen, IMAG-nota V
2001-33, 17 p.
- Bot, G.P.A., 2002. Engineering for sustainable greenhouse production. NJF Seminar no. 340,
Greenhouse Production – Biological and Technical; Aspects. Asker, Norway, Febr 14-15-
2002.
- Bot, G.P.A., 2002, The solar greenhouse, technology for low energy consumption. XXVIth
Intern. Hort. Congress, Toronto, Aug 11-17, 2002. to be publ in Acta Hort.
- Kempkes, F.L.K.; Stanghellini, C., 2002. Energiebesparing door vochtintegrerende regeling.
IMAG nota P2002-73, 51 p

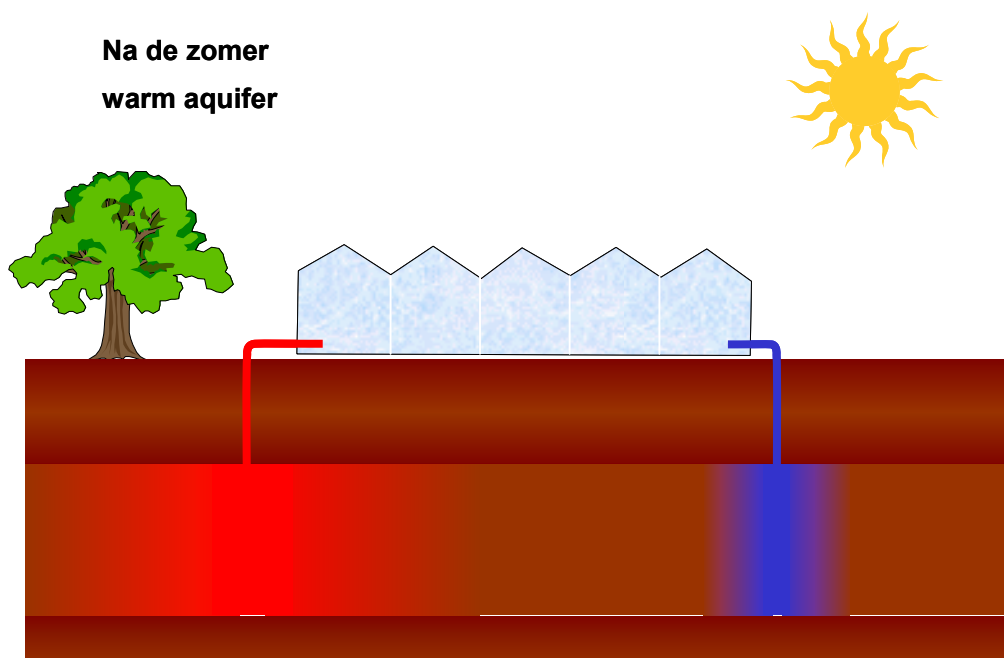
- Campen, J.B.; Zwart, H.F. de, Bot, G.P.A., 2003. Dehumidification of Greenhouses at Northern Latitudes. *Biosystems Engineering*, 86(4) pp 487-493
- Campen, J.C., Bot, G.P.A., 2003. Determination of greenhouse-specific aspects of ventilation using three-dimensional Computational Fluid Dynamics. *Biosystems Engineering* 84(1), p 69-77
- Campen, J.B., Swinkels, G.L.A.M., Braak, N.J. van de; Sonneveld, P.J., Bot, G.P.A., 2003. Vocht afvoeren uit tuinbouwkassen met warmteterugwinning IMAG nota P2003-35, 39 p
- Campen, J.C., 2004. Energy friendly dehumidification and spatial climate distribution in the Solar Greenhouse. PhD Thesis Wageningen University (in preparation)

2.4 Deelproject 2a: Energieafstemming

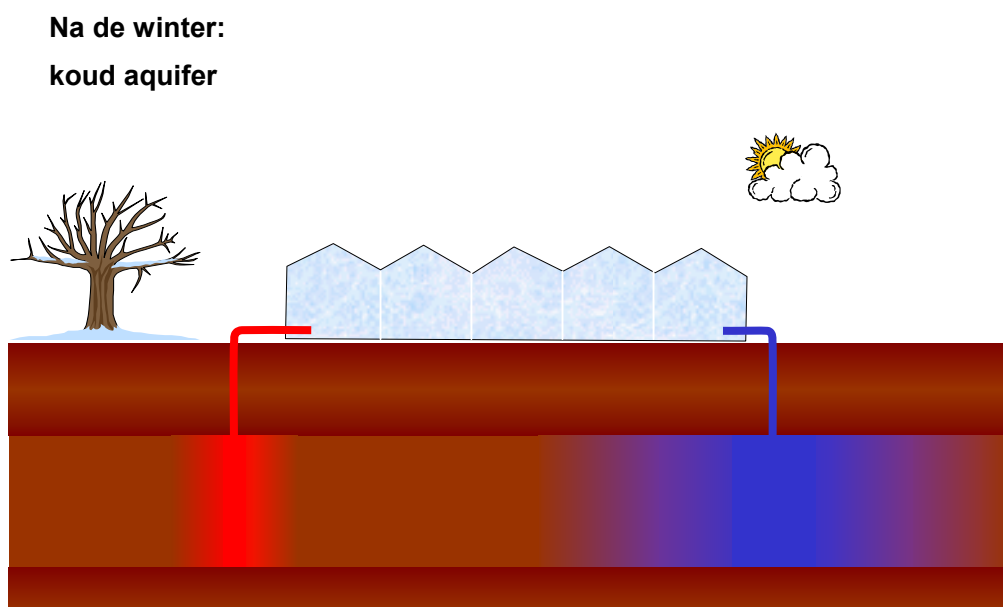
2.4.1 Seizoensafstemming

Bij de energieafstemming staat de vraag centraal hoe de patronen van energiebehoefte en duurzame energieaanbod op elkaar kunnen worden afgestemd. De belangrijkste duurzame energiebron met directe koppeling met het kassysteem is zonne-energie: de kas is een zonnecollector maar heeft in de zomer een te groot en in de winter een te klein aanbod. Door in de zomer warmte uit de kas te onttrekken, welke dan in de winter weer in de kas kan worden gebracht kan zonnewarmte door het gehele jaar optimaal worden gebruikt.

Warmteopslag op seizoensbasis kan in een aquifer (figuur 2.4.1 a,b), in de civiele bouw is daarmee al redelijk veel ervaring opgedaan. Een randvoorwaarde is dat het aquifer energetisch neutraal wordt bedreven, op jaarbasis moet het aquifer dus netto niet worden opgewarmd of afgekoeld. Om in de zomer voldoende warmte te kunnen oogsten is een experiment gestart dat het eerder genoemde experiment met de vochtonttrekkende ribbenbuis complementeert. In het experiment is de “warmteoogstcapaciteit” van verschillende koelelementen (normale verwarmingsbuizen, gevinde aluminium buizen en een in de kasconstructie geïntegreerde ribbenbuis) getest.



Figuur 2.4.1 a Warmteopslag in het aquifer: na de zomer warme kant gevuld



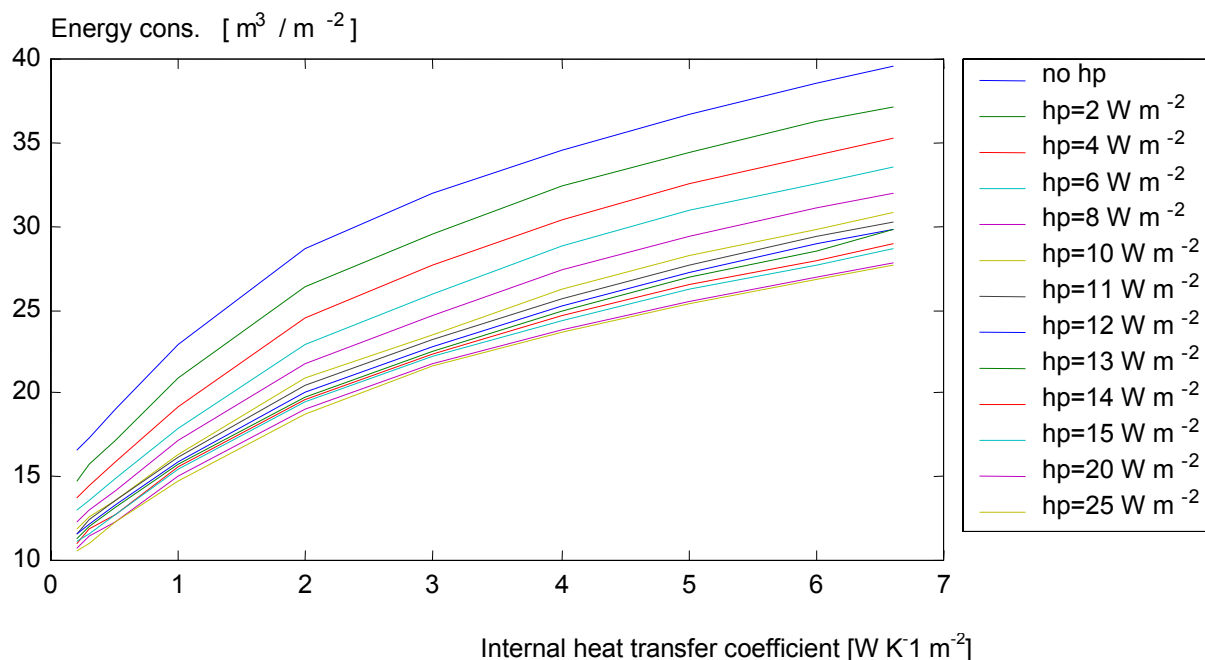
Figuur 2.4.1 b: warmteopslag in het aquifer: na de winter koude kant gevuld

Over het experiment is een rapport verschenen. Met de kennis van dit experiment is middels het dynamische simulatiemodel KASPRO het energievraag- en aanbodpatroon van de kas vastgesteld. In de berekeningen zijn de capaciteit van de warmtepomp, warmteonttrekkende systemen en het type vochtregeling gevarieerd.

2.4.2 Energiebehoefte

Het effect van temperatuur integratie (TI) op het klimaat en het energieverbruik is onderzocht. Dit onderdeel van het onderzoek is in samenhang uitgevoerd met deelproject 2b (gewasonderzoek)

Verder zijn met KASPRO berekeningen uitgevoerd naar het effect van toenemende isolatiewaarde voor de Zonnekas en toenemend vermogen van de warmtepomp. Dit is van belang voor zowel het materiaal- en het constructieonderzoek als het eindconcept. De resultaten zijn weergegeven in fig 2.4.2



Figuur 2.4.2 Jaarlijks energiegebruik voor de Zonnekas in m³ aardgasequivalenten per m² kasoppervlak bij toenemende warmteoverdrachtscoëfficiënt α_i tussen de twee lagen van een dubbeldek voor toenemende warmtepompcapaciteit hp.

Het effect van een verhoging van de isolatiegraad (dus lagere warmteoverdrachtscoëfficiënt α_i tussen de twee lagen van een dubbeldek) op het energiegebruik is groot bij reële isolatiewaarden. Bij verdere verhoging tot zeer hoge (praktisch irreële) waarden, neemt het effect af en resulteert uiteindelijk bij zéér hoge isolatiewaarde in een minimaal energiegebruik van ca 10 -15 m³ aardgasequivalenten. Dit verbruik is dan nog nodig voor de vochtbeheersing. Het belang van een energiezuinige ontvochtiging neemt daarom toe bij toenemende isolatie. Bij toenemend warmtepompvermogen neemt het aandeel te leveren ketelwarmte af en daarmee neemt de energiebehoefte af.

Om in de resultaten de plaats van reële kasdekken aan te geven wordt in tabel 2.4.1 een overzicht gegeven van het energiegebruik bij verschillende reële dekken zonder seizoensopslag/warmtepomp (dus alleen verwarming met een verwarmingsketel) en met seizoensopslag/warmtepomp waarbij dit is uitgerekend voor een paprikagewas als energie-intensieve teelt. Het effect van de emissiecoëfficiënt voor thermische straling ϵ wordt aangegeven voor de resultaten met lage ϵ waarbij hiervoor een waarde van 0.1 is genomen in plaats van 1 voor de normale situatie.

Tabel 2.4.1 Jaarrond energievraag per m² teeltoppervlak in m³ aardgasequivalenten bij verschillende kasdekken met en zonder seizoensopslag/warmtepomp voor een paprikateelt

Beschrijving dek	Energievraag zonder aquifer en WP	Energievraag met aquifer en WP
Enkel dek normaal	53	niet relevant
Enkel normaal met scherm	40	29
dubbel dek normaal	40	26
tripel dek normaal (dubbel dek)	33	20

met scherm)		
dubbel, lage ϵ alzijdig	28	16
tripel, lage ϵ alzijdig	26	12

Een nu uitvoerbare kas met normaal dubbeldek heeft met TI, warmtepomp en aquifer een energiegebruik van 26 m³ aardgas/m² i.p.v. 53 m³ van een standaardkas. Toevoeging van een scherm geeft de situatie van een tripel dek en dus een gebruik van 20 m³. De ontwikkelde materialen hebben voor een dubbeldek een lichttransmissie vergelijkbaar met enkel glas, zodat een dubbel dek toepasbaar is. Verbetering van ϵ bij op peil blijven van de lichttransmissie zal een verdere flinke reductie van de energiebehoefte geven maar hiermee uitgeruste materialen zijn voor de kastuinbouw nog niet beschikbaar. Dit is een grote uitdaging voor materiaaltechnologische onderzoek. Het is wel ontwikkeld voor de civiele bouw (HR++ glas) maar hiervan is de lichttransmissie onvoldoende.

Door deze berekeningen kon de energievraag van de Zonnekas bij toenemende isolatiewaarde worden bepaald. Het overblijvende energiegebruik is nodig voor aandrijving van de warmtepomp. Als het mogelijk is de warmtepomp aan te drijven met duurzame energie (zie par. 2.8) kan de echte Zonnekas worden gerealiseerd. Bij toenemende isolatiewaarde zijn de capaciteiten van zowel de aquifer als de warmtepomp lager zodat op basis van de berekeningen het systeem kan worden geoptimaliseerd.

2.4.3 Rapportage en publiciteit

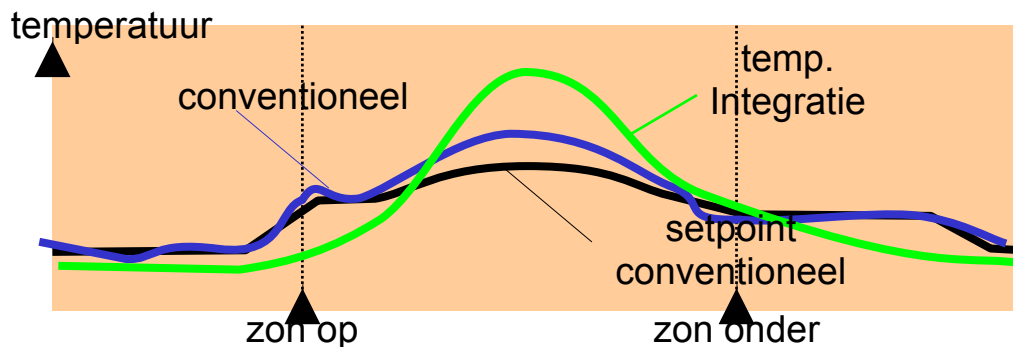
- Huijs, J.P.G. en J.J.G. Breuer. 1998 – Zonnekas. Deelproject 2a energievoorziening. Wageningen, IMAG-DLO Nota V98-87, 23 pp.
- Huijs, J.P.G., J.J.G. Breuer & N.J. van de Braak. 1999 - Zonnekas. Rapportage 1999 'Energievoorziening'. Wageningen, IMAG-nota 99-117, 22 pp.
- Kempkes, F.L.K., N.J. van de Braak & J.P.G. Huijs. 2000 - Afstemming energiestromen Zonnekas. Wageningen, IMAG-nota V 2000-80, 17 pp.
- Knies, P., N.J. van de Braak, F.L.K. Kempkes, H.F. de Zwart & G.P.A. Bot. 2000 - Optimalisatie componenten energievoorziening Zonnekas. Wageningen, IMAG-nota V 2000-76, 19 pp.
- Bot, G.P.A., Braak, N.J. van de , 2001. Zonne-energie en biomassa voor kassen. IMAG nota P2001-66, 15pp
- Bot, G.P.A., 2003. Zonnekas wil stoken zonder aardgas. Vakbl Groenten en Fruit, 24, pp 26-27
- Bot, G.P.A., 2003. De Zonnekas: een kas zonder aardgas, kan dat?. Vakbl Bloemisterij, 24, pp 40-41

2.5 Deelproject 2b: Gewastolerantie

2.5.1 Inleiding

De gewasproductie bepaalt het kasklimaat en daarmee het patroon van de energievraag. In de conventionele klimaatregeling worden instelwaarden (setpoints) voorgeschreven voor kasluchttemperatuur en RV die vervolgens door de regelaar moeten worden gerealiseerd. Deze instelwaarden zijn empirisch bepaald en zij kunnen afhankelijk gemaakt zijn van de tijd

(b.v. dag- en nachtwaarden met overgang hiertussen) of van andere grootheden (b.v. stralingsafhankelijk temperatuur setpoint). In een meer flexibele klimaatregelstrategie worden niet de instelwaarden voorgeschreven maar deze worden bepaald door criteria zoals optimalisatie van kosten en opbrengsten of het aanhouden van een gemiddelde in plaats van een momentane waarde (aanhouden integratiewaarde over bepaalde periode). Dit wordt in figuur 2.5.1 geïllustreerd.



Figuur 2.5.1. Schematische vergelijking conventionele setpoint regeling met temperatuurintegratie voor één etmaal met gelijke gemiddelde temperatuur

Als ventilatie bij een volgens de setpointregeling te hoge momentane temperatuur (die binnen de tolerantiegrens ligt) kan worden uitgesteld kan hierdoor verwarming in een volgens de setpoint regeling te koude periode worden uitgesteld.

Hetzelfde kan gesteld worden voor RV en CO₂. Op deze manier kan het gewas als het ware als buffer voor energie en vocht worden gebruikt. Zodoende kan bij een flexibele regeling de totale energiebehoefte afnemen. Een centrale vraag daarbij is hoe tolerant het gewas is voor variaties van kasluchttemperatuur en RV. Daarom is in dit deelproject onderzocht hoe groot de tolerantiegrenzen zijn en hoe het patroon van gewenste groeicondities kan worden beïnvloed door gebruik te maken van de tolerantiegrenzen van de gewasproductie voor temperatuur en luchtvochtigheid. Ook zijn de risico's voor ziekten en plagen en fysiogene afwijking beschouwd. Dit onderzoek is als promotieproject uitgevoerd door Wageningen Universiteit en onlangs is hierover het proefschrift verschenen (Körner, 2003). In dit eindverslag wordt hiervan een samenvatting gegeven.

2.5.2 Aanpak

Om temperatuur, vocht en CO₂ goed te kunnen controleren is een deels modelgebaseerde aanpak een deels heuristische aanpak gekozen met temperatuurintegratie als basis. Een centrale rol in de modelgebaseerde aanpak speelt het gewasfotosynthese model. De in de literatuur al ontwikkelde modellen moeten worden getoetst op hun bruikbaarheid. Een belangrijk aspect is hierbij is dat het model tot over de tolerantiegrenzen realistisch moet blijven, dus onder relatief extreme omstandigheden moet kunnen worden gebruikt. Om dit te kunnen evalueren is een opstelling ontwikkeld voor de meting van gewasfotosynthese onder alle te verwachten kasklimaatomstandigheden.

Omdat bij het ontwikkelen en testen van de concepten veel gewasproeven onder verschillende omstandigheden moesten worden uitgevoerd is gezocht naar een gewas met

– een korte doorlooptijd waarbinnen alle gewasstadia voorkomen. Daarom is snijchrysant als proefgewas gekozen. De ontwikkelde concepten zijn echter algemeen geldig en kunnen worden vertaald naar andere gewassen.

De energetische effecten van de ontwikkelde regelstrategieën zijn over een geheel jaar berekend met behulp van het bij de partner IMAG ontwikkelde simulatiemodel Kaspro. Dit model is bij de ontwikkeling uitgebreid gevalideerd en heeft zijn betrouwbaarheid bewezen.

2.5.3 Resultaten

Om een betrouwbaar gewasfotosynthesemodel te verkrijgen zijn uit de literatuur drie bladfotosynthesemodellen met toenemende complexiteit geëvalueerd onder extreme temperatuurcondities. Tussen de drie modellen waren vooral bij hoge temperatuur duidelijke verschillen te zien. Het model met de hoogste complexiteit was het meest belovend. Voor deze evaluatie was de ontwikkelde meetopstelling voor gewasfotosynthese op kasniveau onontbeerlijk. Hiermee is uitgebreid gemeten hoe voor snijchrysanten als voorbeeldgewas de fotosynthese afhangt van licht, temperatuur en CO₂ over de verwachte range van klimaatfactoren die in de kas verwacht kan worden. Zodoende kon het fotosynthesemodel over het gehele gebied worden gevalideerd.

Het gevalideerde model is geïmplementeerd in dynamische regelstrategieën. Eerst is een dynamisch temperatuurregime ontworpen waarbij temperatuurintegratie (TI) het beginpunt vormde. Met TI wordt temperatuur op dynamische wijze gestuurd. Temperatuur mag daarbij vergaand fluctueren waarbij het temperatuursgemiddelde in een bepaald tijdinterval een bepaalde waarde moet bereiken. Het energetische voordeel is dat verwarming en ventilatie kunnen worden uitgesteld. Deze methode is inmiddels een algemeen erkende standaard alhoewel de maximale integratietijd en de maximale temperatuurbandbreedte om gelijke plantproductie en kwaliteit te waarborgen nog niet bekend zijn. Hoe groter de bandbreedte hoe hoger de energiebesparing. Het concept TI is vooral empirisch zodat een heuristische benadering hierin nodig is. In de normale TI concepten wordt een vaste bandbreedte en integratietijd ingesteld. Om het energiebesparend effect te maximaliseren bij gelijke gewasproductie en kwaliteit is het concept TI gemodificeerd. In plaats van vaste temperatuurbandbreedten en integratieperioden is een systeem voor korte en lange termijn TI ontwikkeld. De korte termijn integratie (tijdbasis 24 uur) heeft bredere temperatuurbanden maar bij de lange termijn (meerdere dagen) is dit beperkt. In deze strategie zijn verdere een temperatuur dose-response concept en een module voor maximalisatie van gewas brutofotosynthese geïmplementeerd. Hiervoor wordt het gevalideerde fotosynthesemodel gebruikt.

Het effect van het nieuwe regime op kasklimaat, energiegebruik en gewasfotosynthese is met verschillende instellingen bepaald met het gevalideerde simulatieprogramma Kaspro (deelproject 1c). De simulaties toonden aan dat ten opzichte van een regime met normale temperatuurintegratie meer energie kon worden bespaard. Voor normale en veilige instellingen bedroeg dit 4.5%, voor extreme instellingen liep dit op tot 9%.

In dynamische temperatuurregeling met TI is de hierbij gebruikte vochtregeling een limiterende factor voor energiebesparing. Met TI worden verwarming en ventilatie geminimaliseerd en daaruit volgen grotere temperatuurfluctuaties en dus fluctuaties van relatieve vochtigheid (RV). De in de praktijk gebruikte (lage) vaste instellingen voor RV beïnvloeden het temperatuurintegratieregime negatief. Het openen van ramen is dan noodzakelijk bij lage temperatuur is dan noodzakelijk om RV te verlagen. Meestal wordt bij vochtventilatie ook verwarming ingezet. Om TI te steunen en iet tegen te werken is een dynamische RV regelstrategie ontwikkeld. Deze is gebaseerd op de door RV beïnvloede

processen (stress, calciumtekort, plantengroei en –ontwikkeling, Schimmelziekten). Ook voor deze strategie is met Kaspro het effect op kasklimaat, energiebesparing en fotosynthese bepaald. Vergeleken met een constante streefwaarde van 80% voor RV kon met het dynamische vochtregime op jaarbasis 18% energiebesparing voor het voorbeeldgewas chrysant worden gerealiseerd. Voor een volledige teeltperiode van 12 weken kon in het voorjaar zelfs 27% energie bespaard worden.

De twee nieuw ontwikkelde strategieën voor temperatuursturing en vochtsturing zijn met elkaar gecombineerd en in experimenten met vier verschillende lange termijn temperatuurbandbreedten van ± 2 , ± 4 , ± 6 en ± 8 K geëvalueerd. De referentie was een in de praktijk gebruikte standaardstrategie voor TI en vochtregeling. Alleen bij een bandbreedte van ± 8 K was de plantontwikkeling vertraagd. Een bandbreedte van ± 6 K was optimaal voor groei en ontwikkeling en voor energieconsumptie. Er was geen negatief effect van hoger toegelaten RV te zien, er werd wel een sterke toename van droge stof gehalte waargenomen. Voor het voorbeeldgewas chrysant moeten twee kanttekeningen worden geplaatst.

- In de eerste drie weken van de korte dag is het gewas gevoelig voor temperatuurfluctuaties zodat gedurende deze periode TI niet kan worden toegepast. De chrysantenteelt vindt nu in grote kascompartimenten plaats waarin teelten rouleren zodat alle gewasstadia in één kas aanwezig zijn. Toepassing van het ontwikkelde concept vereist dus dat het klimaat in elk teeltvak als apart kascompartiment kan worden geregeld.
- Met toenemende flexibiliteit van de temperatuursturing kan een positief verschil ontstaan tussen gemiddelde dag- en nachttemperatuur (positieve DIF). DIF beïnvloedt bij een groot aantal planten, en bij chrysanten vrij sterk, de stengellengte. Voor een aanvaardbare productkwaliteit worden veelal groeiremmers gebruikt maar dit is te voorkomen door de instelling van een negatieve DIF. Het is dus uitermate belangrijk dit goed in egelstrategieën te integreren.

De extra energiekosten van het ontwikkelde regime met toevoeging van negatieve DIF zijn ook met Kaspro berekend. Vergeleken met de standaardstrategie wordt het energiegebruik in de wintermaandengelijkijd met DIF en TI verlaagd. Bij toenemende temperatuurfluctuaties in het voorjaar en najaar kon het wekelijkse energiegebruik met TI (bandbreedte 6K) tot 60% verlaagd worden. Als een negatieve DIF van -6 K werd ingesteld was deze besparing nog 37%. Bij verlaging van de DIF nam ook de energiebesparing af. De energiebesparing wordt dus door de benodigde negatieve DIF verlaagd. Ten opzichte van het standaard regime wordt echter met negatieve DIF energie bespaard. Bij de beslissing over de toepasbare TI strategie (met of zonder DIF) is het seizoen de belangrijkste factor. Taklengtes sturen door negatieve DIF zorgt voor extra kosten in voor- en najaar. In de zomer is geen controle met negatieve DIF mogelijk, in de winter levert TI automatisch een negatieve DIF. Het DIF concept is een modificatie of restrictie van de etmaal TI en omdat het effect op de stengelstrekking niet volledig bekend is leidt het tot onzekerheden in de temperatuursturing. Het is niet bekend of DIF effecten over meerdere dagen kunnen worden geïntegreerd. Daarom is de hypothese getoetst dat de stengelstrekking op geïntegreerde effecten van dag- en nachttemperaturen reageert. Daarbij is zowel in kasexperimenten als in simulaties een streefwaarde van 0K DIF ingesteld en zijn voor de integratieprocedure over dag en nacht onafhankelijke sturingen geïmplementeerd. Het resultaat was een duidelijke energiebesparing en de planten waren niet significant langer dan met een standaardregime. Hierna is de streefwaarde voor DIF uitgebreid tot -6 en -12 K. De hoogste energiebesparingen werden weer gerealiseerd met een combinatie van het eerder beschreven temperatuur- en vochtregime. Over een heel jaar gezien kon met een lange termijn bandbreedte van slechts ± 2 K een energiebesparing van 33% worden bereikt met de grootste absolute besparing in de wintermaanden. Met de dynamische regeling kan relatief

gezien in voorjaar en herfst de meeste energie worden bespaard. Met negatieve DIF wordt het gebruik van chemische groeiremmers voorkomen en wordt enige energiebesparing ingeleverd. Hier is dus vanuit duurzaamheidsoverwegingen een optimalisatieprobleem omdat zowel reductie van energiegebruik (CO₂ emissie) als gebruik chemische middelen moet worden nagestreefd. Dit is echter fine tuning in het totaal en niet tot in het optimalisatiepunt onderzocht. Bij gebruik van duurzame energie zal een iets verhoogde inzet nodig zijn. De met de nieuwe regelstrategieën bereikte energiebesparingen bij gelijkblijvende fotosynthese is zodanig dat dit substantieel bijdraagt aan de energiezuinigheid van de Zonnekas. Het basisidee dat het gewas kon worden gebruikt als slimme virtuele energiebuffer bleek zeer bruikbaar.

2.5.4 Rapportage en publiciteit

Körner, O., H. Challa & F. Buwalda. 2000 - Temperature control for tomato and chrysanthemum in a solar energy greenhouse / Humidity control in a solar energy greenhouse / Greenhouse crop dry matter accumulation model in MatLab. Tussenrapportage deel 2B, 21 pp. / 11 pp. / 7 pp.

Körner, O., H. Challa, R.J.C. van Ooteghem, 2002, *Modelling temperature effects on crop photosynthesis at high radiation in a solar greenhouse*, Acta Horticulturae, vol. 593, p. 137-144

Körner, O. en R.J.C. van Ooteghem, 2003, *Simulating crop gross photosynthesis at high temperatures*, In: Crop based climate regimes for energy saving in greenhouse cultivation, Ph.D. thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, p. 75-90

Körner, O, 2003. crop based climate regimes for energy saving in greenhouse cultivation. PhD these Wageningen University, 240 p. ISBN 90-5808-861-8

2.6 Deelproject 3a: Besturingstechniek

2.6.1 Inleiding

Het doel van dit deelproject was het ontwikkelen van besturingsalgoritmen waarbij het energieverbruik van de Zonnekas wordt geminimaliseerd, terwijl het kasklimaat voldoet aan de eisen voor gewasgroei met een opbrengst van hoge kwaliteit.

De Zonnekas is complexer dan huidige kassystemen en heeft meer stuurmogelijkheden (zie deelproject 1c):

- Een warmtepomp en een warmtewisselaar om warmte te onttrekken en toe te voeren aan de aquifer.
- Ventilatie met warmteterugwinning, die gebruikt kan worden om de luchtvochtigheid te verminderen met minder warmteverlies dan met reguliere ventilatie met ramen.
- CO₂ sturing onafhankelijk van de ketelsturing. Aangezien het de bedoeling is om zo min mogelijk fossiele energie te gebruiken, moet de CO₂ elders betrokken worden, bijvoorbeeld van warmtekrachtcentrales.

Verder heeft de zonnekas een kasdek dat meer licht doorlaat en beter isoleert, waarmee de gewasopbrengst hoger en het energiegebruik lager is.

Regeling met nu in de praktijk gebruikte algoritmen is niet aantrekkelijk. Het nu al hoge aantal instellingen en (weersafhankelijke) correcties daarop zou verder moeten worden uitgebreid. Ook de gebruikte setpointregeling met terugkoppeling biedt beperkte

— mogelijkheden. De regeling van complexe systemen vereist dat kennis van het systeemgedrag in de regeling wordt ingebouwd. Voor deze systeemkennis zijn dynamische modellen nodig met voldoende nauwkeurigheid. Zodoende kan model voorspellend optimaal regelen worden gerealiseerd waarmee de doelstelling kan worden gehaald.

Het onderzoek uit deelproject 3a wordt weergegeven in een proefschrift (Van Ooteghem, 2004). Tevens is een eindrapport over het onderzoek geschreven (Van Ooteghem 2003^B).

2.6.2 Aanpak

Het wijkende horizon optimale besturingsconcept (RHOC, receding horizon optimal control concept) is een bijzondere vorm van model voorspellend regelen (model predictive control, MPC) en wordt met toenemend succes in de procesindustrie ingezet. Ook voor de kasbesturing is het concept uitermate geschikt, zoals aangetoond door Tap (2000) en Van Henten (1994).

Met modellen die het dynamisch gedrag van kas en gewas in de tijd beschrijven en een weersverwachting kan gesimuleerd worden wat de gevolgen zijn van stuuraanpassingen op het kasklimaat over een bepaalde tijdshorizon. Er wordt een doelstelling geformuleerd die de kosten van energie, de gewasopbrengst, en het verlies aan gewasopbrengst ten gevolge van het overschrijden van temperatuur- en vochtgrenzen omvat. Met een zoekroutine worden de stuurwaarden bepaald voor de hele tijdshorizon, waarbij de kosten gedefinieerd door de doelstelling geminimaliseerd worden. Van deze optimale stuurwaarden wordt de eerste waarde aan het kassysteem opgelegd. Hierna wordt een meting uitgevoerd om de toestand van het kasklimaat (en idealiter het gewas) te bepalen. Vervolgens wordt de berekening herhaald, wat de 'wijkende horizon' wordt genoemd. De hiermee verkregen terugkoppeling is noodzakelijk om afwijkingen tussen de modelvoorspellingen en de werkelijkheid te compenseren.

Voor goede resultaten van de optimalisatie van de stuurwaarden op basis van een dynamisch model van kas en gewas is het belangrijk dat het model een goede weergave is van de werkelijkheid. Daarom is hierin veel inspanning verricht. In principe is het mogelijk het systeem kas+gewas integraal te optimaliseren. Gezien het verschil in tijdschaal tussen kas en gewas levert dit echter numerieke problemen op. Voor het gewas zou men het hele teeltseizoen door moeten rekenen, waarbij op voorhand het weer bekend zou moeten zijn, vanwege de grote invloed van de straling op de gewasgroei. Het kasklimaat varieert op uurbasis en het weer (m.n. straling) zelfs op minuutbasis. Daarnaast zijn de gewasmodellen nog niet zo ver ontwikkeld dat alle aspecten die door het klimaat worden beïnvloed kunnen worden beschreven. In projectdeel 2b zijn temperatuur- en vochttoleranties en een temperatuurintegraal bepaald waaraan het kasklimaat moet voldoen (Körner, 2003). Door middel van deze temperatuurintegraal zullen de langere termijn effecten van de temperatuur op de gewasgroei worden meegenomen.

2.6.3 Modellerings

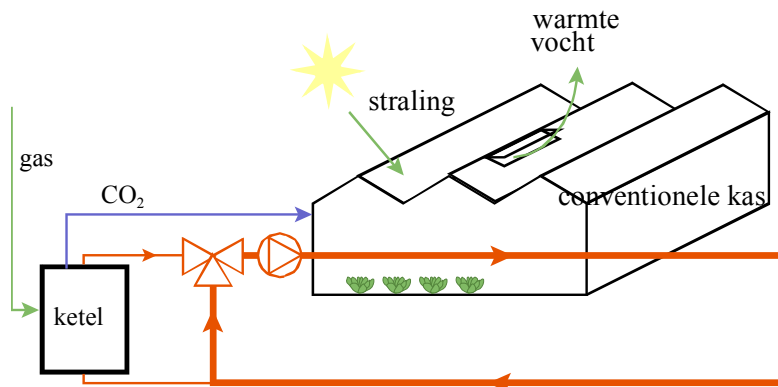
Na bestudering van verschillende bestaande kasklimaatmodellen is gekozen voor een model waarin de processen niet te veel zijn vereenvoudigd (Heesen, 1998, Van Ooteghem, 2001) en dit model is geverifieerd. Het is geschreven in Fortran om voldoende snel te kunnen rekenen in de optimale regeling. Het gewasverdampingsmodel vroeg daarbij aparte aandacht.

Ook voor de gewasgroeimodellen zijn de beschikbare modellen uitgebreid bestudeerd en is een combinatie gemaakt (Körner, Challa and Van Ooteghem, 2002, Körner and Van

Ooteghem, 2003).

Het fysische kas-gewas model is vervolgens gevalideerd met kasdata (Van Ooteghem, 2003^B) om het als voldoende nauwkeurig in te kunnen zetten. Het gewasmodel is apart gevalideerd (deelproject 2b, Körner, Challa en Van Ooteghem, 2002, Körner en Van Ooteghem, 2003)

Het model van een conventionele kas is uitgebreid en aangepast om het gedrag van de Zonnekas te kunnen beschrijven. In figuur 2.6.1 is de uitgangssituatie aangegeven.

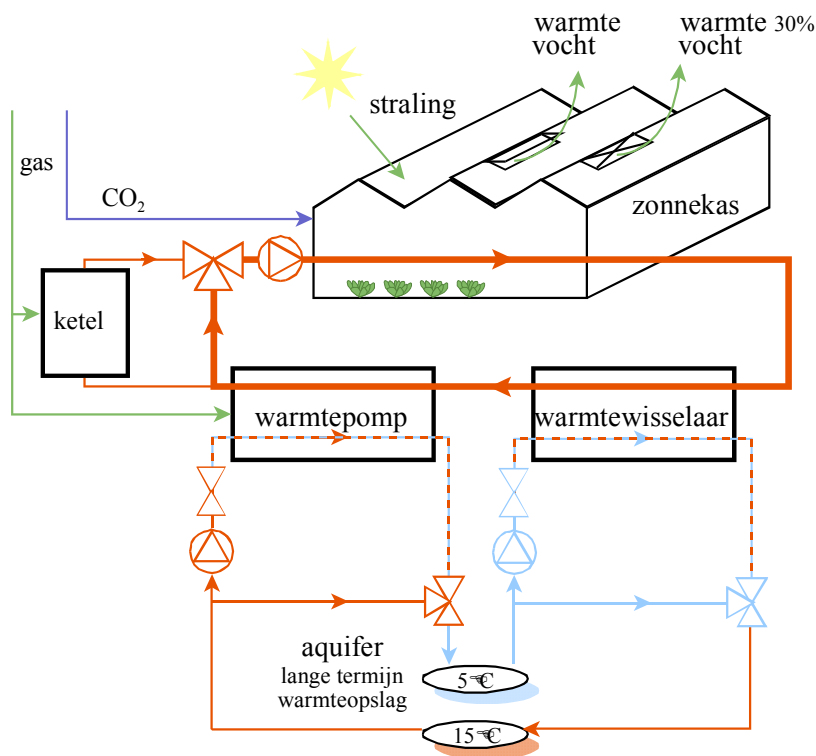


Figuur 2.6.1: Configuratie conventionele kas

De uitbreidingen/aanpassingen van de conventionele kas naar de zonnekas omvatten:

- Van enkel naar dubbel kasdek, met hogere waarden voor de lichttransmissie en isolatiewaarde van het kasdek.
- Toevoeging van een warmtepomp om warmte te onttrekken aan de aquifer en toe te voegen aan de kas op momenten van warmtevraag.
- Toevoeging van een warmtewisselaar om warmte te onttrekken aan de kas en toe te voegen aan de aquifer op momenten van warmteoverschot.
- Toevoeging van ventilatie met warmteterugwinning, die gebruikt kan worden om de luchtvochtigheid te verminderen met minder warmteverlies dan met gewone ventilatie met ramen. De hoeveelheid voelbare warmte die verloren gaat wordt verminderd met 70%.
- CO₂ is vrij beschikbaar, dus CO₂-dosering is onafhankelijk van de ketelsturing (er wordt niet gestookt om CO₂ te genereren).

Voor de aquifer is aangenomen dat dit een oneindig reservoir is met warm en koud water van constante temperatuur. De driewegkleppen voor het genereren van 5 en 15°C water voor de aquifer zijn buiten het systeem gehouden. In het model worden de warmtepomp en de warmtewisselaar gebruikt om (zoveel mogelijk) warmte toe te voeren of te onttrekken aan het ondernet. Het zonnekas-model is beschreven in Van Ooteghem (2003^A). In figuur 2.6.2 wordt de configuratie van de zonnekas gegeven.



Figuur 2.6.2: Configuratie Zonnekas

De aanpassingen aan het gewasmodel worden beschreven in Van Ooteghem (2003^B).

2.6.4 Optimale regeling

In paragraaf 6.2 is beschreven welke modellen er gebruikt zijn en welke onderdelen er zijn toegevoegd voor het dynamisch niet-lineair model van de zonnekas met het gewas. Dit model is gebruikt om de dynamische toestanden te simuleren als functie van de sturingen (klepstanden, raamstanden) en de weersverwachting in een optimale regelaar met wijkende horizon. De wijkende horizon optimale sturing wordt beschreven in Van Ooteghem (2003^B) waarbij wordt ingegaan op de formulering van optimale sturing, de doelfunctie, de sturingangen, de begrenzingen van de toestandsafhankelijke sturingang en de wijkende horizon. Verder is het gepubliceerd (Van Ooteghem et al., 2003^C, 2003^D)

Om het principe te testen is eerst een open lus optimale sturing beproefd via simulatie waarbij een conventionele kas vergeleken wordt met de Zonnekas op een zomer- en een winterdag. Open lus wil zeggen dat nog geen wijkende horizon is toegepast. De resultaten worden in tabel 2.6.1 samengevat voor de toe- of afgevoerde energie en de gewasproductie (drooggewicht).

Tabel 2.6.1: Resultaten energie en drooggewicht open lus zonder temperatuurintegratie

omschrijving	eenheid	geselecteerde	geselecteerde
--------------	---------	---------------	---------------

			zomerdag	winterdag
energie-toevoer	[W·m ⁻² ·dag ⁻¹]	zonnekas	16.16	76.50
		conventionele kas	16.75	105.12
drooggewichts-toename	[kg·m ⁻² ·dag ⁻¹]	zonnekas	0.397	0.183
		conventionele kas	0.316	0.173

Vergeleken met een conventionele kas (met dezelfde optimale sturing) gaan de energiekosten omlaag en de drooggewichtstoename omhoog. Hiermee is aangetoond dat de doelfunctie op de korte termijn (1 dag) goed gekozen is.

Hiermee is verder gegaan naar de langere termijn. Aan de doelfunctie wordt de temperatuurintegraal (TI) toegevoegd om de lange termijn effecten op de groei van het gewas mee te nemen en het bereik van de temperatuurgrenzen worden vergroot (Körner, 2003). De resultaten worden in tabel 2.6.2 samengevat voor de toe- of afgevoerde energie en de gewasproductie (drooggewicht).

Tabel 2.6.2: Resultaten energie en drooggewicht open lus met temperatuurintegratie

omschrijving	eenheid		geselecteerde zomerdag	geselecteerde winterdag
energie-toevoer	[W·m ⁻² ·dag ⁻¹]	zonnekas	10.38	101.60
		conventionele kas	8.94	116.92
drooggewichts-toename	[kg·m ⁻² ·dag ⁻¹]	zonnekas	0.391	0.179
		conventionele kas	0.338	0.186

Vergeleken met een conventionele kas (met dezelfde optimale sturing) gaan de energiekosten omlaag en de drooggewichtstoename omhoog in de zomer en iets omlaag in de winter. De temperatuurintegraal van de zomerdag in de conventionele kas blijkt gemiddeld 0.2°C te hoog te zijn. Dit komt omdat de conventionele kas minder mogelijkheden heeft voor koeling (geen warmtewisselaar).

Vergeleken met de resultaten zonder temperatuurintegratie gaan de energiekosten in de zomer omlaag en in de winter omhoog. Door het toevoegen van de TI wordt een eis gesteld aan de gemiddelde temperatuur van 19°C, terwijl zonder TI de temperatuur mag dalen tot 16°C. Het toevoegen van de TI heeft minder invloed op de drooggewichtstoename.

De open lus berekeningen kunnen als inleiding op de gesloten lus berekeningen worden gezien, waarbij wel het wijkende horizon principe is toegepast. Dit wil zeggen dat op elk volgend tijdstip nieuwe optimale sturingen worden berekend voor de voorspelhorizon. Voor deze berekening zijn begintoestanden (temperatuur kas, luchtvochtigheid) voor dat tijdstip nodig. Deze begintoestanden worden bepaald met het simulatiemodel. Verder zijn op elk tijdstip weersverwachtingen nodig voor de komende 24 uur (de voorspelhorizon). De weersverwachting bestaat uit uurwaarden. In tegenstelling tot de eerdere test met de open lus optimale sturing wordt nu het Seljaar gebruikt, een dataset met een jaar uurwaarden van klimaatdata voor Nederland (Breuer en Van de Braak, 1989). De berekeningen zijn uitgevoerd voor vier maanden uit het Seljaar: januari, april, juli en oktober. De resultaten worden in tabel 2.6.3 samengevat. De energietermen zijn nu verder uitgesplitst om het effect van de warmtepomp en de warmtewisselaar beter te kunnen onderscheiden. Verder zijn de resultaten per maand i.p.v. per dag gegeven.

Uit tabel 2.6.3 blijkt dat er in de onderzochte maanden minder warmte aan de aquifer wordt toegevoerd ($0.5 \cdot Q_{he}$), dan er wordt onttrokken (Q_c). Om dit beter te verifiëren moet nog een

jaarrond-berekening uitgevoerd worden. Verder is te zien dat in april, juli en oktober een aanzienlijke warmtetoevoer Q_h van de aquifer naar de kas plaatsvindt door de warmtepomp. De ketel wordt vooral in januari gebruikt. Verder blijkt dat de *COP* (coefficient of performance) van de warmtepomp varieert van 4.5 tot 7.5 als de warmtepomp wordt gebruikt (Van Ooteghem, 2003^B).

Tabel 2.6.3: Resultaten energie en drooggewicht

omschrijving	januari	april	juli	oktober
$Q_{sum} = Q_{boil} + Q_{hp} - 0.5 \cdot Q_{he}$ energietoevoer: totale toevoer aan kas	46.07	-0.33	-7.88	-0.03
Q_{he} onttrokken door warmtewisselaar aan kas	0.19	17.96	21.36	6.81
$0.5 \cdot Q_{he}$ toegevoerd door warmtewisselaar aan aquifer	0.10	8.98	10.68	3.41
Q_{boil} toegevoerd door ketel aan kas	44.82	7.33	1.76	1.43
Q_h toegevoerd door warmtenomn aan kas	15.79	17.25	13.63	23.91
$Q_{hp} = Q_h - Q_c$ verbruikt voor aansturing warmtenomn	1.35	1.33	1.04	1.95
Q_c onttrokken door warmtepomp aan aquifer	14.44	15.92	12.59	21.96
drooggewichtstoename [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{maand}^{-1}$]	3.62	10.85	11.04	7.85

2.6.5 Adaptieve regeling voor de zonnekas

Er is onderzocht of recursieve parameterschatting (zelflerende modellen) een vereenvoudigd lineair kasmodel voor de conventionele kas bruikbaar maakt. Hiervoor is het model van Tap (2000) gebruikt. Dit vereenvoudigd kasmodel heeft drie toestanden: temperatuur, vochtconcentratie en CO_2 -concentratie (Oost, 1999, De Bruin, 2001). Van dit model is een discrete tijdversie gemaakt, waarmee de parameters on-line zijn geschat door middel van een recursief schattingsalgoritme, met gebruikmaking van kasdata van Tap en het IMAG.

De ontwikkelde concepten zijn interessant als met een zwaar vereenvoudigd model wordt gewerkt. Hierdoor wordt veel kennis over het proces – die wel aanwezig is – weggelaten, waarna deze adaptief door parameterschatting weer wordt toegevoegd. De gekozen methode van recursief schatten maakt gebruik van een gediscrètiseerd model. Het discretiseren van het huidige model is echter een hele opgave.

In eerste instantie leek het nodig te zijn om een gereduceerd model te gebruiken voor de optimale regeling. De modelparameters van het gereduceerde model zouden dan gekalibreerd kunnen worden met het niet-gereduceerde model. Hiervoor zou een zelflerende/adaptieve regeling gebruikt kunnen worden. Voortschrijdend inzicht heeft geleid tot de conclusie dat het mogelijk is optimale regeling (receding horizon optimal control) te realiseren met het huidige model. Aangezien het huidige (zonnekas+gewas-) model een goede beschrijving geeft van de processen is de behoefte voor het schatten van parameters

gereduceerd tot het schatten van de begintoestanden met bijvoorbeeld een extended Kalman filter.

De begintoestanden bepaald met het model of uit meting zijn onnauwkeurig. Deze begintoestanden hebben grote invloed op het verloop van de toestanden in de tijd, en dus voor de uitkomsten van de optimale regeling. Een extended Kalman filter kan gebruikt worden om de begintoestanden voor de optimalisatie op enig tijdstip te bepalen, waarbij rekening wordt gehouden met de onzekerheden in model en meting.

Een extended Kalman-filter kan ook gebruikt worden om parameters te schatten met het toestandsmodel, mocht dit nodig blijken. Dit kan overigens ook een aparte on-line parameter schatter. Aangezien de simulaties van het kas+gewas-model een goede overeenkomst vertonen met de gemeten data is er op dit moment geen behoefte aan een parameterschatter.

2.6.6 Implementatie van RHOC bij Priva Hortimation

De FORTRAN software voor het berekenen van de optimale sturingen is gekoppeld aan de kas-gewas-simulator van Priva Hortimation door Wouters (2003). De simulator is een uitgebreide versie van de Intégro klimaatcomputer die draait op een PC. De uitbreiding bestaat uit een simulator van de meetbox, waarmee een conventionele kas (zonder ventilatie met warmteterugwinning, warmtepomp en warmtewisselaar) gesimuleerd wordt. Deze simulator wordt door Priva ook gebruikt om de regelstrategieën van de Intégro, te testen. Hierdoor kan de praktijksituatie (versneld) getest worden.

Er is gewerkt met de optimale sturingen zonder temperatuurintegratie (zie paragraaf 2.6.4). Wouters (2003) heeft de resultaten van de reguliere sturing vergeleken met de optimale sturing voor een conventionele kas. Dit wordt verder gerapporteerd onder deelproject 3b.

2.6.7 Rapportage en publiciteit

Bruin, J. de, 2001, *Parameter estimation for a greenhouse climate model*, M.Sc. thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 78 pp.

Körner, O., H. Challa, R.J.C. van Ooteghem, 2002, *Modelling temperature effects on crop photosynthesis at high radiation in a solar greenhouse*, Acta Horticulturae, vol. 593, p. 137-144

Körner, O. en R.J.C. van Ooteghem, 2003, *Simulating crop gross photosynthesis at high temperatures*, In: Crop based climate regimes for energy saving in greenhouse cultivation, Ph.D. thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, p. 75-90

Oost, C.R., *Adaptive modelling of greenhouse climate*, M.Sc. thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 133 pp.

Ooteghem, R.J.C. van, 2001, *Greenhouse and photosynthesis models; An evaluation of the existing model* by W.Th.M. van Meurs, E.J. van Henten, L. Heesen and L.G. van Willigenburg, interne notitie

Bontsema, J.; Gelder, A. de; Henten, E.J. van; Janssen, H.J.J.; Lamaker, A.J.J.; Meurs, W.T.M. van; Nijenhuis, P.; Straten, G. van ; Swinkels, G.L.A.M.; Willigenburg, L.G. van, 2002. Optimaal energie efficiënt - Model based - besturingssysteem voor kasklimaat. IMAG nota V2002-37, 75 p

Chalabi, Z.S., Henten, E.J. van, 2002. Optimal feedback control of nonlinear dynamic systems. IMAG nota V2002-58, 38 p.

- Henten, E.J., 2003. Sensitivity analysis of an optimal control problem in greenhouse climate management. *Biosystems Engineering*, 85 (3), pp 355-364
- Ooteghem^A, R.J.C. van, 2003, *The solar greenhouse model; Extension of the greenhouse model with crop model*, interne notitie
- Ooteghem^B, R.J.C. van, 2003, *Eindverslag Deelproject 3a Zonnekas*. Interne notitie
- Ooteghem^C, R.J.C. van, J.D. Stigter, L.G. van Willigenburg en G. van Straten, 2003, *Optimal control of a solar greenhouse*, In: 22nd Benelux Meeting on Systems and Control, Lommel, Belgium, March 19-21 2003, p. 41
- Ooteghem^D, R.J.C. van, J.D. Stigter, L.G. van Willigenburg en G. van Straten, 2003, *Optimal control of a solar greenhouse*, In: European Control Conference, Cambridge, United Kingdom, September 1-4 2003
- Ooteghem, R.J.C. van, 2004, *Optimal control of the Solar greenhouse* (preliminary title). PhD thesis Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, in preparation
- Wouters, H., 2003, *Koppeling van een externe optimalisator aan de Priva kas-gewas simulator*, M.Sc. internship report, Priva Hortimation, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 59 pp.
- Ooteghem, R.J.C., 2004. Control of the Solar greenhouse. PhD Thesis Wageningen University (in preparation)

2.6.8 Referenties

- Breuer, J.J.G. en N.J. van de Braak, 1989, *Reference year for Dutch greenhouses*, Acta Horticulturae, vol. 248, p. 101-108.
- Heesen, L., 1997, *Definitie, gevoeligheidsanalyse en evaluatie van een dynamisch model van het kas-gewasproductieproces*, M.Sc. thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, 91 pp
- Henten, E.J. van, 1994, *Greenhouse climate management: an optimal control approach*, Ph.D. thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 329 pp.
- Körner, O., 2003, *Crop based climate regimes for energy saving in greenhouse cultivation*, Ph.D. thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 240 pp.
- Körner, O. en H. Challa, 2003, *Design for an improved temperature integration concept in greenhouse cultivation*, Computers and Electronics in Agriculture, vol. 39, p. 39-59
- Tap, R.F., 2000, *Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production*, Ph.D. thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 127 pp.

–

2.7 Deelproject 3b: Implementatie in praktische klimaatregeling

Projectdeel 3b is gericht op praktijkimplementatie van de ontwikkelde regelmethode. Een belangrijk knelpunt daarbij is het verschil in platforms in de praktijk en het onderzoek en het foutloos moeten kunnen opereren in de praktijk. Hiervoor moeten uitgebreide tests onder praktijkomstandigheden op een praktijkplatform moeten worden uitgevoerd. Daarom is in projectdeel 3b door Priva Hortimation B.V. een simulator ontwikkeld van het kas-gewas systeem en is de meerwaarde bepaald van de binnen het 'Zonnekas project' ontwikkelde optimale klimaatregeling. Deze samenvatting beschrijft de doelstellingen, de bij Priva Hortimation B.V. uitgevoerde activiteiten en het uiteindelijk opgeleverde resultaat.

2.7.1 Doelstellingen

De doelstelling van het werk van Priva Hortimation B.V. binnen het project is tweeledig geweest. Op basis van de onderstaande technische en functionele uitgangspunten is een kas-gewas simulator ontwikkeld.

- De simulator moet de dynamische respons berekenen die voldoende representatief is voor de werkelijke respons van het kas-gewas systeem, zodat bestaande en nieuw te ontwikkelen klimaatregelingen op hun dynamische regelgedrag en economische en teelttechnische meerwaarde kunnen worden beoordeeld.
- De simulator moet inzetbaar zijn voor het simuleren van gangbare typen kassen en gewassen.
- De omgeving voor ontwikkeling en onderhoud van de simulator moet zo worden gekozen dat de bij Priva Hortimation B.V. beschikbare faciliteiten zoveel mogelijk worden benut.
- De simulator moet aansluitbaar zijn op de bestaande klimaatregelingen (Priva Intégro procescomputer) en op nieuwe optimale regelingen. Belangrijk aandachtspunt is dat de interface waarlangs de sturingen van de stelorganen in de kas (luchtramen, verwarmingsbuizen en schermdoeken) en de resulterende respons van het kas-gewas systeem tussen regelaar en simulator worden doorgegeven, onafhankelijk is van het toegepaste type klimaatregelaar.
- Bij het simuleren van het kas-gewasgedrag als reactie op allerlei typen regelingen is zowel de mogelijkheid van real-time als versneld doorrekenen van belang. Real-time doorrekenen biedt de mogelijkheid tot testen van de timing en dynamica van de klimaatregelaar en directe vergelijking met de werkelijkheid. Versneld doorrekenen maakt het mogelijk om snel de meerwaarde van de regeling te kunnen bepalen over een langere tijdspanne.

Verder heeft Priva Hortimation B.V. tot taak gehad om met de ontwikkelde simulator een eerste beoordeling uit te voeren van de economische en teelttechnische meerwaarde van de binnen het 'Zonnekas project' ontwikkelde optimale klimaatregeling.

2.7.2 Activiteiten

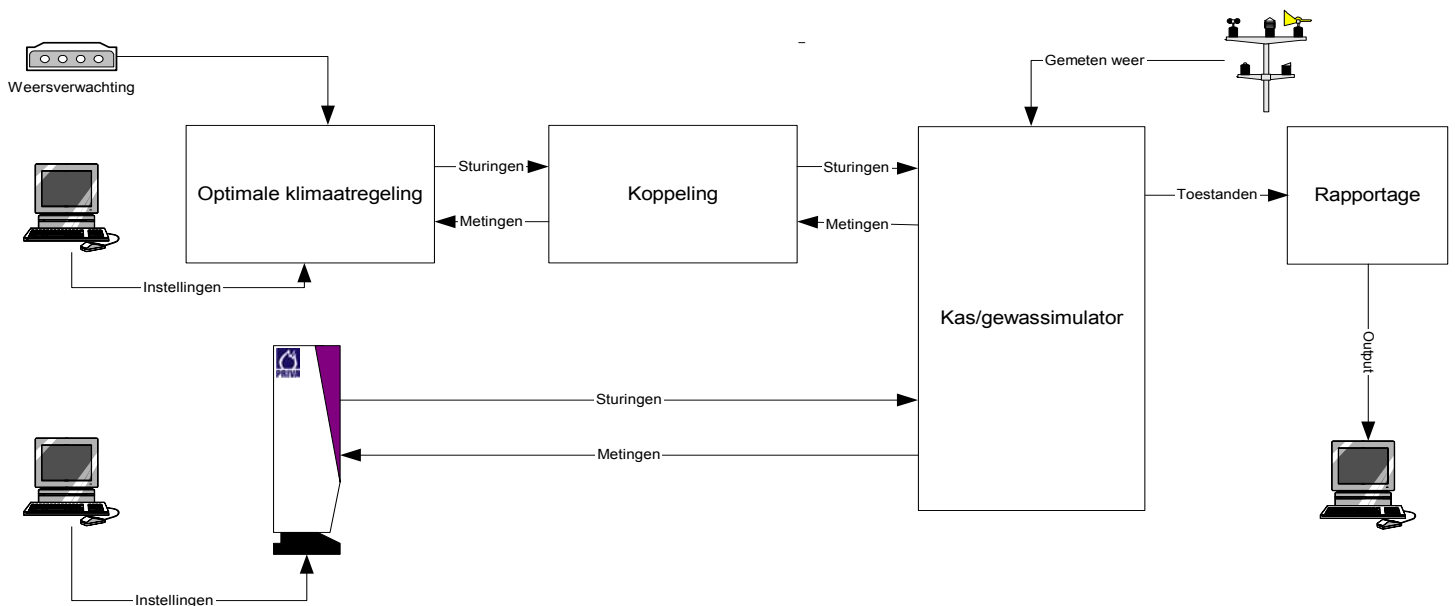
Om aan de hierboven genoemde uitgangspunten te voldoen zijn bij Priva Hortimation B.V. de volgende activiteiten uitgevoerd:

- Onderzoek en realisatie van de interface tussen de klimaatregelaar op de procescomputer en de simulator. De simulator is aangesloten op zowel de bestaande klimaatregelingen (Priva Intégro procescomputer) als de, binnen het Zonnekas project

- ontwikkelde optimale regelaar (gebaseerd op RHOC, Receding Horizon Optimal Controller). Door de interface te baseren op de bestaande fysieke scheiding tussen klimaatregelaar en het kas-gewassysteem, d.w.z. sturingen van stelorganen (luchtramen, verwarmingsbuizen, schermdoeken en metingen van kasklimaat (kastemperatuur, luchtvochtigheid, CO₂ etc.) is deze overeenkomstig de werkelijkheid en tevens onafhankelijk van het toegepaste type klimaatregelaar.
- Inventarisatie van reeds beschikbare rekenmethoden voor simuleren van kas-gewas systemen binnen de wetenschappelijke literatuur. Hierbij is met name, zonder onnodig verlies aan nauwkeurigheid, de nadruk gelegd op praktische toepasbaarheid en genericiteit (toepasbaar voor gangbare typen kassen en gewassen). Als resultaat zijn een aantal fysieke modelvergelijkingen opgesteld, die zijn getoetst aan de hand van metingen uit de praktijk.
- Ontwerp en implementatie van de kas-gewassimulator binnen de ontwikkelomgeving, waarin tevens de programmatuur voor de Priva Intégro procescomputer wordt gemaakt. Dit garandeert de mogelijkheid van verdere ontwikkeling en een blijvend onderhoud en voorkomt onnodige extra ontwikkelkosten door een optimale benutting van de bestaande faciliteiten voor ontwerp, realisatie en analyse van diverse regelprogrammatuur. Het platform, waarop de simulator draait, is de PC. Dit garandeert voldoende aansluitmogelijkheden op nieuwe, te ontwikkelen, regelingen.
- Geschikt maken van de simulator voor versnelde simulatie.
- Beoordelen van de binnen het 'Zonnekas' project ontwikkelde optimale klimaatregeling met behulp van de ontwikkelde kas-gewassimulator. Hiertoe moet een bepaalde hoeveelheid basiskennis aangaande de gebruikte technieken worden opgedaan.

2.7.3 Resultaat

De hierboven beschreven activiteiten hebben, als direct resultaat, een werkend systeem opgeleverd waarmee nieuw te ontwikkelen regelingen zowel in simulatie als in de praktijk kunnen worden beoordeeld en vergeleken met de huidige commerciële procesregelingen. Figuur 2.7.1 geeft een schematisch overzicht van het ontwikkelde systeem.



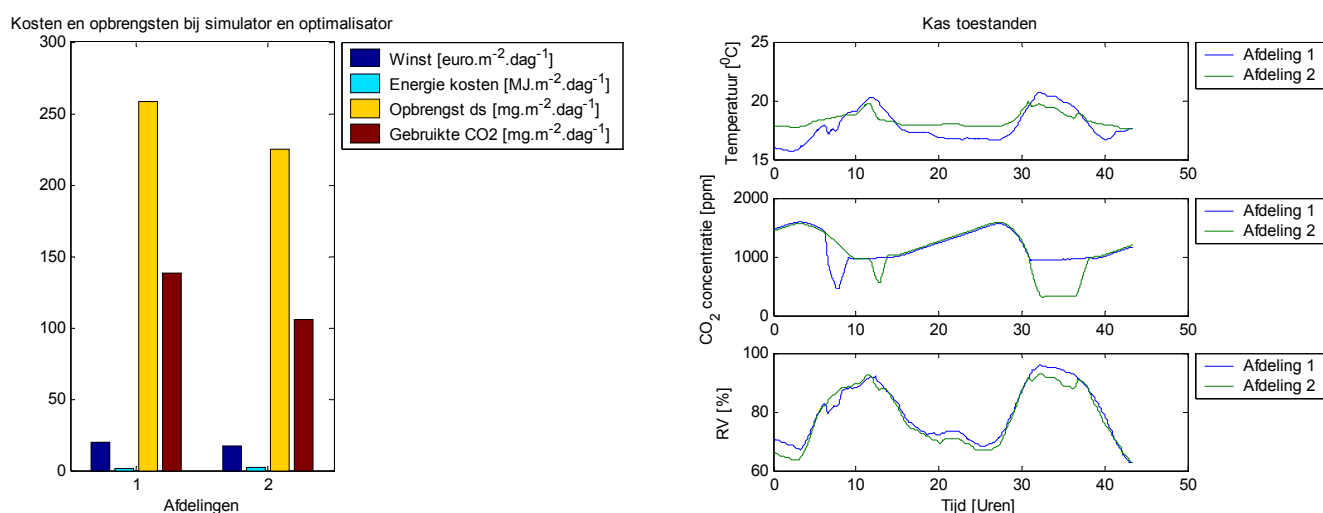
Figuur 2.7.1: het binnen het project ‘Zonnekas’ ontwikkelde systeem.

De ontwikkelde kas-gewassimulator is gebaseerd op de modelvergelijkingen zoals deze zijn beschreven door De Zwart (1996). Grofweg zijn er twee typen modellen in de simulator opgenomen; modellen met de beschrijving van de dynamica van de actuatoren en een model met de dynamica van het kasklimaat. De modellen bepalen volledig dynamisch, real-time het kasklimaat en de verwachte gewasgroei op basis van de gewenste buistemperaturen, raamstanden en doekstanden. Tevens wordt rekening gehouden met de begrenzingen zoals de eindgebruiker deze heeft ingesteld in de Intégro procescomputer.

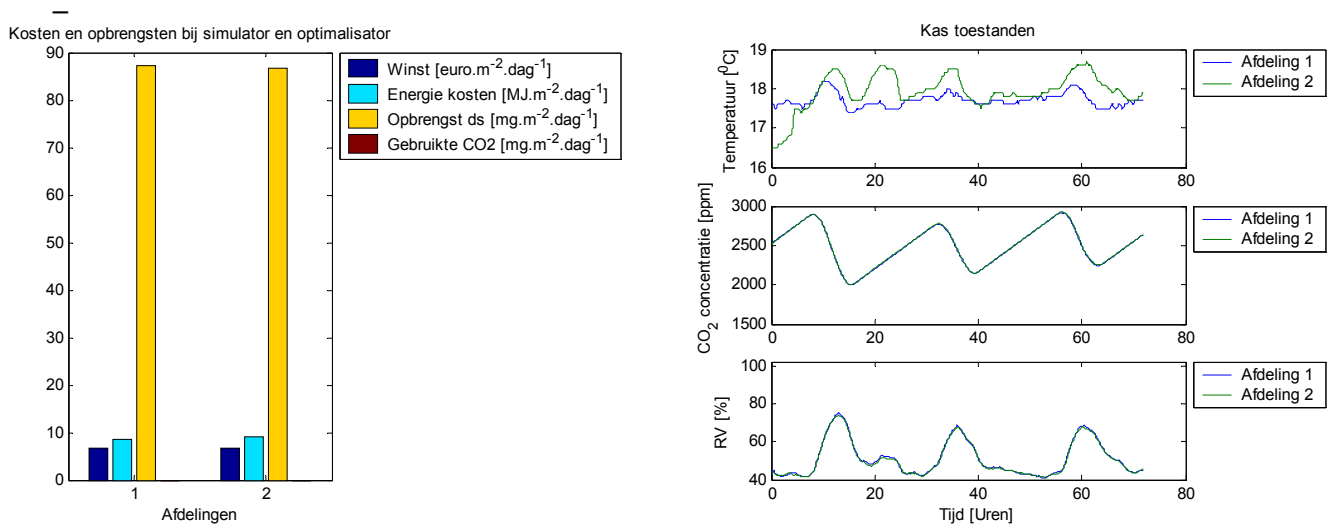
De kas-gewassimulator is opgenomen in de standaard ontwikkelomgeving van de Intégro procescomputer zodat deze ook gebruikt kan worden voor het dynamisch testen van nieuwe dan wel aangepaste commerciële regelingen.

Om de door de projectpartners ontwikkelde optimale klimaatregeling te kunnen testen en beoordelen is deze gekoppeld aan de Intégro procescomputer met daarin opgenomen de ontwikkelde kas-gewassimulator, zie fig. 2.7.1. De koppeling tussen beide componenten heeft een groot aantal functionele taken waaronder het regelen van de timing van de optimale klimaatregeling, het inlezen en verwerken van de klimaatmetingen in de kas en het verwerken van de berekende optimale sturingen tot bruikbare sturingen voor de Intégro procescomputer.

Met het ontwikkelde systeem zijn enkele eerste simulaties uitgevoerd op basis waarvan de ontwikkelde optimale klimaatregeling is beoordeeld. Hiertoe zijn in de Intégro procescomputer twee klimaat afdelingen gedefinieerd; afdeling 1 is aangestuurd door de optimale regeling terwijl afdeling 2 geregeld is door de Intégro procescomputer met gemiddelde instellingen. In de onderstaande figuur zijn enkele simulatieresultaten weergegeven.



Figuur 2.7.2 simulatieresultaten van twee gemiddelde dagen in het voorjaar.



Figuur 2.7.3 simulatieresultaten van twee gemiddelde dagen in de winter.

In de bovenstaande figuren is duidelijk te zien dat de optimale klimaatregeling het meeste voordeel biedt gedurende het voorjaar. In de winterperiode is er vrijwel geen voordeel te behalen doordat de speelruimte voor optimalisatie erg klein is. Verder blijkt dat de meeste winst is behaald door optimaal te ventileren en CO₂ te doseren.

Voor het praktisch toepassen van een dergelijke optimale klimaatregeling zijn de volgende technische en functionele conclusies en aanbevelingen naar voren gekomen:

- De praktische haalbaarheid van nieuwe optimale regelingen is, om zowel commerciële als technische redenen, naast de resultaten ook sterk afhankelijk van de genericiteit van een oplossing. Naarmate een regeling voor meer verschillende typen kassen en gewassen geschikt is, is bijvoorbeeld het afzetgebied voor dit type regeling groter en is installatie en ondersteuning eenvoudiger realiseerbaar.
- Om concurrerend te kunnen zijn in relatie tot de bestaande standaard klimaatregelingen moet een optimale klimaatregeling zeker de mogelijkheid bieden om energiebesparende doeken en temperatuur integratie optimaal te benutten.
- Voor implementatie van een dergelijke optimale regeling in de praktijk moet de dynamica van de stelorganen in de berekeningen binnen de regeling worden meegenomen.
- Naast optimalisatie van kasklimaatregeling is ook optimalisatie van de energieproductie van belang. Het is sterk aan te bevelen om de optimalisatie van energieproductie en klimaatregeling gecombineerd uit te voeren.
- Het kwantificeren van gewasopbrengst binnen de optimalisatie verdient, bij vervolgonderzoeken op dit vlak, zeker extra aandacht. De huidige berekeningen van de gewasopbrengst zijn in feite gebaseerd op sla/tomaat en enigszins vereenvoudigd voor toepassing bij andere gewassen door uit te gaan van de fotosynthese als drijfveer. Echter, bij de prijsvorming van een gewas spelen ook een aantal andere factoren (vorm, kleur, productgewicht, verhouding vrucht - blad) een belangrijke rol, die nu nog niet expliciet zijn meegenomen.

2.7.4 Uitvoering van het project

Binnen het Zonnekas project is intensief samengewerkt met, met name, de projectpartners WU en IMAG. Een aantal activiteiten zijn bij Priva Hortimation B.V. uitgevoerd door stagairs van de studierichting Landbouwtechnische Wetenschappen aan de WU. Deze zijn begeleid door medewerkers van Priva Hortimation B.V. terwijl een gedeelte wetenschappelijke consultancy heeft plaats gevonden door WU en IMAG.

2.7.5 Perspectief

Met de ontwikkelde kas- gewassimulator en koppeling heeft Priva Hortimation B.V. de mogelijkheid gecreëerd om door de onderzoeksinstellingen ontworpen regelstrategieën relatief eenvoudig te beoordelen op haar praktische haalbaarheid. Binnen het EET-project Weer in Control 2 zal van deze faciliteiten gebruik gemaakt gaan worden.

2.7.6 Eindconclusie

- Gedurende de periode waarin het project is uitgevoerd zijn de doelstellingen, zoals geformuleerd in het projectplan, gerealiseerd. De simulatie omgeving is geïmplementeerd, er heeft een eerste beoordeling plaatsgevonden van de binnen het Zonnekas project ontwikkelde optimalisator en bovendien is veel ervaring opgedaan met het regelen op basis van fysische modellen.
- De samenwerking met de projectpartners heeft naar ieders tevredenheid plaats gevonden.

2.7.7 Rapportage en publiciteit

De resultaten zijn in interne, vertrouwelijke rapporten beschreven.

2.7.8 Literatuur

Zwart, H.F. de, 1996, "*Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model*", Proefschrift Landbouwuniversiteit Wageningen, 236 pp.

2.8 Duurzame energiedekking

Het onderzoek heeft uitgewezen hoe het concept van een kas met lage energiebehoefte er uit ziet. De helft van de besparing wordt bereikt door de inzet van zonne-energie, die in de zomer wordt geoogst en dus op het conto komt van de inzet van duurzame energie. De overblijvende aandrijfenergie zou natuurlijk door fossiele energie kunnen worden gedekt, maar voor een kas zonder fossiel energiegebruik moet deze aandrijfenergie ook worden gedekt door duurzame energie.

Daarbij is onderzocht of dit kan door elektrische aandrijving. Bij elektrische aandrijving wordt de aandrijfenergie van de warmtepomp direct geleverd en niet via een gasmotor met restwarmte. Dan zal bij het nog niet bestaande super isolerende dek in plaats van 10 m³ aardgasequivalenten (AGE) aandrijfenergie voor de gasmotor- warmtepomp- combinatie ongeveer 50 kWh per m² elektrische aandrijfenergie nodig zijn. Wel te realiseren is op dit ogenblik een dubbel dek met extra energiescherm. De benodigde energie is dan ongeveer het dubbele.

De eerste elektrische optie is die van fotovoltaïsche (PV) zonnecellen. Een vereiste hiervoor is wel dat het openbare elektriciteitsnet als buffer kan worden gebruikt. Dan kan de jaarrond (maar vooral zomers) opgewekte PV elektriciteit in de perioden met warmtebehoefte (vooral in de winter) worden gebruikt. Voor het super isolerende kasdek is dan ongeveer 6000 m² PV oppervlak nodig per ha kas, bij het dubbele dek met energiescherm het dubbele. Hierbij wordt uitgegaan van de huidige PV cellen met een PV rendement van ca 80 kWh opbrengst per m² per jaar. (overall Beschikbare oppervlakken zoals bedrijfsgebouwen en het regenwaterbassin kunnen gemakkelijk voor PV worden ingericht. Deze beslaan voor de meeste bedrijven ongeveer 0.2 van het areaal en kunnen dus een aandeel leveren in de totale energievoorziening. Ook kan PV op afstand op goedkoop beschikbare oppervlakken worden geïnstalleerd. Een voorwaarde is wel dat de prijs van PV cellen voor economische inzet nog sterk moet dalen, maar de verwachting is algemeen dat dit zal gebeuren. Bij verbetering van het PV rendement zal het benodigde PV oppervlak uiteraard dalen.

De tweede mogelijkheid is elektrische aandrijving uit windenergie. Ook hier zal het openbare elektriciteitsnet als buffer moeten worden gebruikt om de variaties in elektriciteitsaanbod van de windmolen op korte en lange termijn op te vangen. Het aanbod van windenergie loopt echter meer in de pas met de warmtevraag dan het aanbod van PV-energie, omdat hierin het sterke zomer - wintereffect ontbreekt. Voor de eerder gehanteerde energiebehoefte van de super geïsoleerde kas zal dan een windmolen nodig zijn met een nominaal vermogen van ca. 300 kW per ha kas. Voor het dubbele dek met energiescherm is dit weer het dubbele. Dit kan als een redelijk reële optie worden beschouwd. De windmolen kan daarbij ook elders worden geplaatst.

De derde mogelijkheid is dekking met biomassa. Hierbij wordt zonlicht via fotosynthese vastgelegd in biomassa die later weer beschikbaar kan worden gemaakt door directe verbranding al of niet na vergassing van de totale massa of via omzetting in olie, alcohol of waterstof. Daarbij is de fotosynthese efficiëntie cruciaal. Deze efficiëntie is lager dan 1 %. Daarom komt maar ca. 6000 AGE per ha via biomassa beschikbaar (efficiëntie 0.6%). Bij directe verbranding of vergassing zal dan een areaal van 16 ha biomassa per ha kastuinbouw nodig zijn voor het super isolerende kasdek. Ook dit wordt weer verdubbeld voor een dubbel dek met energiescherm. Dit is een optie als dit in gebieden met zeer extensieve landbouw kan worden geteeld en de afstand verwaarloosbare energieverliezen oplevert. Bij omzetting in olie, alcohol of waterstof is het omzettingsrendement laag zodat dan het benodigde oppervlak biomassa verveelvoudigt.

2.9 Conclusies

Om een kas volledig met duurzame energie te bedrijven moet het kassysteem allereerst een lage energiebehoefte hebben. Een lage energiebehoefte kan worden bereikt door een kasdek met hoge isolatiewaarde. Voor de gewasproductie moet dit gepaard gaan met een hoge lichtdoorlatendheid. Hierdoor kan de energiebehoefte ten opzichte van een enkel dek ongeveer worden gehalveerd. Verbeterde kasdekken zijn nu beschikbaar maar om een super isolerend hoog lichtdoorlatend kasdek mogelijk te maken is verder materiaalonderzoek nodig. De klimatisering, vooral de energiezuinige vochtbeheersing, moet aansluiten op het goed isolerende dek. De beste methode is ventilatie met warmteterugwinning. Deze wordt nu verder getest. Er moet ook gebruik worden gemaakt van de tolerantie van het gewas voor variaties in kasklimaat, het gewas buffert dan als het ware energie. Verder moet de klimaatregeling geschikt zijn om het systeem van minuut tot minuut te sturen met optimaal energiemanagement. Op deze aspecten is veel kennis verzameld die binnenkort in proefschriften beschikbaar komt en door het bedrijfsleven

– operationeel wordt gemaakt.

De tweede slag wordt gemaakt door oogst van zonne-energie in de zomer, opslag in een aquifer en gebruik via een warmtepomp in de winter. Hierdoor wordt de energiebehoefte ook weer ongeveer gehalveerd bij een super isolerend dek. Het onderzoek wijst uit dat de overblijvende energiebehoefte bepaald wordt door de aandrijving van de energiecycclus en voor het beste (nu nog niet bestaande) kasdek uitkomt op ca 10 m³ aardgasequivalenten per m² kas. Voor de op dit ogenblik realiseerbare beste optie, een dubbel dek met energiescherm, is dit ongeveer het dubbele.

Voor dekking van de uiteindelijke energiebehoefte door duurzame energie bieden wind- en bio-energie binnen bepaalde randvoorwaarden mogelijkheden. PV zal aanvullend kunnen worden ingezet als de kostprijs hiervan significant zal dalen.

3 Behalen van de doelstellingen op het gebied van economie, ecologie en technologie

3.1 Doelstellingen op het gebied van economie

De Zonnekas was gericht op de ontwikkeling van een kassysteem waarbij de energiebehoefte gedekt wordt met duurzame energie. Bij de isolatie van de kas is gemikt op gelijk blijven van de lichtdoorlatendheid en daarmee op gelijk blijven van de productie. Met de nu ontwikkelde materialen is een dubbel kasdek mogelijk en als hier bovendien een energiescherm in wordt aangebracht is de energiebehoefte ten opzichte van een conventioneel enkel dek zonder scherm met meer dan 60% gedaald. Bij gelijke productie moeten de extra investeringskosten dus uit de energiebesparing worden gefinancierd. De extra investeringen zijn nodig voor het dubbeldek met scherm, de aanleg van de aquifer de warmtepomp en de energiezuinige ontvochtiging. Een dubbel dek van de gewenste hoge kwaliteit folie (PVDF of ETFE) vraagt een meerinvestering van 13 € per m² ten opzichte van enkel glas (5 € per m²). Deze folies zijn nu verkrijgbaar. De benodigde investering voor een scherm bedraagt ca 6 € per m². De warmtepomp met de benodigde capaciteit van ca 15 kW per ha vraagt een investering van ca. 10 € per m² en de benodigde aquifer vraagt 15 € per m². Omdat de warmtebehoefte laag is kan ook met een relatief kleine aquifer- en warmtepompcapaciteit per m² worden volstaan. Daarnaast vraagt een installatie voor energiezuinige ontvochtiging door ventilatie met warmteterugwinning een investering van ca 5 € per m². De geschatte totaalinvestering is dus ca. 50 € per m². Er kan met een relatief kleine verwarmingsketel worden volstaan zodat dit ten opzichte van de oude situatie nog een besparing van enkele € per m² oplevert.

Een eerste stap in de schatting van de energiekosten is energievoorziening met aardgas. Gedurende de looptijd van het project is de vaststelling van de energiekosten ingrijpend gewijzigd door de invoering van het z.g. CDS systeem. Zodoende telt in zowel de conventionele als de energiezuinige situatie niet alleen het energiegebruik maar ook de aansluitwaarde. Met het LEI rekenmodule CDS kan worden uitgerekend dat bij een verbruik van 53 m³ per m² per jaar en een daarbij benodigde aansluitwaarde van 250 m³ per uur de energiekosten 9.60 € per m² per jaar zullen bedragen. Bij een verbruik van 20 m³ per m² per jaar en een aansluitwaarde van 100 m³ per uur zullen de energiekosten naar 3,50 € per m² per jaar dalen. Zodoende moet de extra investering gefinancierd worden met de besparing van ca 6 € per m² per jaar zodat bij een (groene) rente van 5% de terugverdientijd ca 10 jaar is. Dit is voor een ondernemer nog niet echt interessant hoewel het in de buurt komt. Subsidiereregelingen (MIA, EIA, VAMIL) maken een economisch haalbare realisatie wel mogelijk. Bij stijgende energieprijzen zal de terugverdientijd dalen.

3.2 Doelstellingen op het gebied van ecologie

De daling van de energiebehoefte die nu mogelijk is met het ontwikkelde Zonnekas concept is meer dan 60%. Deze energiebehoefte kan gedekt worden door duurzame energie als de geleverde duurzame energie qua kosten vergelijkbaar is met of lager dan de onder 3.1 genoemde energiekosten. Bij inzet van aardgas is de vermindering in de CO₂ emissie gemiddeld ca 0.5 kton per ha per jaar. Bij een areaal van 10.000 ha is dus een reductie van

5.000 kton per jaar mogelijk.

Het systeemontwerp is er op gericht dat er een lage ziekte- en plaagdruk is in de kas. In huidige conventionele kassen is de afgelopen jaren een behoorlijke reductie in het gebruik van chemische gewasbeschermingsmiddelen bereikt. De verwachting is dat dit in de Zonnekas vergelijkbaar zal zijn omdat het optreden van calamiteiten en insleep van buiten nooit zijn te voorkomen. Verder is in huidige kassen de nutriënten- en watervoorziening als gesloten systeem uitgevoerd waarbij emissie van nutriënten naar de omgeving wordt voorkomen. Verder wordt hiernaar in het EET project Hydrion-line onderzoek verricht. Dit systeem is in de Zonnekas geïmplementeerd.

De milieudruk door de geproduceerde folies is laag. Door de moderne uitvoering van de productiefaciliteiten treedt hierbij geen onacceptabele emissie op naar lucht, bodem of water.

3.3 Doelstellingen op het gebied van technologie

Voor wat betreft de kasdekfolie is de doelstelling gerealiseerd van een dubbellaags uitvoering met de lichttransmissie van enkel glas. In het gebouwontwerp zijn ventilatie, homogeen kasklimaat, klimatisering en vochthuishouding geïntegreerd. Het voldoet aan de normen voor de kassenbouw zodat het verzekerd is. De capaciteit van een aquifer is ruim voldoende voor de benodigde seizoenswarmteopslag en de capaciteit van de warmtepomp is hierop aangepast. De tolerantie van het gewas voor klimaatvariëaties kon voor een redelijk gedeelte dag-nacht klimaatvariëaties opvangen zodat de inzet van het gewas als virtuele korte termijn warmtebuffer een succes is. De optimale model-based regelalgoritmen zijn zeer goed in staat het complexe systeem te besturen. Deze zullen snel in de praktijk kunnen worden geïmplementeerd door de ontwikkeling van een kassimulator waarop de algoritmen onder praktijkcondities snel zonder risico voor de bedrijfsvoering kunnen worden getest.

Het uitgevoerde onderzoek heeft in nauwe wisselwerking gestaan met parallel onderzoek waarin energiebesparing centraal stond zoals naar nieuwe of verbeterde kasdekmaterialen, naar andere manieren van warmteonttrekking, energieopslag of klimaatregeling. Veelal kon gebruik gemaakt worden van dezelfde infrastructuur, zoals ontwikkelde modellen voor lichttransmissie of kasklimaat of meetapparatuur.

In de loop van het project stonden ontwikkelingen binnen de sector Kastuinbouw niet stil. Parallel aan het onderzoek naar het concept Zonnekas als zeer energievriendelijk kassysteem zijn door andere partijen de concepten Gesloten Kas en Kas als Energieleverancier ontwikkeld. De Gesloten Kas mikt een productieverhoging van ca 20% door het gesloten houden van de kas ook bij hoge instraling en op energiebesparing door seizoenswarmteopslag en gebruik van een warmtepomp. In de kas is in voldoende koelvermogen door koud aquiferwater voorzien om piek instralingen op te kunnen vangen. Omdat genoeg zomerwarmte wordt geogst is het kasdek conventioneel (zonder luchtramen) uitgevoerd. De capaciteiten van aquifer en warmtepomp zijn daarom veel groter dan die van de Zonnekas. De Gesloten Kas zal in 2004 in de praktijk worden opgeleverd. Bij de Kas als Energieleverancier wordt gemikt op een kas met isolerend tweelaagsdek en een efficiënte warmtewisselaar die in de zomer bij hoge kastemperaturen water kan opwarmen tot een temperatuur van ca. 27 °C, dit water wordt in de aquifer opgeslagen en is door de efficiënte warmtewisselaar geschikt om bij warmtevraag de kas te verwarmen. Bovendien kan het overschot aan opgeslagen warmte bij het gegeven temperatuurniveau aan derden worden geleverd. De efficiënte warmtewisselaar maakt een warmtepomp overbodig en er is alleen enige energie nodig voor het verpompen van het koel-

– verwarmingswater en het aandrijven van de ventilator van de warmtewisselaar. De investeringskosten van de warmtewisselaar zijn echter nog onbekend.

Naast deze concepten is ook een ontwikkeling op gang gekomen waarbij glasgroentengewassen in de winter worden bijbelicht met hoge lichtintensiteit. Daarbij is zoveel restwarmte van de elektriciteitsproductie beschikbaar dat het isoleren van de kas geen zin heeft. Geclaimd wordt dat het energiegebruik per eenheid product minimaal gelijk blijft en zelfs kan dalen.

Het is waarschijnlijk dat vanwege de grote diversiteit in de kastuinbouw de verschillende ontwikkelingen parallel zullen verlopen. Zodoende zal de ontwikkeling van energiezuinige kassystemen en energievoorziening door duurzame energie prioriteit houden. In dat kader heeft LTO Nederland onlangs als doel gesteld de een geheel duurzame energievoorziening voor de kastuinbouw in 2020 te realiseren.

4 Gerezen problemen

De gerezen problemen en hun oplossing zijn reeds in de rapportages van de deelprojecten (Hoofdstuk 2) opgenomen.

5 Octrooiaanvragen

Zoals in de rapportage van deelproject 1c is verwoord, is voor de convectorput octrooi aangevraagd

6 Commerciële vooruitzichten

Het Zonnekas project heeft de concepten ontwikkeld voor een kassysteem met lage energiebehoefte, met seizoensenergieopslag in een aquifer en gebruik van een warmtepomp. De lage energiebehoefte is gerealiseerd door hoge isolatiewaarde met verbeterde kasdekmaterialen, energiezuinige ontvochtiging, benutting van de tolerantie van het gewas voor kasklimaatvariaties en optimale model-based regeling van kasklimaat en energievoorziening.

Energieopslag in een aquifer wordt nu al meer en meer in de kastuinbouw toegepast. Ook de inzet van warmtepompen zal toenemen. Model-based control en optimale regeling worden in praktische kasregelsystemen geïmplementeerd. Dit zal stap voor stap gebeuren omdat praktische regelsystemen gecompliceerd zijn en niet zonder risico in een keer totaal kunnen worden veranderd. Toepassing van isolerende kasdekken geniet meer en meer belangstelling. In de Nederlandse glastuinbouw is glas algemeen toegepast als kasdek materiaal. Parallel aan het Zonnekas project zijn in andere projecten met succes voor glas en harde kunststoffen verbeteringen onderzocht. Voor glas is een zowel een microstructuur als een meerlaags anti-reflectie coating veelbelovend en verwacht wordt dat deze zullen binnen afzienbare tijd op de markt worden geïntroduceerd. De toepassing van hoogwaardige kunststoffolies is prijstechnisch interessant maar vraagt meer inspanning bij marktintroductie.

De conclusie is dat veel delen van de projectresultaten al in de markt zijn geïntroduceerd en dat andere delen in ontwikkelingen elders zijn opgenomen.

-

7 Samenwerking partners

De samenwerking tussen de partners is goed verlopen en heeft ook geleid tot de samenwerking in andere projecten (oa EET Hydrionline, EET Weather in Control, EU SMT Kasmaterialen)

8 Publicaties

De publicaties zijn al bij de deelprojecten vermeld en worden hieronder in een totaalijst weergegeven:

- Bontsema, J.; Gelder, A. de; Henten, E.J. van; Janssen, H.J.J.; Lamaker, A.J.J.; Meurs, W.T.M. van; Nijenhuis, P.; Straten, G. van ; Swinkels, G.L.A.M.; Willigenburg, L.G. van, 2002. *Optimaal energie efficiënt - Model based - besturingssysteem voor kasklimaat*. IMAG nota V2002-37, 75 p
- Bot, G.P.A., 2000, *Imagineering for sustainable greenhouse production*. Proc. CIGR World congress 2000, Tsukuba, Japan, Invited lecture. CD ROM
- Bot, G.P.A., 2001, *Developments in indoor sustainable plant production with emphasis on energy saving*. Computers and Electronics in Agriculture (30), p 151-165
- Bot, G.P.A., 2001. *Energy efficiency and ventilation*. Invited lecture Int workshop on Greenhouse design and Crop Engineering. Vieste, Italy, 13-15 Sept 2001
- Bot, G.P.A., 2001. *The solar greenhouse, technology for low energy consumption*. Int congress NTV 2001, Acta Hort. 611, p 61-71
- Bot, G.P.A., Braak, N.J. van de , 2001. *Zonne-energie en biomassa voor kassen*. IMAG nota P2001-66, 15pp
- Bot, G.P.A., 2002. *Engineering for sustainable greenhouse production*. NJF Seminar no. 340, Greenhouse Production – Biological and Technical; Aspects. Asker, Norway, Febr 14-15-2002.
- Bot, G.P.A., 2002, *The solar greenhouse, technology for low energy consumption*. XXVIth Intern. Hort. Congress, Toronto, Aug 11-17, 2002. to be publ in Acta Hort.
- Bot, G.P.A., 2003. *Zonnekas wil stoken zonder aardgas*. Vakbl Groenten en Fruit, 24, pp 26-27
- Bot, G.P.A., 2003. *De Zonnekas: een kas zonder aardgas, kan dat?*. Vakbl Bloemisterij, 24, pp 40-41
- Breuer, J.J.G., H.F. de Zwart & G.P.A. Bot. 1999 - *Aspecten warmtepompen*. IMAG Nota 99 - 130, 37 pp.
- Braak, N.J. van de, J.B. Campen & J.C. Bakker. 1998 - *Zonnekas, Deelproject 1c Klimaatbeheersing*. Tussenrapportage: 9-7-98, 20 pp.
- Bruin, J. de. 2001 - *Warmteterugwinning uit ventilatielucht van kassen*. Wageningen, IMAG-nota V 2001-32, 60 p
- Bruin, J. de, 2001, *Parameter estimation for a greenhouse climate model*, M.Sc. thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 78 pp.
- Campen, J.B. en J.C. Bakker. 1998 - *Ontvochtigingssysteem in kas kan energie besparen*. Groenten en Fruit/Glasgroenten, 1998(44), p.32-22.
- Campen, J.B. en J.C. Bakker. 1998 - *Warmte terugwinnen uit ventilatie in nieuw type kas*. Groenten en Fruit/Glasgroenten, 1998 (44), p.13.

- Campen, J.B. 1999 - *Met ontvochtiger blijft warmte binnen*. Groenten en Fruit, 9 april, p. 17.
- Campen, J.B., N.J. van de Braak, G.P.A. Bot & H.F. de Zwart. 2000 - *Ontvochtigen via ventilatie of condensatie?* Vakblad voor de Bloemisterij 55 (32), p. 36-37.
- Campen, J.B., Bot, G.P.A., 2000, *New dehumidifying system for greenhouses*. Acta Hort.534, p 255-262
- Campen, J.C., G.P.A. Bot, 2001, *Design of a low-energy dehumidifying system for greenhouses*. J.agric. Engng. Res 78 p 65-73
- Campen, J.C., Bot, G.P.A., 2001. *Dehumidification in greenhouses by condensation on finned pipes*. Biosystems Engineering 82(2), p177-185
- Campen, J.B.; Zwart, H.F. de, Bot, G.P.A., 2003. *Dehumidification of Greenhouses at Northern Latitudes*. Biosystems Engineering, 86(4) pp 487-493
- Campen, J.C., Bot, G.P.A., 2003. *Determination of greenhouse-specific aspects of ventilation using three-dimensional Computational Fluid Dynamics*. Biosystems Engineering 84(1), p 69-77
- Campen, J.B., Swinkels, G.L.A.M., Braak, N.J. van de; Sonneveld, P.J., Bot, G.P.A., 2003. *Vocht afvoeren uit tuinbouwkassen met warmteterugwinning* IMAG nota P2003-35, 39 p
- Campen, J.C., 2004. *Energy friendly dehumidification and spatial climate distribution in the Solar Greenhouse*. PhD Thesis Wageningen University (in preparation)
- Chalabi, Z.S., Henten, E.J. van, 2002. *Optimal feedback control of nonlinear dynamic systems*. IMAG nota V2002-58, 38 p.
- Climent, J.M. 1999 - *Long term energy storage for greenhouses; greenhouse energy saving with a long term energy cycle*. Landbouwniversiteit Wageningen, Thesis, Applied physics; A550-713, 79 pp.
- Doremaele, R.G.M.E. van, 1998. *Foliebevestigingssytemen, onderzoek naar bevestigingsmogelijkheden van folie*. MSc thesis Wageningen Universiteit
- Hemming, S., D Waaijenberg en J.B. Campen, 2002, *EET-Zonnekas: Crop production system with sustainable energy, Part 1b: Greenhouse construction, light transmittance and insulation*. IMAG-Nota, no. P 2002-19, 65 p.
- Hemming, S en D. Waaijenberg, 2001, *Herausforderung für moderne Folien*, Gärtnerbörse – Das Magazin für Zierpflanzenbau, 101. Jahrgang, no. 19, 13-10-2001, p. 43-45
- Henten, E.J., 2003. *Sensitivity analysis of an optimal control problem in greenhouse climate management*. Biosystems Engineering, 85 (3), pp 355-364
- Hoffmann, S., 2000, *UV-straling in de kas: mogelijkheden en grenzen*, Vakblad voor de Bloemisterij, 55 (25), P. 44-46.
- Hoffmann, S, 2001, *Ultraviolet radiation in the greenhouse*, FloraCulture International, 11 (5), p. 18-27.
- Hoffmann, S. en D. Waaijenberg, 2001, *Das optimale Gewächshausklima – eine Herausforderung für moderne Gewächshausfolien*, paper bij GKL-Frühjahrstagung 'Kunststoffe im Gewächshausbau und in der Gewächshausnutzung', Erfurt (D), 25 en 26 april 2001, gepresenteerd door S. Hoffmann.
- Huijs, J.P.G. en J.J.G. Breuer. 1998 – *Zonnekas. Deelproject 2a energievoorziening*. Wageningen, IMAG-DLO Nota V98-87, 23 pp.
- Huijs, J.P.G., J.J.G. Breuer & N.J. van de Braak. 1999 - *Zonnekas. Rapportage 1999 'Energievoorziening'*. Wageningen, IMAG-nota 99-117, 22 pp.
- Huseby, C., S. Hoffmann, J.B. Campen en D. Waaijenberg, D., 2001, *The design of an Advanced Sustainable Crop Production System – An interaction of construction, climate and light condition*, IMAG Nota P 2001-69, 58 p.

- Kempkes, F.L.K., N.J. van de Braak & J.P.G. Huijs. 2000 - *Afstemming energiestromen Zonnekas. Wageningen*, IMAG-nota V 2000-80, 17 pp.
- Kempkes, F.L.K.; Stanghellini, C., 2002. *Energiebesparing door vochtintegreerende regeling*. IMAG nota P2002-73, 51 p
- Knies, P., N.J. van de Braak, F.L.K. Kempkes, H.F. de Zwart & G.P.A. Bot. 2000 - *Optimalisatie componenten energievoorziening Zonnekas*. Wageningen, IMAG-nota V 2000-76, 19 pp.
- Knies, P., N.J. van de Braak, F.L.K. Kempkes, H.F. de Zwart & G.P.A. Bot. 2001 - *Effecten van temperatuurintegratie op energiegebruik. Deelproject 1C*, Wageningen, IMAG-nota V 2001-33, 17 p.
- Körner, O., H. Challa & F. Buwalda. 2000 - *Temperature control for tomato and chrysanthemum in a solar energy greenhouse / Humidity control in a solar energy greenhouse / Greenhouse crop dry matter accumulation model in MatLab*. Tussenrapportage deel 2B, 21 pp. / 11 pp. / 7 pp.
- Körner, O., H. Challa, R.J.C. van Ooteghem, 2002, *Modelling temperature effects on crop photosynthesis at high radiation in a solar greenhouse*, Acta Horticulturae, vol. 593, p. 137-144
- Körner, O. en R.J.C. van Ooteghem, 2003, *Simulating crop gross photosynthesis at high temperatures*, In: Crop based climate regimes for energy saving in greenhouse cultivation, Ph.D. thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, p. 75-90
- Körner, O., 2003. *Crop based climate regimes for energy saving in greenhouse cultivation*. PhD these Wageningen University, 240 p. ISBN 90-5808-861-8
- Oost, C.R., *Adaptive modelling of greenhouse climate*, M.Sc. thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 133 pp.
- Ooteghem, R.J.C. van, 2001, *Greenhouse and photosynthesis models; An evaluation of the existing model* by W.Th.M. van Meurs, E.J. van Henten, L. Heesen and L.G. van Willigenburg, interne notitie
- Ooteghem^A, R.J.C. van, 2003, *The solar greenhouse model; Extension of the greenhouse model with crop model*, interne notitie
- Ooteghem^B, R.J.C. van, 2003, *Eindverslag Deelproject 3a Zonnekas*. Interne notitie
- Ooteghem^C, R.J.C. van, J.D. Stigter, L.G. van Willigenburg en G. van Straten, 2003, *Optimal control of a solar greenhouse*, In: 22nd Benelux Meeting on Systems and Control, Lommel, Belgium, March 19-21 2003, p. 41
- Ooteghem^D, R.J.C. van, J.D. Stigter, L.G. van Willigenburg en G. van Straten, 2003, *Optimal control of a solar greenhouse*, In: European Control Conference, Cambridge, United Kingdom, September 1-4 2003
- Wouters, H., 2003, *Koppeling van een externe optimalisator aan de Priva kas-gewas simulator*, M.Sc. internship report, Priva Horticulture, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 59 pp.
- Ooteghem, R.J.C. van, 2004, *Optimal control of the Solar greenhouse* (preliminary title). PhD thesis Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, in preparation
- Saye, A., van Loon, W.K.P., Bot, G.P.A. and de Zwart, H.F., 2000. *The solar greenhouse: a survey of energy saving methods*. Acta Hort. 534, p 131-138
- Swinkels, G.J., 1999. *MatLight, een model voor de berekening van de lichttransmissie van alternatieve kasdekken en kasdekmaterialen*. IMAG Nota 99-119, 34p
- Verlody, I. & D. Waaijenberg. 1999 - *Folie om de kas doet niet meer onder voor glas*. De Boomkwekerij 43 (1999), p. 13-15.
- Verlody, I. & D. Waaijenberg. 1999 - *Folie om de kas doet niet meer onder voor glas*. Vakblad voor de Bloemisterij, no 47, 26 november 1999, p. 42-43.

-
- Verloot, I. en D. Waaijenberg, 1999, *Folie om de kas doet niet meer onder voor glas*, De Boomkwekerij, no. 43, 29-10-1999, p. 13 – 15.
- Waaijenberg, D. & I. Verloot. 1999 - *Polyethleen folie als kasomhullingsmateriaal*. Groenten en Fruit, Glasgroenten 12 november 1999, p. 18-19.
- Waaijenberg, D., 2000, *Natuurlijke ventilatiemogelijkheden in kassen*, IMAG Nota no. P 2000-42, 44 p.
- Waaijenberg, D en S. Hoffmann, 2000, *Constructievormen en omhullingsmaterialen voor tuinbouwkassen – inventarisatie en nieuwe mogelijkheden*, IMAG rapport no. 2000-09, 70 p.
- Waaijenberg, D en I. Verloot, 2000, *Additives make greenhouse films universally effective*, FlowerTech, 2000, vol.3, no. 7, p. 8-11
- Waaijenberg, D en S. Hoffmann, 2001, *persberichten* n.a.v. verschijnen van IMAG-rapport 2000-09 in Cobouw (d.d. 17-3-2001: blad + Internet: Sierteeltkassen in de toekomst van kunststof); Vakblad voor de Bloemisterij, no. 12, 23-3-2001 (IMAG onderzoekt energiekas van de toekomst); Groenten en Fruit, Glasgroenten, 30-3-2001 (Folie frustreert radicale verbetering milieubelasting); Oogst, tuinbouw, 23-3-2001 (IMAG onderzoekt vijf nieuwe kasontwerpen), WB, 29-3-2001 (interview: Kas van folie en luchtmatrassen) en in Agrarisch Dagblad, 16-3-2001 (Onderzoekers IMAG: kas in toekomst milieuvriendelijker
- Waaijenberg, D, 2001, *Entwicklungen im niederländischen Gewächshausbau*, lezing bij KTBL-Arbeitstagung 'Technik im Gartenbau', Bad Waldsee (D), 24 september 2001
- Zwart, H.F. de. 1999 - *Warmteopslag en ontvochtiging met een warmtepomp in kassen*. In: Duurzame energie: met het oog op morgen. Conferentieboek Nederlandse Duurzame Energie Conferentie, 25 & 26 november 1999 te Noordwijkerhout, p. 330-331.