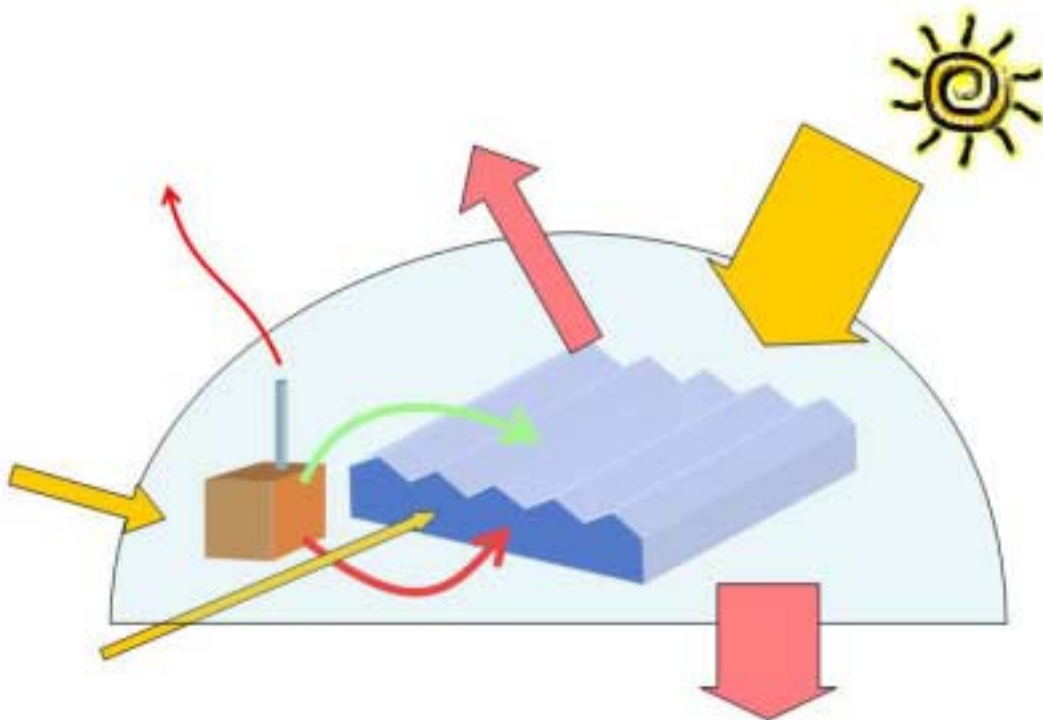


Energieprestatie en teeltkundige ervaringen in de Energieproducerende kas

Eindrapport van een 2 jaar durend praktijkexperiment

H.F. de Zwart, F. van Noort & J.C. Bakker





Energieprestatie en teeltkundige ervaringen in de energieproducerende kas

Eindrapport van een 2 jaar durend praktijkexperiment

H.F. de Zwart, F. van Noort & J.C. Bakker

© 2008 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

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

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Bornsesteeg 65, 6708 PD Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 47 70 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	pagina
Voorwoord	1
Inleiding	3
1 Netto energieproductie door een Energieproducerende kas	5
2 De technische installatie van de Energieproducerende kas van Hydro Huisman	9
Inleiding	9
2.1 De kasruimte	9
2.2 Verwarming en koeling	10
Verwarming	10
Koeling	11
2.3 Ontvochtiging	12
2.4 Warmte en koudeopslag in de aquifer	12
2.5 De virtuele WKK-installatie	14
2.6 Kasklimaatregeling	16
3 Het ZigZag Kasdek materiaal	17
3.1 Teeltermingen met het ZigZag kasdek	18
4 De FiWiHEX warmtewisselaar	21
Inleiding	21
4.1 Ontwikkeling van de uitvoeringsvorm van de FiWiHEX	21
4.2 Prestatie van de FiWiHEX warmtewisselaar	23
4.2.1 Koeling in de Energieproducerende Kas	25
4.2.2 Verwarming in de Energieproducerende Kas	26
4.2.3 Ontvochtigen met warmterugwinning	27
4.2.4 Ervaringen met de duurproef aan de FiWiHEX warmtewisselaar die op direct aquiferwater is aangesloten.	29
5 Homogeniteit van de kasluchttemperatuur	31
6 Energieverzameling, opslag en gebruik	37
6.1 Warmteopslag	37
6.2 Opslag in de aquifer	39
6.3 Energiegebruik en -levering bij Hydro Huisman	42
6.4 Relatie tussen kasklimaat en energieproductie	46
6.5 Conclusies	47
7 Kasklimaat en gewasproductie	49
7.1 Gewasgroei	52
7.2 Conclusie	56
8 De Energieproducerende Kas in een economisch perspectief	57

9	Samenvatting en Conclusies	61
9.1	Samenvatting	61
9.2	Conclusies	64
10	Nabeschouwing en aanbevelingen	69
10.1	De Energieproducerende Kas als Energieproducent	69
10.2	Aanbevelingen	71
11	Literatuur	73
Bijlage I. Groeicijfers opplanting 1 – 5		5 pp.
Bijlage II. Kwaliteitsbeoordeling opplanting 2 – 5		3 pp.
Bijlage III. Integraal verslag tussenrapportage		36 pp.

Voorwoord

Toen in 2001 de energieproducerende kas voor het eerst genoemd werd kon de sector niet vermoeden welke enorme potentie daarin schuil ging. De potentie om zonlicht als bron van duurzame energie warmte effectief te benutten is door de politieke aandacht voor de klimaatcrisis nog veel belangrijker geworden. Het streven van de glastuinbouw De noodzaak om op termijn zonder aanvullende inzet van fossiele energie jaarrond te kunnen telen is door de olieprijsontwikkeling van fossiele brandstoffen in 2008 nog eens heel duidelijk geworden. De voordelen op klimaatgebied zijn evident. De potentie om in een ander en nog beter geconditioneerd kasklimaat een betere kwaliteit en hogere fysieke opbrengst te realiseren is een extra mogelijkheid om meerkosten terug te kunnen verdienen.

Het praktijkexperiment Energieproducerende Kas heeft resultaat opgeleverd voor zowel de energetische mogelijkheden als de productiemogelijkheden van dit nieuwe systeem van klimaatbeheersing en energieproductie. In de praktijk zie ik al volop spin off van dit praktijkexperiment. Ook is de metafoor “Kas als Energiebron” mede door dit project echt gaan leven bij politiek en maatschappij.

Het onderzoek van Wageningen UR is waardevol omdat het tuinders op weg helpt om in deze richting te investeren en ook omdat het knelpunten en verdere onderzoeksvragen aandraagt. Het project is een mooi voorbeeld van effectieve samenwerking tussen overheid (LNV) en bedrijfsleven (LTO Glaskracht Nederland en het Productschap Tuinbouw) op het gebied van innovatie en onderzoek.

De Stuurgroep Kas als Energiebron dankt de financiers en tevens de onderzoekers van Wageningen UR en gastheer van het project Stef Huisman voor dit stukje baanbrekend werk. Ook de leden van Stuurgroep Kas als Energiebron, welke aan de basis stonden van dit project, hebben met hun input en begeleiding een belangrijke bijdrage geleverd aan dit onderzoek. De resultaten zijn een impuls voor de sector om op dit spoor krachtig door te gaan naar een klimaatneutrale glastuinbouw.

Nico van Ruiten

Voorzitter Stuurgroep Kas als Energiebron

Inleiding

De huidige intensieve glastuinbouw is in hoge mate afhankelijk van de inzet van fossiele energie. In directe zin is dit in de vorm van aardgas en in indirecte zin in de vorm van het gebruik van elektriciteit, wat voor het overgrote deel uit aardgas en steenkool wordt geproduceerd. Met uitzondering van de meest energie-intensieve tuinbouwbedrijven is de hoeveelheid energie die hiermee per m² kas wordt toegediend echter nog altijd veel minder dan de hoeveelheid zonne-energie die per m² kas wordt ingevangen.

In de gangbare tuinbouw gaat vrijwel alle energie die vanuit het zonlicht en de andere energiebronnen aan de kas wordt toegevoerd in de vorm van warmte- en waterdamp verloren (slechts 2 tot 5% van de totale hoeveelheid toegevoerde energie wordt als chemisch vastgelegde biomassa verhandeld). Het overgrote deel van dit energieverlies treedt in de zomer op wanneer de ramen worden geopend om te voorkomen dat de kaslucht teveel in temperatuur oploopt. In een aantal teelten (met name potplanten) wordt de zonne-energie in de zomer zelfs al voordat het in warmte wordt omgezet uit de kas weggehouden door de reflectie van de kas met behulp van krijt of schermen te verhogen. Een kleiner deel van het warmteverlies komt voort uit de beperkte warmte-isolatie van de kas-omhulling. Ook gaat er warmte verloren bij het afvoeren van vocht (noodzakelijk om luchtvochtigheid niet te ver te laten oplopen). Ook hiervoor worden de ramen namelijk regelmatig geopend.

Door niet de ramen open te zetten maar de overvloedige warmte in de vorm van opgewarmd water op te slaan in een ondergronds energieopslagsysteem kan het warmteverlies van het kassysteem worden beperkt. Er kan zelfs zoveel warmte worden verzameld dat er sprake is van een overschot. Wanneer dit overschot groot is en door derden kan worden gebruikt kan de kas worden getransformeerd tot een netto energieproducerende kas.

Om het principe van de netto Energieproducerende kas te beproeven is in 2004 besloten tot de bouw van een experimentele faciliteit rond dit concept. Door financiering vanuit het Productschap Tuinbouw en het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en de bijdragen van de Provincie Gelderland, het ministerie van Economische zaken, het ministerie van Vlokshuisvesting Ruimtelijke ordening en Milieubeheer en de Rabobank konden de investeringen die hiervoor nodig waren gefinancierd worden. Er kon een kas van 2700 m² worden ingericht die een onderdeel vormde van de nieuwbouw bij Hydro Huisman, een innovatieve tropische potplantenteler. Het bedrijf werd gebouwd in het nieuwe tuinbouwgebied "Bergerden" in de regio Huissen/Bemmel. Behalve de extra kosten voor de installatie hebben het Productschap en het Ministerie tevens het onderzoek dat Wageningen UR in de Energieproducerende kas heeft uitgevoerd gefinancierd.

Vanaf de zomer van 2006 is deze experimentele faciliteit in bedrijf gesteld zodat er inmiddels ruim 2 jaar ervaring met het concept is opgedaan. Eind 2007 is een tussenrapportage over de experimenten opgesteld. In deze tussenrapportage is veel aandacht besteed aan de wijzigingen van uitvoering en bedrijfsvoering die hebben plaatsgevonden tussen het moment waarop de beslissing voor de bouw werd genomen en het najaar van 2007. Ook konden in de tussenrapportage de resultaten met de praktisch realiseerbare componenten worden getoond. De wijzigingen in de gebruikswijze en de beperkingen van de outillage leidden tot de conclusie dat het concept zoals dat is gerealiseerd naar verwachting nèt een netto energie productie zou laten zien. De tussenrapportage is, met uitzondering van grotendeels overlappende teksten, integraal als bijlage aan dit rapport toegevoegd.

Het eindrapport dat nu voor ligt presenteert de resultaten over de inmiddels langer geworden periode maar gaat daarnaast ook in op het perspectief van Energieproducerende kassen in het algemeen. Ter ondersteuning van de begripsvorming rond deze materie gaat hoofdstuk 1 nader in op de fysische grondslag van de Energieproducerende kas. De Energieproducerende kas is immers in tegenspraak met de 1e hoofdwet van de thermodynamica (in een afgesloten systeem is de totale energie-inhoud constant). Het blijkt dat de begrippen Energieproducerende kas of netto energieproducerende kas gebaseerd zijn op een berekening waarbij de instraling van de zon niet als energie-input wordt gerekend.

Bij de formulering van het project Kas Als energiebron is beoogd een kassysteem te ontwikkelen waarmee het netto energie-overschot, volgens de in hoofdstuk 1 beschreven definitie gemaximaliseerd kon worden. Dit betekent dat er

is gestreefd naar een kas die zoveel mogelijk licht doorlaat, zo weinig mogelijk warmte verliest en met een zo laag mogelijk elektriciteitsverbruik het benodigde kasklimaat kan realiseren. De sleuteltechnologieën die hierbij zijn gebruikt zijn de toepassing van het innovatieve ZigZag kasdek en het gebruik van de FiWiHex warmtewisselaar. Om voor de verwarming en voor de energie-onttrekking uit de kas over voldoende temperatuurverschil te kunnen beschikken is in het experiment ook een warmtepomp opgenomen. Zo'n warmtepomp en de pompen en ventilatoren van de warmtewisselaars gebruiken elektriciteit en omdat deze elektriciteit voordelig kan worden geproduceerd met een WKK-installatie vormt deze een nadrukkelijk onderdeel van het concept. De schaalgrootte van het experiment was echter zodanig dat er geen fysieke WK-unit kon worden opgenomen. De werking daarvan is daarom achteraf met behulp van een simulatiemodel toegevoegd. Hoofdstuk 2 geeft een gedetailleerde beschrijving van de totale installatie die in het experiment is gebruikt en de modelmatige toevoeging van de WK-unit.

Het hoog-innovatieve karakter van het kasdek materiaal is voldoende reden om in hoofdstuk 3 op de hoofdpunten van deze component in te gaan. Voor een meer uitgebreide beschrijving van de ervaringen met dit kasbedekkingsmateriaal wordt verwezen naar de eerder genoemde tussenrapportage.

Een soortgelijke bijzondere interesse gaat uit naar de FiWiHex warmtewisselaar die tijdens de looptijd van het project is ontwikkeld van prototype tot marktrijp product. Het grote belang van een efficiënte warmtewisselaar tegen de achtergrond van een energieproducerende kas is de beperking van het elektriciteitsverbruik dat met de klimatisering gemoeid is. Elektriciteit is een relatief waardevolle energievorm wat tot spaarzaam gebruik noopt. Hoofdstuk 4 presenteert de ontwikkeling van de FiWiHex warmtewisselaar en de eigenschappen die er op dit moment aan toegekend kunnen worden.

Behalve het elektriciteitsverbruik en de opwarming en afkoeling van het water is ook de homogeniteit in kasluchttemperatuur die de FiWiHex warmtewisselaars weten te realiseren een belangrijk kwaliteitskenmerk. Om dit te bepalen is gedurende een periode van een maand de horizontale temperatuurverdeling in een dicht meetnetwerk gevolgd. De resultaten hiervan worden in hoofdstuk 5 getoond.

Alle technologie die in de hoofdstukken 2 t/m 5 wordt besproken heeft naast het realiseren van een groeizaam kasklimaat tot doel de overtollige zonne-energie die in de kas tot onacceptabel hoge kasluchttemperaturen zou leiden te verzamelen en in een seizoensopslagsysteem te bufferen. Vanuit deze buffer kan dan in de daaropvolgende winter (een deel van) de eigen warmtevraag worden ingevuld en kan een deel van de warmtevraag van een derde partij worden ingevuld. Hoofdstuk 6 gaat uitgebreid op de prestaties van de Energieproducerende Kas op dit punt.

Hoofdstuk 2 t/m 6 geven uitgebreide analyses en perspectieven op technisch gebied, maar voor tuinders is de kasuitrusting primair bedoeld om een bepaald product in de gewenste kwaliteit voort te brengen. Van (semi) gesloten kassen, zoals de Energieproducerende Kas, wordt verwacht dat de verbeterde grip op temperatuur, luchtvochtigheid en CO₂-concentratie de productie en de kwaliteit op een hoger plan kunnen brengen.

Hoofdstuk 7 geeft daarom de bevindingen van de gewasgroei-monitoring gedurende twee zomerperiodes (2007 en 2008). Er zijn ook waarnemingen in winterperiodes gedaan, maar omdat het kasklimaat in de Energieproducerende Kas in de winter nagenoeg gelijk is ten opzichte van de referentie worden die periodes slechts summier besproken.

Nadat in de eerste hoofdstukken op alle deel-aspecten is ingegaan wordt in hoofdstuk 8 een analyse gepresenteerd over het economisch perspectief. Hierbij wordt ingegaan op het rendement dat met de huidige installatie gehaald kan worden, maar wordt ook een kleine doorkijk gemaakt naar verschuivingen die in de meest bepalende factoren te verwachten zijn.

In hoofdstuk 9 wordt de samenvatting van het onderzoek gegeven en worden de conclusies die uit dit project kunnen worden gedestilleerd gepresenteerd.

Hoofdstuk 10 presenteert tenslotte nog een nabeschuiving en een aantal aanbevelingen.

1 Netto energieproductie door een Energieproducerende kas

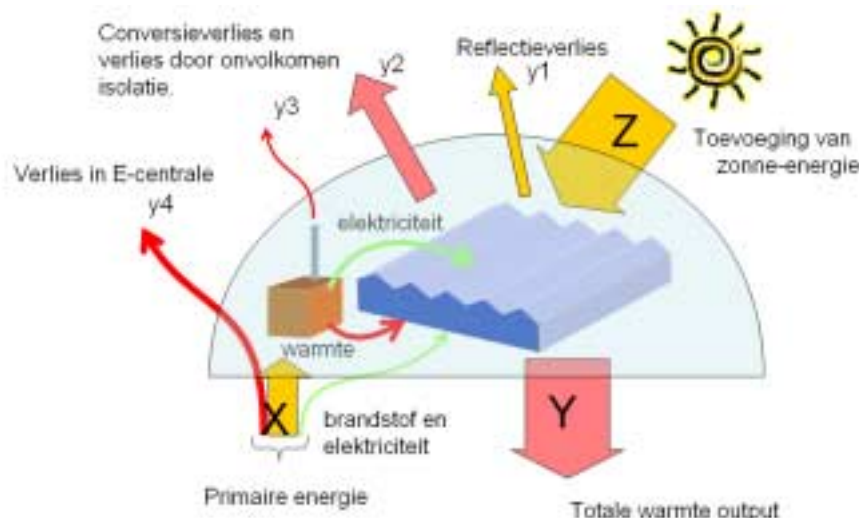
In vele studies is naar voren gekomen dat een kas onder Nederlandse omstandigheden op jaarbasis meer energie invangt dan er voor de verwarming in de winter nodig is. Dit is zeker het geval wanneer de kas wordt voorzien van een isolerend kasdek. Het aanbod van zonlicht in Nederland bedraagt immers zo'n 3600 MJ/m² per jaar, waarvan een kas met een goede lichtdoorlatendheid zo'n 2500 MJ/m² de kas laat binnenkomen, terwijl de verwarming van een kas met een isolerend kasdek, zelfs in zware stookteelten, niet meer dan 1000 MJ/m² per jaar hoeft te kosten.

Het is dan ook niet verwonderlijk dat de ramen van kassen in grote delen van het jaar in meer of mindere mate geopend zijn om het overschot aan zonnewarmte af te voeren. Bovendien wordt in veel teelten gebruik gemaakt van reflecterende schermen of krijt om tijdens lichtrijke dagen een deel van het zonlicht buiten de kas te kunnen houden en zo een overmatige opwarming te kunnen voorkomen.

Wanneer een kas het verlies aan energie in de zomer zou kunnen voorkomen door deze actief af te vangen en deze aan derden ter beschikken zou stellen kan een tuinbouwkas een Netto Energieproducerend systeem worden. Hiermee wordt bedoeld dat de hoeveelheid energie die de kas aan derden levert in dat geval groter kan zijn dan de hoeveelheid energie die in de vorm van gas, elektriciteit of warm water nodig heeft om het gewenste kasklimaat te kunnen realiseren. De netto energieproductie is in onderstaande schets gevisualiseerd als het verschil tussen Y en X.

In deze schets is de kas met de daarbij behorende installaties onder een soort kaasstolp geplaatst en zijn de energie toe- en afvoerstromen door middel van pijlen getekend. De wet van behoud van energie dicteert dat de som van de energiestromen die door de pijlen worden gesymboliseerd in een lange termijn evenwichtssituatie 0 moet zijn. De tussenvoeging 'op lange termijn' is geplaatst omdat de dynamica van het systeem ertoe leidt dat warmte tijdelijk kan accumuleren en weer afgegeven kan worden. Hierdoor kan de bovengenoemde som tijdelijk wel degelijk ongelijk aan 0 zijn.

Uit de schets kan worden afgeleid dat het zodanig vergroten van Y dat deze groter wordt dan X (de voorwaarde voor een Netto Energieproducerende kas) slechts vereist dat de som van de verliesposten y1 t/m y4 kleiner is dan Z. In het extreme geval waarbij alle 4 de verliesposten 0 zijn, is de netto energieproductie van de kas gelijk aan de instraling van de zon en zal deze 100 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar bedragen.



Figuur 1.1. Hoofddcomponenten in de energiebalans rond een energieproducerende kas.

In het project Energieproducerende Kas wordt het reflectieverlies (y_1) beperkt door de toepassing van het ZigZag kasdek materiaal. Bij aanvang van het project in 2006 werd de beperking van dit reflectieverlies evenwel op veel momenten gehinderd door het gebruik van een schaduw scherm. Vanwege het conflict tussen deze gebruikswijze en het streven naar een netto energieproductie is gedurende de looptijd van het project gestreefd naar een beperking van dit schermgebruik. Teneinde de verliesfactor y_1 zoveel mogelijk te beperken is er gezocht naar een teeltkundig aanvaardbare verruiming van de stralingsgrens. Hierover wordt in hoofdstuk 6 en 7 verslag gedaan. Door aanpassingen van de teeltwijze (het toepassen van nieuwe teeltstrategieën en het selecteren van een geschikt sortiment) is er in 2007 en in 2008 aanzienlijk minder geschermd en is het lichtaanbod (en dus het energieaanbod) duidelijk toegenomen.

De verliespost y_2 is in gangbare kassen de belangrijkste verliesfactor. Dit convectieverlies komt gedeeltelijk doordat het kasdek een beperkte isolatie geeft, maar vooral doordat de ramen veelvuldig geopend moeten worden, hetzij om warmte af te voeren (zomer), hetzij om overtollig vocht af te voeren. In de Energieproducerende Kas wordt het openen van ramen zoveel mogelijk beperkt door de kas intern te koelen. In principe kan de kas ook mechanisch worden ontvochtigd, waardoor de ramen helemaal niet meer geopend zouden hoeven worden, maar omdat dit tot onaanvaardbaar hoge elektriciteitskosten leidde is hier vanaf maart 2007 verder vanaf gezien. Vanaf die tijd is dus een ingecalculeerd energieverlies voor lief genomen. Er is dus een concessie gedaan aan de maximalisatie van het netto overschot omwille van een beperking van de elektriciteitskosten.

De verliesfactoren y_3 en y_4 beschrijven het conversieverlies dat optreedt bij de productie van elektriciteit uit primaire brandstoffen. Wanneer deze elektriciteit lokaal op het tuinbouwbedrijf wordt voortgebracht is dit verlies klein (verliespost y_3). WKK in de tuinbouw heeft een overall rendement van 95% of meer. Indien de elektriciteit uit het openbare net wordt betrokken is het toe te rekenen verlies echter groter. Het gemiddelde rendement in het Nederlandse openbare net is 43% zodat bij het gebruik van deze elektriciteit gemiddeld genomen ruim 2 keer de gebruikte hoeveelheid aan primaire energie wordt gebruikt. Pas wanneer het openbare net substantieel met duurzame energie wordt gevoed is er vanuit het oogpunt van de vermindering van het beslag op fossiele brandstoffen reden om gebruik van elektriciteit uit het openbare net te bevorderen. Zolang dat niet zo is zal het gebruik van WKK voor de elektriciteitsbehoefte de verliesposten y_4 fors meer verlagen dan dat y_3 oploopt. Hierdoor geniet het gebruik van WKK de voorkeur.

In de bespreking Figuur 1.1 is tot nu toe de opslag van warmte in ondergrondse watervoerende lagen (aquifers) nog niet genoemd. Strikt genomen hoeft een netto energieproducerende kas ook geen gebruik te maken van seizoensopslag. Immers, het maximaliseren van de energieproductie vereist alleen het beperken van de 4 verliestermen (y_1 t/m y_4).

De doelstelling van het project Energieproducerende Kas behelst echter naast de maximalisatie van de netto energieproductie (lees: warmtelevering) ook een beperking van het primaire energieverbruik tot onder de 11 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar¹.

Wanneer aan de gewenste teelttemperaturen wordt vastgehouden (dus als de kas in de winter niet koud kan worden gezet) kan een verlaging van het primaire energieverbruik naast het verhogen van de isolatiegraad en het beperken van het ventilatieverlies eigenlijk alleen worden gerealiseerd door een verbetering van het conversierendement van primaire energie naar warmte. Hiervoor is de warmtepomp hét apparaat (zie Bijlage I) en zo'n machine vergt een externe warmtebron. Als we uitgaan van een winterse warmtebehoefte van 600 MJ per m² (deze getallen komen uitvoerig aan bod in hoofdstuk 4) en een elektrisch aangedreven warmtepomp, dan zal deze warmtepomp in de winter 480 MJ per m² kasoppervlak uit de externe warmtebron onttrekken. Als deze warmtebron water is dat 10 °C in temperatuur wordt verlaagd gaat dit om 12 m³ water per m² kasoppervlak. Het zal duidelijk zijn dat zo'n volume niet kosteneffectief in een bovengronds opslagvat kan worden opgeslagen (de grootste bovengrondse buffers in de huidige tuinbouw bevatten 0.05 m³ water per m² kasoppervlak) zodat het gebruik van een aquifer een voor de hand liggende oplossing vormt.

¹ In de projectdoelstelling is geformuleerd dat het primaire energieverbruik t.o.v. een standaardkas met een jaarverbruik van 45 m³ aardgasequivalenten (a.e.) met 75% wordt verminderd. Dit levert een doelverbruik op van maximaal 11 m³ a.e.

Een tweede reden voor de opname van een aquifer in het concept is dat de afnemer van de warmte, net als de kas zelf, de in de zomer vrijkomende warmte waarschijnlijk alleen in de winter kan gebruiken.

In het in Figuur 1.1 geschetste plaatje wordt ook geen aandacht geschonken aan elektriciteitsproductie uit zonlicht. Dit komt in de eerste plaats omdat bij de plaatsing van PV-panelen de netto energieproductie van de kas niet kan toenemen. De energie uit het zonlicht kan immers maar één keer worden gebruikt. De schets blijft dus gelden, ongeacht de vorm waarin de netto energieproductie wordt geleverd.

Dit geldt niet wanneer er windmolens tot de energieproducerende kas gerekend zouden worden. In dat geval kan de energieproductie in theorie nog groter worden dan de instraling van de zon. Immers, naast de externe energie-input Z komt er dan nog een externe input W bij (windenergie), waarvan wel de output in de berekening een rol speelt, maar niet de input.

2 De technische installatie van de Energieproducerende kas van Hydro Huisman

Inleiding

Bij de realisatie en het ontwerp van de Energieproducerende Kas in Huissen is gestreefd naar de bouw van een installatie waarbij een hoge lichtdoorlatendheid kon worden gecombineerd met een goede isolatie. Hiervoor is niet alleen gebruik gemaakt van het zigzag kasbedekkingsmateriaal, waarover in hoofdstuk 3 uitvoerig zal worden gesproken, maar wordt er 's nachts ook intensief geschermd.

Ondanks deze warmteverliesbeperkende factoren moet de kas natuurlijk nog wel worden verwarmd wanneer deze ook in de winter op de vooraf ingestelde minimumtemperatuur moet worden gehouden. Deze verwarming gebeurt zoveel mogelijk op basis van duurzame energie die in de zomer in de kas wordt verzameld. Het temperatuurniveau van deze duurzame energie is echter laag (in theorie maximaal 25 °C, maar in de praktijk niet hoger dan 18 °C (zie hoofdstuk 7)). Daarom is er een warmtepomp in het concept opgenomen.

Het tijdsverschil tussen de periode van warmtebehoefte (winter) en warmteoverschot (zomer) wordt overbrugd door een seizoensopslag systeem in een aquifer.

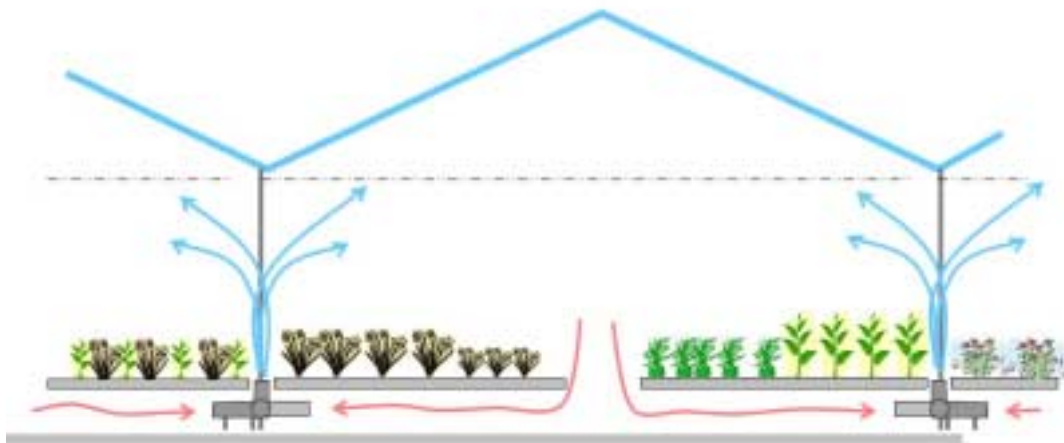
Dit hoofdstuk belicht de verschillende onderdelen van de installatie en beschrijft de algemene karakterisering van die componenten.

Het systeem zoals dat uiteindelijk gebouwd is verschilt overigens op een aantal punten significant ten opzichte van het ontwerp dat bij aanvang van de ontwerpfase van het project was voorgesteld. In de tussenrapportage m.b.t. dit project (de Zwart, 2007) is uitvoerig op die aanpassingen en de argumentatie daarvoor ingegaan.

2.1 De kasruimte

De kasruimte in de Energieproducerende Kas is gevuld met grote roltafels. De roltafels kunnen door de kas worden verplaatst en rouleren veelvuldig.

De tafels hebben uiteraard een teeltkundig en bedrijfsmatig belang, maar spelen ook een rol in de geleiding van de luchtstromen door de kas. Wanneer de tafels netjes tegen elkaar geschoven zijn wordt tijdens het koelen en verwarmen van de kas lucht tussen het middenpad door aangezogen en na respectievelijk koeling en verwarming midden onder de goot weer naar boven geblazen. Figuur 2.1 geeft hiervan een schematische weergave.



Figuur 2.1. Dwarsdoorsnede van de Energieproducerende Kas.

De lay-out die in Figuur 2.1 is getoond kan onbeperkt in de breedte en diepte worden gerepeteerd.

Ter hoogte van de goot is een horizontaal scherm gemonteerd dat als energiescherm én als schaduw scherm wordt gebruikt. Dit betekent dat het scherm elke nacht wordt gesloten om het energieverlies van de kas zo klein mogelijk te maken.

In de loop van het experiment is het stralingscriterium waarbij het scherm overdag gesloten werd in stapjes opgevoerd. In het najaar van 2006 werd het scherm al bij 350 W/m^2 globale straling gesloten. In het voorjaar en de zomer van 2007 is dit criterium verhoogd naar 400 en 450 W/m^2 .

Gezien de positieve ervaringen die in de Energieproducerende Kas met de ruime lichtdoorlatendheid zijn opgedaan is het criterium voor het sluiten van het scherm overdag in 2008 nog verder opgehoogd naar 600 W/m^2 globale straling.

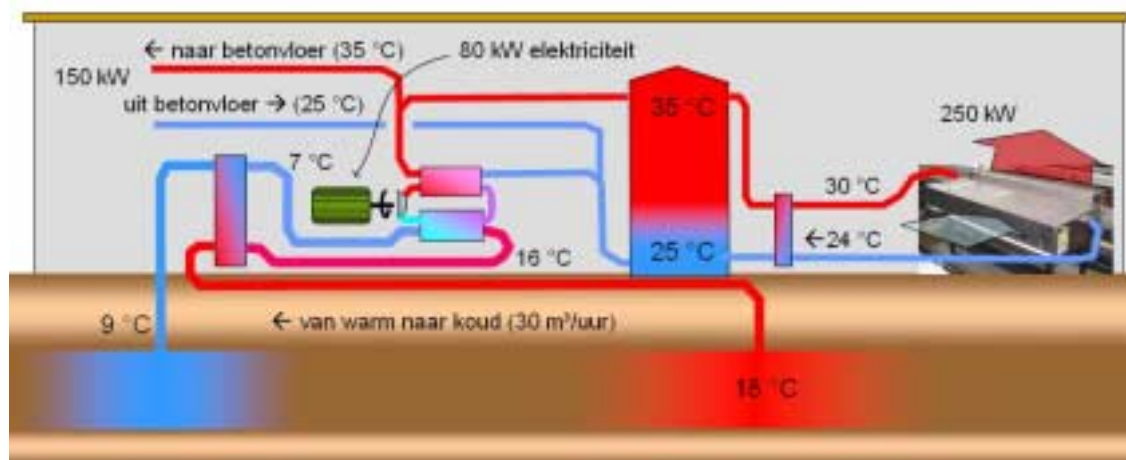
2.2 Verwarming en koeling

Verwarming

In de winter en in koude nachten moet de kas worden verwarmd om gunstige groeiomstandigheden te behouden. Hiertoe moet kaslucht met een temperatuur die iets onder de 20°C ligt door de FiWiHEX-en worden aangezogen, opgewarmd en de kas weer worden ingeblazen.

In principe maakt het voor het toevoeren van verwarmingsvermogen aan de kaslucht niet uit of er veel lucht wordt rondgeblazen bij een kleine opwarming of weinig lucht wordt rondgeblazen met een grote opwarming. In de praktijk kost het rondblazen van lucht echter aandrijfenergie voor de ventilatoren en de productie van verwarmingswater met een warmtepomp kost meer elektriciteit naarmate het water heter moet worden gemaakt. Er zal dus in de praktijk ergens een optimum liggen waarbij een goede balans wordt gevonden tussen de elektriciteitsinput voor de ventilatoren en de elektriciteitsinput voor de warmtepomp. Omdat de uitkomst van deze optimalisatie heel sterk afhangt van de karakteristieken van de FiWiHEX wordt dit in detail uitgewerkt in hoofdstuk 4. Deze paragraaf beperkt zich tot de uitleg van de werking van de installatie tijdens het verwarmen van de kas.

Ter toelichting van de installatie tijdens de verwarming wordt gebruik gemaakt van de onderstaande schets.



Figuur 2.2. Werking van de Energieproducerende kas tijdens de verwarmingsmodus, geconcretiseerd met een aantal voor de installatie karakteristieke getallen.

Uit Figuur 2.2 zijn de warmtepomp en de korte termijn opslagtank centraal gesteld. De opslagtank fungeert vooral als regelbuffer zodat de voortdurende fluctuaties in het gevraagde verwarmingsvermogen niet door het op- en afregelen van de warmtepomp opgevangen hoeven te worden. De warmtepomp kan hierdoor veel gelijkmatiger draaien.

De warmtepomp wordt in werking gesteld als óf de FiWiEx-en warmte vragen, óf de verwarming van de betonvloer van de rest van het bedrijf warmte vraagt. Meestal vallen de tijdvakken waarin deze twee warmtevragers een beroep op de warmteproductie doen samen. Gemiddeld genomen is de verhouding waarin dan warmte wordt gevraagd rond de in de figuur geschetste situatie (35% om 65%).

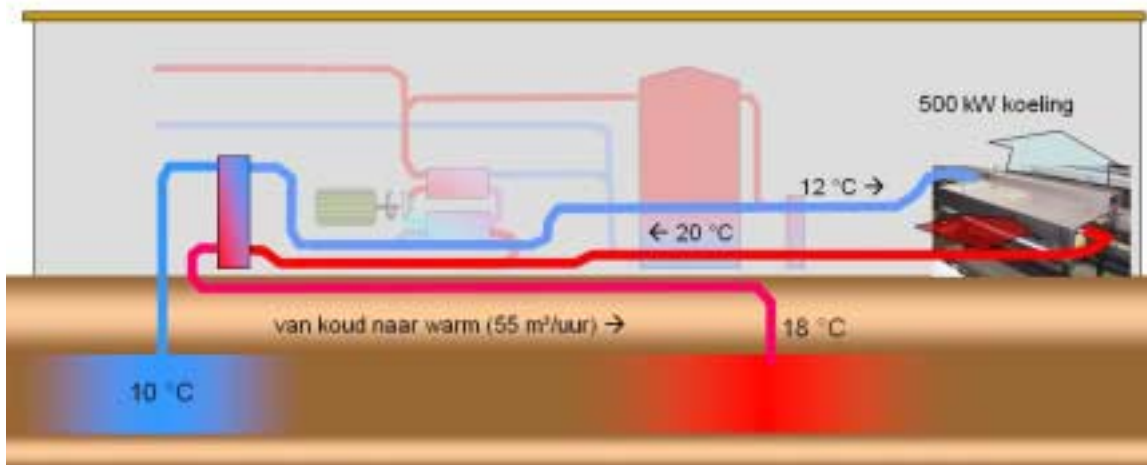
De installatie heeft een grote scheidingswisselaar die het aquifer-water scheidt van het verwarmingssysteem water. Daarnaast is er nog een kleinere warmtewisselaar die het water dat circuleert in de warme kant van de warmtepomp, het buffervat en de betonvloer scheidt van het water dat door de FiWiEx-en stroomt. Omdat deze tweede warmtewisselaar veel kleiner is gekozen is de temperatuurval hier aanzienlijk groter (bijna 5 °C).

De regelprincipes die tijdens het verwarmen worden toegepast zijn vrij eenvoudig. De kasklimaatregelaar bepaalt een gewenst verwarmingsvermogen en bestuurt de warmtetoevoer naar de betonvloer. De FiWiEx-besturing vertaalt het verwarmingsvermogen in een pomp- en ventilatordebiet en, samen met het waterdebiet dat ten behoeve van de betonvloer aan de regelbuffer wordt onttrokken, zorgt dit voor een afkoeling bovenin de tank. Deze afkoeling doet de warmtepomp aanslaan. De warmtepomp heeft een eigen temperatuurregeling die de water van rond de 35 °C verzorgt, waarbij de compressoren vier standen hebben (25, 50 75 en 100% van het warmtepomp vermogen). Als de warmtepomp in werking treedt wordt koud water gemaakt en deze wordt via de grote scheidingswisselaar in de koude put van het aquiferdoublet geïnfiltereerd. De debietregeling voor de bronpompen zorgt er daarbij voor dat aan beide kanten van de warmtewisselaar de temperatuurval gelijk is (zoals in Figuur 2.2 aan beide kanten 2 °C).

Koeling

Wanneer de intensiteit van het zonlicht boven waarden van rond de 250 W/m² uitstijgt dreigen kassen te warm te worden en moet er energie worden afgevoerd. Waar een standaard-kas dit doet door ramen te openen doet de Energieproducerende kas dit door de kaslucht met de FiWiEx te koelen.

Het hydraulisch schema waarmee dit gebeurt is aanzienlijk eenvoudiger dan de hydrauliek die tijdens het verwarmen ingezet moet worden.



Figuur 2.3. Werking van de Energieproducerende kas tijdens de koelmodus, geconcretiseerd met een aantal voor de installatie karakteristieke getallen.

Het initiatief voor de regeling van het koelvermogen ligt bij de kasklimaatcomputer. Deze detecteert dat de kas te warm wordt en stuurt een signaal met een gewenst koelvermogen naar de TCS-regelaar (zie paragraaf 2.6). Op grond van dit gevraagd vermogen (variërend van 0 tot 800 kW) worden de FiWiHex ventilatoren opgetoerd en wordt koelwater door de kas geleid. Het koelwater warmt in de kas op en de warmte wordt via de grote scheidingswisselaar naar de warme bron gebracht. Ook hier zorgt de debietregelaar die de bronpompen bestuurt voor een symmetrische temperatuurval over de scheidingswisselaar (in dit voorbeeld 2 °C).

2.3 Ontvochtiging

In het oorspronkelijk ontwerp van de installatie konden de FiWiHex blokken ook worden gebruikt voor de ontvochtiging-met-warmteterugwinning. Dit bleek echter in de praktijk moeilijk beheersbaar en bovendien deed dit het verbruik van (relatief dure) elektriciteit oplopen (zie paragraaf 4.2.3) waardoor deze mogelijkheid uiteindelijk niet gebruikt is. De ontvochtiging vond dus plaats door op momenten dat het in de kas te vochtig werd de ramen op een kiertje te zetten (zodat de Energieproducerende Kas in feite een semi-gesloten kas was).

2.4 Warmte en koudeopslag in de aquifer

Ter overbrugging van het halve jaar tijdsverschil tussen de verzameling van warmte en de benutting daarvan wordt gebruik gemaakt van een aquifer. Een aquifer is een ondergrondse zandlaag die aan de boven- en onderkant opgesloten is door slecht waterdoorlatende kleilagen. In een deltagebied zoals Nederland kunnen zulke aquifers bijna overal in de ondergrond aangetroffen worden, hoewel er grote verschillen zijn in dikte en permeabiliteit (de grofheid) van die zandpakketten.

In het tuinbouwgebied Bergerden is een geschikte aquifer beschikbaar die zich uitstrekt over een diepte van 35 tot 70 meter onder het maaiveld. In deze aquifer zijn twee bronnen gemaakt die 210 meter uit elkaar liggen. Figuur 2.4 toont de locatie van deze twee bronnen.

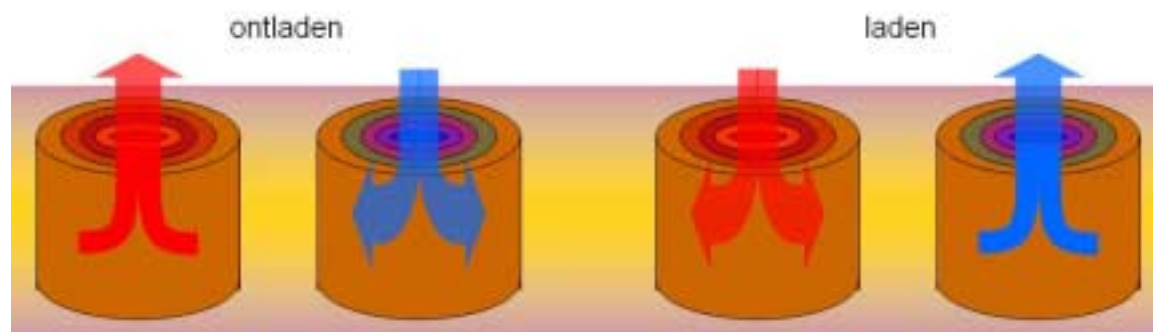
Bij het laden van een seizoensopslagsysteem in een aquifer wordt water met een hogere temperatuur dan de omgeving door de zandlaag vanuit de kern van de bron rondom zijwaarts geperst. Het (bewegende) water staat daarbij warmte af aan het stilstaande zand en koelt daardoor af. Een schematische weergave van dit proces staat afgebeeld in Figuur 2.5. Wanneer er water met een bepaalde temperatuur gedurende een bepaalde tijd in een aquifer wordt ingebracht zal er een vloeiende temperatuurgadiënt vanuit de koude omgeving naar de warme kern ontstaan.

Een belangrijke consequentie van het gebruik van aquifers voor warmteopslag is dus dat slechts een klein deel van de warmte die met een bepaalde temperatuur is opgeslagen met dezelfde temperatuur weer kan worden onttrokken. Het grootste deel van de opgeslagen energie komt op een lagere temperatuur weer beschikbaar. Een uitgebreidere beschrijving van het gedrag van een aquifer als warmteopslagsysteem kan worden gevonden in het rapport 'Praktijkmeting aan een ondergronds energieopslagsysteem en validatie van een dynamisch simulatiemodel' (Campen en de Zwart, 2004).

Hoofdstuk 6, waar de resultaten van metingen worden getoond, gaat ook nog wat uitgebreider op deze materie in.



Figuur 2.4. Satellietfoto van het gebied rond de Energieproducerende kas met daarin de twee bronnen van het seizoenopslagsysteem gemarkeerd.



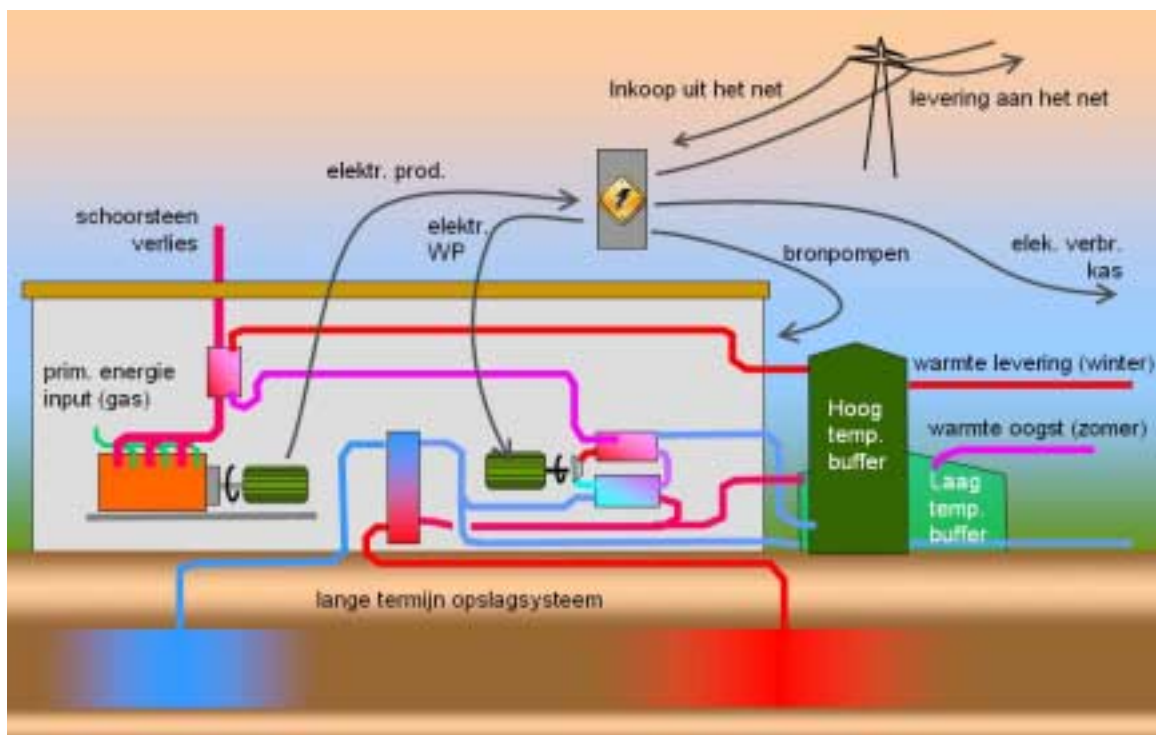
Figuur 2.5. Schematische weergave van de verdringing en toestroom van water bij het laden en ontladen van een bronnenpaar in een aquifer.

2.5 De virtuele WKK-installatie

Zoals ook al in de tussenrapportage gerapporteerd (zie Bijlage) is het experiment uitgevoerd zonder fysieke WKK-installatie. De schaalgrootte van het praktijkexperiment is namelijk te klein om een enigszins representatieve WK-unit te kunnen inpassen. In de overall energieprestatiebepaling die in hoofdstuk 6 voor de installatie bij Hydro Huisman en in hoofdstuk 7 voor een tomatenteelt worden gepresenteerd wordt echter toch gerekend met de aanwezigheid van zo'n unit. Dit wordt gerealiseerd door data van een virtueel ketelhuis aan respectievelijk de meetdata en de simulatiedata toe te voegen. Dit virtueel ketelhuis is een model dat, uitgaande van de data m.b.t. het kasklimaat en warmte en koude vraagpatronen, berekent hoe zo'n installatie gefunctioneerd zou hebben en wat dit dan voor de prestatie betekend zou hebben. Het gebruik van zo'n virtuele WKK-installatie is alleszins verdedigbaar omdat het (a) om berekeningen gaan die geen interactie met het kasklimaat hebben, (b) om relatief kleine hoeveelheden energie gaat, (c) de WKK-technologie als standaard technologie kan worden gekarakteriseerd en (d) de bewerking op de meetdata volledig transparant wordt uitgevoerd.

De belangrijkste rol van de WKK-installatie in Energieproducerende kassen is de productie van elektriciteit zonder verlies van restwarmte en de productie van CO_2 . Deze CO_2 kan goed worden gebruikt om de opname van het gewas te compenseren. Immers, in een gesloten kas is er geen toevoer van CO_2 uit de buitenlucht, zodat zonder dosering de concentratie tot ver onder de buitenlucht-concentratie zou dalen, met een zware beperking van de gewasgroei tot gevolg. Uiteraard kan deze CO_2 -behoefte ook door andere bronnen worden ingevuld (zuivere CO_2 uit tanks, een CO_2 -distributie netwerk zoals OCAP), maar lokale productie zal in de regel goedkoper zijn, zeker omdat de elektriciteit die overdag door de WK wordt geproduceerd meestal goedkoper is dan de elektriciteit uit het openbare net.

In onderstaande figuur is afgebeeld hoe de virtuele WKK in de installatie voor warmte en koudeproductie is ingepast.



Figuur 2.6. Het virtueel ketelhuis waarin de WKK-installatie elektriciteit levert voor eigen gebruik of levering aan het openbare net en waarbij de afvalwarmte wordt benut voor de kasverwarming. Overtollige zomerwarmte uit de kas en overtollige warmte uit de WKK kan in het seizoensopslagsysteem worden opgeslagen voor gebruik in de winter.

De capaciteit die voor de virtuele WKK-installatie wordt verondersteld is 16 W per m² energieproducerende kas, wat gelijk staat aan 160 kW per hectare Energieproducerende kas. Afgezet tegen de in de tuinbouw gebruikelijke 500 kW per hectare is dit een kleine unit, maar deze capaciteit is groot genoeg om uit te kunnen gaan van goede praktische omzettingsrendementen. Er wordt derhalve gerekend met een elektrisch rendement van 42% en een thermisch rendement van 53%. 5% van de in de WKK verbruikte primaire energie wordt dus als schoorsteenverlies geaccepteerd.

Een belangrijke eigenschap van WKK-units is dat het ongunstig is om de WKK in deellast te laten werken. Gegeven het feit dat de vraag naar elektriciteit behoorlijk zal fluctueren betekent dit dat de WK-unit netgekoppeld zal moeten zijn.

In de zomer is de elektriciteitsvraag relatief laag zijn en zal de WK netto veel stroom exporteren naar het openbare net. In de winter, bij gebruik van de warmtepomp is het stroomverbruik vaak hoger dan de 15 W/m² die de WK levert en zal er netto elektriciteit moeten worden ingekocht.

Het door Wageningen UR ontwikkelde 'ketelhuis' simulatieprogramma schakelt de WKK-installatie tussen 7 en 23 uur op werkdagen hoe dan ook aan. Een flink deel van de periode tussen 7 en 23 uur is er behoefte aan CO₂ en het overschot aan elektriciteit kan in die periode goed verkocht worden. In de weekenden is er wel behoefte aan CO₂, maar is de verkoopwaarde van elektriciteit laag. Daarom wordt de WK in de weekenden alleen aangezet als er zonlicht is (ten behoeve van de CO₂ dosering) maar wordt op deellast naar maximaal 65% teruggeregeld als er een warmte-overschot in de hoogtemperatuur buffer dreigt te ontstaan.

De warmtepomp wordt ingeschakeld als de warmtevraag van de kas groter is dan het warmteproductie van de WK en de hoogtemperatuur warmtebuffer (bijna) geleegd is.

Het gebruik van een 150 kWe WKK per hectare op een bedrijfsvoering zoals toegepast in de Energieproducerende kas levert op jaarbasis een vrijwel sluitende balans tussen totale inkoop en verkoop van elektriciteit. De waarde van elektriciteit is door de dag echter niet constant. Indien de inkoop dus vooral 's nachts plaatsvindt en de verkoop vooral overdag, kan bij een sluitende elektriciteitsbalans toch een financieel overschot uit de elektriciteitshuishouding worden gerealiseerd. Hoofdstuk 8 gaat hier dan ook expliciet op in.

Behalve de besturing van de WKK en de warmtepomp bestuurt het virtueel ketelhuis ook de laad- en ontlad strategie van de laagtemperatuur buffer. Dit laden en ontladen van de laagtemperatuurbuffer vindt deels plaats bij gebruik van de warmtepomp en de kaskoeling, maar in de zomer is er een structureel warmteoverschot en in de winter een structureel tekort.

Gedurende een zomerse dag gebruiken de FiWiHEx warmtewisselaars in de kas koud water en sturen dit opgewarmd weer terug naar het virtuele ketelhuis. Het simulatieprogramma berekent uit deze informatie hoeveel energie hierbij in de etmaalbuffer moet worden opgeslagen en berekent aan de hand van de informatie m.b.t. de retourtemperaturen uit de kas hoe de temperatuuropbouw in de laag-temperatuur buffer zal zijn. Na verloop van tijd raakt de buffer 'vol', dat wil zeggen dat er bijna geen lagen met koud water onderin de laagtemperatuur buffer over zijn. Vanaf dat moment gaat er, al dan niet parallel aan de wateruitwisseling met de FiWiHEx-en, een waterstroom lopen die de etmaalbuffer afkoelt door middel van warmte-overdracht met het seizoensopslagsysteem. Deze warmte-overdracht loopt via de scheidingswisselaar, waarbij het voor de wisselaar geldende temperatuurverlies in rekening wordt gebracht.

In de winter wordt de etmaalbuffer uitgeoeld door het verdampercircuit van de warmtepomp. In die periode wordt bijgehouden of er nog genoeg warme lagen in de laagtemperatuurbuffer zitten. Worden deze te koud, of zijn de 'warme' lagen op, dan wordt de buffer verwarmd met water uit het seizoensopslagsysteem. Dit loopt opnieuw via de scheidingswisselaar zodat ook hier weer een zeker temperatuurverlies tussen het water in de warme bron en het water bovenin de etmaalbuffer in rekening wordt gebracht.

Het grote voordeel van het gebruik van de laagtemperatuurbuffer is dat de etmaalmiddeling van warmtevraag en -aanbod zonder het temperatuurverlies van de scheidingswisselaar kan verlopen. Bovendien wordt er pompenergie uitgespaard als niet al het water over de aquifer moet worden uitgewisseld.

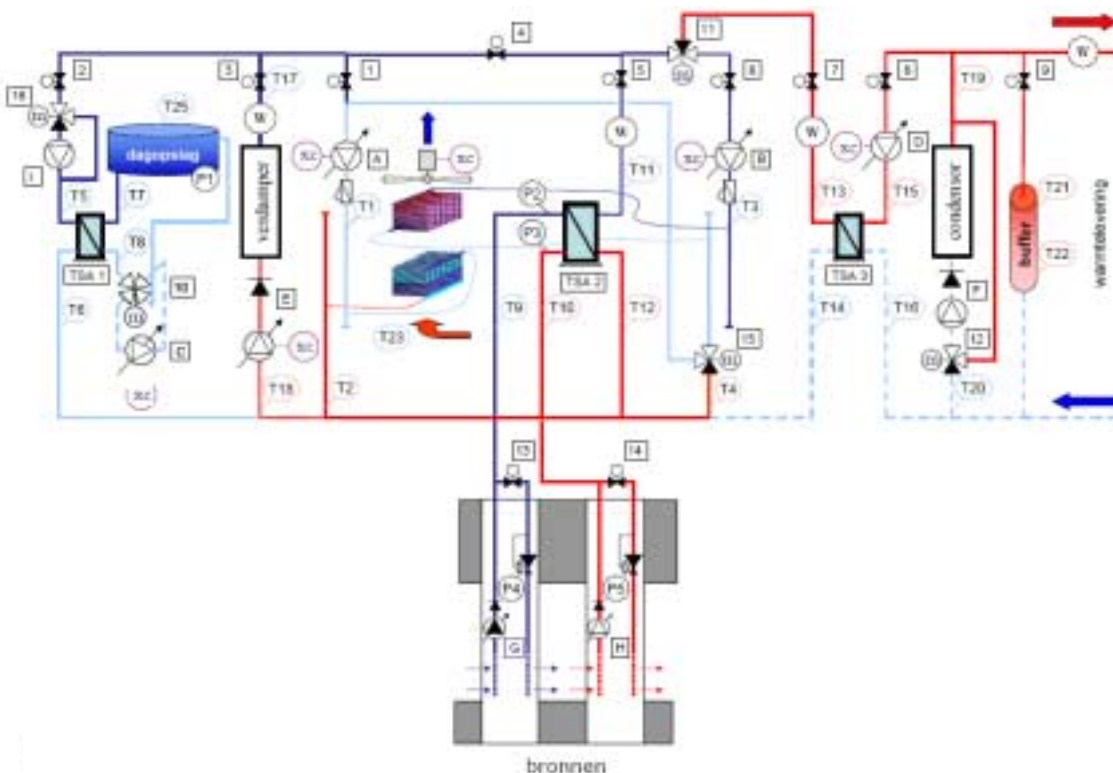
2.6 Kasklimaatregeling

De besturing van alle onderdelen van de Energieproducerende Kas vindt plaats door een functionele verdeling van verantwoordelijkheden tussen de Hoogendoorn Economic kasklimaatcomputer en het TCS (Total Control System) van Lek/Habo. De kasklimaatcomputer bestuurt het kasklimaat in alle afdelingen van de kwekerij. Voor de afdelingen 1, 2 en 3 realiseert de kasklimaatcomputer dat door ramen te openen als het in de kas te warm of te vochtig is en door verwarmingswater te laten circuleren als de luchttemperatuur onder de gewenste waarde zakt.

Voor de Energieproducerende Kas (afdeling 4) wordt bij een warmtevraag niet direct een klep aangestuurd, maar wordt een analogo signaal ($0\text{ mA} = \text{uit}$, $4\text{ mA} = 0\text{ kW}$, $20\text{ mA} = 200\text{ kW}$ verwarming) naar de besturingsunit voor de Energieproducerende Kas gestuurd (het TCS). Als er een koelvraag is (dus als de kas boven de ingestelde 'ventilatie-lijn' komt) wordt dit eveneens middels een analogo signaal aan het TCS doorgegeven ($0\text{ mA} = \text{uit}$, $4\text{ mA} = 0\text{ kW}$, $20\text{ mA} = 800\text{ kW}$ koeling).

De functionele splitsing maakt dat de kasklimaatregelaar op geen enkele manier belast hoeft te worden met de besturing van het grote aantal componenten in de techniek van de Energieproducerende Kas. De besturing van de bronpompen, de warmtepomp, de water- en luchtdebieten door de installatie loopt hierdoor gezien vanuit de kasklimaatregelaar helemaal vanzelf. Zelfs voor de warmtelevering vanuit de energieproducerende kas aan de betonvloer van Hydro Huisman hoeft de kasklimaatcomputer geen bijzondere acties te ondernemen. Het loskomen van het eindcontact op de mengklep die warm water vanuit de buffertank naar de betonvloer inlaat vormt voor TCS het signaal dat er warmte aan derden geleverd kan worden.

In Figuur 2.7 is een prinsipeschema afgebeeld van de installatie die door het TCS wordt bestuurd.



Figuur 2.7. Schematisch overzicht van het hydraulische systeem dat door het TCS wordt aangestuurd op grond van het door de kasklimaatcomputer gevraagde koel- of verwarmingsvermogen.

De gekozen functionele opdeling maakt het mogelijk dat de installatie zoals die bij Hydro Huisman is geplaatst door iedere in de tuinbouw gebruikte kasklimaatcomputer ingezet zou kunnen worden.

3 Het ZigZag Kasdek materiaal

Vanuit het belang van een hoge lichttransmissie en een laag warmteverlies (dus de beperking van de verliesfactoren y_1 en y_2 in Figuur 2.1) is in het ontwerpstadium van de Energieproducerende kas gekozen voor de toepassing van het ZigZag® polycarbonaat kasdek van General Electric.

Het resultaat van het kasdek voor wat betreft de warmtedoorgang is bevredigend. De warmtedoorlaat is conform de verwachting voor een dubbeldeks materiaal, dat wil zeggen gemiddeld $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ (dat is inclusief het warmteverlies-verhogende effect van de condensatie tegen het kasdek). Gedurende het overgrote deel van het stookseizoen maakt de Energieproducerende kas evenwel gebruik van een energiescherm dat elke nacht gesloten wordt. Hierdoor daalt de effectieve warmtedoorgang voor de Energieproducerende kas naar $3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

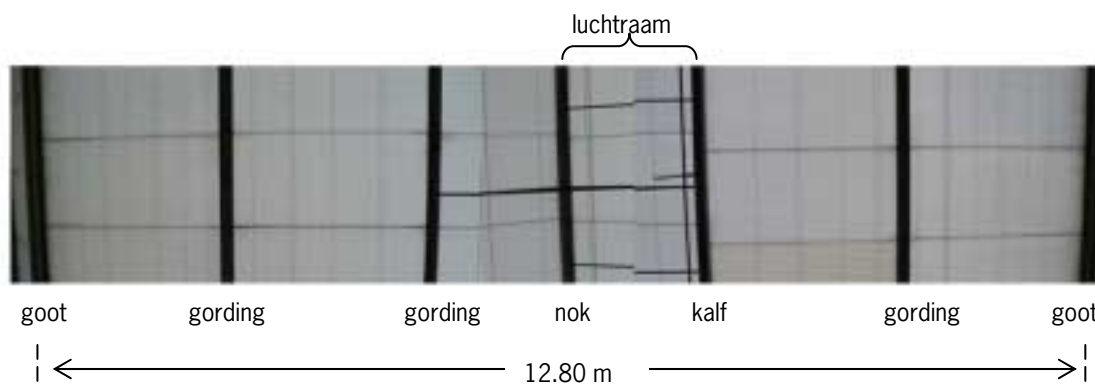
De lichttransmissie van de kas varieert wat in de tijd. Er is een gemiddelde transmissie bepaald van 58% (gemeten op 26 oktober 2006) een transmissie van 51% (gemeten op 24 april 2007) en een transmissie van 56% (gemeten op 25 mei 2007). De laagste waarde, 51%, is gemeten na een lange droge periode waarin er zonder twijfel een aanzienlijke hoeveelheid stof op het kasdek lag. De meting in mei, nadat er in de voorafgaande week veel regen was gevallen, geeft dan ook weer een waarde aan die in de buurt ligt van de 58% die in oktober het jaar daarvoor bij de net nieuwe kas was gemeten.

In november 2007 is op een klein oppervlak van de kas gemeten aan het effect van een grondige reiniging van het kasdek (reinigen met water en borstel). Het bleek dat een reinigingsbeurt de lichtdoorlatendheid met 2% deed toenemen. Omdat de Energieproducerende kas niet actief gereinigd wordt is het aannemelijk te stellen dat de lichtdoorlatendheid 56% procent bedraagt.

Hoewel deze lichtdoorlatendheid helemaal niet slecht is in vergelijking met andere breedkappers (de tussenrapportage meldt een 42% lichtdoorlatendheid van een breedkapper van een bromeliatuinder en de standaard kasafdelingen van Hydro Huisman hebben een lichtdoorlatendheid van 46%) is de in dit experiment gebleken lichttransmissie een tegenvaller ten opzichte van de uitgangspunten die in de bureaustudie voorafgaand aan het experiment zijn uitgevoerd. De oorspronkelijke berekeningen gingen uit van een overall lichttransmissie van 68%.

De 12% punten lagere overall transmissie worden veroorzaakt door vuil (2%-punten), de geringere doorlatendheid van het zigzag materiaal zelf (6%-punten) en door de zwaardere constructie

Anders dan op grond van bij de eerste ontwerpen en documentatie m.b.t. de ZigZag plaat werd aangenomen konden de platen namelijk niet in één stuk van nok naar goot worden geleverd. Het dek bestaat daardoor uit drie delen, waardoor er twee brede aansluitprofielen op de gordingen moesten worden gebruikt. Dit is goed te zien in de onderstaande fotomontage.



Figuur 3.1. Fotomontage van dekconstructie van de Energieproducerende kas.

Wanneer vanuit Figuur 3.1 de gezamenlijke breedte van de aansluitprofielen wordt gedeeld door de breedte van de hart-op-hart afstand tussen de goten, dan blijkt het horizontaal geprojecteerde schaduwoppervlak van deze profielen 7% te zijn. De gordingen zijn echter ook nog eens erg dik en massief waardoor de effectieve lichtonderschepping van de nok, gording en goot op 9% kan worden gesteld. Wanneer de platen uit één stuk zouden zijn geweest was de lichtonderschepping tenminste 3%-punt lager geweest. De drie gordingen hadden dan namelijk op dezelfde wijze kunnen worden uitgevoerd als de dunne, opengewerkte gordingen die in de rest van de kas van Hydro Huisman zijn gebruikt. Figuur 3.2 laat zien dat deze gordingen veel fragieler zijn.



Figuur 3.2. Detail opnamen van de gordingen in de Energieproducerende kas en in kassen van afdeling 1 en 2 van het bedrijf van Hydro Huisman. De schaal van de foto's is gelijk zodat de afmetingen direct vergelijkbaar zijn.

Wanneer de drie genoemde factoren bij elkaar worden genomen is het grootste deel van het verschil tussen de verwachten en gerealiseerde waarde verklaard.

De 6%-punt lagere lichttransmissie van de plaat ten opzichte van glas is een gegeven, maar de extra onderschepping van de constructie en het lichtverlies door het niet schoongemaakte dek zijn wel te voorkomen. De maximaal haalbare lichttransmissie van een breedkap kas met het ZigZag kasdek kan daarom gesteld worden op 61%.

3.1 Teeltervaringen met het ZigZag kasdek

Ten behoeve van het perspectief van de ZigZag-plaat voor de tuinbouw zijn natuurlijk behalve de lichttransmissie-effecten en warmte-isolatie, de algemene teeltervaringen met het gebruik van de plaat van belang. De betreffende tuinder is hierover niet onverdeeld positief. De relatief hoge lichtdoorlatendheid (in vergelijking met de driedubbele polycarbonaat plaat die op de rest van het bedrijf wordt toegepast) is in de winter prima, maar in de zomer is de lichtintensiteit voor een aantal echte schaduwplanten te hoog. Dit betekent dat bij een toepassing in de potplantenteelt met dergelijke gewassen schaduwschermen met een wat hogere beschaduwingsfactor gebruikt moeten worden (tenminste in sommige delen van de kas). Dit is extra belangrijk omdat de gebruikelijke maatregel om de zomerse warmte uit de kas te houden, het krijten van het dek, bij het ZigZag materiaal niet werkt omdat het krijt heel snel van het dek afspoelt. Dit wordt veroorzaakt door de bewust aangebrachte easy-clean coating die vervuiling moet tegengaan, maar daardoor ook voorkomt dat bewust aangebrachte 'vervuiling' (krijt) niet hecht.

In de Energieproducerende Kas, waar door verneveling en koeling het klimaat goed in de hand gehouden kan worden en waarin speciaal geselecteerde soorten worden geteeld, is de hoge transparantie juist een voordeel. In de

referentiekas, waar de temperatuur en luchtvochtigheid minder goed gecontroleerd konden worden, slaat de balans door naar een negatieve beoordeling.

Een groot probleem van het ZigZag kasdek is de afdrup van condenswater. De platen zijn behandeld met een coating die ervoor moet zorgen dat het condens in een vloeiende film naar de condensafvoer stroomt, maar door de vorm van de plaat verzamelt het condens zich onderaan de rand van de ZigZag. De afstroom-capaciteit van al dat vocht is bij de gangbare dakhellingen te klein, waardoor er veel water naar beneden drupt. Dit maakt het werken in de kas in de winter zeer onaangenaam en heeft negatieve gevolgen voor de gewaskwaliteit.

4 De FiWiHEx warmtewisselaar

Inleiding

Gedurende de looptijd van het project Energieproducerende kas is de FiWiHEx warmtewisselaar tot wasdom gekomen.

De theoretische functie van de warmtewisselaar binnen het concept Energieproducerende Kas is driedelig.

De belangrijkste functie is het voorkomen dat ingevangen zonne-energie moet worden afgelucht ter voorkoming van een te hoge kasluchttemperatuur.

In tweede plaats kan de warmtewisselaar worden gebruikt om de kas te ontvochtigen zonder verlies van voelbare en latente warmte. Bij de gebruikelijke wijze van ontvochtigen van de kas worden namelijk de ramen opengezet waarbij de vochtige kaslucht wordt vervangen door drogere buitenlucht (verlies van latente warmte). Omdat de buitenlucht meestal niet alleen droger maar ook kouder is verliest de kas op zo'n moment ook voelbare warmte (vergelijkbaar met verliesfactor y_2 in Figuur 1.1).

In de derde plaats kan de warmtewisselaar goed worden gebruikt voor de verwarming van de kas. Immers, een belangrijke eigenschap van een warmtewisselaar is dat deze relatief veel verwarmingsvermogen kunnen afgeven bij een beperkte overtemperatuur van het verwarmingswater (het temperatuurverschil tussen aanvoerwatertemperatuur en de te verwarmen lucht).

Ten behoeve van de praktische realisatie van deze functies in een tuinbouw-omgeving spelen twee zaken een belangrijke rol. In de eerste plaats zijn de integratiemogelijkheden van de behuizing en het luchtverdelingspatroon van de uitgeblazen lucht van groot belang. Ten behoeve van een evenwichtige ontwikkeling van het gewas is een goede horizontale homogeniteit van belang en kunnen er duidelijke eisen aan het verticale temperatuurprofiel in het gewas worden gesteld. Hierop gaat paragraaf 4.1 dieper in.

In de tweede plaats spelen tal van overwegingen in de operationele bedrijfsvoering een rol. De warmtewisselaar gebruikt koel- en/of verwarmingswater en elektriciteit om de gestelde doelen te realiseren. Deze 'commodities' hebben een prijs en het resulterende koel-, verwarmings en/of ontvochtigingsresultaat hebben een waarde. Paragraaf 4.2 gaat uitgebreid in op de wijze waarop de verhouding tussen prijs en waarde voor de generatie FiWiHEx-en die in de Energieproducerende kas opgesteld staan geoptimaliseerd kan worden.

4.1 Ontwikkeling van de uitvoeringsvorm van de FiWiHEx

In de tussenrapportage is beschreven hoe de FiWiHEx zich heeft ontwikkeld vanaf het concept tot de eerste serie-matig geproduceerde units. Figuur 4.1 toont een foto van deze uitvoeringsvorm. Aan de voorkant zijn de verticaal geplaatste matjes zichtbaar en aan de achterkant is de dwarsstroom ventilator te zien. Een meer schetsmatige tekening is te zien in Figuur 4.3.



Figuur 4.1. Foto van de FiWiHEx warmtewisselaar die in de Energieproducerende kas is gebruikt.

De compacte en lineaire uitvoeringsvorm maakt het mogelijk dat de warmtewisselaars onder de teelttafels worden geplaatst ter hoogte van de goten (zie Figuur 2.1). Het uitblaasprofiel kan worden gekarakteriseerd als een platte 'plak' lucht zodat deze lucht goed tussen de teelttafels naar boven kan worden geblazen. De uitblaassnelheid is voldoende om de koude lucht hoog genoeg te krijgen voor de noodzakelijke horizontale verspreiding boven in de kas (zie ook hoofdstuk 5).

In het voorjaar van 2006 zijn ruim 150 van de bovengetoonde FiWiEx-en ten behoeve van de Energieproducerende kas gemaakt. Daarna is de ontwikkeling doorgezet en vanaf begin 2008 zijn er twee nieuwe uitvoeringsvormen beschikbaar. Deze zijn afgebeeld in onderstaande foto.



Figuur 4.2. Foto en schets van de nieuwste FiWiEx typen. De linker foto betreft een hangende variant die de lucht van onder aanzuigt en bovenlangs naar voren uitblaast (in de foto naar rechts). De rechter foto is een uitvoeringsvorm die op de grond wordt gezet. De lucht wordt van boven aangezogen, gaat dan door de warmtewisselaar, keert onderlangs om en wordt vervolgens opzij geblazen (in deze foto naar rechts).

Het belangrijkste verschil tussen de twee bovengetoonde uitvoeringsvormen is dat de linker bedoeld is om de kou bovenin de kas in te brengen, terwijl de rechter uitvoeringsvorm koeling van onderuit de kas realiseert. Het is op dit moment nog niet duidelijk welke wijze van koelen de beste teeltresultaten levert en bovendien is het goed denkbaar dat het ene type voor bepaalde gewassen beter uitpakt dan het andere.

Vanuit het oogpunt van de prestaties van een kas als Energieproducerende kas is er evenwel geen principieel verschil te verwachten voor de resultaten die bij koeling van onderuit of koeling van bovenaf. De energieprestatie hangt namelijk voor het overgrote deel af van de eigenschappen van de koeler/ventilator combinatie en van het gewenste teeltregime. De eigenschappen van de koeler/ventilator combinatie worden besproken in de volgende paragraaf en de effecten van het teeltregime komen aan bod in hoofdstuk 7.

4.2 Prestatie van de FiWiHex warmtewisselaar

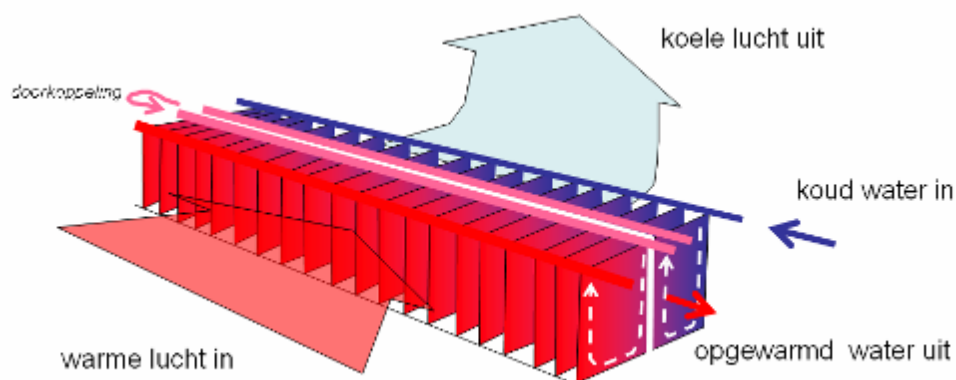
Voor de beoordeling van een warmtewisselaar zijn twee belangrijk onderscheidende factoren van belang, namelijk de effectieve warmte-overdrachtscoëfficiënt per inhoudsmaat van een unit en het elektriciteitsverbruik per eenheid warmte-overdracht. Als de beschikbare ruimte voor warmte-overdracht onbeperkt zou zijn kan vrij gemakkelijk een grote hoeveelheid warmte worden overgedragen met een klein luchtzijdig drukverlies en is het eenvoudig om met een klein elektriciteitsverbruik veel warmte over te dragen. Als apparaten echter compact gebouwd moeten worden om in de kasconstructie verwerkt te kunnen worden zal het oppervlak waar de lucht doorheen moet stromen klein zijn en het drukverlies navenant groot.

De FiWiHex warmtewisselaar is een goede realisatie van een koel- en verwarmingsunit in een kleine behuizing met een beperkte drukval, waardoor het elektriciteitsverbruik per eenheid overgedragen energie beperkt kan blijven.

In Figuur 4.3 is deze warmtewisselaar schematisch opengewerkt en ingekleurd met kleuren die de koelmodus illustreren. In de figuur is uitgebeeld dat de in Huissen gebruikte warmtewisselaar in feite uit twee blokken bestaat. Deze blokken kunnen in serie worden geschakeld, zoals in de figuur is getoond, maar de twee blokken kunnen ook ieder apart van water worden voorzien (hierover verderop meer).

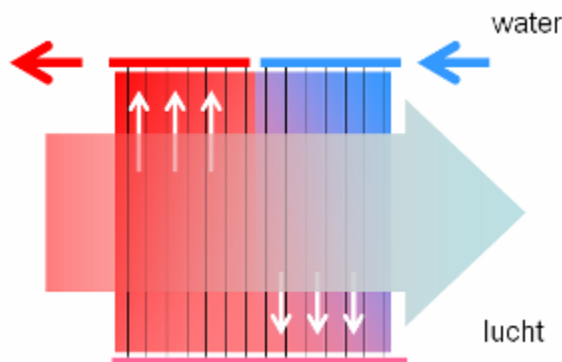
Elk blok bestaat uit twee hoofdheaders waarop 113 subheaders zijn aangesloten. De subheaders lopen in figuur 4.3 van voor naar achter en staan haaks op de dikke hoofd-headers.

Vanuit de ene helft van de subheader stroomt het water door capillairen in het matje naar beneden (aangegeven met de witte pijlen). Onderin komt het in een verzamelbuisje en stroomt het naar voren waarna het aan de voorkant van het matje weer naar boven vloeit. Bovenaan wordt het via de ander hoofdheader naar de waterzijdige uitgang van warmtewisselaar blok geleid. In Figuur 4.3 stroomt het water na passage door het achterste blok voor een tweede opwarming door het voorste blok.



Figuur 4.3. Opengewerkte schets van de in Huissen gebruikte FiWiHex warmtewisselaar.

Wanneer een enkel warmtewisselaarblok nader wordt beschouwd kan deze worden opgevat als 113 parallelle warmtewisselende oppervlakken. Al deze oppervlakken worden aan twee kanten aangestroomd met lucht en elk van die oppervlakken vormt een mengvorm van een kruisstroom en tegenstroom warmtewisselaar. Dit is uitgebeeld in Figuur 4.4

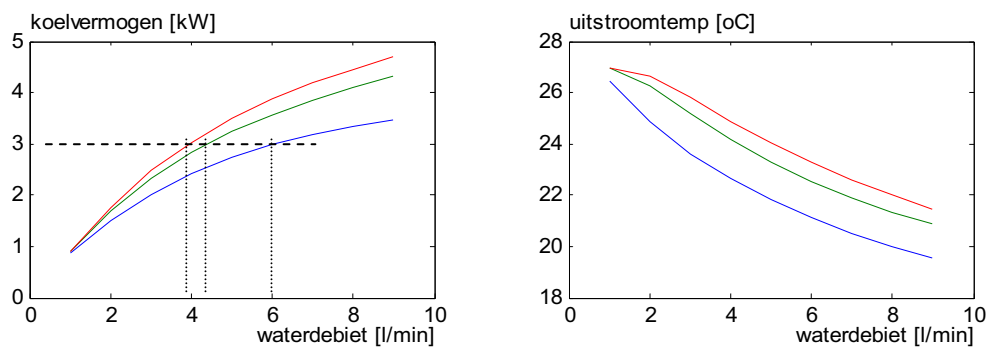


Figuur 4.4. Een enkel FiWiHEX-matje wat wordt gekoeld door het koelwater en wordt opgewarmd door de langstroomende lucht.

Met de bovengetoonde schetsen van de werking van de FiWiHEX is het logisch dat de opwarming van het water en de afkoeling van de lucht afhankelijk is van de onderlinge verhouding van de water- en luchtdebieten en van de warmte-overdracht aan en door het matjesoppervlak. Als het water relatief hard stroomt ten opzichte van de lucht zal het water maar weinig in temperatuur stijgen en de lucht sterk in temperatuur dalen. Omgekeerd zal bij een relatief hoge luchtsnelheid vooral de watertemperatuur veranderen. Bij gebruik van een warmtewisselaar zal dus langs één of andere weg een strategie moeten worden bepaald die aangeeft welke verhouding van lucht- en waterdebiet tot de gunstigste werking leidt. Bij aanvang van het experiment kon deze optimale bedrijfsvoering van de warmtewisselaars nog niet bepaald worden omdat de precieze karakteristieken van de warmtewisselaar en de ventilator die de lucht door de warmtewisselaar blaast nog onbekend waren.

Als onderdeel van de bestudering van het verloop van warmte-overdracht van de wisselaars is het overdrachtsproces van de gemiddelde FiWiHEX gekarakteriseerd en is er informatie over het elektriciteitsverbruik dat gemoeid is met het rondpompen van water en lucht beschikbaar gekomen. Voor de karakterisering van het overdrachtsproces is een simulatiemodel ontwikkeld dat is beschreven in de Zwart en Kempkes (2007).

Onderstaande grafiek toont het verband tussen de koelcapaciteit van 1 FiWiHEX met doorgekoppelde warmtewisselaar blokken (zoals in Figuur 4.3) als functie van waterdebiet en luchtdebiet bij kasluchtcondities die typerend zijn voor koelsituaties in de Energieproducerende kas.

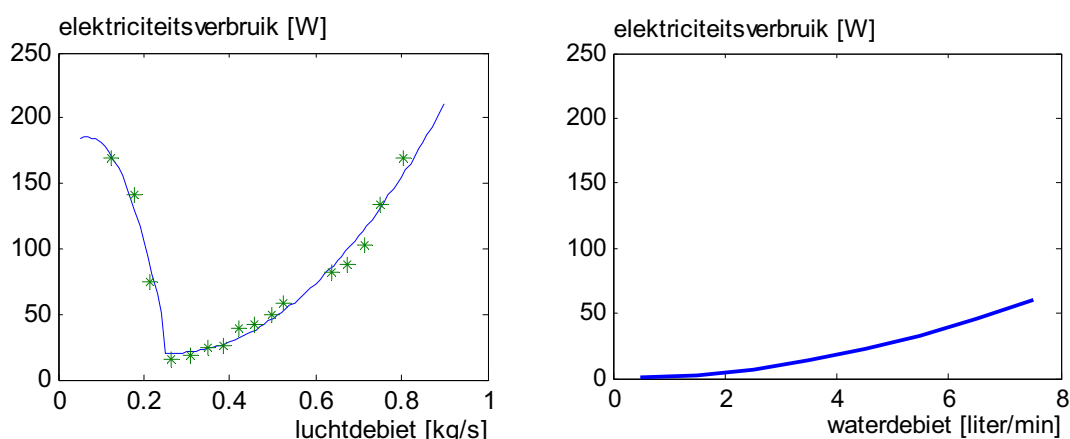


Figuur 4.5. Koelcapaciteit van een Huissense FiWiHEX warmtewisselaar bij een ingaande watertemperatuur van 12 °C, en een kasluchttemperatuur van 27 °C met een relatieve luchtvochtigheid van 85%. De rode lijnen gelden bij een luchtdebiet van 0.75 kg/s, de groene lijnen bij 0.5 kg/s en de blauwe lijnen bij 0.25 kg/s.

Figuur 4.5 illustreert dat wanneer er bijvoorbeeld een koelvermogen van 3 kW gewenst wordt (dat is bij de in de Energieproducerende kas toegepaste dichtheid van FiWiHEX per 20 m² een kolecapaciteit van 150 W/m²) dit kan worden gerealiseerd met een waterdebiet tussen de 3.9 en 6 liter per minuut, afhankelijk van het gebruikte luchtdebiet. De uitstroomtemperatuur varieert daarbij tussen 25 en 21 °C.

Om een antwoord te krijgen op de vraag welk water en luchtdebiet er vanuit energiegebruiks-oogpunt gekozen moet worden moeten de consequenties van deze keuzes gekwantificeerd worden. Dit kan door de het elektriciteitsverbruik van de pompen en ventilatoren bij deze afweging te betrekken.

Figuur 4.6 toont het elektrisch vermogen dat de ventilatoren in de Energieproducerende kas opnemen als functie van het geleverde luchtdebiet.



Figuur 4.6. In Huissen gemeten relaties tussen het luchtdebiet en het elektriciteitsverbruik van de FiWiHEX ventilator en het waterdebiet door het koelcircuit en het elektriciteitsverbruik van de pompen.

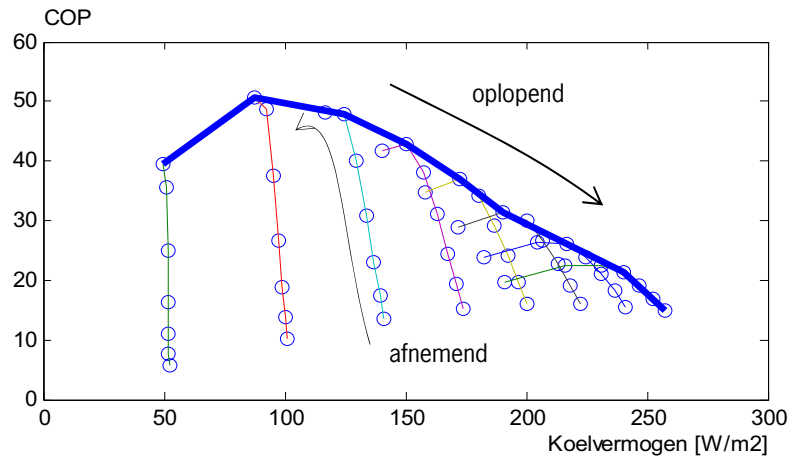
Figuur 4.6 laat direct zien dat het verpompen van water met de installatie van de Energieproducerende kas aanzienlijk minder elektriciteit kost dan het rondblazen van lucht. Het koelvermogen van 150 W/m² dat in de bespreking van Figuur 4.5 als voorbeeld genoemd werd kan dus voordeliger bij het debiet van 6 liter per minuut worden gerealiseerd dan bij een waterdebiet van 4 liter per minuut en een hoger luchtdebiet. Bij het debiet van 6 liter per minuut moet er in totaal 60 W elektriciteit worden gespendeerd aan een koelvermogen van 3 kW. Als het elektriciteitsverbruik wordt gedeeld door het koelvermogen blijkt dat de effectieve koel-COP van de installatie in dit specifieke voorbeeld 50 bedraagt.

4.2.1 Koeling in de Energieproducerende Kas

In de praktische situatie van de Energieproducerende Kas bij Hydro Huisman staat voor elke 20 m² een FiWiHEX warmtewisselaar opgesteld. Met de karakteristieken die voor de kas bepaald zijn kan voor elke combinatie van waterdebiet en luchtdebiet berekend worden wat het koelvermogen is dat in dat geval gerealiseerd kan worden en welk aquiferdebiet daarbij hoort (bij een symmetrisch temperatuurverlies over de warmtewisselaar is het aquiferdebiet gelijk aan debiet dat door de FiWiHEX stroomt). Door voor al deze combinaties het gerealiseerde koelvermogen te delen door het elektriciteitsverbruik van de pompen en de ventilator wordt de onderstaande grafiek verkregen (Figuur 4.7).

De grafiek laat zien dat bij lage koelvermogens voor het laagst mogelijke ventilatordebiet moet worden gekozen. Pas bij hogere koelvermogens (bij gebruik van 1 FiWiHEX per 20 m² treedt dit op bij koelvermogens groter dan 150 W/m²) ontstaan er curves waaruit blijkt dat de keus voor water of lucht wat minder scherp komt te liggen.

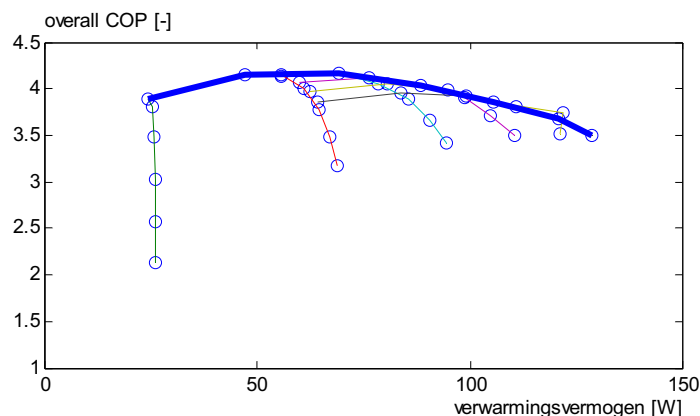
De conclusie die uit de grafiek getrokken kan worden is dat de installatie bij Hydro Huisman, waar de koelbehoefte meestal tussen de 150 en 200 W/m² ligt op die momenten koelt met een overall koel-COP die rond de 30 ligt maar dat bij grotere koelbehoefte de COP diep wegzakt.



Figuur 4.7. Effectieve koel-COP van de complete installatie bij Hydro Huisman (dus koelvermogen per eenheid elektrisch vermogen voor ventilator, circulatiepompen, en aquiferpompen). De aanvoerwatertemperatuur is 12 °C en de kasluchttemperatuur is 27 °C bij een RV van 85%.

4.2.2 Verwarming in de Energieproducerende Kas

Op vergelijkbare manier als ter bepaling van de overall COP van de koeling kan er ook een overall COP voor de verwarming worden bepaald. Tijdens de verwarming wordt er echter niet alleen elektriciteit gespendeerd aan het circuleren van lucht en water, maar wordt er vooral elektriciteit verbruikt door de warmtepomp die het water van gemiddeld 14 tot 15 °C (zie hoofdstuk 6) op een hoger temperatuurniveau brengt zodat de kas met water van 30 °C verwarmd kan worden. (In het installatieschema van Figuur 2.7 is te zien dat de warmtepomp het water daarvoor op een nog wat hogere temperatuur moet brengen omdat de warmte moet worden overgedragen via een scheidingsswisselaar (TSA 3)). De warmtepomp werkt met een COP van ongeveer 5, maar omdat er ook elektriciteit verbruikt wordt door de pompen en de ventilator komt de overall COP daar altijd een stuk onder te liggen.



Figuur 4.8. Overall COP van de complete installatie bij Hydro Huisman tijdens verwarmen (dus verwarmingsvermogen per eenheid elektrisch vermogen voor warmtepomp, ventilator, circulatiepompen, en aquiferpompen). De aanvoerwatertemperatuur is 30 °C en de kasluchttemperatuur is 20 °C.

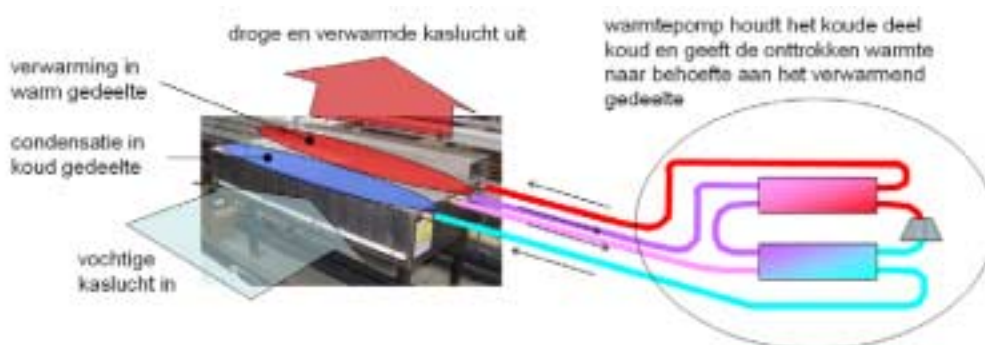
Aangezien het verwarmingsvermogen voor de Energieproducerende kas zelden boven de 100 W/m^2 uitkomt kan uit Figuur 4.8 worden geconcludeerd dat de COP tijdens verwarmen rond de 4 ligt.

4.2.3 Ontvochtigen met warmteterugwinning

Het komt in de winter regelmatig voor dat er een overmaat aan vocht in de kaslucht is terwijl er geen koelbehoefte is. In gangbare kassen worden op die momenten de ramen geopend om het overtollige vocht af te voeren. Hierbij gaat niet alleen voelbare warmte verloren, maar ook latente warmte die vrij had kunnen komen wanneer het vocht op een warmtewisselaar zou zijn gecondenseerd. Om dit overtollig vocht af te voeren zonder warmteverlies zijn de FiWiHex warmtewisselaars in de Energieproducerende Kas uitgerust met een dubbel koelblok.

Als nu het eerste blok van de koeler door middel van de warmtepomp koud gemaakt wordt en de (ongewenste) afkoeling van de lucht vervolgens weer met het tweede blok wordt naverwarmd kan de kaslucht worden ontvochtigd zonder de eerder genoemde verliesposten.

Een schematisch overzicht van de werking hiervan staat in onderstaande plaatje



Figuur 4.9. Principeschema van het ontvochtigen met warmteterugwinning door het voorste blok van de FiWiHex koud te maken en het achterste blok te laten verwarmen. De warmtepomp gebruikt de latente warmte die aan het vocht onttrokken is voor de verwarming.

Met de inmiddels bekende karakteristieken van de FiWiHex blokken kan de werking van dit mechanisme nauwkeurig worden doorgerekend.

De ontvochtiging moet gemiddeld genomen plaatsvinden bij een kasluchttemperatuur van 20°C en een luchtvochtigheid van 88% RV (een RV van 90% wordt in de teelt van Hydro Huisman nog net geaccepteerd). Het is bekend dat ontvochtiging met een goede voelbaar/latent verhouding kan plaatsvinden bij water van ongeveer 12°C , dus laten we aannemen dat er water met 10°C in het koude blok stroomt. De vochtafvoer uit de weinig verdampende potplantenkas zal in de regel niet zo groot zijn (10 tot $30 \text{ gr/(m}^2 \text{ uur)}$), dus gaan we in dit rekenvoorbeeld uit van een luchtdebiet van 0.3 kg per seconde. Lagere debieten zijn gegeven de karakteristieken van de ventilatoren in de Energieproducerende Kas zeer inefficiënt (zie Figuur 4.6). Onderstaande grafiek laat het ontvochtigingsvermogen door het condenserende blok zien als functie van het waterdebiet. Doordat de kaslucht van 20 graden door zo'n koud blok wordt geblazen koelt de lucht af. Deze afkoeling is natuurlijk groter naarmate het koude water harder door het ontvochtigende blok stroomt. In Figuur 4.10 is aangegeven dat de lucht 1°C afkoelt als er $10 \text{ gram/(m}^2 \text{ uur)}$ wordt ontvochtigd en 1.4°C afkoelt als er 30 gram wordt ontvochtigd.

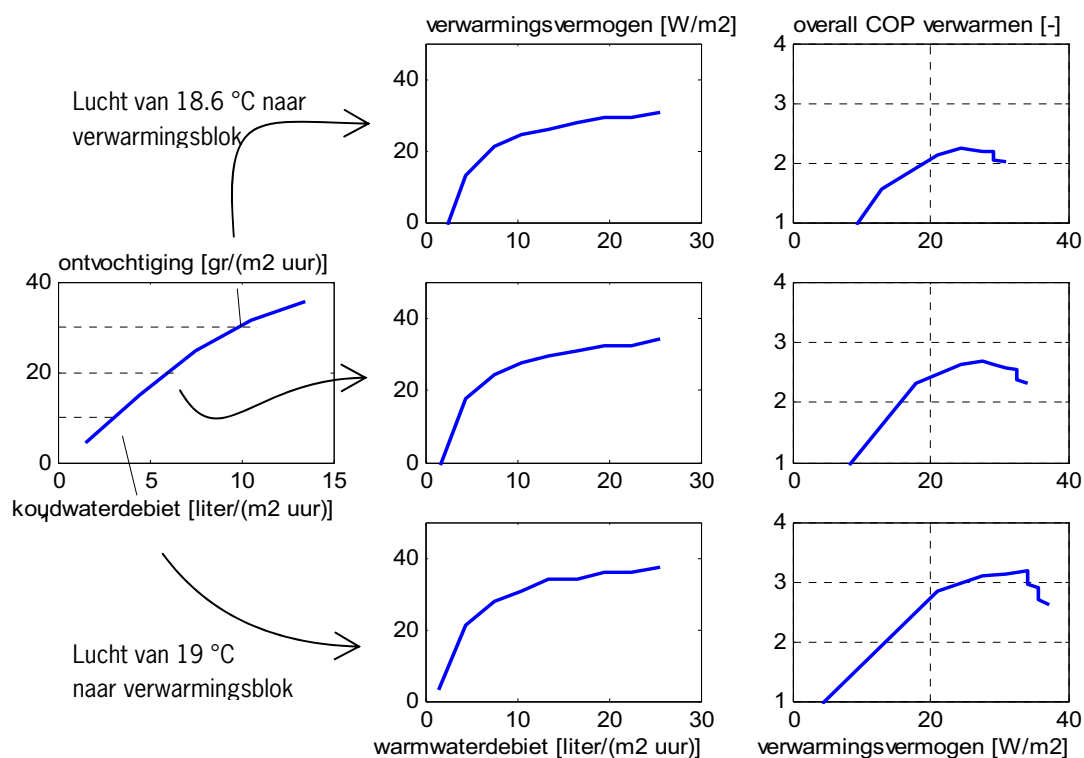
In alle gevallen is het voelbare warmteverlies een onbedoeld effect, wat weer gecompenseerd zal moeten worden. Omdat in de Energieproducerende Kas de verwarming plaatsvindt met water van 30°C kan het verwarmingsvermogen dat middels het tweede blok wordt toegediend alleen door middel van het waterdebiet worden geregeld (de aanvoertemperatuur en het luchtdebiet liggen tijdens de ontvochtiging immers vast). Als het verwarmingswaterdebiet klein is is de toegevoegde verwarming klein, en bij een hoge ontvochtiging zelfs negatief.

Uit Figuur 4.10 kan worden afgelezen dat als er bijvoorbeeld 20 gram per m^2 per uur ontvochtigd moet worden en de kas daarnaast met 30 W/m^2 verwarmd moet worden (dus als het buiten 's nachts een graad of 12 is) er een waterdebiet van 6 liter per m^2 per uur door het voorste blok moeten worden gepompt en een waterdebiet van 15 liter per m^2 per uur door het tweede blok. Voor de realisatie van dit verwarmingsvermogen met ontvochtigde lucht was kennelijk 11 W/m^2 elektriciteit nodig want in de laatste grafiek op de middelste rij blijkt dat de verwarming met een COP van 2.7 gerealiseerd wordt.

Op het eerste gezicht lijkt deze COP veel ongunstiger dan de COP van ongeveer 4 die bij een verwarmingsvermogen van 30 W uit Figuur 4.8 kan worden afgelezen. Echter, als de kas niet op deze manier zou worden ontvochtigd dan zouden de ramen moeten worden opgezet en zou er 3 m^3 buitenlucht per m^2 per uur moeten worden uitgewisseld. Deze buitenlucht zou dan 8°C moeten worden opgewarmd, waar bijna 9 W stookenergie aan moet worden gespendeerd.

Verwarming met 30 W/m^2 ontvochtigde lucht moet dus worden vergeleken met 39 W/m^2 verwarming met niet-ontvochtigde lucht. De conclusie blijft evenwel dat de Energieproducerende Kas in geval de ramen zouden worden opgezet om deze 20 gram per m^2 vocht af te voeren minder elektriciteit gebruikt (namelijk $39/4 \approx 10 \text{ W/m}^2$) dan wanneer er met ontvochtigde lucht wordt gewerkt.

Wanneer soortgelijke berekeningen worden gemaakt bij wat kleinere ontvochtigingsbehoeften en op momenten dat het minder koud is blijkt telkens dat het elektriciteitsverbruik van de Energieproducerende Kas lager wordt indien er met luchtramen wordt ontvochtigd dan wanneer er mechanisch wordt ontvochtigd tijdens de periode met een warmtevraag. De combinatie van deze analyse en het feit dat de ontvochtiging-met-warmteterugwinning in de praktische situatie voor veel extra problemen zorgde (instabiliteit van de regeling met grote temperatuur-fluctuaties tot gevolg) maakte dat in het voorjaar van 2007 besloten is over te stappen op ontvochtigen door het openen van de ramen.



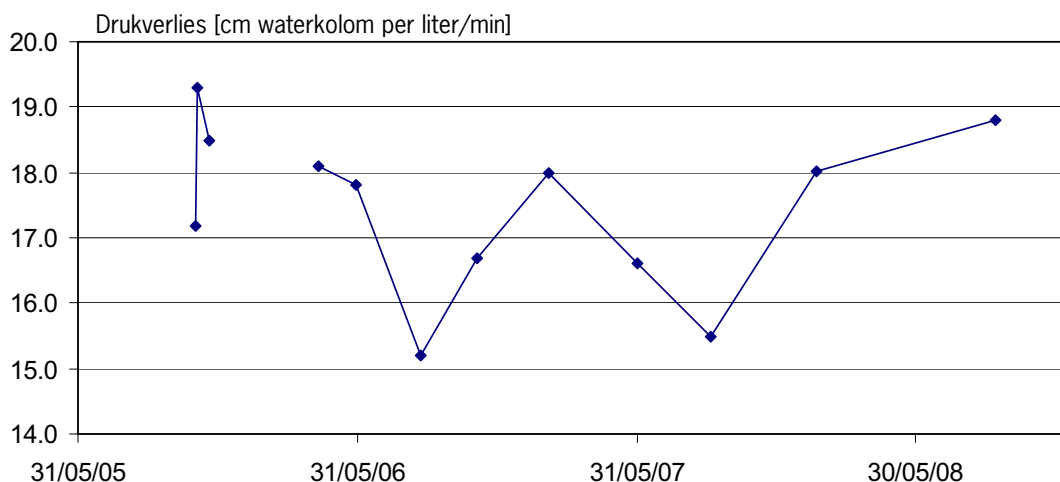
Figuur 4.10. Illustratie van de werking van de ontvochtiging met warmteterugwinning. In het voorste blok wordt vocht aan de kaslucht onttrokken. De ontvochtiging is groter naarmate het waterdebiet toeneemt. (Het koude water wordt aangeboden op 12°C). Bij het ontvochtigen koelt de lucht af en deze afkoeling is meer naarmate er meer ontvochtigd wordt. Het tweede blok kan weer warmte toevoegen door warm water te laten circuleren. De temperatuur van dit verwarmingswater is gesteld op 30°C . Tenslotte kan door deling van het uiteindelijke verwarmingsvermogen door het totale elektriciteitsverbruik een COP worden berekend voor het verwarmen met ontvochtigde lucht.

4.2.4 Ervaringen met de duurproef aan de FiWiHEX warmtewisselaar die op direct aquiferwater is aangesloten.

In het begin van het project Energieproducerende Kas is sprake geweest van het gebruik van de FiWiHEX warmtewisselaars zonder scheidingsswisselaar tussen aquifer en kas. Om vergunningstechnische redenen is daar bij de uiteindelijke bouw van afgezien, maar omdat de 1.5 °C temperatuurverlies over de warmtewisselaar de COP voor het koelen toch ruim 10 punten lager maakt (de COP-curve in Figuur 4.7 komt bij 200 W/m² op 37 in plaats van op 27 zoals in de huidige installatie het geval is) was dit punt voldoende relevant om in een duurtest te bekijken of de FiWiHEX in principe ook zonder scheidingsswisselaar zou zijn blijven functioneren.

Daarom is in de kelder van het Technotron gebouw van WUR Agrotechnology & Food Innovations een FiWiHEX warmtewisselaar uit de allereerste serie (zomer 2005) ruim drie jaar beproefd door er met een aan/uit schema water dat direct uit een aquifer komt doorheen te pompen.

Van tijd tot tijd is hier de drukval bij het toegepaste waterdebiet (3 liter per minuut) opgenomen. De drukval blijkt in de tijd nogal te variëren. Als er door de punten die in de afgelopen 3 jaar verzameld zijn een lijn wordt getrokken zou men kunnen spreken van een gering stijgende trend.



Figuur 4.11. Ontwikkeling van het drukverlies over een FiWiHEX die met direct aquiferwater wordt doorstroomd.

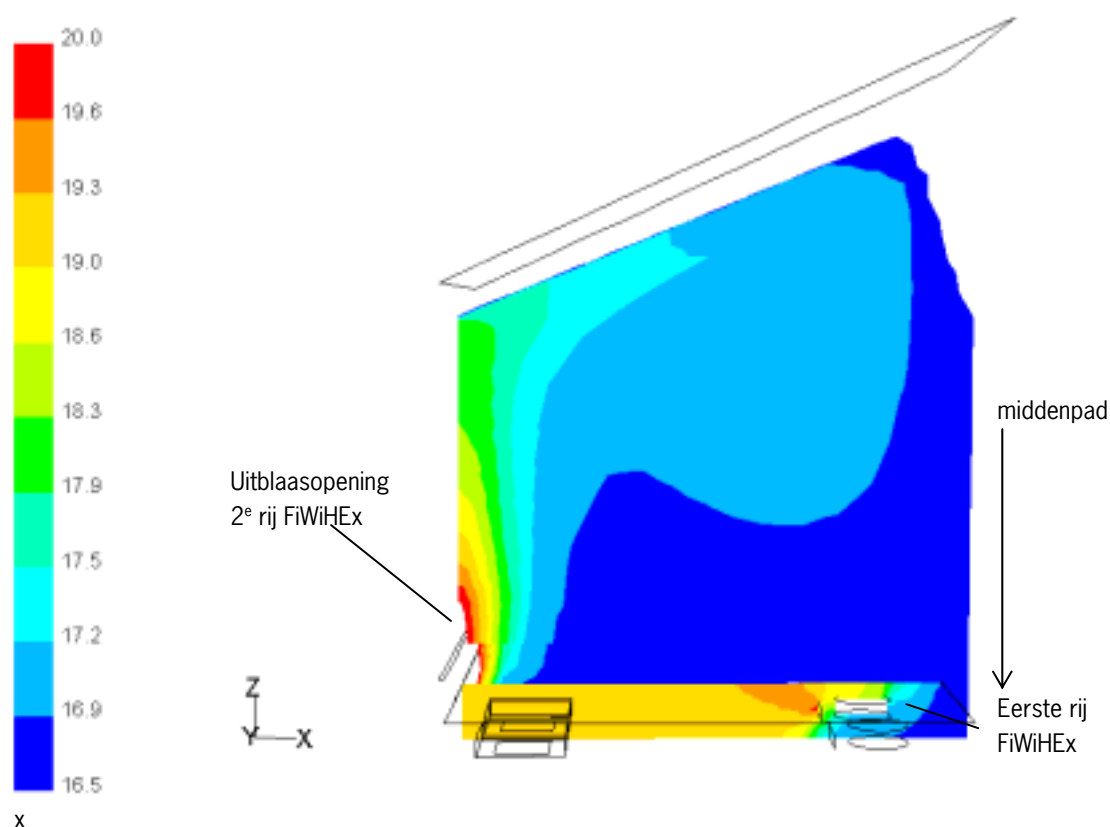
Het experiment met de directe doorstroming van een FiWiHEX met aquiferwater levert kennelijk geen problemen op met een langzame verstopping, althans niet met de waterkwaliteit die onderaan het Veluwemassief wordt aangetroffen.

Het blijft echter dat op dit moment de wetgeving rond het gebruik van aquifer simpelweg eist dat het aquiferwater gescheiden wordt van het systeemwater en dat in die zin het uitgevoerde experiment een zeer theoretisch karakter heeft.

5 Homogeniteit van de kasluchttemperatuur

Bij de formulering van het project Energieproducerende kas is een uitgebreide CFD-studie² gemaakt van de te verwachten homogeniteit van de kaslucht (Campen, 2005). Voor de tuinbouw is het namelijk vanuit beheersmatig oogpunt van groot belang dat temperaturen homogeen verdeeld zijn over de kas.

In de toenmalig opgestelde rapportage werd geconcludeerd dat op gewashoogte slechts kleine verschillen te verwachten waren. Figuur 5.1 is uit het bovengenoemde rapport overgenomen en laat zien dat bij het verwarmen van de kas alleen vlak bij de uitblaasopeningen grote temperatuurgradiënten zullen optreden.



Figuur 5.1. Verwachte temperatuurverdeling in de kas tijdens verwarmen.

De figuur laat zien dat over het grootste deel van de tafel het temperatuurverschil rond de 0.5 °C ligt.

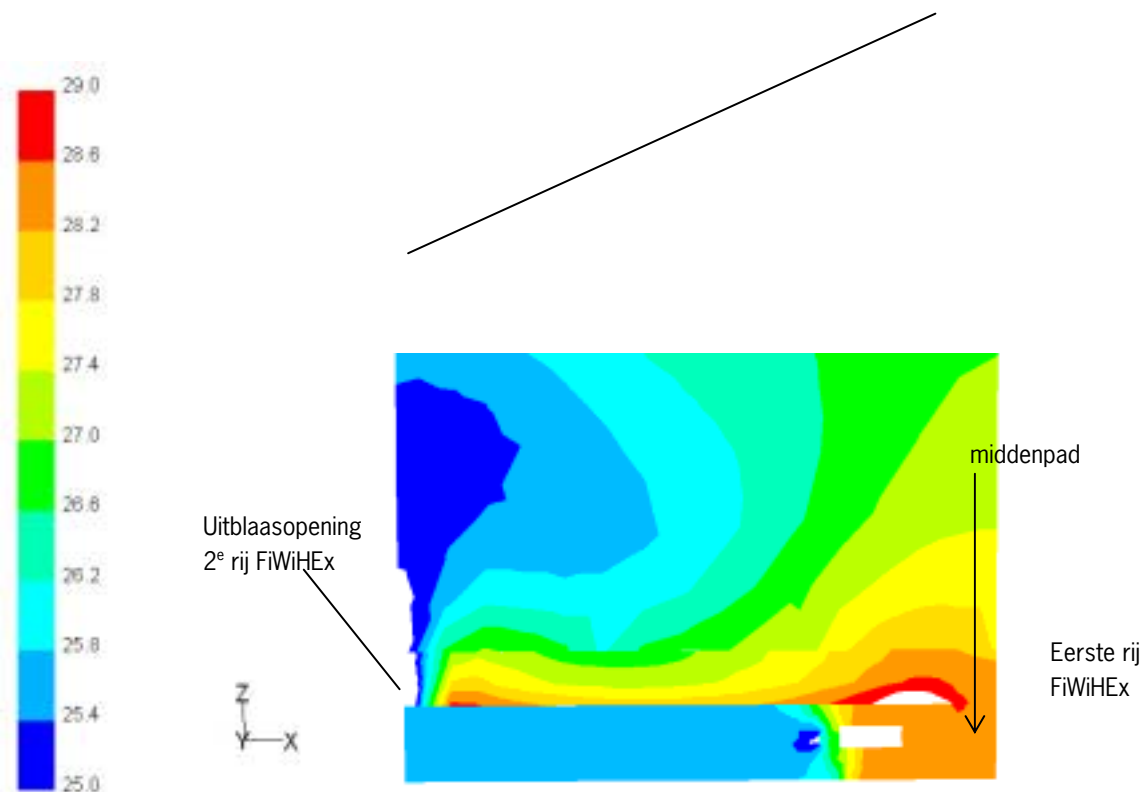
Opvallend in de figuur is dat er 2 rijen FiWiHEX-en zijn getekend (de ronde vorm aan de rechterkant en de vierkante vorm aan de linkerkant). In de periode waarin deze verkennende CFD-studies voor de Energieproducerende kas zijn gemaakt was er namelijk nog sprake van de ronde uitvoeringsvorm van de FiWiHEX warmtewisselaars. Ook werd er toen vanuit gegaan dat er twee typen FiWiHEX-en zouden worden gebruikt, namelijk één met een voorwaarts gerichte uitblaasmond en één met een naar boven gerichte uitblaasopening. De verwarming van de kaslucht zou dan in twee stappen hebben plaatsgevonden. De figuur laat zien dat de eerste rij FiWiHEX-en (rechts) de lucht van 16.5 °C naar 19 °C verwarmt en de tweede rij de opwarming doorzet (tot naar 24 °C, als een wit vlak aangegeven omdat de kleurschaal tot 20 °C loopt).

² CFD = Computational Fluid Dynamics

De lay-out van het systeem waarvoor de CFD-berekeningen zijn gemaakt is dus wat afwijkend ten opzichte van de uiteindelijke uitvoering maar het uitblaasprofiel in de modelberekeningen is overeenkomstig. De behandelde lucht komt als een opwaarts gerichte 'plak' lucht naar boven en waaiert op ruime hoogte boven het gewas uit.

Figuur 5.1 illustreert overigens ook dat destijds werd uitgegaan van een stooktemperatuur die rond de 17 °C zou liggen. De verwarming zou in dat geval plaats hebben gevonden met lucht van 24 °C.

In hetzelfde rapport zijn ook CFD-berekeningen gemaakt voor de verwachte situatie tijdens het koelen van de kas (zie Figuur 5.2). Omdat de energiebelasting op het kasvolume tijdens de zomer veel groter is dan in de winter zijn de temperatuurverschillen tussen de verschillende gebieden in de kasruimte groter dan in de winter, maar de horizontale verdeling op enige hoogte boven het gewas is ook hier erg homogeen.



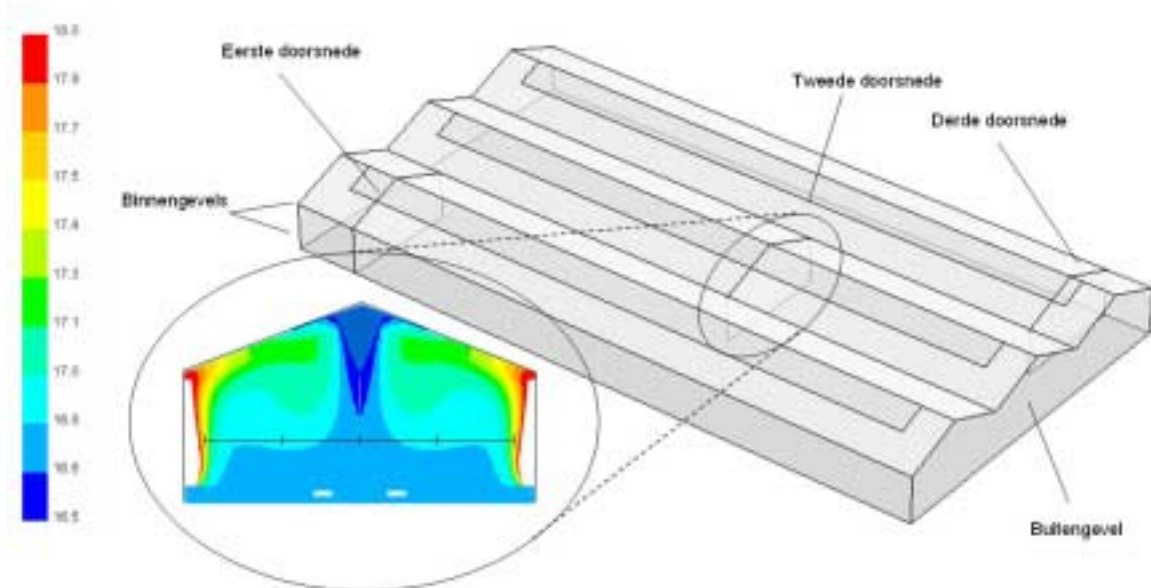
Figuur 5.2. Verwachte temperatuurverdeling in de kas tijdens koelen.

De figuur laat zien dat de energie vrijkomt in het gewas dat op de tafel staat en dat deze warme lucht vanuit het middenpad onder de tafel door gezogen wordt. Ook hier is weer het 2-traps proces te zien. Er is een sterke gradiënt aan het begin onder de tafel. De eerste koelers koelen de lucht van ruim 28 °C af naar 25.6 °C en de tweede rij koelt de lucht verder terug naar 23 °C (dus als witte vlek getekend door het CFD-programma omdat deze lager is dan de onderkant van de kleurschaal).

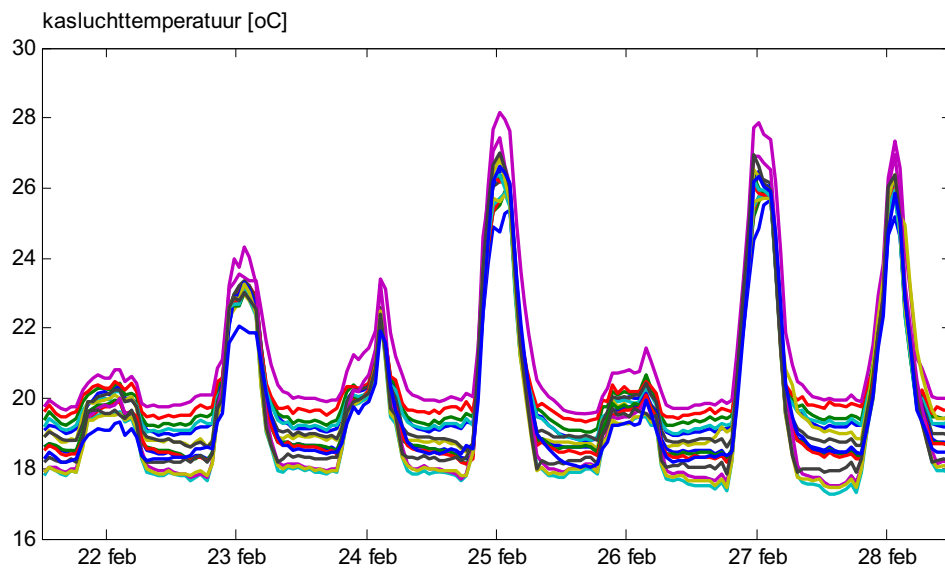
Om de verwachtingen die indertijd werden ontleend aan de verkennende CFD-berekeningen te kunnen verifiëren zijn er in de Energieproducerende kas 15 temperatuursensoren, verdeeld over drie doorsneden, opgehangen. Figuur 5.3 laat de situering van deze drie doorsneden zien. Ze zijn in een soort diagonaal over de kas gelegd.

De meetinstrumenten zijn overal op 1.5 meter boven de tafels gemonteerd, zodat ze net boven de toppen van de hoogste potplanten hingen.

Met deze sensoren is twee keer een aaneengesloten periode van een maand gemeten. In Figuur 5.4 zijn de meetwaarden van alle 15 sensoren over een week getoond. De temperatuurverschillen tussen de verschillende locaties komen tot uiting doordat er een band van temperaturen te zien is.



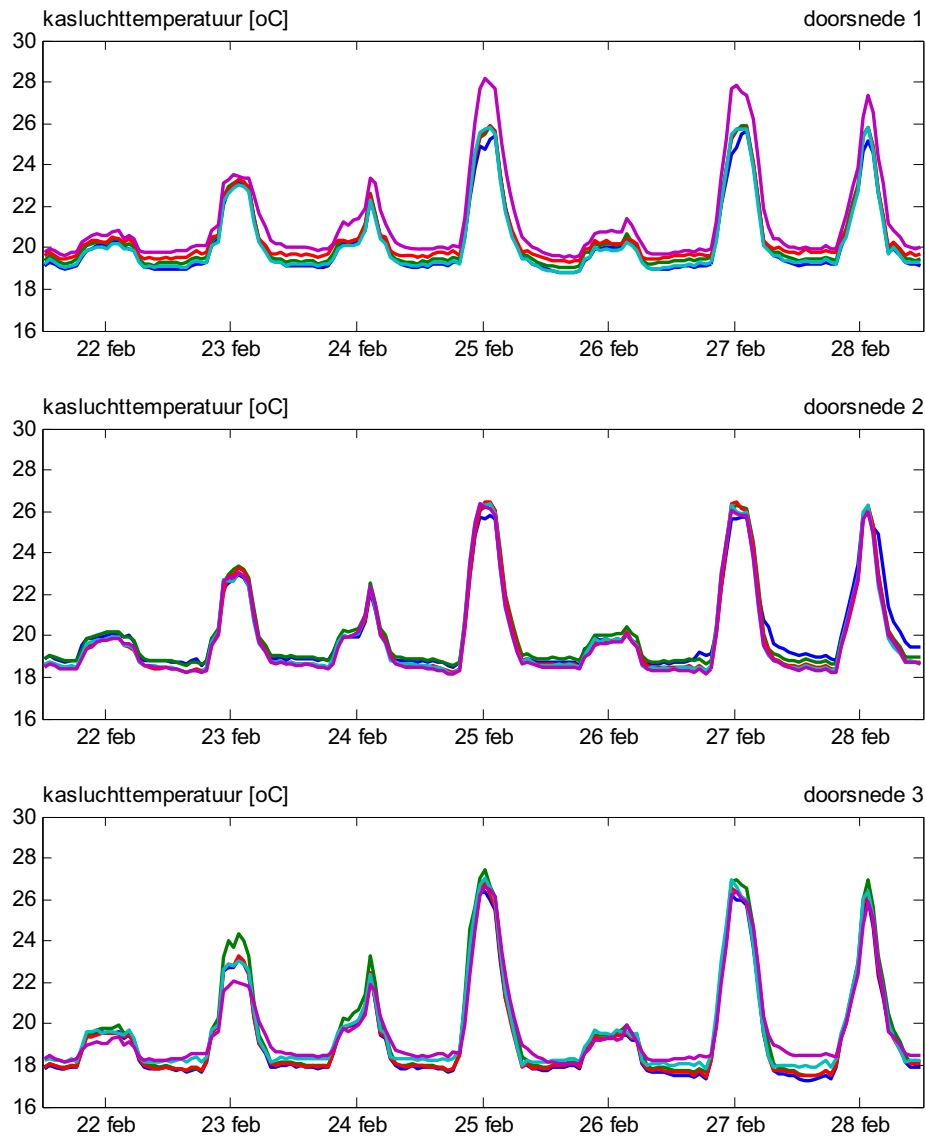
Figuur 5.3. Lokalisering van de drie doorsneden waarin de horizontale temperatuurverdeling op gewashoogte is gesitueerd. De sensoren hangen op de in de uitsnede getoonde lijn.



Figuur 5.4. Verloop van de 15 temperaturen in de periode van 22 tot en met 28 februari 2008.

In vergelijking met andere datasets uit de praktijk is de horizontale variatie die wordt aangetroffen niet klein. Over een wat langere perioden worden de verschillen echter behoorlijk uitgemiddeld. Het verschil tussen de warmst en koudste weekgemiddelde temperatuur in de hierboven getoonde grafiek bedraagt 1.8 °C.

In eerste instantie lijken de bovenbeschreven waarnemingen er op te duiden dat de horizontale variatie in de praktijk veel groter is dan de CFD-berekeningen deden vermoeden. Het beeld wordt echter anders wanneer er wordt gekeken naar het verloop van de temperaturen binnen de drie doorsneden. Dit is afgebeeld in Figuur 5.5.



Figuur 5.5. Verloop van de 5 temperaturen die per doorsnede gemeten zijn in de periode van 22 tot en met 28 februari 2008.

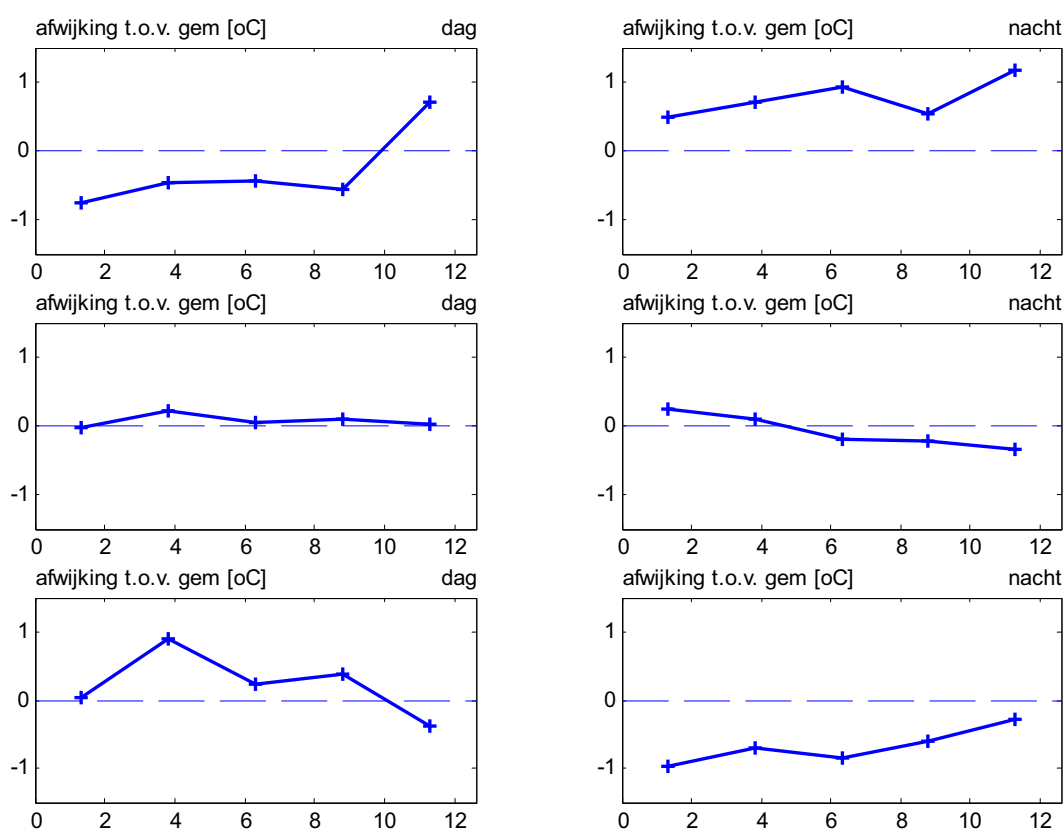
Bij vergelijking tussen de grafiek van Figuur 5.4 en de grafieken van Figuur 5.5 blijkt dat de brede temperatuurband vooral ontstaat door verschillen tussen de doorsneden en niet door verschillen binnen de doorsneden.

Een interessant resultaat komt ook naar voren in het verloop van de temperatuur overdag op 23 februari in doorsnede 3 in vergelijking met de andere doorsneden. De gemiddelde kasluchttemperatuur is boven de 20 °C, maar onder de 26 °C zodat op die dag de FiWiHEX-en uit stonden. Het is duidelijk dat in die momenten de spontaan

optredende temperatuurverschillen (bijvoorbeeld door verschillen in lichtintensiteit, verschillen in verdamping of verschillen in absorptie van zonlicht) niet door de luchtbeweging vereffend worden.

Figuur 5.6 laat het gemiddelde temperatuurprofiel in de drie doorsneden zien, uitgesplitst naar de nacht- en de dagperiode. De temperaturen zijn uitgedrukt ten opzichte van de algemeen gemiddelde temperatuur in de kas. De grafieken laten zien dat de variatie binnen de doorsneden meestal minder dan $\pm 0.5\text{ °C}$ bedragen. Verder valt op dat de eerste doorsnede 's nachts wat warmer is dan de tweede doorsnede en overdag wat kouder. De derde doorsnede is juist overdag wat warmer en 's nachts wat kouder.

Dit soort verschillen kunnen veroorzaakt worden door een wat grotere warmte- en koudeuitwisseling bij de 1^e doorsnede dan bij de 3^e doorsnede (de gemiddelde doorstroming van water door de FiWiHEx-blokken is bij doorsnede 1 bijvoorbeeld wat groter dan ter hoogte van doorsnede 3). In perioden waarin zowel gekoeld als verwarmd wordt (zoals in februari 2008) vallen de effecten van de wat kleinere overdracht tegen elkaar weg.



Figuur 5.6. Gemiddelde afwijking van de 5 temperaturen die per doorsnede zijn gevolgd ten opzichten van de algemeen gemiddelde kasluchttemperatuur, uitgesplitst naar de dagsituatie (links) en de nachtsituatie (rechts) in februari 2008.

De verschillen over de drie doorsneden geven aan dat de homogeniteit voldoet aan de eis die ten aanzien van de homogeniteit van de kasluchttemperatuur bij de groenlabel-certificering wordt gesteld, namelijk dat het verschil tussen de warmste en koudste plek in de kas niet meer dan 2 °C ($\pm 0.5\text{ °C}$) mag zijn. Het feit dat dit een expliciete eis is geeft al aan dat het een serieuze prestatie is om deze homogeniteit te realiseren. De horizontale temperatuurverdeling in de Energieproducerende Kas kan zich op dit punt dus goed meten met de moderne standaards.

6 Energieverzameling, opslag en gebruik

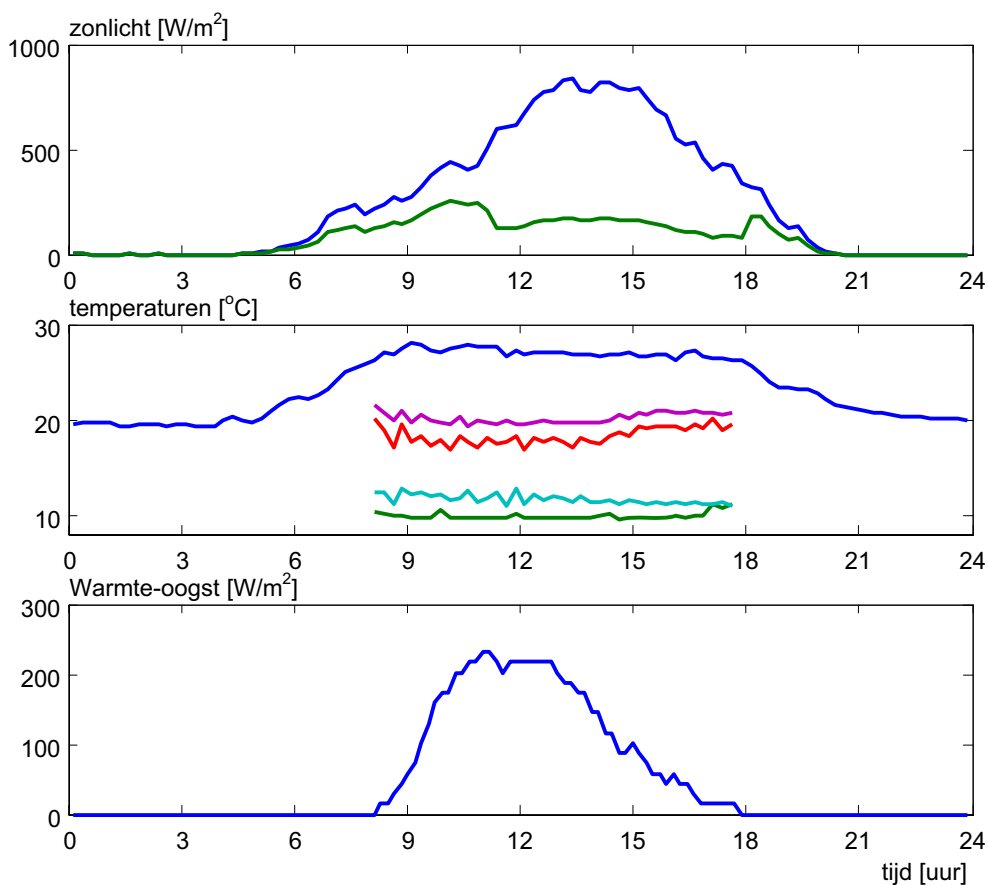
De hoofdgedachte achter het onderzoeksproject Energieproducerende Kas is de verzameling van overtollige zomerse zonne-energie ten behoeve van de benutting daarvan in koudere perioden. Het meest gecompliceerde onderdeel daarvan is de onttrekking van de warmte aan de kaslucht omdat de warmte moet worden onttrokken aan een laagwaardige energiedrager (kaslucht tussen de 27 en 30 °C).

In dit hoofdstuk wordt getoond welke prestatie er op dit punt met de installatie bij Hydro Huisman gerealiseerd is en hoe deze warmte is opgeslagen in en onttrokken aan de aquifer.

Het hoofdstuk wordt afgesloten met de overall energie-analyse van de installatie en de conclusies die daaruit getrokken kunnen worden.

6.1 Warmteoogst

Als in de zomer de zon doorkomt stijgt de temperatuur in de kas en gaan de FiWiHEX warmtewisselaars op een gegeven moment de overtollige warmte aan de kas onttrekken. In onderstaande serie grafieken wordt dit getoond voor een warme dag (25 juli 2007).



Figuur 6.1. Zonlicht aanbod, temperaturen en warmteoogst op een lichtrijke dag in de zomer van 2007.

Uit de figuur worden een aantal zaken direct duidelijk. In de eerste plaats moet de hoeveelheid zonlicht boven een drempel komen alvorens de kasluchttemperatuur zo hoog wordt dat er een koelbehoefte ontstaat. Op deze dag lag die drempel op ongeveer 250 W/m^2 , maar deze drempel wordt natuurlijk ook bepaald door de buitentemperatuur. Hoe kouder het buiten is, hoe hoger deze drempel komt te liggen. In de tweede plaats valt de plotselinge daling van de stralingsintensiteit in de kas die om 11:00 intreedt op. Deze scherpe daling wordt veroorzaakt door het sluiten van het schaduw scherm, waardoor er zonlicht uit de kas weggeschermd wordt. De vermindering van het stralingsaanbod in de kas is ook terug te zien op de grafiek van de warmteoogst. Precies samenvallend met de scherm-sluiting zakt de warmteoogst iets in.

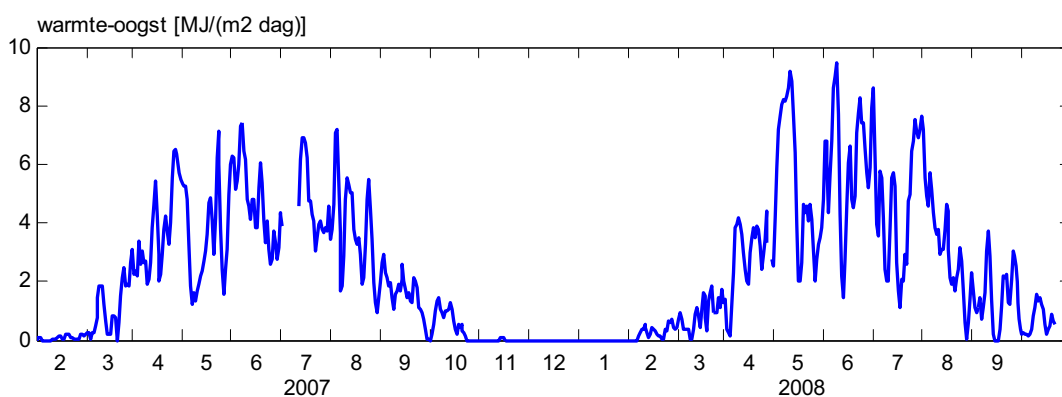
Een volgende conclusie die uit de grafieken kan worden getrokken is dat het schaduw scherm behalve de reflectie van zonlicht ook een aanzienlijke hoeveelheid zonlicht absorbeert. Dit kan worden afgeleid uit het feit dat de stralingsintensiteit van het zonlicht in de kas de hele dag iets onder de 200 W/m^2 blijft, terwijl de warmteoogst tussen 11:00 en 14:00 rond de 220 W/m^2 ligt. Dit kan alleen als het schaduw scherm als een soort warm 'plafond' werkt.

Het middelste plaatje laat zien dat als de FiWiHEX-en in werking zijn, het koelwater van 12°C naar 20°C wordt opgewarmd. Bij de warmtewisseling in de centrale warmtewisselaar (TSA 2 in Figuur 2.7) die het aquiferwater scheidt van het systeemwater wordt ongeveer $1\frac{1}{2}^\circ\text{C}$ temperatuur verloren. Dit betekent dat met het 20°C warme water uit de kas de warme bron op 18.5°C gebracht kan worden en dat voor de terugkoeling van het koelwater naar 12°C water van 10.5°C in de koude bron nodig is.

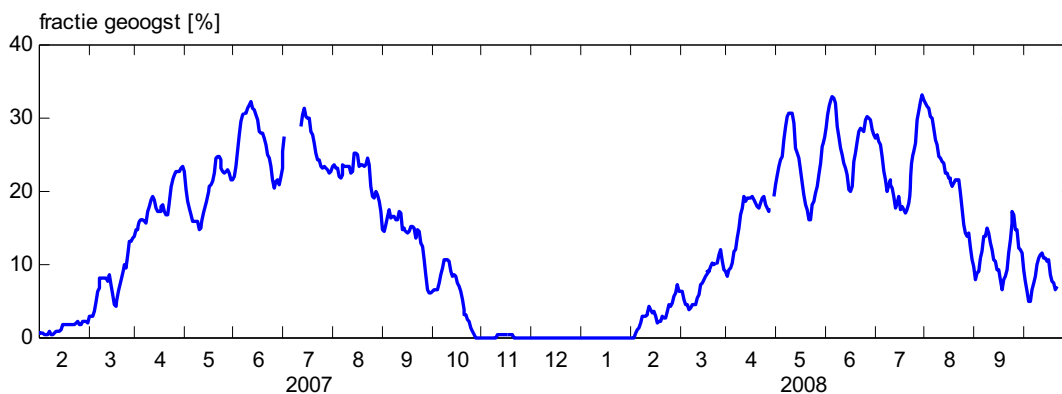
De totale hoeveelheid warmte die op deze dag aan de kas onttrokken is (het oppervlak onder de onderste grafiek) bedraagt 5.9 MJ . Uit de middelste grafiek blijkt dat deze energie is opgeslagen door een temperatuurverschil van 8°C aan te leggen, en bij deze delta T betekent dit dat er op deze dag 175 liter water per m^2 kas van de koude bron naar de warme bron is gepompt.

Als deze 5.9 MJ wordt vergeleken met de totale hoeveelheid ingestraald zonlicht dan blijkt dat de Energieproducerende kas 26% van het op 25 juli 2007 ingestraalde zonlicht heeft weten vast te leggen in de vorm van een 9°C opwarming van water uit de koude bron.

Soortgelijke berekeningen als rondom Figuur 6.1. zijn ook voor de hele periode gemaakt. De resultaten hiervan staan in de onderstaande grafieken.



Figuur 6.2. Dagelijkse energieverzameling door de Energieproducerende Kas. Voor de leesbaarheid van de grafiek zijn de data afgevlakt met 10 daags voortschrijdend gemiddelde filter. (Het is om die reden dat de 5.9 MJ die op 25 juli 2007 verzameld is in deze grafiek niet als zodanig terug gevonden kan worden.)



Figuur 6.3. Dagelijkse fractie van het zonlicht dat door de Energieproducerende Kas vanuit de kaslucht wordt onttrokken en wordt opgeslagen in de aquifer. Voor de leesbaarheid van de grafiek zijn de data afgevlakt met 10 daags voortschrijdend gemiddelde filter. (Het is om die reden dat de 26% die voor 25 juli 2007 berekend is in deze grafiek niet als zodanig terug gevonden kan worden.)

Het algemene beeld dat uit Figuur 6.2 naar voren komt is de grote fluctuatie in de hoeveelheid warmte die per dag aan de kas onttrokken kan worden. Dit wordt veroorzaakt door het wisselvallige weer in de Nederlandse zomers. Een tweede opmerkelijke punt is dat de dagelijkse warmteverzameling in 2008 vaak hoger uitkomt (en ook over het de hele zomer heen groter is dan in 2007). De eerste verklaring is dat er over de periode april t/m september 2008 wat meer licht is geweest dan in 2007. In 2008 werd er over de deze periode 2930 MJ/m² gemeten terwijl dezelfde periode een jaar eerder 2860 MJ/m² liet zien. De relevante periode in 2008 was dus 2.5% lichter.

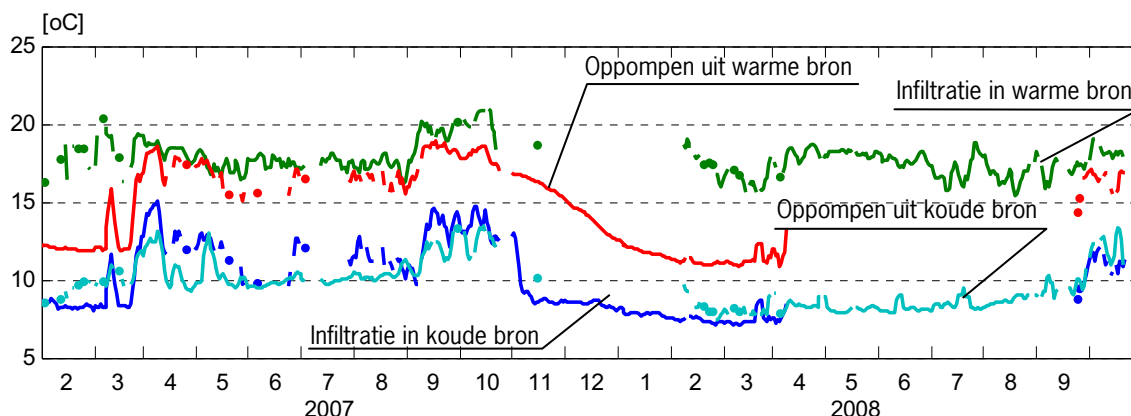
Een tweede verklaring is de andere schermstrategie (zie ook hoofdstuk 7), wat goed terug te vinden is in de maand mei van 2007. Er is daar een zichtbare hogere fractie van het zonlicht verzameld (zie Figuur 6.3). De totale hoeveelheid zonne-energie die in de periode april t/m september in 2007 werd vastgelegd was 660 MJ/m² per jaar en in dezelfde periode een jaar later was dit 735 MJ/m² (dus 11% meer).

6.2 Opslag in de aquifer

De warmte die in de zomer aan de kaslucht wordt onttrokken wordt in de vorm van opgewarmd water in de aquifer opgeslagen. Figuur 6.1 laat zien dat de temperatuur die daarbij in de aquifer bereikt kan worden iets onder de temperatuur ligt waarmee het water uit de kas komt. Dit komt door het temperatuurverlies dat over de scheidingswisselaar optreedt.

In de winter, wanneer de aquifer met behulp van de warmtepomp wordt uitgeoeld, vindt een soortgelijk temperatuurverlies plaats. De temperatuur van het water dat in de koude bron wordt opgeslagen is 1 tot 2 graden minder koud dan de temperatuur van het water dat uit de verdampers van de warmtepomp stroomt.

Onderstaande figuur toont de temperaturen waarbij de energie-uitwisseling met de aquifer in de meetperiode heeft plaatsgevonden. Alle temperaturen zijn aan de aquiferkant van de scheidingswisselaar gemeten (dus temperatuurvoeler T9 en T10 uit Figuur 2.7).



Figuur 6.4. Temperatuur waarmee water in en uit de warme en koude bron van de aquifer is gestroomd. Om de grafiek wat beter leesbaar te maken zijn de data met een voortschrijdend gemiddelde filter van 4 dagen afgevlakt.

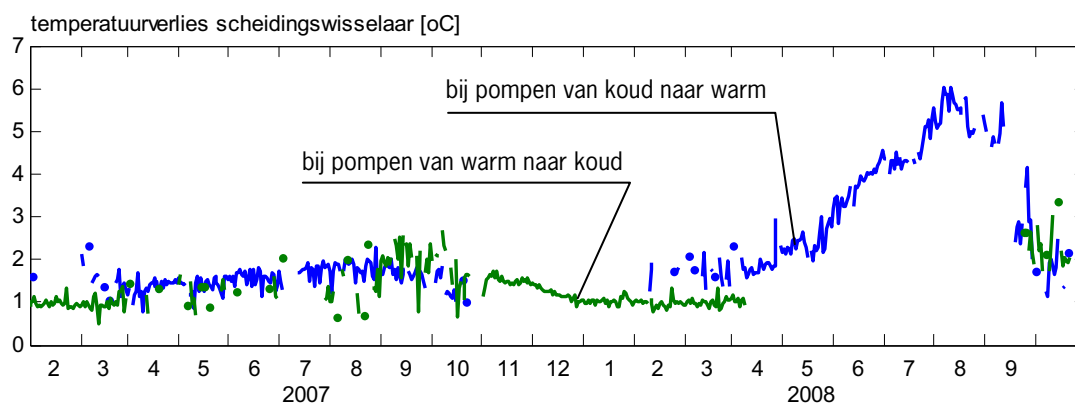
De figuur laat in de eerste plaats zien dat water dat uit de warme bron wordt onttrokken minder warm is dan waarmee het erin is geladen en dat ook het water dat uit de koude bron komt minder koud is dan waarmee het erin is geïnfiltrerd. Dit komt door temperatuurvereffenings-effecten onderweg (met name de warme bron ligt ver bij de meetpunten vandaan), maar vooral door het karakter van de opslag van energie in een aquifer. Als er warmte of koude in een aquifer wordt ingebracht wordt er energie uitgewisseld tussen het bewegende water en het stilstaande zand in de aquifer. De resulterende temperatuur is een naar de warmtecapaciteit van de verschillende stoffen gewogen gemiddelde temperatuur. Als er dus water met een relatief hoge temperatuur in de kern van de bron wordt geïnfiltrerd worden de verder naar buiten liggende 'ringen' opgewarmd met een wat lagere temperatuur (zie voor de beeldvorming Figuur 2.5). Hierdoor ontstaat het typische gedrag dat in de winter van 2007/2008 in Figuur 6.4 is te zien. De hele zomer is de warme bron geladen met water van 17 °C of hoger maar al vanaf december 2007 komt het water op beduidend lagere temperaturen terug. Dit ondanks het feit dat de hoeveelheid energie die in de aquifer was opgeslagen en weer aan de aquifer werd onttrokken in de periode februari 2007 tot februari 2008 vrijwel in evenwicht was (zie Figuur 6.5). Dit verschijnsel is inherent aan het gebruik van aquifers als opslagsysteem, zolang de hoeveelheid warmte die wordt ingebracht gelijk is aan de hoeveelheid die eraan wordt onttrokken. Pas wanneer er gedurende een aantal jaren stelselmatig meer warmte in de aquifer wordt ingebracht dan dat er aan wordt onttrokken (ordegrootte anderhalf maal zoveel er in als er uit) zal de warme bron-temperatuur min of meer constant kunnen blijven.

Figuur 6.4 is ook een aardige illustratie van het feit dat er perioden zijn waarin er uitsluitend water van de warme naar de koude bron wordt gepompt en perioden waarin water uitsluitend van de koude naar de warme bron wordt gepompt. Dit zijn de delen van de grafiek waar maar 2 lijnen zichtbaar zijn. Stukken van de grafiek waarin 4 lijnen zichtbaar zijn betreffen perioden waarin over het etmaal zowel water de ene kant als de andere kant op wordt gepompt.

In de bespreking van Figuur 6.1 is het temperatuurverlies bij de scheidingswisselaar al even aan de orde geweest. Deze scheidingswisselaar wordt door de vergunningverlener verplicht maar is in veel gebieden ook noodzakelijk omdat het water wat uit de aquifer gepompt wordt corrosief is en/of opgeloste gassen (methaan, CO_2) kan bevatten die niet in het verwarmingssysteem toegelaten kunnen worden.

In juli 2007 was het temperatuurverlies over deze wisselaar ongeveer 1.5 °C en in onderstaande grafiek is te zien dat dit in september en oktober 2007 opliep richting 2.5 °C. Dit temperatuurverlies was in de projectgroepvergaderingen een terugkerend punt van aandacht zodat de zorgen hierover in oktober 2007 toenamen. Vanaf november t/m februari 2008 kon evenwel een afnemend temperatuurverlies worden geconstateerd zodat het projectteam concludeerde dat een ingrijpende reinigungsoperatie niet nodig was.

De ontwikkelingen in april t/m augustus 2008 laten echter zien dat dit achteraf gezien geen verstandige beslissing is geweest. De eerste signalen dat het temperatuurverlies toenam kwamen in mei 2008, maar er is toen geen actie genomen vanwege de ervaring van het jaar daarvoor dat dit tijdelijke processen zouden zijn die zichzelf zouden herstellen. Vlak voor de bouwvak (juli 2008) was het temperatuurverlies opgelopen naar 4 °C maar pas na de projectgroep vergadering van begin september, toen het temperatuurverlies naar 5 á 6 °C was opgelopen is actie ondernomen door de bronnen en de warmtewisselaar met vol debiet te spuien en water met kracht heen en weer te pompen. Zoals te zien leverde dit direct resultaat, hoewel ervan uitgegaan kan worden dat een nog wat grondiger reiniging het temperatuurverlies nog iets verder terug zou kunnen brengen.

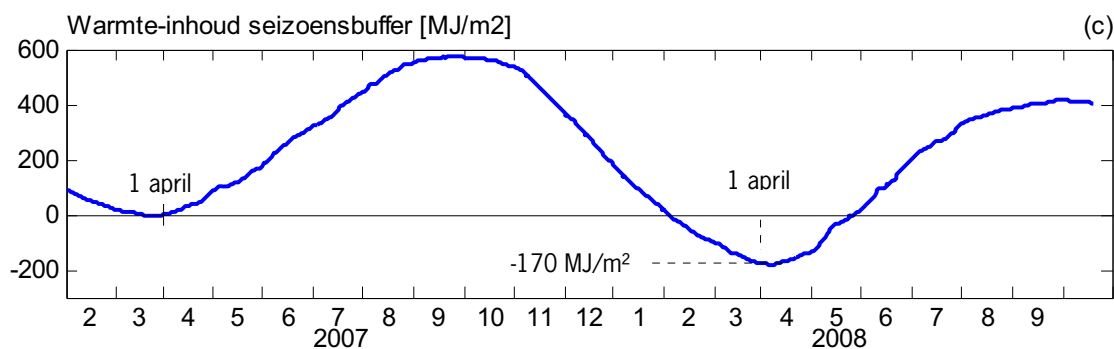


Figuur 6.5. Temperatuurverlies over de scheidingswisselaar. Het verlies bij het pompen van water van de koude naar de warme bron wordt met de blauwe lijn aangegeven en het verlies bij het pompen van warm naar koud wordt met de groene lijn weergegeven.

Modelberekeningen geven aan dat de slechte werking van de warmtewisselaar in de zomer van 2008 tot 5 kWh per m² extra elektriciteitsverbruik hebben geleid, maar het feit dat het water minder warm is opgeslagen zal in de winter 2008/2009 ook tot extra elektriciteitsverbruik leiden. Modelberekeningen geven aan dat indien het jaargemiddeld temperatuurverlies over de scheidingswisselaar van 1 naar 2 °C oploopt het elektriciteitsverbruik van de energieproducerende kas met 7 kWh/m² jaar toeneemt. Zou het temperatuurverlies van 2 naar 3 °C oplopen dan neemt het elektriciteitsverbruik met 9 kWh per m² per jaar toe. Grofweg zou dus gesteld kunnen worden dat een graad extra verlies over de wisselaar tot 8 kWh stroomverbruik per m² per jaar leidt.

Overigens hebben de hierboven beschreven problemen geen invloed op de in §6.3 gepresenteerde energie-analyse omdat die betrekking heeft op de periode van 1 april tot 1 april, dus de periode waarin er geen problemen met de scheidingswisselaar waren.

De opslag en onttrekking van warmte in de aquifer leidt tot een cumulatieve warmte-inhoud van aquifer die gedurende de zomer oploopt en gedurende de winter afneemt. Figuur 6.5 toont het verloop zoals dat in de meetperiode bij Hydro Huisman is gemeten.



Figuur 6.6. Cumulatieve warmte-inhoud van het seizoensopslagsysteem van de Energieproducerende kas.

Uit Figuur 6.6 kan geconcludeerd worden dat er in de winter van 2007/2008 meer warmte aan de aquifer is onttrokken dan er in de daaraan voorafgaande zomer in is opgeslagen. Begin februari wordt de 0-lijn gepasseerd en na een jaar, dus op 1 april 2008 staat de warmte-inhoud van de aquifer 170 MJ/m² lager dan een jaar daarvoor.

Gezien het feit dat de top van warmte-inhoud in september 2008 lager ligt dan in september 2007 mag worden verwacht dat de warmte-inhoud in april 2009 nog een stuk lager zal zijn dan in april 2008.

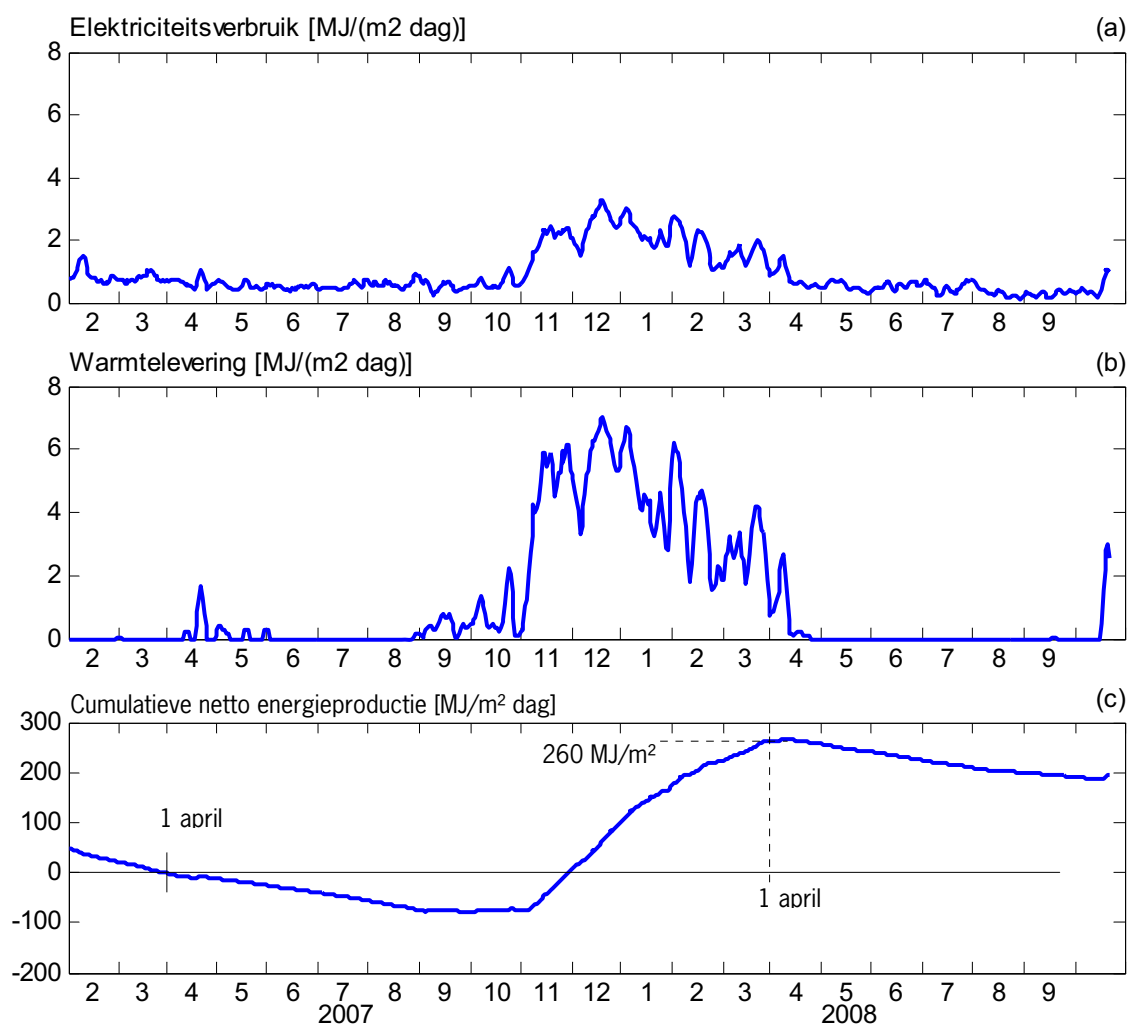
Er kan dus worden geconstateerd dat er in de praktijksituatie bij Hydro Huisman een soort roofofbouw op de aquifer plaatsvindt en dat de gemeten energie-verdiensite niet geheel aan de Energieproducerende Kas kan worden toegerekend. Meer dan 25% van de warmte die aan de aquifer is onttrokken is niet in de energieproducerende kas verzameld, maar is aan de ondergrondse waterstromen onttrokken.

Het feit dat zo'n 0-lijn passage geen wezenlijke invloed heeft op de mogelijkheid om warmte aan de aquifer te onttrekken is zowel in het voorjaar van 2007 als in 2008 geïllustreerd. Het water van de warme bron is in die periode weliswaar koud (12 °C of minder) maar dat neemt niet weg dat er energie aan kan worden onttrokken (door het af te koelen naar 7 °C). Praktisch gesproken is een aquifer dan ook nooit leeg. Ook bij een zeer overmatige onttrekking van warmte blijft de temperatuur van de warme bron hangen rond de natuurlijke bodemtemperatuur en die is in Nederland 11 °C.

6.3 Energiegebruik en –levering bij Hydro Huisman

De installatie van de Energieproducerende kas verbruikt elektriciteit en realiseert daarmee een gunstig kasklimaat (niet te warm, niet te koud, niet te vochtig en niet te droog) en levert bovendien warmte aan de rest van het bedrijf. De doelstelling van de Energieproducerende Kas was om te streven naar een grotere energielevering (in de vorm van warmte ten behoeve van de verwarming van de betonvloer) dan dat de kas zelf aan elektriciteit verbruikt. Het zal duidelijk zijn dat in de zomerperiode deze balans zwaar scheef ligt in de richting van een veel groter elektriciteitsverbruik dan warmtelevering, zodat in de winter deze balans zwaar naar de andere kant zal moeten liggen. In Figuur 6.7 zijn de drie grafieken afgebeeld die het elektriciteitsverbruik (in MJ/(m² Energieproducerende Kas)) de warmtelevering (in MJ/(m² Energieproducerende Kas)) en de resultante van die twee tonen. Deze resultante is getoond als een cumulatieve lijn.

Uit Figuur 6.7 (c) kan worden afgelezen dat in de periode van 1 april 2007 tot 1 april 2008, dus in een jaarrond situatie, het surplus aan warmtelevering minus de verbruikte elektriciteit 260 MJ/m² bedraagt.

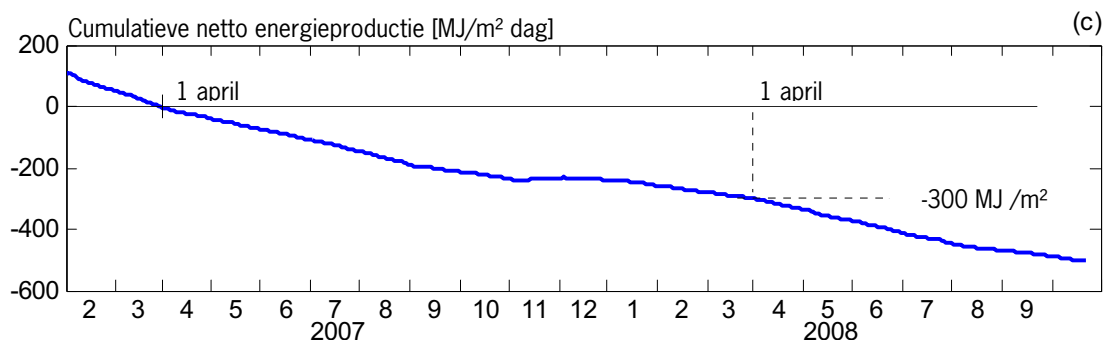


Figuur 6.7. Elektriciteitsverbruik van de Energieproducerende Kas (a) en warmtelevering vanuit de Energieproducerende kas naar de betonvloerverwarming van de kasafdelingen 1, 2 en 3 (b). Beide grootheden zijn in MJ per m² Energieproducerende Kas uitgedrukt waarbij voor de omrekening van kWh elektriciteit naar MJ een factor 3.6 is gebruikt (geen conversieverliezen in de productie van elektriciteit in rekening genomen). Grafiek (c) toont het gecumuleerd verschil tussen levering en verbruik. Vanaf het snijpunt door de 0-lijn is de kas netto energieproducerend (in dit geval zonder rekening te houden met conversieverliezen bij de elektriciteitsproductie).

In Figuur 6.7 is bij de omrekening van de in de installatie van Hydro Huisman gemeten elektriciteitsinput, die in kWh wordt uitgedrukt, naar een vergelijkbare eenheid als de warmtelevering (MJ) de conversiefactor 3.6 gebruikt (1 kWh = 3.6 MJ). Door deze conversiefactor te gebruiken wordt voorbijgegaan aan het feit dat voor de productie van elektriciteit met een beperkt omzettingsrendement fossiele energie wordt ingezet. Het Nederlandse openbare elektriciteitsnet heeft een gemiddeld omzettingsrendement van 43%.

Het elektriciteitsverbruik van de Energieproducerende Kas is fors. In de periode van 1 april 2007 tot 1 april 2008 werd in totaal 120 kWh/m² verbruikt. Van deze hoeveelheid werd 80 kWh gebruikt voor de klimatisering van de kas en 40 kWh voor het opwerken van de warmte die nodig is om het warmteoverschot in de aquifer te kunnen leveren aan de betonvloerverwarming van de naastgelegen afdelingen.

Als dit omzettingsrendement op het elektriciteitsverbruik van de Energieproducerende Kas zou worden toegepast komt de energie-input die aan de kas toegerekend zou moeten worden meer dan 2 maal zo hoog te liggen.



Figuur 6.8. Cumulatieve netto energieproductie indien het elektriciteitsverbruik van de Energieproducerende Kas met een conversie-efficiëntie van 43% wordt omgerekend in MJ energie-input.

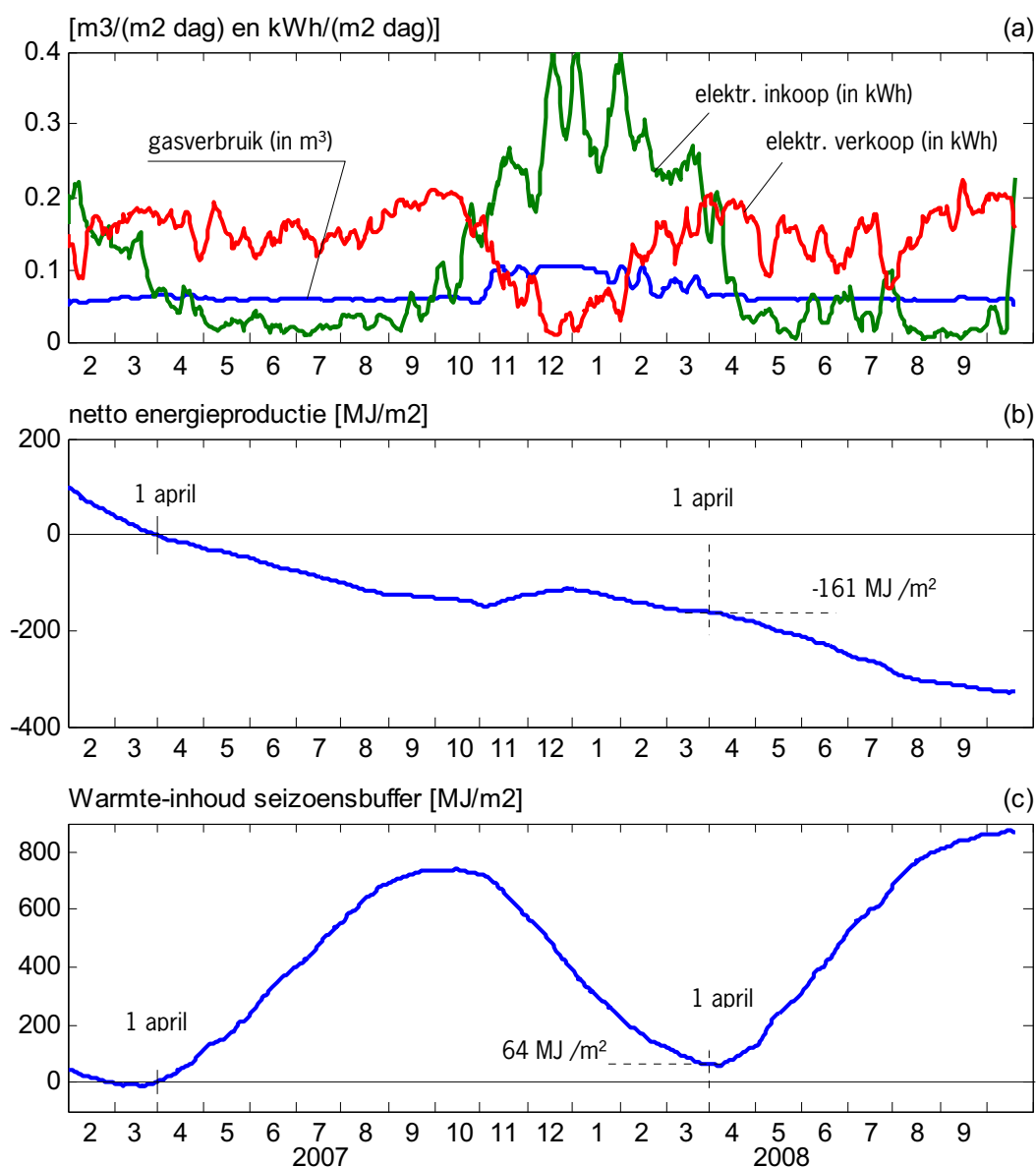
De vergelijking tussen de resultaten van Figuur 6.7 (c) en Figuur 6.8 illustreert het belang van de conversiefactor die aan de productie van de benodigde elektriciteit wordt toegekend.

Op beide toegepaste conversierendementen is echter wat aan te merken. Het gebruik van een conversiefactor 1 gaat voorbij aan de realiteit rond de huidige elektriciteitsinfrastructuur waar het overgrote deel van de stroom in elektriciteitscentrales wordt geproduceerd die een beperkt conversierendement voor primaire energie (fossiele brandstof) naar elektriciteit hebben.

Het gebruik van de factor 0.43, zoals in Figuur 6.8 is gedaan, miskent echter de toepassing van WKK in de glastuinbouw. Immers, de factor 0.43 ontstaat doordat in het Nederlandse elektriciteitsnet voor elke MJ elektriciteit ruim 1.3 MJ warmte als afvalproduct wordt vernietigd. Dit is warmte die gemakkelijk gebruikt had kunnen worden en die bij toepassing van WKK ook zeker gebruikt wordt.

Daarom is in hoofdstuk 2 al aangegeven dat de installatie eerder kan worden beoordeeld wanneer er door middel van een model wordt berekend wat de prestatie zou zijn geweest als deze op een zodanige schaal zou zijn gebouwd dat de toepassing van WKK mogelijk was.

Onderstaande figuur toont hoe in dat geval de in- en verkoop van stroom en de inkoop van gas zou zijn geweest en hoe dit zou zijn uitgedrukt op de energieproductie.



Figuur 6.9. Gasverbruik en elektriciteit in- en verkoop van de Energieproducerende Kas indien deze zou zijn uitgerust met een WKK-installatie van 160 kWe per ha. ((a)-deel). De data zijn afgevlakt met een 7-daags voortschrijdend gemiddelde filter. Het (b)-deel van de figuur toont de resulterende netto energieproductie bij ongewijzigde warmtelevering aan de betonvloer (dus bij een levering zoals bij Figuur 6.6 (b)). Het (c)-deel van de grafiek toont de berekende inhoud van de seizoensbuffer en is vergelijkbaar met Figuur 6.5.

Figuur 6.9 (a) laat zien dat het gasverbruik een zeer vlak patroon volgt. Dit komt doordat de WK-installatie in principe uitsluitend tijdens de plateau-uren draait en de variatie in warmtevraag wordt opgevangen door het eventuele warmtesurplus in de aquifer onder te brengen, of bij een warmtetekort de warmtepomp in te schakelen. De seizoensinvloeden komen daarom vooral in het in- en verkoopregime van elektriciteit naar voren. In de winter wordt netto stroom ingekocht en in de zomer wordt netto stroom verkocht. Overigens vindt stroomverkoop vooral tijdens de plateau-uren plaats terwijl stroominkoop vooral tijdens daluren plaatsvindt, waardoor er op dit punt een handelsvoordeel kan worden behaald. Op de gasverbruiklijn zit eigenlijk ook nog een weekpatroon (waarbij er op werkdagen bijna 2 maal zoveel gas wordt verbruikt als op weekenddagen), maar dit effect is ten behoeve van de leesbaarheid

door middel van een 7-daags voortschrijdend gemiddelde filter afgevlakt. De jaarlijkse inkoop behelst 48 kWh en de jaarlijkse verkoop bedraagt 49 kWh. Het gasverbruik bedraagt 26 m³ per m² energieproducerende kas, maar met dit gasverbruik is niet alleen de energieproducerende kas geklimatiseerd, maar is ook 685 MJ warmte aan de betonvloer geleverd (overeenkomend met 23 m³ aardgas equivalenten).

Het mag duidelijk zijn dat de netto energieproductie van de Energieproducerende Kas met WKK nog steeds negatief is. Het verschil tussen verbruik en levering is 5.6 m³ en dit komt overeen met de in Figuur 6.9 afgebeelde -161 MJ/m² (zie Figuur 6.9. (b)).

De Energieproducerende Kas met WKK doet het echter wél beter dan de Energieproducerende Kas *zonder* WKK en een conform het conversierendement van het openbare elektriciteitsnet berekende energie-input (vergelijk Figuur 6.9 (b) met Figuur 6.8). Daar komt nog bij dat Figuur 6.9 (c) laat zien dat de warmtelevering vanuit de situatie met WKK in principe groter had kunnen zijn. Er zit immers na een jaar nog 64 MJ/m² in 'voorraad' in de aquifer. In vergelijking met de situatie die bij Hydro Huisman is waargenomen, waar de warmtevoorraad in april 2008 -170 MJ/m² staat is dit dus een forse verbetering.

Indien de status van de aquifer over de jaarrond-situatie in de berekening van de netto energieproductie wordt meegenomen komt het oordeel voor de situatie uit Figuur 6.9 nog wat gunstiger te liggen en het oordeel voor de situatie zonder WKK aanzienlijk minder gunstig. Het ketelhuis met WKK had immers nog 64 MJ extra kunnen leveren waardoor het netto toe te rekenen gasverbruik met 2 m³ zou dalen naar 3.6 m³ a.e. per m² per jaar, terwijl de netto energieproductie in de gevallen zonder WKK met 170 MJ per m² per jaar zou verslechteren.

In de bovenstaande paragraaf zijn drie situaties besproken waarbij de netto-energieproductie uitkomt op

- 90 MJ/m² per jaar (namelijk de 260 MJ elektriciteit die in Figuur 6.7 is afgebeeld minus de 170 MJ 'roofbouw' op de aquifer) in geval het elektriciteitsverbruik met een conversierendement van 1 wordt toegerekend
- -470 MJ/m² per jaar (namelijk de -300 MJ primair energieverbruik die in Figuur 6.8 is afgebeeld minus de 170 MJ oneigenlijke warmteonttrekking aan de aquifer) in geval het elektriciteitsverbruik met een conversierendement van 0.43 wordt toegerekend
- -100 MJ/m² per jaar in geval de energieproducerende kas met een WK-installatie zou zijn bedreven en een vergrote levering aan de betonvloer de aquiferlading op jaarbasis neutraal zou houden.

Het eerstgenoemde getal is niet goed verdedigbaar zolang er geen gebruik gemaakt wordt van 100% groene stroom. Het tweede getal gaat voorbij aan de praktische realiteit waarin WKK als standaard technologie geldt.

Het derde getal geeft daarom de meest realistische stand van zaken maar komt uit op een negatieve netto energieproductie (en dus in feite geen netto energieproductie, maar uitsluitend een laag energieverbruik betekent). Dit roept de vraag op of het in de praktijk eigenlijk wel mogelijk is om een netto energieproducerende kas te exploiteren. Hierop gaat de volgende paragraaf in.

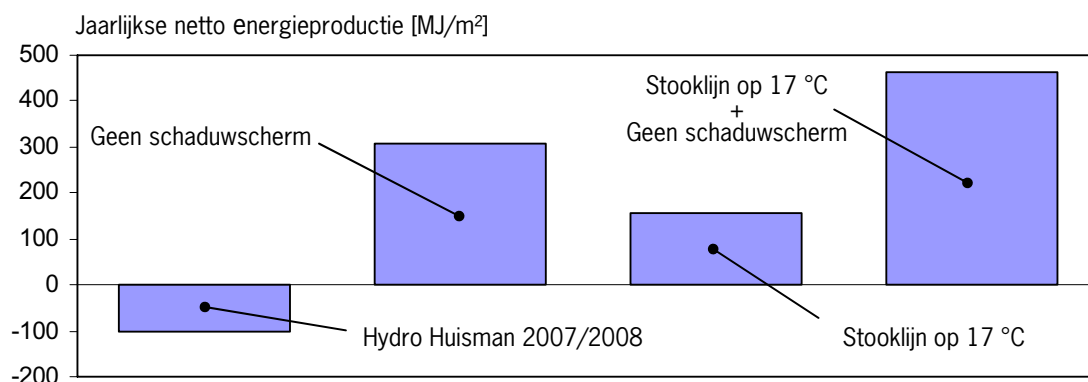
6.4 Relatie tussen kasklimaat en energieproductie

Bij de bespreking van Figuur 2.1 kwam naar voren dat vanuit theoretisch oogpunt de netto energieproductie wordt bepaald door de 4 verliesfactoren. Deze verliesfactoren hangen af van de 'hardware' van de energieproducerende kas (isolatiewaarde en lichtdoorlatendheid van het kasdek, het conversierendement van de elektriciteitsopwekking), maar natuurlijk ook van het gebruik van de kas. Ten opzichte van de oorspronkelijke berekeningen in de aanloop naar het project zijn hierin belangrijke wijzigingen geweest. De stooklijn bij Hydro Huisman is geen 17 °C geweest maar varieerde tussen 19 en 20 °C. Daarnaast is het scherm niet als noodmaatregel ingezet voor perioden met een te kleine koelcapaciteit, maar als belangrijk instrument om te veel lichtinval op het gewas te voorkomen.

Deze twee wijzigingen hebben een grote invloed op de potentiële netto energieproductie van het concept. Met nadruk wordt hier gesproken over de *potentiële* netto energieproductie omdat het resultaat van de berekening helemaal afhankelijk is van de hoeveelheid warmte die door derden wordt afgenomen. Immers, als de Energieproducerende Kas

in de zomer de aquifer laadt, maar de aquifer in de winter niet of onvoldoende wordt gelegeerd, (zie Figuur 6.9), dan wordt de netto energieproductie in negatieve zin beïnvloed.

In onderstaande figuur is aangegeven hoe het netto potentieel afhangt van de twee hierboven genoemde factoren en wat de effecten zijn van de afwijkende gebruikswijze bij Hydro Huisman ten opzichte van het oorspronkelijke concept.



Figuur 6.10. Potentiële netto energieproductie indien op de genoemde punten zou zijn vastgehouden aan het oorspronkelijke concept voor de Energieproducerende Kas in plaats van de toegepaste gebruikswijze bij Hydro Huisman in 2007 en 2008.

Met nadruk wordt in Figuur 6.10 gesproken over de potentiële netto energieproductie. In het laatste geval, waar de stooklijn naar 17 °C is teruggebracht en het zonlicht maximaal in de kas wordt toegelaten is de jaarlijkse netto energieproductie 460 MJ/m² per jaar, maar daarvoor moet er 931 MJ per m² vanuit de aquifer aan de betonvloer worden geleverd. Dat is bijna drie keer zoveel als wat er in de huidige situatie gebeurt. De warmte-afgiftecapaciteit van de betonvloer is hiervoor ontoereikend, mede vanwege het feit dat de betonvloer eigenlijk maar 5 maanden verwarmd wordt (zie Figuur 6.7). Een kas zoals de Energieproducerende Kas bij Hydro Huisman zou dus prima netto energieproducerend kunnen zijn mits de afnamecapaciteit van de afnemer hiervoor groot genoeg zou zijn. Hiermee is direct geïllustreerd dat het de afnemer is die in hoge mate bepaalt of het energieproducerende kasconcept ook *netto* energieproducerend is.

6.5 Conclusies

- De experimenten met de klimatisering van Energieproducerende Kas bij Hydro Huisman laten zien dat het goed mogelijk is een kas in de zomer (bijna) gesloten te houden door de warmte middels FiWiHEX warmtewisselaars vanuit de kas te onttrekken. De opslag in de zomer en hergebruik in de winter, zowel voor de eigen warmtebehoefte van de Energieproducerende Kas als die van de betonvloerverwarming op de rest van het bedrijf, blijken ook in technische zin goed te verlopen. Continue of frequente monitoring van vitale componenten, zoals het temperatuurverlies over scheidingswisselaars, is hierbij echter noodzakelijk om problemen zoals die zich in de zomer van 2008 op dit punt hebben voorgedaan te voorkomen.
- De waargenomen werking van het aquifersysteem voldoet geheel aan de theoretische verwachtingen die eraan gesteld kunnen worden. Vooral het feit dat energie die middels water op een bepaalde temperatuur in een aquifer wordt opgeslagen voor een groot deel op een beduidend lagere temperatuur weer terug komt wordt overduidelijk door de metingen geïllustreerd.

- De analyse van de warmtebalans over een winter en een tweetal zomers laat zien dat de warmteverzameling uit de Energieproducerende Kas bij Hydro Huisman beperkt is. Op jaarbasis wordt ongeveer 20 tot 25% van het zonlicht in de aquifer vastgelegd. Dit komt enerzijds omdat de lichtdoorlatendheid van de kasconstructie niet erg hoog is, maar aan de andere kant doordat er juist op mooie zonnige dagen geschermd wordt. Gedurende het experiment is het schermcriterium weliswaar verhoogd, maar de warmteopstoot blijft beperkt tot zo'n 710 MJ per m² per jaar.
Het feit dat het met de gegeven installatie niet goed mogelijk was de kas te ontvochtigen met terugwinning van de voelbare en latente warmte, (waardoor hier al vroeg in het experiment mee is gestopt), draagt bij aan de geringe warmteverzameling. Overigens zou ook als de installatie wél inzetbaar was geweest voor zo'n energiezuinige ontvochtiging, toch met buitenlucht zijn ontvochtigd omdat het voor een Energieproducerende Kas van groot belang is het elektriciteitsverbruik zo laag mogelijk te houden (zie ook § 4.2.3).
- Met een eigen warmteverbruik van 620 MJ en een warmteopstoot van 710 MJ per m² is er in theorie ruimte voor een Netto Energieproductie van 90 MJ/m² per jaar. Als conversieverliezen buiten beschouwing worden gelaten door te stellen dat 1 kWh elektriciteit gelijk staat aan 3.6 MJ energie, blijkt de energieproductie echter 260 MJ per m² per jaar te bedragen. Dit ligt ver boven dit theoretisch maximum en het blijkt dan ook dat de installatie 170 MJ/m² meer warmte uit de aquifer haalt dan dat er wordt geladen. Het grootste deel van die geleverde 260 MJ dus eigenlijk een vorm van aardwarmte en niet afkomstig uit de zomerse overschotten in de kas.
- Het veronachtzamen van de conversieverliezen rond elektriciteitsproductie is echter niet reëel. In het Nederlandse elektriciteitsnet is het gemiddelde conversierendement 43% (en dus het conversieverlies 57%). Als er met zo'n reëel conversierendement wordt gewerkt dan verandert het resultaat van de Energieproducerende Kas van een netto energieproductie van 90 MJ/m² per jaar naar een netto energieverbruik van 470 MJ per m² per jaar.
Het effectieve conversierendement kan evenwel fors worden verbeterd door de toevoeging van een WKK aan het concept (zoals uiteengezet in paragraaf 2.5). Hierdoor wordt het netto energieverbruik verlaagd van 470 MJ/m² per jaar naar 161 MJ/m² per jaar met nog een optie om dit verder te verlagen naar 100 MJ per m² per jaar. Om deze optie te benutten moet het verwarmingssysteem van de rest van het bedrijf van Hydro Huisman een groter beroep op energielevering door de Energieproducerende Kas doen.

Het geheel overziend moet geconcludeerd worden dat de installatie bij Hydro Huisman niet netto energie producerend is (maar wel een zeer energiezuinig kasconcept vormt). De installatie zou beslist wél tot een netto energie producerend systeem hebben geleid als het kasklimaat zou zijn gehanteerd waar in de ontwerpfase vanuit was gegaan. Dit betekent een lagere stooktemperatuur en/of een zeer terughoudendgebruik van het schaduw scherm. Overigens zou in dat geval de warmteafgifte naar de overige kasafdelingen moeten worden vergroot (bijvoorbeeld door de warmte niet alleen naar de betonvloer te sturen) om de geoogste warmte ook daadwerkelijk binnen het bedrijf weer te kunnen benutten.

7 Kasklimaat en gewasproductie

De inrichting van een kas met warmtewisselaars, het gebruik van een warmtepomp en de aanleg van aquifers vragen hoge investeringen die niet alleen door energiebesparing en levering van het warmteoverschot renderen. Een substantieel deel van de kosten moeten goedgemaakt worden door een verhoging van de productiewaarde.

De verhoging van de CO₂-concentratie die door het gesloten houden van de ramen mogelijk wordt kan leiden tot een verhoogde productieomvang en het voorkomen van extreme omstandigheden biedt mogelijkheden voor een verbetering van de kwaliteit.

Het gewaskundig onderzoek is gericht op het kwantitatief en kwalitatief vaststellen van de gewasreactie in de Energieproducerende kas ten opzichte van een referentie. Deze referentie bestaat uit een afdeling met een gelijk kasdek als in de Energieproducerende kas, maar zonder koelmogelijkheden. In 2006 had de referentie ook geen luchtbevochtigingssysteem. Maar omdat de ervaring in deze eerste zomer liet zien dat de, voor potplanten relatief hoge lichtdoorlatendheid van het kasdek tot een té hoge warmtebelasting leidde, is in het najaar van 2006 ook in de referentiekas een fogging-installatie geplaatst. Hierdoor zijn de erg lage luchtvochtigheden, die de referentiekas in 2006 negatieve invloed hadden op de groei, in de rest van de meetperiode niet meer voorgekomen.

De bestudering van het effect van de Energieproducerende kas op de teelt heeft in verschillende tranches plaatsgevonden van elk 12 tot 14 weken plaatsgevonden. Binnen een dergelijke tranche zijn steeds hieronder afgebeeld de 10 gewassen (maar 6 gewasgroepen) gevolgd.



Croton (twee cultivars)



Ficus (2 cultivars)



Schefflera



Potanthurium (twee cultivars)



Areca (palm)

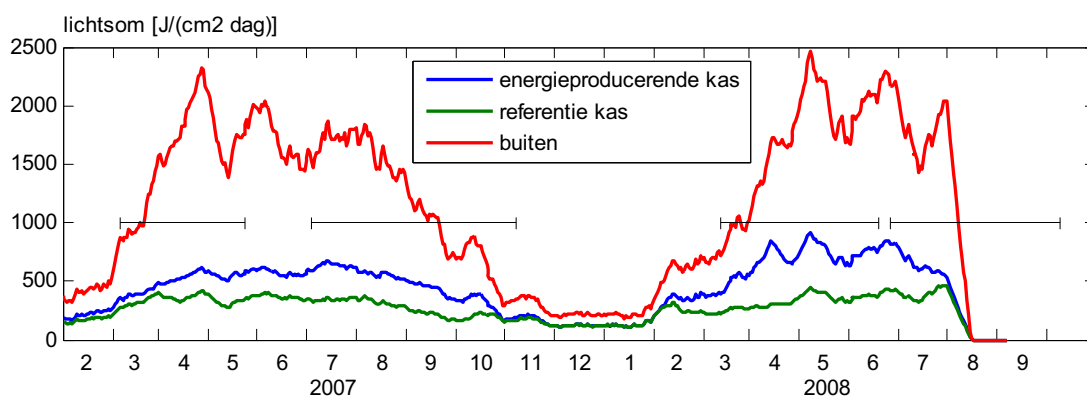


Dracaena (2 cultivars)

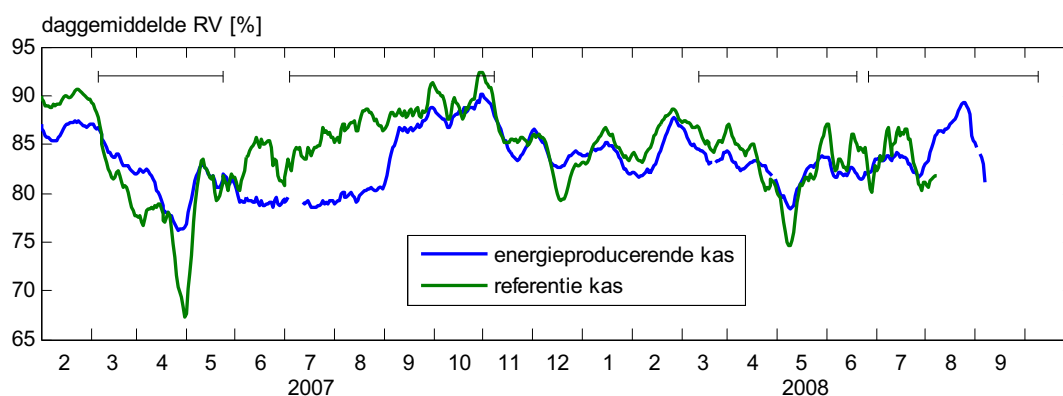
Per cyclus zijn de waarnemingen uitgevoerd bij aanvang, tijdens en aan het einde van de teelt. Er zijn zowel destructieve als niet destructieve waarnemingen uitgevoerd. Ze betreffen vooral de groeisnelheid, uiterlijk van de planten (lengte, vertakking, kleur), kwaliteit en eventuele afwijkingen in de groei. Waarnemingsplanten worden aan het begin van de proef aselekt bepaald.

De eerste tranche was in de winterperiode van 2006 tot februari 2007 maar omdat het kasklimaat tussen de Energieproducerende kas en de referentiekas in de winter niet van elkaar verschilde wordt er in dit rapport geen aandacht aan die eerste tranche besteed.

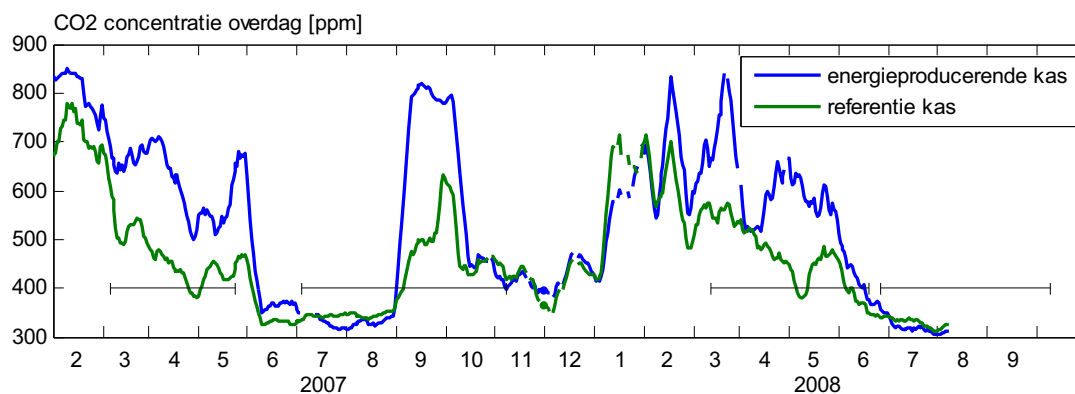
De belangrijkste verschillen ontstaan pas vanaf het voorjaar en in de zomer en betreffen de luchtvochtigheid van de kaslucht, de CO_2 -concentratie en de lichtsom.



Figuur 7.1. Lichtsom per dag. De rode lijn is de lichtsom zoals buiten gemeten. De blauwe en groene lijn geven de lichtsom op gewashoogte waarin de eigenschappen van de kasconstructie, krijten en schermstrategie zijn verdisconteerd. De dagelijkse data zijn afgevlakt met een voortschrijdend gemiddelde filter om de trends beter te kunnen onderscheiden. De tijdvakken waarover de gewaswaarnemingen hebben plaatsgevonden zijn in de figuur gemarkeerd.

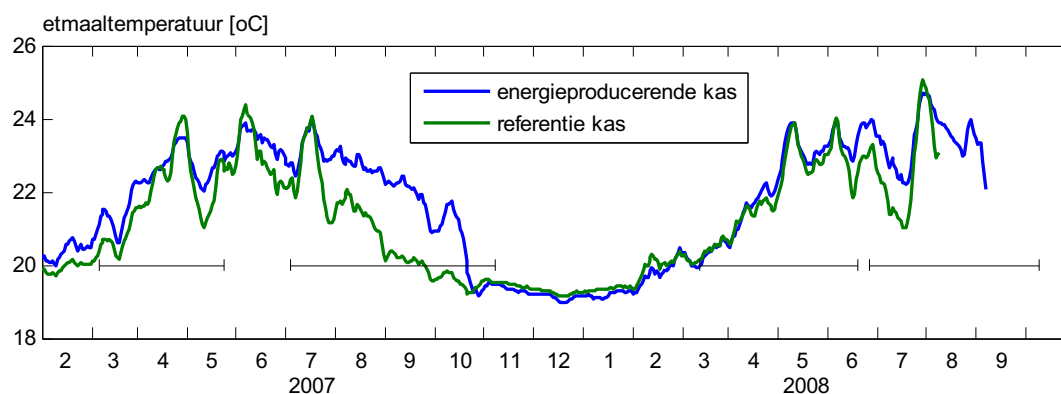


Figuur 7.2. Daggemiddelde RV. In de winter zijn de kasklimaten voor wat betreft luchtvochtigheid vergelijkbaar, maar in warme perioden (eind april 2007, mei 2008). De dagelijkse data zijn afgevlakt met een voortschrijdend gemiddelde filter om de trends beter te kunnen onderscheiden. De tijdvakken waarover de gewaswaarnemingen hebben plaatsgevonden zijn in de figuur gemarkeerd.



Figuur 7.3. CO₂ concentratie overdag in de energieproducerende kas en in de referentiekas. De dagelijkse data zijn afgevlakt met een voortschrijdend gemiddelde filter om de trends beter te kunnen onderscheiden. De tijdvakken waarover de gewaswaarnemingen hebben plaatsgevonden zijn in de figuur gemarkeerd.

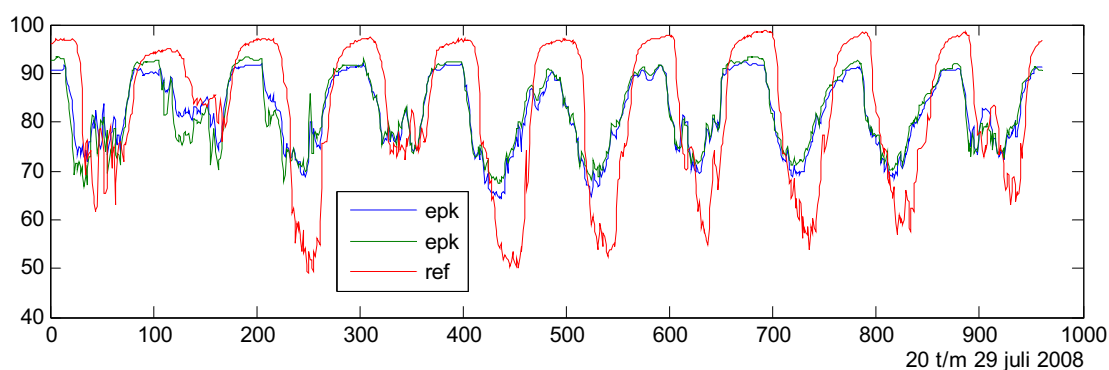
Ten slotte wordt ook de temperatuur getoond.



Figuur 7.4. Etmaaltemperaturen in de Energieproducerende kas en in de referentiekas. De dagelijkse data zijn afgevlakt met een voortschrijdend gemiddelde filter om de trends beter te kunnen onderscheiden. De tijdvakken waarover de gewaswaarnemingen hebben plaatsgevonden zijn in de figuur gemarkeerd.

De kasluchttemperaturen in de energieproducerende kas verschillen niet wezenlijk van die van de referentiekas. Alleen in extreme perioden (eind april 2007, juni 2007 en eind juli 2008) konden de zeer hoge temperaturen die in de referentiekas optraden in de energieproducerende kas worden voorkomen.

Figuur 7.2 laat zien dat gemiddeld genomen het verschil in luchtvochtigheden tussen de Energieproducerende kas en de referentiekas in 2008 erg klein waren. De figuur laat evenwel niet de verschillen binnen het etmaal zien. Als hierop wordt ingezoomd dan blijkt dat het profiel over het etmaal in warme dagen wel duidelijk verschilt.



Figuur 7.5. RV-verloop over 10 warme dagen in 2008.

Het is in Figuur 7.5 heel opvallend dat overdag de luchtvochtigheid in de referentiekas diep wegzakt in vergelijking met de luchtvochtigheid in de Energieproducerende kas. Dit verschil kan echter niet geheel aan de beschikbaarheid van de FiWiHEX-en in de energieproducerende kas worden toegeschreven want er was ook een groot verschil in vernevelingscapaciteit tussen de beide kassen.

7.1 Gewasgroei

In de tabellen 7.1 – 7.4 zijn de verschillen in gewasgroei tussen de Energieproducerende Kas en de referentiekas van de verschillende opplantingen vastgelegd. De resultaten staan onder de tabel, aangevuld met de resultaten van de gewasbeoordeling.

Tabel 7.1. Procentueel verschil van Energieproducerende Kas ten opzichte van de Referentiekas voor lengte-groei, bladoppervlak, versgewicht, drooggewicht en versgewicht bloemen van opplanting 2.

Opplanting 2

week 10, 2007 - week 21, 2007

EPK versus Referentie (in % verschil, waarbij de referentie op 100% is gesteld)

	Lengte	Blad oppervlak	Vers gewicht	Droog gewicht	Versgewicht bloemen
Anthurium 'Sierra'	0	22	27	40	65
Anthurium 'Silence'	-3	3	9	28	212
Areca	13	18	29	-	
Croton 'Red batik'	21	18	24	35	
Croton 'Sunny star'	28	46	51	6	
Dracaena 'Song of india'	7	1	19	13	
Dracaena 'Surprise'	-3	-41	157	-26	
Ficus 'longifolia'	9	-1	22	50	
Ficus benjamina 'Exotica'	7	32	29	60	
Schefflera	19	4	4	27	

De resultaten van de Energieproducerende Kas ten opzichte van de referentie bij opplanting 2 waren als volgt:

- De planten van Anthurium 'Sierra' en 'Silence' waren niet groter, maar hadden wel meer bladoppervlak, meer versgewicht, meer drooggewicht en een hoger versgewicht aan bloemen.
- De Areca's waren langer, hadden meer bladoppervlak en hadden meer versgewicht.
- De Crotons hadden meer lengte, meer bladoppervlak, meer versgewicht en meer drooggewicht. Dracaena 'Song of India' had meer lengte, minder bladoppervlak, meer vers- en drooggewicht.
- Dracaena 'Surprise' was korter, had minder bladoppervlak, minder drooggewicht, maar wel meer versgewicht.
- Ficus Longifolia was langer, had minder bladoppervlak en meer vers- en drooggewicht.
- Ficus 'Exotica' had meer lengte, meer bladoppervlak, meer vers- en drooggewicht.
- Schefflera was langer, had iets meer bladoppervlak en iets meer versgewicht en meer drooggewicht.

Na elke opplanting zijn de planten beoordeeld door een panel bestaande uit telers en de onderzoeker. De planten zijn beoordeeld op plantvorm, lengte/breedte verhouding, bladkleur en een totaal indruk. De resultaten van de deze beoordelingen van planten uit de Energieproducerende Kas t.o.v. de referentiekas waren als volgt:

- De Areca's waren minder, vooral omdat de bladkwaliteit minder was (lichter groen).
- Anthurium 'Sierra' was beter door groter blad en meer bloemen. Anthurium 'Silence' was gelijkwaardig.
- Croton 'Sunny Star' was beter door grotere planten met mooiere bladtekening (meer geel). Croton 'Red Batik' was minder van kwaliteit en dat had vooral te maken met de mindere bladkleur (teveel geel).
- Dracaena 'Surprise' was beter door mooiere bladtekening en de Ficus benjamina was slechter doordat de bladeren lichter groen van kleur waren.
- De overige drie gewassen waren gelijkwaardig (Dracaena 'Song of India', Ficus longifolium en Schefflera).

Tabel 7.2. Procentueel verschil van Energieproducerende Kas ten opzichte van de Referentiekas voor lengte-groei, bladoppervlak, versgewicht, drooggewicht en versgewicht bloemen van opplanting 3.

Opplanting 3

week 27, 2007 - week 45, 2007

EPK versus Referentie (in % verschil, waarbij de referentie op 100% is gesteld)

	Lengte	Blad oppervlak	Vers gewicht	Droog gewicht	Aantal bloemen
Anthurium 'Silence'	-1	39	50	62	109
Anthurium 'Saxo'	-2	2	36	45	155
Areca	0	-	50	66	
Croton 'Petra'	-5	-	25	67	
Croton 'Iceton'	16	53	66	86	
Dracaena 'Surprise'	13	55	66	66	
Dracaena 'Song of India'		Planten verdwenen			
Ficus elastica	4	-	17	25	
Ficus benjamina		Planten verdwenen			
Schefflera	4	-	4	28	

De resultaten van de Energieproducerende Kas ten opzichte van de referentiekas bij opplanting 3 waren als volgt:

- de planten van Anthurium 'Silence' waren niet langer, maar hadden wel een groter bladoppervlak, meer vers- en drooggewicht en veel meer bloemen.
- Anthurium 'Saxo' was ook niet langer en had geen groter bladoppervlak, maar wel meer vers- en drooggewicht en meer bloemen.
- De Areca's waren niet langer, maar hadden meer vers- en drooggewicht.

- Croton 'Petra' was ook niet langer, maar had wel meer vers- en drooggewicht. Een belangrijke reden voor het korter blijven is dat de gedeelte van de planten ging bloeien en daarmee stopt (voor de tijd) de lengtegroei.
- Croton 'Iceton' en Dracaena 'Surprise' waren langer, hadden meer bladoppervlak en meer vers- en drooggewicht. Ficus Elastica en Schefflera hadden 4% meer lengte en meer vers- en drooggewicht.
- Van Dracaena 'Song of India' en Ficus Benjamina waren de meetplanten helaas verdwenen op het moment van de eindwaarneming.

De kwalitatieve beoordeling van de planten uit de Energieproducerende Kas vergeleken met de referentie was als volgt:

- De planten uit de EPK van Anthurium 'Saxo' en 'Silence' werden als beter beoordeeld, vooral door een betere plantvorm en lengte/breedte verhouding.
- Areca werd als slechter beoordeeld op de minder goede bladkleur.
- Croton 'Petra' was gelijk.
- Croton 'Iceton', Dracaena 'Surprise' en Schefflera waren beter op alle beoordeelde punten.
- Ficus elastica was slechter op alle beoordeelde punten.

Tabel 7.3. Procentueel verschil van Energieproducerende Kas ten opzichte van de Referentiekas voor lengtegroei, bladoppervlak, versgewicht, drooggewicht en versgewicht bloemen van opplanting 4.

Opplanting 4

week 11, 2008 - week 26, 2008

EPK versus Referentie (in % verschil, waarbij de referentie op 100% is gesteld)

	Lengte	Blad oppervlak	Vers gewicht	Droog gewicht	Aantal bloemen	aantal Scheuten
Anthurium 'Saxo'	-16	-9	1	19	104	126
Anthurium 'Champion'	-5	0	16	28	0.8 stuks	188
Areca	3	-	-	-		
Croton 'Petra'	-4	1	8	18		
Croton 'Mrs Iceton'	33	61	88	90		
Dracaena 'Song of India'	24	49	62	93		
Dracaena 'Surprise'	7	23	31	28		
Ficus benjamina 'Exotica'	4	-	-	-		
Ficus longifolia	11	-	-	-		
Schefflera amatus	12	-	-	-		

In opplanting 4 waren de resultaten van de Energieproducerende Kas versus de referentiekas als volgt:

- Anthurium 'Saxo' was beduidend korter, had minder bladoppervlak, gelijk versgewicht en meer drooggewicht en behoorlijk meer bloemen en scheuten.
- Anthurium 'Champion' was korter, had evenveel bladoppervlak, maar duidelijk meer vers- en drooggewicht en meer bloemen en scheuten (de referentie had geen bloemen).
- Croton 'Petra' was korter, had een gelijk bladoppervlak en meer vers- en drooggewicht. Ook in deze opplanting kwamen de Petra's in de EPK makkelijk in bloei en daardoor stopt de lengtegroei.
- Beide Dracaena's hadden meer lengtegroei, meer bladoppervlak, meer vers- en drooggewicht.
- Bij de (grote) planten Areca, Ficus benjamina, Ficus longifolia en Schefflera amatus zijn alleen lengte metingen uitgevoerd en voor al gewassen gold dat de planten in de EPK groter werden.

De kwalitatieve beoordeling van de planten uit de Energieproducerende Kas vergeleken met de referentiekas was als volgt:

- Anthurium 'Saxo' en 'Champion' zijn kwalitatief beter op alle onderdelen.
- Areca wordt opnieuw slechter beoordeeld op bladkleur.
- Croton 'Petra' is kwalitatief minde
- Croton 'Iceton' s gelijkwaardig. Beide Dracaena's zijn ook gelijkwaardig.
- Ficus benamina scoort slechter op de bladkleur, terwijl Ficus longifolium beter scoort door de bladkleur.
- Schefflera amatus was gelijkwaardig in beide afdelingen qua kwaliteit.

Tabel 7.4. Procentueel verschil van Energieproducerende Kas ten opzichte van de Referentiekas voor lengte-groei, bladoppervlak, versgewicht, drooggewicht en versgewicht bloemen van opplanting 5.

Opplanting 5

week 25, 2008 – week 42, 2008

EPK versus Referentie (in % verschil, waarbij de referentie op 100% is gesteld)

	Lengte	Blad oppervlak	Vers gewicht	Droog gewicht	Aantal bloemen
Anthurium 'Saxo'	5	15	22	19	28
Anthurium 'Champion'	4	-20	3	7	29
Anthurium 'Season'	3	12	12	13	30
Croton 'Petra'	14	34	33	35	-
Croton 'Mrs Iceton'	4	49	44	46	-
Dracaena 'Surprise'	-6	27	-10	-5	-
Ficus benamina 'Exotica'	12	-	-	-	-
Ficus longifolia	18	-	-	-	-
Schefflera amatus	10	-	-	-	-

In opplanting 5 waren de resultaten van de energie producerende kas versus de referentie als volgt:

- Anthurium 'Saxo' en 'Season' waren op alle punten beter, dus meer lengte, bladoppervlak, vers- en drooggewicht en meer bloemen.
- Anthurium 'Champion' had meer lengte, vers- en drooggewicht, meer bloemen, maar minder bladoppervlak bij de energieproducerende kas.
- Bij de Crotons was de totale groei beter bij de energie producerende kas.
- Bij Dracaena 'Surprise' is bij de energie producerende kas alleen meer bladoppervlak geproduceerd ten opzichte van de referentie. Lengte, vers- en drooggewicht was betrouwbaar slechter bij de energie produce-rende kas.
- Ficus benamina, Ficus longifolia en Schefflera waren in de energie producerende kas langer dan in de referentie.

De kwalitatieve beoordeling van de planten uit de Energieproducerende Kas vergeleken met de referentiekas was als volgt:

- Anthurium 'Saxo' en 'Season' waren betrouwbaar beter, vooral op plantvorm en lengte/breedte verhouding.
- Anthurium 'Champion' was gelijk.
- De Crotons waren beter, vooral op bladkleur. Ficus benamina was gelijk. Ficus longifolia was beter, vooral op lengte/breedte verhouding. Schefflera was minder goed, vooral op kleur.

Samenvattend

- Anthurium: meestal niet meer lengte groei, wel meer bladoppervlak, vers- en drooggewicht, meer bloemen en meestal een betere kwalitatieve beoordeling, vooral op lengte/breedteverhouding en meer bloemen.
- Areca: De groei was of gelijk of beter, maar de kwaliteitsbeoordeling was altijd minder goed door een minder goede bladkleur.
- Croton: De groei was over het algemeen beter, behalve wanneer de cultivar 'Petra' in bloei kwam. De kwaliteitsbeoordeling hing meestal samen met de kleurintensiteit en was meestal beter voor de Energieproducerende kas.
- Dracaena: De groei en beoordeling van Dracaena 'Song of India' was altijd beter. De groei van Dracaena 'Surprise' is niet zo snel en de verschillen meestal niet groot. De kwaliteitsbeoordeling was meestal in het voordeel van EPK, dat kwam ook de een mooiere bonte kleur door meer licht.
- Ficus: De groei was in beter en de kwaliteitbeoordeling altijd minder en dat had te maken met een lichtere bladkleur.
- Schefflera: De groei was meestal beter en de kwaliteitsbeoordeling was niet eenduidig, maar dat kwam omdat er steeds een andere cultivar is beoordeeld.

7.2 Conclusie

In 2007, maar vooral in 2008 is veel meer licht toegelaten door later te schermen dan in de praktijk bij de meeste potplantenteelten gebruikelijk is. Daarnaast is in de Energieproducerende Kas de luchtvochtigheid stabiel geweest dan in de referentiekas en in extreem warme en zonnige perioden werd de Energieproducerende Kas wat minder warm. Deze combinatie van klimaatfactoren leverde in het algemeen meer groei op en dat vertaalde zich een verbetering van één of meer van de volgende parameters lengtegroei, bladoppervlak, versgewicht, drooggewicht, bloemen of scheuten.

In veel gevallen was de kwaliteitsbeoordeling aangaande de planten die uit de Energieproducerende kas kwamen gelijk of beter en dit had te maken met een betere plantgroei (Anthurium, Schefflera) en/of mooiere bladtekening (Croton, Dracaena). De verschillen hadden nog groter uit kunnen vallen, maar helaas is er een groot deel van de tijd een beperkt CO₂-aanbod geweest om van het verbeterde klimaat volledig gebruik te maken (zie Figuur 6.3). De oorzaak van deze beperkte CO₂-dosering lag bij problemen met de rookgasreiniging en de ombouw van de warmte en CO₂-infrastructuur van de Energiecombinatie Bergerden (ECB). De oplossing van deze problemen hebben lang op zich laten wachten door de faillissement van ECB en de tijdrovende procedure van de doorstart die daarna heeft plaatsgevonden.

In twee gevallen was de beoordeling altijd slechter, namelijk bij Areca en Ficus benamina en dat had te maken met de lichtere bladkleur die ontstond in de Energieproducerende Kas. Uit diverse waarnemingen is gebleken, dat de bladkleur donkerder wordt, wanneer de planten worden geplaatst in zwaarder geschermd afdelingen. Het is daarvoor mogelijk (en wordt door het bedrijf Stef Huisman ook daadwerkelijk uitgevoerd) om jonge planten onder veel licht snel op te kweken en later te verplaatsen naar 'donkerder' afdelingen om op kleur te komen.

De ervaringen met het telen van tropische potplanten bij Hydro Huisman in veel lichtrijkere omstandigheden dan wat in de sector gebruikelijk was hebben geleid tot een grote toename van de aandacht en interesse voor de lichttoetreding bij deze gewassen. In combinatie met de toepassing van nevelinstallaties en een zorgvuldige kasklimaatregeling zal dit ook in de standaard potplantenteelt tot een duidelijk teeltversnellingsperspectief leiden en dus tot een energiebesparing per eenheid product.

8 De Energieproducerende Kas in een economisch perspectief

De Energieproducerende Kas bij Hydro Huisman heeft van 1 april 2007 tot 1 april 2008 120 kWh aan elektra per m² gebruikt. Daarvan was 80 kWh nodig voor de klimaatbeheersing en warmteverzameling en 40 kWh voor de opwerking van de laagwaardige warmte naar een temperatuurniveau waarop de warmte kan worden ingezet voor de verwarming van de betonvloer van afdeling 1, 2 en 3 van de kwekerij. Deze warmtelevering bedroeg in deze periode 685 MJ per m² per jaar.

Om deze twee basisgegevens in economische zin te kunnen vertalen moeten prijzen voor warmte en elektriciteit worden vastgesteld. Het bedrijf van Hydro Huisman is onderdeel van een energiecluster (de Energiecombinatie Bergerden). De in dit collectief deelnemende tuinders behalen door schaalvoordelen en een iets gunstiger (afgevlakte) gezamenlijk afnamepatroon van warmte en elektriciteit voordeel waardoor er binnen de cluster lagere warmte- en elektriciteitsprijzen gelden dan buiten zo'n cluster. In 2007/2008 was de gemiddelde warmteprijs € 9 per GJ en de elektriciteitsprijs die voor de Energieproducerende Kas werd gerekend bedroeg 8,5 cent per kWh. De warmteprijs was in het ECB-gebied dus iets lager dan wanneer de warmte met een eigen ketel zou zijn opgewekt, maar de elektriciteitsprijs die door Hydro Huisman voor de Energieproducerende Kas werd betaald was ook iets lager³.

Uit de bovenstaande cijfers volgt dat de waarde van de 685 MJ per m² geleverde warmte € 6,17 is, en de elektriciteitskosten voor de Energieproducerende kas € 10,20 per jaar bedroegen. Als de (verkoop)waarde van de warmte wordt afgetrokken van de inkoopkosten van de elektriciteit bedragen de netto energiekosten voor de Energieproducerende kas dus € 4,03 per m² per jaar.

Het warmtegebruik van de Energieproducerende kas bedroeg in deze periode 626 MJ per m². Indien deze warmte voor € 9 per GJ gekocht had moeten worden zouden de stookkosten voor deze kasafdeling € 5,63 zijn geweest. De besparing op energiekosten, na aftrek van de verkoopwaarde van warmte, bedraagt dus $€ 5,63 - (€ 10,20 - € 6,17) = € 1,60$ bedraagt.

Naast de besparing op energiekosten is er in de energieproducerende kas een duidelijke teeltversnelling geconstateerd. Een inschatting hiervan komt op een versnelling van 4 weken per jaar, waardoor de productietoename op 8% zou kunnen worden ingeschat. Er is bij sommige soorten een kwaliteitsverbetering waargenomen en bij sommige planten een kwaliteitsvermindering dus het is reëel te stellen dat er geen geldelijke voordelen in het kwaliteitseffect zijn te verdisconteren. Uitgaande van een omzetwaarde van € 60 per m² teeltruimte vertegenwoordigt 8% teeltversnelling een omzetvergroting van € 4,80 per m² per jaar. Na aftrek van de extra arbeidskosten die zo'n teeltversnelling met zich meebrengt (ingeschat op € 0,25 per m²) is de economische waarde van de teeltversnelling dus € 4,55.

De jaarlijkse meeropbrengst van de Energieproducerende Kas tegen de achtergrond van de prijzen die in 2007/2008 golden bedraagt hiermee € 6,15 per m² per jaar.

De investeringskosten voor een installatie zoals die in de Energieproducerende Kas is gebruikt zouden bij toepassing op een reële schaalgrootte uitkomen op gemiddeld € 85 per m² (€ 30 voor het bronnenpaar, € 20 voor de koelers in de kas € 20 voor de warmtepomp en € 15 voor het installatiewerk)⁴. Wanneer dit bedrag wordt vergeleken met

³ In 2007 is er nog een kassysteem in bedrijf gesteld dat gebruik maakt van een warmtepomp als enige warmtebron, bekend onder de naam Kas zonder Gas van Maurice van Hoorn. In deze situatie wordt de elektriciteitsprijs laag gehouden via een scherp uitonderhandeld contract voor nachstroom, aangevuld met een zeer groot opslagsysteem dat 's nachts met die nachstroom wordt opgewarmd als warmtebron voor overdag.

⁴ De investeringen voor de realisatie van de Energieproducerende Kas waren ongeveer 6 maal hoger maar niet reëel om in dit verband te gebruiken omdat de schaalgrootte niet representatief is voor het concept en bovendien de nieuwigheid van de installatie tot grote extra kosten leidt.

de jaarlijkse revenuen is het duidelijk dat de terugverdientijd voor tuinbouwbegrippen veel te lang is. De simple pay out time (SPOT) bedraagt in dit geval namelijk bijna 14 jaar en daarbij zijn onderhouds- en rentelasten niet meege-rekend.

Het feit dat de huidige installatie bij Hydro Huisman in economische zin slecht rendeeft heeft natuurlijk te maken met de hoge investeringskosten van de installatie in verhouding tot de waarde van de energiebesparing die ermee wordt gerealiseerd en de stijging van de productwaarde.

Bij alle drie deze punten kunnen kanttekeningen worden geplaatst.

Investeringskosten

Het is evident dat energiebesparende systemen beter renderen naarmate de investeringskosten die ermee gemoeid zijn afnemen. Indien systemen zoals in de Energieproducerende Kas in grotere aantallen zouden worden geproduceerd is er op dit punt vooruitgang te verwachten. Ook kunnen de kosten voor het bronnenpaar van plaats tot plaats sterk verschillen en zouden dus voor sommige locaties gunstiger kunnen zijn (de kosten voor de aanleg van een bronnenpaar in een aquifer kunnen echter ook oplopen tot bijna € 50,- per m²).

Waarde van de energiebesparing

In het algemeen is het zo dat energiebesparende systemen beter gaan renderen naarmate de energieprijzen toenemen. De huidige ontwikkeling van trendmatig stijgende gasprijzen, en de verwachting dat dit de komende jaren doorzet zou betekenen dat het economisch rendement van een concept als de Energieproducerende Kas langzaam beter wordt.

Als wordt aangenomen dat de investeringskosten veel langzamer toenemen dan de energiekosten zal dit inderdaad zo zijn, maar het effect van stijgende energiekosten wordt sterk getemperd door het feit dat de Energieproducerende Kas het warmteverbruik sterk beperkt (zelfs negatief maakt want de Energieproducerende Kas produceert meer warmte dan hij zelf gebruikt), maar dat deze warmtevraag wordt vervangen door een elektriciteitsvraag. De installatie zoals die bij Hydro Huisman staat heeft in de periode van 1 april 2007 tot 1 april 2008 ruim 1300 MJ aan warmtevraag bespaard (de vraag van de kas + de levering aan de betonvloer bedraagt 1310 MJ) maar heeft daarvoor 120 kWh elektriciteit verbruikt. In bovenstaande tekst is gebleken dat de marge die hierdoor is ontstaan € 1,60 bedraagt.

Bij stijgende energieprijzen zal niet alleen de warmteprijs, maar ook de elektriciteitsprijs stijgen. Indien de verhouding blijft zoals die op dit moment is zal de waarde van de energiebesparing zelfs bij een verdubbeling van de gasprijs naar 60 cent per m³ nog steeds beperkt zijn (€ 3,20).

Het is dus niet alleen de prestatie uitgedrukt als hoeveelheid warmte in de vorm van opgewarmd water in de aquifer die de besparing op energiekosten door een Energieproducerende Kas bepaalt, maar ook de verhouding tussen elektriciteitsinput en de warmteoutput. In de huidige marktsituatie is een MJ elektriciteit 2.6 keer zoveel waard als een eenheid hoogwaardige warmte (warmte van ongeveer 85 °C).

Stijging van de productwaarde

In de Energieproducerende Kas waren de klimaatomstandigheden gedurende het experiment aanzienlijk gunstiger dan in de referentiekas. Hierdoor kon een teeltversnelling van 8% worden gerealiseerd.

De verbetering van het teeltklimaat bestond in de eerste plaats uit het verhogen van de lichttoevoer en besturen van de luchtvochtigheid. Daarbovenop konden extreme temperaturen worden voorkomen en in een aantal perioden was ook de CO₂-concentratie hoger. In feite staan de eerste twee factoren (de hoge lichttoevoer en het besturen van de luchtvochtigheid) los van het gebruik van het concept Energieproducerende Kas. De lichtintensiteit in de referentiekas moest lager worden gekozen vanwege het daar aanwezige sortiment en vanwege het feit dat de nevelinstallatie in die kas slechts de halve capaciteit had van de nevelinstallatie in de Energieproducerende Kas (bij aanvang van het project in 2006 was er zelfs helemaal geen nevelinstallatie in de referentiekas waardoor er onaanvaardbaar ongunstige klimaatomstandigheden ontstonden).

Zoals in hoofdstuk 7 is vermeld moet het grootste deel van de teeltversnelling aan het lichteffect worden toegeschreven. Dat wil zeggen dat aan de baten-kant van het concept Energieproducerende Kas bij Hydro Huisman, eigenlijk niet de eerder genoemde € 4,55 per m² per jaar toegekend mag worden. Aan de andere kant is het waarschijnlijk dat als de CO₂-dosering voldoende was geweest, de productiestijging groter was geweest.

Simulatieberekeningen voor een tomatenteelt laten zien dat een gesloten kas met een goede CO₂-voorziening 8 tot 15% productiestijging oplevert. De genoemde marge is vooral afhankelijk van de referentie die gekozen wordt. Heeft de referentie in de zomer een CO₂-doseercapaciteit van 100 kg/ha uur dan kan de meerproductie in een gesloten kas naar die 15% oplopen, maar wordt in de referentie gesteld dat er 250 kg CO₂ per ha per uur kan worden gedoseerd (de CO₂ in de rookgassen van een WK-unit van 500 kWe per ha) dan geeft het sluiten van de kas veel minder vaak een CO₂ voordeel en zakt de meerproductie naar een 8%.

Naast een stijging van de productie kan kaskoeling echter ook leiden tot een duidelijke stijging in kwaliteit en tot een verbetering van de vitaliteit van het gewas (met name in de phalaenopsis-teelt en er wordt momenteel ervaring opgedaan in de rozenteelt). In de waardevolle phalaenopsis-teelt is deze kwaliteitsverbetering zodanig dat kaskoeling rendeert en in die sector functioneren dan ook verschillende op de Energieproducerende kas gelijkende systemen (bijvoorbeeld de Kas zonder Gas en Sion Orchids).

In de rozenteelt lopen op dit moment een paar initiatieven en de resultaten bij die voorlopers zouden een nieuwe stimulans in de ontwikkeling kunnen geven.

9 Samenvatting en Conclusies

In de afgelopen jaren is een schat aan kennis en ervaring opgedaan rond het concept Energieproducerende Kas. Er zijn honderden bezoekers bij de kas geweest en er zijn ruim 20 lezingen over de ervaringen in dit onderzoeksobject gehouden. Bovendien is de ontwikkeling van de technische installaties die nodig zijn voor de efficiënte koeling van kassen in hoog tempo doorgezet, mede op grond van de continue stroom van teeltkundige en tuinbouwtechnische ervaringen en inzichten die in de projectteamvergaderingen werd uitgewisseld. In dit hoofdstuk worden alle relevante zaken die in dit document uiteengezet zijn samengevat en worden de belangrijkste conclusies op een rijtje gezet.

9.1 Samenvatting

Het aanbod van energie in de vorm van zonlicht bedraagt in Nederland ongeveer 100 m^3 aardgas equivalenten en dat is (ruimschoots) meer dan de warmtevraag van kassen. Dat kassen desondanks gas verbruiken komt omdat de toevoer van energie uit zonlicht in de winter te klein is voor het handhaven van de noodzakelijke temperatuur. In de zomer is de toevoer vaak veel te groot en wordt het overschot aan (zonne)warmte vernietigd wanneer de ramen worden geopend. Wanneer deze vernietiging van zonnewarmte voorkomen kan worden door de kas te koelen kan de overtollige energie worden opgeslagen voor gebruik in de winter. Als door de beperking van de warmteverliesposten van de kas de warmtevraag in het koude deel van het jaar klein genoeg gemaakt wordt, kan de kas zelfs meer energie verzamelen dan hij zelf nodig heeft voor de verwarming en kan de kas netto energie producerend worden.

Vanuit theoretisch oogpunt kan dus worden gesteld dat een kas netto energieproducerend is als de verliesfactoren klein genoeg zijn. Dit lijkt in strijd met de eerste hoofdwet van de Thermodynamica, maar is dat niet omdat in de berekening van de netto energieproductie de energie-inhoud van de duurzame (zonne- of andere duurzame) energie niet aan de inputkant wordt meegerekend. Zo kan de energieproductie van een energieproducerende kas in theorie zelfs meer dan 100 m^3 a.e. per m^2 worden indien windmolens een integraal deel zijn van het systeemconcept 'energieproducerende kas'.

Om het concept van de Kas Als Energiebron in een praktijksituatie te beproeven is op het tuinbouwbedrijf van Hydro Huisman een Energieproducerende Kas gebouwd. De kas was bestemd voor een potplantenteelt op roltafels en de ruimtelijke indeling maakte het mogelijk om verwarmde en gekoelde lucht, die nodig is voor de klimatisering, tussen de tafels door te blazen. In de ontwerpfase waren er de nodige zorgen over de horizontale temperatuurverdeling die in de kas zou kunnen optreden doordat verwarming en koeling feitelijk vanuit een geconditioneerde 'plak' lucht plaatsvinden. Metingen aan de horizontale variatie in temperaturen hebben echter laten zien dat er op dit punt eigenlijk niets te wensen over blijft. De kas kan zich qua horizontale homogeniteit goed meten met andere moderne kassen. Ook de gewasontwikkeling was zeer evenwichtig over de kas verdeeld. Er waren geen plekken in de kas waar specifieke klimaatproblemen naar voren kwamen.

De besturing van alle componenten die de warmteverzameling moesten realiseren, de warmte moesten opslaan in een aquifer en vervolgens in de winter weer aan de kas moesten terugleveren werd verzorgd door een speciaal ontwikkeld regelsysteem, het TCS (Total Control System). Dit systeem heeft zijn goede werking bewezen en kan door iedere kasklimaatcomputer worden aangestuurd.

Vanwege de schaalgrootte van het experiment is er geen gebruik gemaakt van een WKK-installatie. Bij toepassing van het concept Energieproducerende kas op praktijkschaal (bijvoorbeeld een bedrijf van 2 ha) zou dit in verband met de behoefte aan elektriciteit en CO_2 , wel een onderdeel van het uiteindelijk concept moeten zijn. Daarom is de analyse van de werking van de installatie niet alleen gemaakt op basis van de pure meetgegevens, maar is ook de (praktijk)situatie geanalyseerd waarin een deel van de elektriciteitsbehoefte met een WK-installatie wordt gedekt. Hiervoor is een 'ketelhuissimulatiemodel' ontwikkeld dat de WKK-performance simuleert op basis van de gemeten vraagpatronen van de kas.

Voor de minimalisatie van de warmteverliezen en de efficiëntie van de warmte-verzameling is in de Energieproducerende kas gebruik gemaakt van twee nieuwe componenten: het ZigZag kasdek materiaal en de FiWiHex warmtewisselaar. De bruikbaarheid van het ZigZag materiaal is in de praktische situatie van de Energieproducerende kas fors tegengevallen. Dit kwam niet zozeer door de specificaties van het plaatmateriaal zelf (de gemeten specificaties waren maar een klein beetje minder dan de opgegeven productspecificaties), maar vooral door bouwtechnische beperkingen. Het feit dat de plaatlengte niet gelijk was als de toegepaste kapmaten leidde tot zware gordingen met ingewikkelde koppelprofielen. Vanuit teelttechnisch oogpunt was de drup die van de platen afviel zeer bezwaarlijk. Het eerste punt is geen principiële probleem. Bij voldoende marktvraag zullen er relatief eenvoudig machines kunnen worden gemaakt die elke gewenste plaatlengte kunnen maken. De drup is wel een hardnekkig probleem omdat dit samenhangt met de vorm van de plaat.

De FiWiHex warmtewisselaar bleek prima in staat het kasklimaat in de hand te houden en met een beperkte elektriciteits-input warmte te kunnen verzamelen. De overall COP voor de warmteverzameling, (=de hoeveelheid warmte die verzameld en opgeslagen wordt in de aquifer per eenheid toegevoerde elektriciteit) bedraagt gemiddeld 30. Dit lijkt laag, maar is een forse verbetering in vergelijking met gebruikelijke koelinstallaties in de tuinbouw, die veelal tussen de 15 en 20 scoren. Parallel aan de meetperiode bij Hydro Huisman is de ontwikkeling van de FiWiHex doorgezet waardoor de koeling inmiddels (met de verbeterde FiWiHex) zou kunnen hebben plaatsgevonden met een overall COP van 40.

Tijdens verwarmen werkt de Energieproducerende kas met een overall COP die rond de 4.2 ligt. Deze COP is veel lager dan de koel-COP omdat bij verwarmen een warmtepomp gebruikt wordt om het water uit de aquifer (met een temperatuur van 18 °C of minder) in temperatuur te verhogen voor de verwarming. Het daarvoor benodigde elektriciteitsverbruik door de warmtepomp heeft een zeer grote impact op de COP.

Met het model dat voor de werking van de FiWiHex is gemaakt kan het gedrag van de bij Hydro Huisman toegepaste uitvoeringsvariant worden bestudeerd als deze wordt gebruikt voor ontvochtigen-met-warmteterugwinning. Op grond van deze berekeningen is aangetoond dat er in de gegeven situatie bij Hydro Huisman zuiniger met elektriciteit wordt omgegaan wanneer de kas met buitenlucht wordt ontvochtigd dan wanneer dit intern met warmteterugwinning gebeurt. Daarom is in februari 2007 besloten om in koude perioden de ontvochtiging te realiseren door de ramen op een kier te zetten. Deze gebruikswijze bespaart elektriciteit maar beperkt de warmteverzameling in de aquifer en ondergraaft daarmee in zekere mate het concept van een Netto Energieproducerende kas. Omdat echter elektriciteit echter meer waard is dan warmte in de aquifer is het vanuit bedrijfseconomisch oogpunt begrijpelijk dat deze beslissing genomen is.

De eerste maanden van het experiment traden er een aantal problemen met de installatie op die steeds enige tijd hebben gevraagd alvorens ze waren opgelost. Dit kwam vooral door het gebrek aan ervaring met de nieuwe techniek, waardoor de betrokkenen bij de constatering van problemen deze niet direct op de juiste manier wisten te duiden. Een compleet overzicht van de problemen en oplossingen daarvoor staat beschreven in bijlage III vanaf pagina 20.

Vanaf 1 februari 2007 functioneerde de installatie echter naar behoren en in dit rapport worden vooral de meetresultaten in de periode van 1 april 2007 tot 1 april 2008 gebruikt omdat dit een jaarrond tijdspanne beslaat waarin precies een volledige laad- en ontladingscyclus werd doorlopen. In deze periode was het elektriciteitsverbruik 120 kWh per m² (wat overeenkomt met 432 MJ/m²) en bedroeg de warmtelevering 685 MJ/m². De warmtelevering is dus groter dan de elektriciteitsinput. Wanneer input van elektriciteit en output van warmte in een 1 op 1 verhouding worden gewaardeerd is de Energieproducerende kas dus netto energieproducerend.

In werkelijkheid is dit overschot van 253 MJ/m² evenwel enigszins gechargeerd omdat het berust op een grotere warmteonttrekking aan de aquifer dan dat er in de zomer weer wordt geladen. Als de netto energieproductie wordt gecorrigeerd voor dit oneigenlijke gebruik van de aquifer (de aquifer is namelijk voor een deel als aardwarmtebron gebruikt) dan blijft er een netto overschot van 90 MJ/m² over, wat overeenkomt met bijna 3 m³ aardgas equivalenten.

De 1 op 1 omrekening van megajoules elektriciteit in megajoules warmte is echter discutabel. Voor de productie van 1 MJ elektriciteit wordt namelijk niet 1 MJ primaire energie verbruikt, maar in Nederland gemiddeld 2.3 MJ. De feitelijke energie-input voor de verbruikte 120 kWh is dus geen 432 MJ maar 1000 MJ (in de elektriciteitscentrale). Dit leidt tot de conclusie dat wanneer het gemiddelde Nederlandse conversierendement voor primaire energie naar Elektricititeit in de berekening wordt gebruikt, de Energieproducerende Kas niet langer netto energieproducerend is. Het netto verbruik van de kas is dan 1000 MJ (dat is de toe te rekenen primair energie) – 685 MJ (dat is de warmte die aan de betonvloer is geleverd) = 315 MJ ofwel 10 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar.

Een belangrijke mogelijkheid om het conversierendement te verbeteren is de inzet van WKK. Het 'ketelhuissimulatie-model' berekent dat bij een WKK van 160 kWe per hectare het primaire energieverbruik van de kas daalt van de genoemde 1000 MJ/m² naar 850 MJ/m². Bovendien wordt hiermee het eerder genoemde oneigenlijk gebruik van 170 MJ/m² uit de aquifer opgeheven en omgezet in een overschot van 64 MJ/m². Als er dus gebruik gemaakt wordt van een WKK zal de warmtelevering zonder probleem kunnen toenemen naar 750 MJ/m². Het netto energieverbruik van de energieproducerende kas onder de teeltomstandigheden van Hydro Huisman komt dan op 100 MJ/m² per jaar (circa 3 m³ a.e.). Daarmee kas is daarmee nog steeds geen netto energie producerende kas, maar wél een zeer energiezuinig kassysteem.

Bovengenoemde resultaten roepen de vraag op waardoor het komt dat de Energieproducerende Kas niet in staat bleek om netto energieproducerend te zijn zoals in de eerste conceptberekeningen wel het geval was.

Naast de tegenvallende lichtdoorlatendheid van de kas en de knieval voor de besparing op elektriciteitskosten door geen gebruik te maken van ontvochtiging-met-warmteterugwinning ligt de oorzaak voor een groot deel in het afwijken van de oorspronkelijk beoogde temperatuurinstellingen en het regelmatige gebruik van het schaduw scherm. Als de oorspronkelijke uitgangspunten worden gehanteerd levert de kas in potentie een netto energieproductie van 150 tot 460 MJ/m² per jaar op (zie § 6.4).

Overigens zou er dan waarschijnlijk wel wat aan de warmteleveringzijde van het systeem moeten gebeuren want het is de vraag of de bestaande situatie de grotere hoeveelheid warmte die in dat geval beschikbaar zou zijn zou kunnen benutten. De warmte-afgiftecapaciteit van de betonvloer en de warmteproductiecapaciteit van de warmtepomp hebben immers hun beperkingen.

Dit illustreert direct dat een netto Energieproducerende Kas niet kan bestaan zonder een afnemer met voldoende vraag.

De teeltomstandigheden in de Energieproducerende kas waren zeer goed en groeizaam. De temperatuur en luchtvochtigheid werden prima in de hand gehouden en in 2007, maar vooral in 2008 kon er (daardoor) veel meer licht in de kas worden toegelaten door veel minder te schermen.

Voor de lichtintensiteit in de Energieproducerende Kas verschilde ten opzichte van de referentiekas, maar de luchtvochtigheid zakte in de referentiekas ook op zomerse dagen vaak diep weg. Dit verschil hing echter niet zozeer met de FiWiHEX koelers samen, maar vooral aan de andere regeling en kleinere vernevelingscapaciteit in de referentiekas.

De combinatie van de bovengenoemde gunstiger klimaatfactoren leverde in het algemeen meer groei op wat zich vertaalde in een verbetering van één of meer van de parameters lengtegroei, bladoppervlak, versgewicht, drooggewicht, bloemen of scheuten. In sommige gevallen werd de kwaliteit van de planten uit de Energieproducerende Kas als beter beoordeeld. Anthurium en Schefflera hadden een betere plantgroei en Croton en Dracena kregen een mooiere bladtekening. Enkele andere gewassen gaven geen duidelijk effect op de kwaliteit te zien.

De verschillen waren wellicht groter uit gevallen als de CO₂-dosering naar behoren was geweest want deze heeft helaas regelmatig door leveringsproblemen vanuit de centrale voorzieningen sterk te wensen overgelaten.

Bij Areca en Ficus benjamina was de beoordeling altijd slechter vanwege de lichtere bladkleur die ontstond in de Energieproducerende Kas. Deze planten hadden beter in een donkerder kascompartiment kunnen worden afgekweekt om alsnog een beter gewaardeerde kleur te krijgen.

Voor de berekening van het economisch perspectief van de Energieproducerende Kas moet de energiebesparing worden omgerekend in een energiekostenbesparing en moet er een waarde aan de extra revenuen uit de verbeterde gewasopbrengst worden toegekend. De economische rentabiliteitsberekeningen zijn gemaakt uitgaande van een warmteprijs van € 9,- per GJ en een elektriciteitsprijs van gemiddeld € 0,085 per kWh. De waarde van teelt is op € 60,- per m² per jaar ingeschaald.

De energiekostenbesparing wordt sterk beperkt door het feit dat een deel van de warmtevraag wordt vervangen door een elektriciteitsvraag. Hierdoor is de kostenbesparing, ondanks de levering van warmte ter waarde van € 6,17 aan de aangrenzende kasafdelingen onder de voorhanden condities bij Hydro Huisman niet meer dan € 1,60.

De waarde van de meerproductie in de Energieproducerende Kas ten opzichte van de referentiekas is moeilijk exact vast te stellen maar wordt ingeschat op € 4,80 (8% van de teeltwaarde). Van deze bruto meer-opbrengsten moeten nog wat meerwerk kosten worden afgetrokken waardoor de meerwaarde van de extraproductie op € 4,55 wordt geschat.

Het financieel voordeel dat met de Energieproducerende kas wordt behaald bedraagt dus $4,55 + 1,60 = € 6,15$ per m² per jaar. Als de richtlijn wordt gehanteerd dat de terugverdientijd voor een investering met zo'n grote impact op de energiehuishouding maximaal 8 jaar moet bedragen om bedrijfseconomisch interessant te kunnen zijn, mag de investering in de installatie niet meer dan € 50 per m² bedragen.

Aangezien de investeringen in systemen zoals bij Hydro Huisman op dit moment rond de € 85 per m² liggen zal er nog veel aan hetzij de kostenkant, hetzij de opbrengstenkant moeten gebeuren alvorens de techniek in de opzet van een energieproducerende kasconcept op brede schaal toegepast zou kunnen worden. Per situatie en/of teelt dient dit dan nader geanalyseerd te worden. Het zal duidelijk zijn dat de verhouding tussen de waarde van warmte (in dit rapport op € 9 per GJ vastgesteld) en de waarde van elektriciteit (hier op € 0.085 per kWh vastgesteld) hierop van grote invloed is. Naarmate elektriciteit verhoudingsgewijs duurder wordt dan warmte neemt het perspectief voor een Netto Energieproducerende kas af.

9.2 Conclusies

Het onderzoeksproject Energieproducerende Kas is, gemeten naar de publicitaire impact van de combinatie van een praktijkkas, een onderzoeksproject en een demonstratiefaciliteit zeer succesvol gebleken. Er hebben vijf grote evenementen plaatsgevonden (inclusief de opening in juni 2006) waar rond de honderd mensen zich op de hoogte lieten stellen van de ervaringen in de Energieproducerende Kas in het bijzonder en de algemene ontwikkelingen rond geconditioneerd en energiezuinig telen.

Daarnaast zijn er ruim 200 kleinere groepen langs geweest, variërend van ondernemers, beleidsmakers en politici uit alle lagen van het openbaar bestuur (waaronder ook verschillende internationale gezelschappen) tot groepen studenten en mensen die zich wilden laten informeren over energiebesparingsmogelijkheden.

Een zeer belangrijke spin-off ten behoeve van de potplantenteelt is de kennisvergroting op het gebied van het schaduw scherm-regime en de toepassing van verneveling.

De conclusies ten aanzien van de technische doelstellingen die in het project gesteld waren worden opgesteld aan de hand van een aantal vragen die in het 'Projectvoorstel Kas Als Energiebron' zijn beschreven. Vrij vertaald zijn deze vragen:

1. Realiseert de energieproducerende kas inderdaad een netto energieoverschot?
2. Is het primair energieverbruik van de kas kleiner dan 11 m³ a.e.?
3. Is er een productieverhoging?
4. Is het klimaat goed regelbaar?
5. Is de energieproducerende kas financieel haalbaar?

In dit hoofdstuk worden al deze hoofdvragen langsgelopen.

Ad 1.

In hoofdstuk 6 van dit rapport wordt uitgebreid ingegaan op de energiehuishouding die op het bedrijf is gemeten. Indien het gemeten elektriciteitsverbruik wordt vergeleken met de gemeten warmtelevering aan de naastgelegen kasafdelingen dan blijkt dat de elektriciteitsinput van 432 MJ/m^2 wordt overschreden door de warmtelevering van 685 MJ/m^2 . Wanneer echter de elektriciteitsinput wordt omgerekend naar de hoeveelheid primaire energie die daarvoor nodig is geweest dan volgt de conclusie dat het verbruik (bij een gemiddeld Nederlands centralerendement van 43%) 1000 MJ/m^2 is en volgt de conclusie dat de kas, bij gebruik van het concept bij de teelten van Hydro Huisman, ver van netto energieproducerend is gebleken.

Zelfs na toevoeging van een warmtekrachtinstallatie die ten doel heeft de conversieverliezen bij de productie van elektriciteit optreden nuttig in te zetten is de kas onder die omstandigheden nog niet netto energieproducerend. Bij een WK-unit van 160 kWe per hectare Energieproducerende Kas (waarmee er op jaarbasis net zoveel elektriciteit aan het openbare net wordt verkocht als dat er wordt ingekocht (resp. 49 en 48 kWh/m^2)) is het verbruik $26 \text{ m}^3/\text{m}^2$ per jaar. Dit is $4 \text{ m}^3/\text{m}^2$ per jaar meer dan de hoeveelheid warmte die de Energieproducerende Kas aan naastliggende afdelingen levert (zijnde $22 \text{ m}^3 \text{ a.e.}$).

Het blijkt overigens dat het systeem in principe best netto energieproducerend had kunnen zijn indien er minder gebruik gemaakt wordt van het schaduw scherm of als de stooktemperatuur lager gekozen zou worden. Dit zijn twee factoren die in de uiteindelijke benutting van de kas belangrijk anders zijn gehanteerd dan waarvan in de oorspronkelijke plannen werd uitgegaan.

Indien de stooklijn op de beoogde 17°C zou hebben gelegen en indien het schaduw scherm alleen als calamiteitenoplossing zou zijn gebruikt dan zou de Energieproducerende kas een netto energieoverschot van 460 MJ/m^2 per jaar hebben kunnen opleveren (15 m^3 aardgas equivalenten). In dat geval had er overigens waarschijnlijk ook wat gewijzigd moeten worden in de voorzieningen die zorgdragen voor de afzet van het warmteoverschot op de omliggende kasafdelingen. De huidige afzetcapaciteit is daarvoor waarschijnlijk ontoereikend en een netto energieproducerende kas bestaat alleen bij gratie van een afnemer van het warmteoverschot.

Samenvattend: de kas met de gebruikte installatie en de teeltwijze is niet netto energieproducerend. Dit was wel mogelijk geweest indien de oorspronkelijk beoogde klimaatinstellingen t.a.v. temperatuurregeling en scherminstallatie waren gehandhaafd.

Ad 2.

Indien er wordt uitgegaan van een 'ketelhuis' met een WK-unit van 160 kWe dat een hectare Energieproducerende Kas van elektriciteit, warmte, koude en CO_2 voorziet kan dit ketelhuis daarnaast nog 1.2 hectare kas verwarmen met het warmteoverschot dat in de zomer is verzameld, aangevuld met de afvalwarmte uit de elektriciteitsproductie. Zoals eerder aangegeven zal dit 'ketelhuis' hiervoor 26 m^3 aardgas per m^2 Energieproducerende Kas verbruiken. Op het eerste gezicht is dit heel erg veel meer dan de 11 m^3 die oorspronkelijk als doel voor het gasverbruik van de Energieproducerende kas was gesteld.

Dit grote verschil komt doordat in het concept zoals dat in dit rapport wordt besproken de Energieproducerende Kas de warmtelevering niet in de vorm van een voorraad water van 18°C in een aquifer verzorgd, maar deze warmte op een bruikbaar temperatuurniveau aflevert. Zo werd in hoofdstuk 8 al gemeld dat $1/3$ van de 120 kWh/m^2 die de Energieproducerende Kas verbruikt bestemd is voor de opwerking van het water in de aquifer t.b.v. levering aan de betonvloer. Het verbruik van $26 \text{ m}^3/\text{m}^2$ is dan ook niet uitsluitend voor de Energieproducerende Kas, maar ook voor het 1.2 maal zo grote oppervlak ernaast. Het energieverbruik van het kascomplex is dus $26/2.2 = 12 \text{ m}^3$ aardgas per m^2 per jaar.

Indien wordt gekeken naar het primaire energieverbruik van een Energieproducerende Kas die niet verder gaat dan het verzamelen van warmte in de aquifer en het klimatiseren van zichzelf (en dus de warmte niet in een direct bruikbare vorm aan de afnemer van dit overschot aflevert) is een WK-unit van 115 kWe per ha voldoende en daalt het gasverbruik van de eerder genoemde $26 \text{ m}^3/\text{m}^2$ naar $16 \text{ m}^3/\text{m}^2$ per jaar.

Samenvattend: Hoewel het Energieproducerende kasconcept een zuinig kasconcept vormt blijft het absolute verbruik indien de kas wordt gebruikt zoals dat bij Hydro Huisman heeft plaatsgevonden ruim boven de 11 m³ per m² per jaar. Als de Energieproducerende kas zijn warmteoverschot opwerkt tot 35 °C alvorens het aan de betonvloer te leveren bedraagt het absolute energieverbruik bij gebruik van een WKK 26 m³ per m² per jaar. Als de energiekosten voor het opwerken van de laagwaardige aquifer-warmte niet op het conto van de Energieproducerende Kas worden gebracht bedraagt het gasverbruik 16 m³ per m² per jaar.

Deze 16 m³ per m² per jaar moet worden vergeleken met de oorspronkelijk verwachte 11 m³ per m² per jaar omdat bij deze 11 m³ ook geen rekening was gehouden met het opwerken van de verzamelde warmte. Ook dan blijft echter een feit dat de Energieproducerende kas meer heeft verbruikt dan verwacht, wat vooral komt door de hogere stooktemperatuur (20 °C in plaats van 17 °C)

Ad 3.

Hoofdstuk 7 laat zien dat er in de zomermaanden een duidelijke teeltversnelling wordt gerealiseerd. Dit gold in 2008 nog meer dan in 2007. Hierbij moet echter nog wel de kanttekening gemaakt worden dat de waargenomen teeltversnelling lang niet geheel aan de kaskoeling toegeschreven moet worden. Het verschil komt vooral door de hoger lichttoetreding en die had in de referentiekas ook hoger kunnen zijn indien hier hetzelfde sortiment zou hebben gestaan als in de Energieproducerende Kas en indien de vernevelingscapaciteit gelijk was geweest. Aan de andere kant is er groeiversnellingspotentieel blijven liggen door problemen met de CO₂-toediening. De kwaliteit van het gewas is voor bijna alle gewassen goed, maar niet significant beter.

Samenvattend: Er is zeker productieverhoging mogelijk. Voor een potplantenteelt zoals die bij Hydro Huisman wordt dit ingeschat op 8%. Het productie-effect is echter zeer afhankelijk van de referentie die men hanteert.

Ad 4.

Bij aanvang van het experiment waren er regelmatig zorgen over de regelbaarheid van het klimaat, vooral met betrekking tot de vraag of het in de kas niet te warm of te koud zou worden. Het is in de afgelopen 2½ jaar gebleken dat de FiWiHex units, aangestuurd door het TCS-systeem prima in staat waren het klimaat te beheersen. Er zijn een paar keer storingen geweest die door adequate alarmeringen zijn verholpen en die geen noemenswaardige schade aan het gewas hebben geleverd.

Samenvattend: Het klimaat is met FiWiHex warmtewisselaars en besturing via het Total Control System (TCS) uitstekend regelbaar

Ad 5

In hoofdstuk 9, waar de economische perspectieven voor de Energieproducerende Kas bij Hydro Huisman zijn uitgewerkt komt naar voren dat de investeringen onvoldoende worden goedge maakt door de € 6,15 meeropbrengsten die de Energieproducerende Kas oplevert.

In andere teelten en bij andere energieprijzen zal deze situatie niet zo gauw veranderen, vooral omdat het concept Energieproducerende Kas sterke concurrentie ondervindt van het concept waarbij kassen vrijwel geheel worden verwarmd uit restwarmte die vrijkomt uit elektriciteitsproductie voor het openbare net.

Samenvattend: De investeringen in een systeem zoals aangebracht in de Energieproducerende Kas bij Hydro Huisman leveren in de huidige marktomstandigheden een te klein economisch voordeel ten opzichte van de daarbij behorende kosten.

Naast de bovengenoemde hoofdconclusies zijn er nog een aantal belangrijke nevenconclusies uit het onderzoek te trekken.

- Tijdens de looptijd van het project zijn een aantal problemen naar voren gekomen die achteraf gezien eenvoudig verholpen konden worden maar op dat moment, door gebrek aan ervaring met de installatie grote problemen opleverden. De opgedane ervaringen zijn voor de toekomst dan ook zeer waardevol en zijn daarom stuk voor stuk in de als bijlage toegevoegde tussenrapportage genoemd (zie bijlage III, hoofdstuk 5).
- In de aanloop naar de bouw van de Energieproducerend Kas, maar vooral ook in de periode na de bouw is de FiWiHEX gegroeid van een niet seriematig te produceren prototype naar een volwassen product dat goed inzetbaar is in de tuinbouw. Het resultaat is een compacte warmtewisselaar die, afgemeten naar zijn volume, qua overall COP duidelijk uitsteekt boven de algemeen in de tuinbouw toegepaste warmtewisselaars. Met overall COP wordt hier de verhouding bedoeld tussen de verwarming of koeling die de warmtewisselaar realiseert per eenheid elektrisch aandrijfvermogen voor het rondpompen van water en het rondblazen van lucht. De tot stand gekomen commerciële typen kunnen zowel in een lay-out worden toegepast waarin de lucht onderlangs wordt ingeblazen als in systemen waarin de lucht bovenlangs wordt gecirculeerd.
- Uit berekeningen met een speciaal model dat het gedrag van de FiWiHEX warmtewisselaar beschrijft, kan worden berekend wat de optimale besturingstrategie is voor lucht- en waterdebiet om tot een zo laag mogelijk elektriciteitsverbruik voor de klimatisering te komen (dus een zo hoog mogelijk overall COP te realiseren). Met de gegeven karakteristieken van de installatie betekent dat vooral een terughoudend beleid voor het optoeren van de ventilator. Lucht rondblazen is namelijk duurder dan water rondpompen. De berekeningen ten aanzien van de overall COP voor de verwarming als de kas gelijktijdig moet worden ontvochtigd laten zien dat het vanuit elektriciteitsverbruikoverwegingen gunstiger is de kas te ontvochtigen door het openen van ramen dan door actieve condensatie van waterdamp op koude FiWiHEX-blokken. Aangezien er naast dit theoretisch probleem grote praktische problemen waren bij de realisatie van ontvochtiging-met-warmteterugwinning is deze optie die de installatie in principe bood niet ingezet. Door deze ervaringen, en door de afwezigheid van een directe vraag hiernaar uit de praktijk, is de ontwikkeling van een dubbel blok die zou kunnen worden ingezet voor ontvochtiging-met-warmteterugwinning niet doorgezet.
- Uit de duurproef met een FiWiHEX die met direct aquiferwater werd doorstroomd zijn in een periode van 3 jaar geen problemen naar voren gekomen. Er was sprake van een slechts zeer licht stijgende trend in het drukverlies. Dit is een positieve constatering omdat de overall koel-COP aanzienlijk toeneemt (van 27 naar 37) wanneer de scheidingswisselaar achterwege zou kunnen blijven. De constatering heeft op dit moment echter weinig praktische waarde omdat de wetgever het gebruik van een scheidingswisselaar voorschrijft ter bescherming van de kwaliteit van het diepe grondwater. Bovendien geldt de waarneming uitsluitend voor water met de kwaliteit die in de aangeboorde aquifer wordt aangetroffen (onderaan het Veluwemassief).
- De ervaringen met het telen van potplanten onder veel hogere lichtintensiteiten dan gebruikelijk hebben een venster opgeleverd op een veel productievere potplantenteelt dan waarvan tuinders tot nu toe uitgingen. Een voorwaarde is wel dat er gewerkt wordt met een vernevelingsinstallatie zodat de ongunstig lage luchtvochtigheden worden vermeden. Ook moet er wellicht een verdeling van soorten of groeistadia in een kas worden aangebracht zodat gewassen of stadia die kunnen profiteren van een groot lichtaanbod niet in de buurt staan van soorten of teeltstadia die geen grote lichthoeveelheid tolereren.

10 Nabeschouwing en aanbevelingen

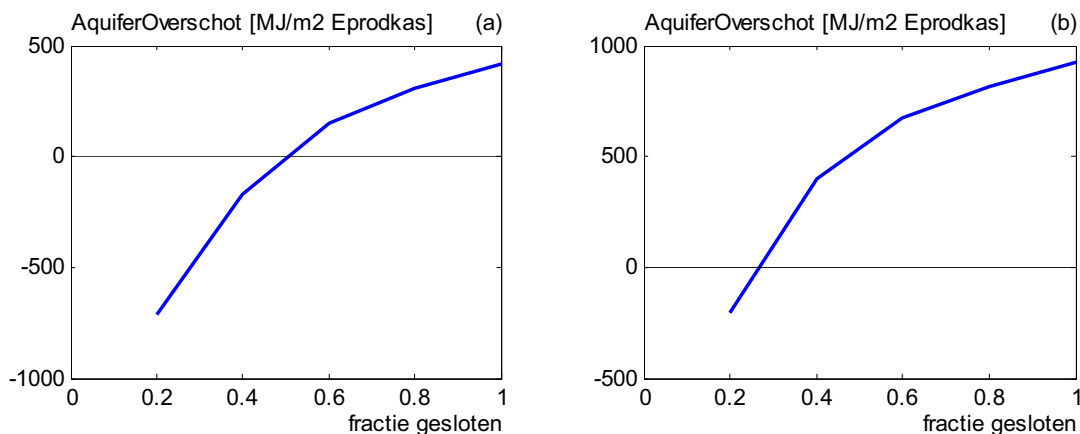
10.1 De Energieproducerende Kas als Energieproducent

De koelunits in de Energieproducerende Kas onttrekken warmte aan de kaslucht met een COP van ongeveer 30 (er wordt 30 keer zoveel zonne-energie geoogst als dat er aan elektriciteit moet worden toegevoerd). Als dit wordt vergeleken met de COP waarmee er zonne-energie met een zonnecollector kan worden verzameld is dit erg laag, zodat het vanuit energetisch oogpunt niet aantrekkelijk is om kassen als energieproducent voor derden te gebruiken zolang er ruimschoots collectoroppervlak bij die derden te vinden is (de daken van bedrijfshallen, huizen en flatgebouwen).

Voor de verzameling van zonnewarmte voor de verwarming van kassen ligt deze situatie echter anders. De warmtebehoefte van de huidige kassen is weliswaar per m² dakoppervlak vergelijkbaar met die van woonhuizen, maar in tegenstelling tot huizen kan dit dakoppervlak niet voor de onderschepping van zonlicht worden gebruikt. Het gewas heeft dit licht immers nodig om te groeien. Er zou zonnewarmte in de omgeving van kassen kunnen worden geoogst, maar daar is het beschikbare oppervlak in de regel zeer beperkt. De verzameling van zonne-energie zoals de Energieproducerende Kas dat doet voor de eigen warmtebehoefte is daarom een goed systeem. Dit betekent dat een deel van de kas kan worden uitgevoerd als Energieproducerend oppervlak wat op de rest van het bedrijf zou kunnen worden benut.

De energieproducerende fractie zou zodanig gekozen moeten worden dat het verzamelen en gebruik van warmte op de langere termijn in evenwicht komt. Op een bedrijf als dat van Hydro Huisman, waar de standaard-afdelingen ongeveer 17 m³ aardgas equivalenten aan warmte verbruiken en de Energieproducerende Kas zoals die de afgelopen jaren gebruikt is ongeveer 26 m³ aardgas equivalenten per m² Energieproducerende Kas zou kunnen leveren (als er een WK-installatie van 16 We/m² Energieproducerende kas zou worden geplaatst), zou dit betekenen dat 45% van het bedrijfsoppervlak als Energieproducerende kas zou moeten worden ingericht. Het energieverbruik van het complete bedrijf zou dan op 12 m³/m² per jaar uitkomen. De energieproducerende fractie gebuikt immers 26 m³ per m² per jaar, maar voorziet daarmee ook in de warmtebehoefte van 1.2 keer zijn eigen oppervlak in het niet gesloten deel en 45% van 26 is 12 m³. Het energieproducerende kasconcept zorgt hiermee dus voor een energiebesparing voor het totale complex van $5/17 = 30\%$. Dit percentage kan nog oplopen wanneer de nieuwste typen FiWiHex warmtewisselaars zouden worden gebruikt en wanneer er nog wat minder geschermd zou worden in het Energieproducerende gedeelte.

De potentie van de Energieproducerende Kas voor andere teelten kan op een soortgelijke wijze worden beoordeeld. In Figuur 10.1 is het getoond hoe de balans tussen opslag en benutting van warmte in een aquifer afhangt van de fractie van het kascomplex dat als gesloten kas wordt gebouwd. De grafieken zijn gemaakt voor een energiezuinig geteeld tomatengewas (zie (Poot *et al*, 2008).



Figuur 10.1. Jaarlijks overschot (positief getal) of tekort (negatief getal) in de aquifer als functie van de gesloten kasfractie in geval de kas overtollig vocht afvoert middels de ramen (a) of middels ontvochtiging-met-warmteterugwinning.

In de figuur worden twee varianten getoond, namelijk de situatie waarin de kas wordt ontvochtigd zoals dat bij Hydro Huisman is gebeurd (dus door de ramen op een kiertje te zetten) en de situatie waarin de warmteoogst is gemaximaliseerd door de ontvochtiging ook bij somber weer met de koelunits te doen en de onbedoeld verloren voelbare warmte weer aan te vullen middels een tweede blok (zie § 4.2.3).

Het is duidelijk dat de warmteverzameling in de linker figuur kleiner is dan in de rechter figuur. Bij een kas die voor de volle 100% als Energieproducerende Kas is uitgevoerd resteert er in het ene geval een overschot van 400 MJ/m² (het meest rechtse punt van de grafiek) en in het andere geval is er 900 MJ/m² per jaar over.

De Energieproducerende fractie waarbij de seizoensopslag in balans is is in geval de ontvochtiging buiten de koeluren met de ramen plaatsvindt (de linker grafiek) 0.5. Dit wil zeggen dat de kas dan voor 50% als Energieproducerende kas zou moeten worden uitgevoerd en de overige 50% als gewone kas zou kunnen worden gebouwd. Ingeval een volledig gesloten kas zou worden gebruikt is de warmteverzameling aanzienlijk groter en moet slechts 30% als Energieproducerende fractie worden gebouwd (het snijpunt met de 0-lijn in de rechtergrafiek ligt bij 0.3).

Wanneer ervan wordt uitgegaan dat het voor de teelt beter is om in een Energieproducerende Kas te telen (omdat daarmee gemakkelijk hoge CO₂-concentraties kunnen worden gerealiseerd) is het aantrekkelijk om het overtollige vocht in de winter en in de nacht gewoon via de ramen af te voeren in plaats van ontvochtiging-met-warmteterugwinning. In het eerste geval is immers de helft van het bedrijf energieproducerend en in het andere geval slechts 30%.

Het energieverbruik in de linksituatie (dus waarbij er geen ontvochtiging-met-warmteterugwinning wordt toegepast) is 17.5 m³ aardgas per m² kas. Dit gas wordt gebruikt in een WK-installatie van 130 kWe per hectare kas (dus 260 kWe per ha Energieproducerende Kas want deze beslaat de helft van het bedrijfsoppervlak). De elektriciteit van deze WK wordt in de zomer vooral tijdens plateau-uren verkocht. In de winter overstijgt de elektriciteitsvraag de lokale productiecapaciteit en wordt er (vooral 's nachts) elektriciteit ingekocht.

Als voor de andere variant wordt gekozen (dus ontvochtiging-met-warmteterugwinning op 30% van het bedrijf) is het energieverbruik op jaarbasis 19 m³/m². In dat geval moet er een WK-unit van 150 kWe per ha wordt gebruikt om de jaarlijkse elektriciteitsverkoop in balans te brengen met de elektriciteitsinkoop. Het concept ontvochtigen-met-warmteterugwinning vraagt immers meer elektriciteit.

In de beschrijving van de energiezuinige teelt (Poot *et al.*, 2008) wordt beschreven dat de teelt in de standaard-situatie 27 m³ aardgas equivalenten aan warmte vraagt (dit is zeer laag door het gebruik van een dubbel scherm, luchtbeweging om een hoge luchtvochtigheid te kunnen tolereren, een zorgvuldig gekozen temperatuurregime en pas in januari te planten). De teruggang van 27 m³ aardgas naar 17.5 m³ aardgas per m² per jaar betekent een energiebesparing van 35%. Voor de toepassing van het zelfvoorzieningsconcept op een bedrijf zoals dat van Hydro Huisman is eerder vastgesteld dat er in dat geval een energiebesparing van 30% zou kunnen worden gerealiseerd. Het energiebesparingsperspectief van het in dit rapport beschreven concept is in de tomatenteelt dus een klein beetje hoger dan in de potplantenteelt (35% in plaats van de 30% die bij een bedrijf als dat van Hydro Huisman gerealiseerd zou kunnen worden).

10.2 Aanbevelingen

De teeltkundige perspectieven van kassen die met FiWiHex-en (of andere luchtbehandelingssystemen) geconditioneerd worden zijn zeer goed. De mogelijkheden om de gewasontwikkeling te sturen zijn duidelijk beter (hoewel het pleit of de koeling het beste van bovenaf of van onderuit kan plaatsnemen nog niet beslecht is) en het perspectief van een kas waarin met een geringe CO₂-dosering een hoge concentratie kan worden gehandhaafd is zeer aantrekkelijk. Daarbij wordt de kas ook nog eens voor een substantieel deel door duurzame energie verwarmd. Dat al deze voordelen op dit moment toch in de main stream tuinbouw niet renderen komt doordat de investeringen te hoog zijn in vergelijking met de revenuen en dit vooral in vergelijking met de concurrerende techniek, de WKK-technologie.

De WKK-technologie floreert echter uitsluitend in de huidige marktomstandigheden waarin de spark spread groot is en de gas-toevoer stabiel lijkt. Indien in de toekomst het gas schaarser wordt en de elektriciteitsprijs meer en meer ontkoppeld raakt van de gasprijs (doordat elektriciteit uit een steeds diversere mix van primaire energiebronnen wordt voortgebracht) brokkelt de basis van de succesvolle WKK-technologie af. De energie-infrastructuur zal dan gaandeweg gaan leunen op elektriciteit en duurzame energie. In die omstandigheden zullen de installaties die in het onderzoek rond de Energieproducerende kas zijn bestudeerd uitstekend uit de voeten kunnen. Immers, de Energieproducerende kas beoogt met zo min mogelijk aandrijfenergie (elektriciteit) en met een zo groot mogelijke hulp van in de zomer verzamelde warmte-overschotten de kas te verwarmen.

Het concept heeft dus een duidelijke toekomstwaarde en daarom verdient het aanbeveling om de ontwikkeling en het opdoen van gebruikerservaringen door te zetten.

Qua investeringskosten is het ook goed om op te merken dat de belangrijkste kostenpost op dit moment niet in de hoogwaardige technologie rond WK, rookgasreiniging, warmtepomp en warmtewisselaars zit, maar in de aanleg van de bronnen voor het lange termijn opslagsysteem. Mede gezien het feit dat de opslag van warmteoverschotten uit de zomer voor verwarmingsdoeleinden in de winter niet alleen bij kassen een groot energiebesparingspotentieel heeft maar ook in de gebouwde omgeving is het aanbevelingswaardig om innovatief vermogen te richten op de verlaging van de kosten die hierbij gemaakt worden.

11 Literatuur

- Campen, J.B. en H.F. de Zwart, 2005,
Klimatisering van de Energieproducerende tuinbouwkas met FiWiHex warmtewisselaars, Agrotechnology & Food Innovations B.V., Nota nr 407
- Campen, J.B. en H.F. de Zwart, 2004,
Praktijkmeting aan een ondergronds energieopslagsysteem en validatie van een dynamisch simulatiemodel, Wageningen, Agrotechnology & Food Innovations B.V., Rapport 058
- Poot, E, H.F. de Zwart, J.C. Bakker, G.P.A. Bot, A Dieleman en A de Gelder, L.C. Marcelis en D. Kuiper, 2008,
Richtinggevende beelden voor energiezuinig telen in semigesloten kassen; Nota 568; Wageningen UR Glastuinbouw
- Kempkes, F.L.K en E. van Os; 2006,
Gewasgroei en energiegebruik in kassen onder een Lexan-ZigZag kasdek in vergelijking met verschillende soorten kasdekken; Nota 428; Wageningen UR Glastuinbouw
- Velde, N.J.A. van der,
Effecten stijgende energieprijzen voor de Nederlandse glastuinbouw; Rapport VR2008-018 Wageningen UR LEI
- Zwart, H.F. de en J.B. Campen; 2005,
Jaarrond berekeningen aan de Energieproducerende tuinbouwkas; Nota in opdracht van de stuurgroep Kas Als Energiebron
- Zwart, H.F. de, F. van Noort en J.C. Bakker, 2007,
Tussenrapportage Energie en Teelt in de Energieproducerende kas, Wageningen UR Glastuinbouw, nota 491
- Zwart, H.F. de en F.L.K. Kempkes, 2007,
Characterizing cooling equipment for closed greenhouses; Proceedings of the Greensys symposium in Naples 2007.

Bijlage I.

Groeicijfers opplanting 1 – 5

Opplanting 1					wk 42, 2006 - wk 4, 2007							
	EPK											
	lengte [cm]		bladoppervlak [cm2]		versgewicht [g]		bloemen		drooggewicht [gram]			
	eind	begin	eind	begin	eind	begin	eind	begin	eind	begin		
Anthurium 'Sierra'	43.0	30.6	635	223	116.4	9.1	6.2	0	5.9			
Anthurium 'Vivaro'	36.4	33.8	680	312	48.2	21.9	1.5	0	6.2			
Areca	43.8	31.0	577	315	23.2	22.9	nvt	nvt	8.4			
Croton 'Red Batik'	35.0	27.2	1201	1083	54.9	51.1	nvt	nvt	9.7			
Croton 'mrs. Iceton'	33.4	28.8	2390	2057	66.7	56.4	nvt	nvt	11.1			
Dracaena 'song of india'	47.2	32.8	1338	1339	80.5	69.9	nvt	nvt	14.6			
Dracaena 'surprise'	34.2	31.8	1306	1109	101.4	70.6	nvt	nvt	12.4			
Ficus longifolia	72.2	65.8	1747	1252	71.0	51.7	nvt	nvt	18.7			
Ficus 'Golden king'	41.6	28.8	896	570	26.0	19.6	nvt	nvt	4.6			
Schefflera	43.0	32.0	1310	1296	78.4	86.0	nvt	nvt	13.4			
	REF											
Anthurium 'Sierra'	41.2	30.6	742	223	46.5	9.1	2.2	0.0	9.3			
Anthurium 'Vivaro'	36.8	33.8	670	312	47.0	21.9	2.5	0.0	9.4			
Areca	44.4	31	543	315	17.1	22.9	nvt	nvt	3.4			
Croton 'Red Batik'	33.0	27.2	1122	1083	51.6	51.1	nvt	nvt	10.3			
Croton 'mrs. Iceton'	33.8	28.8	1978	2057	53.5	56.4	nvt	nvt	10.7			
Dracaena 'song of india'	38.8	32.8	1349	1339	73.6	69.9	nvt	nvt	14.7			
Dracaena 'surprise'	36.2	31.8	1448	1109	109.1	70.6	nvt	nvt	21.8			
Ficus longifolia	67.0	65.8	1444	1252	61.3	51.7	nvt	nvt	12.3			
Ficus 'Golden king'	42.6	28.8	1094	570	31.9	19.6	nvt	nvt	6.4			
Schefflera	45.8	32	1520	1296	91.5	86	nvt	nvt	18.3			
	Extra lengte in EPK				Extra versgewicht in EPK				Extra drooggewicht in EPK			
	Extra bladopp. in EPK				Extra bloemen in EPK							
verschillen	in cm	% t.o.v ref	in cm2	% t.o.v ref	in gram	% t.o.v ref	in aantal	% t.o.v ref	in gram	% t.o.v ref		
Anthurium 'Sierra'	1.8	4	-107	-14	69.9	150	4.0	181	-3	-36.5		
Anthurium 'Vivaro'	-0.4	-1	10	1	1.2	3	-1.0	-38	-3	-34.0		
Areca	-0.6	-1	34	6	6.1	35			5	146.4		
Croton 'Red Batik'	2.0	6	79	7	3.3	6			-1	-6.2		
Croton 'mrs. Iceton'	-0.4	-1	412	21	13.2	25			0	3.3		
Dracaena 'song of india'	8.4	22	-11	-1	6.9	9			0	-0.7		
Dracaena 'surprise'	-2.0	-6	-142	-10	-7.7	-7			-9	-43.2		
Ficus longifolia	5.2	8	303	21	9.7	16			6	52.2		
Ficus 'Golden king'	-1.0	-2	-198	-18	-5.9	-18			-2	-28.7		
Schefflera	-2.8	-6	-210	-14	-13.1	-14			-5	-26.7		
Gemiddeld		2.2		0.0		20.5		71.4		2.6		

Opplanting 2							wk 10, 2007 - wk 21, 2007				
	EPK										
	lengte [cm]		bladoppervlakt [cm ²]		versgewicht [g]		bloemen [gram]		drooggewicht [g]		
	eind	begin	eind	begin	eind	begin	eind	begin	eind	begin	
Anthurium 'Sierra'	36.0	32.2	519	326	28.0	19.0	5.6	0	6.6	2.9	
Anthurium 'Silence'	38.0	33.0	1122	185	49.0	11.0	13.1	0	10.4	1.8	
Areca	77.0	56.0	2487	993	89.0	34.0	-	-	-	-	
Croton 'Red batik'	57.0	38.2	2581	1500	97.0	68.0	-	-	21.9	14.1	
Croton 'Sunny star'	64.0	37.6	4649	2184	140.0	76.0	-	-	22.3	12.3	
Dracaena 'Song of india'	48.0	33.8	1929	1436	105.0	77.0	-	-	21.3	15.0	
Dracaena 'Surprise'	33.0	25.2	990	318	59.0	22.0	-	-	9.4	2.8	
Ficus 'longifolia'	73.0	48.7	2050	513	56.0	17.0	-	-	20.6	3.5	
F. benjamina 'Exotica'	60.0	33.6	2347	359	36.0	9.0	-	-	12.5	1.4	
Schefflera	57.0	16.2	2181	736	106.0	44.0	-	-	28.8	9.0	
	REF										
Anthurium 'Sierra'	36.0	32.2	426	326	22.0	19.0	3.4	0.0	4.7	2.9	
Anthurium 'Silence'	39.0	33.0	1091	185	45.0	11.0	4.2	0.0	8.1	1.8	
Areca	68.0	56.0	2112	993	69.0	34.0	-	-	-	-	
Croton 'Red batik'	47.0	38.2	2181	1500	78.0	68.0	-	-	16.2	14.1	
Croton 'Sunny star'	50.0	37.6	3174	2184	93.0	76.0	-	-	21.0	12.3	
Dracaena 'Song of india'	45.0	33.8	1904	1436	88.0	77.0	-	-	18.8	15.0	
Dracaena 'Surprise'	34.0	25.2	1400	318	23.0	22.0	-	-	11.8	2.8	
Ficus 'longifolia'	67.0	48.7	2079	513	46.0	17.0	-	-	13.7	3.5	
F. benjamina 'Exotica'	56.0	33.6	1780	359	28.0	9.0	-	-	7.8	1.4	
Schefflera	48.0	16.2	2093	736	102.0	44.0	-	-	22.7	9.0	
	Extra lengte in EPK Extra bladopp. in EPK Extra versgewicht in EPK Extra bloemen in EPK Extra drooggewicht in EPK										
verschillen	in cm	% t.o.v ref	in cm ²	% t.o.v ref	in gram	% t.o.v ref	in gram	% t.o.v ref	in gram	% t.o.v ref	
Anthurium 'Sierra'	0.0	0	93	22	6.0	27	2.2	65	2	40.4	
Anthurium 'Silence'	-1.0	-3	31	3	4.0	9	8.9	212	2	28.4	
Areca	9.0	13	375	18	20.0	29					
Croton 'Red batik'	10.0	21	400	18	19.0	24			6	35.2	
Croton 'Sunny star'	14.0	28	1475	46	47.0	51			1	6.2	
Dracaena 'Song of india'	3.0	7	25	1	17.0	19			3	13.3	
Dracaena 'Surprise'	-1.0	-3	-410	-29	36.0	157			-2	-20.3	
Ficus 'longifolia'	6.0	9	-29	-1	10.0	22			7	50.4	
F. benjamina 'Exotica'	4.0	7	567	32	8.0	29			5	60.3	
Schefflera	9.0	19	88	4	4.0	4			6	26.9	
Gemiddeld		9.9		11.4		37.0		138.3		26.7	

Opplanting 3		wk 27, 2007 - wk 45, 2007									
EPK											
		lengte [cm]		bladoppervlak [cm ²]		versgewicht [g]		bloemen [gram]		drooggewicht [gram]	
		eind	begin	eind	begin	eind	begin	eind	begin	eind	begin
Anthurium 'Silence'		40.4	28.4	1200	196	92.4	13.7	22	0.0	13.9	2.0
Anthurium 'Saxo'		43.2	29.4	944	300	91.8	19.0	15	0.0	13.9	2.9
Areca		75.6	47.0	-	-	100.0	26.8	-	-	27.1	7.1
Croton 'Petra'		40.9	28.2	-	-	97.0	23.9	-	-	20.5	4.6
Croton 'Iceton'		43.2	33.6	1430	263	43.3	8.0	-	-	9.0	1.9
Dracaena 'Surprise'		36.4	24.2	878	371	66.3	24.9	-	-	7.7	3.2
Dracaena 'Song of India'			28.5	-	-	-	30.8	-	-	-	5.1
Ficus elastica		79.5	46.8	-	-	170.5	71.5	-	-	23.4	8.8
Ficus benjamina		51.7	36.0	-	-	-	60.9	-	-	-	13.5
Schefflera		40.0	25.2	-	-	71.5	51.1	-	-	13.1	6.6
REF											
Anthurium 'Silence'		41	28.4	862	196.0	61.4	13.7	10.6	0.0	8.6	2.0
Anthurium 'Saxo'		44.2	29.4	924	300.4	67.6	19.0	5.8	0.0	9.6	2.9
Areca		75.7	47.0	-	-	66.5	26.8	-	-	16.3	7.1
Croton 'Petra'		42.9	28.2	-	-	77.8	23.9	-	-	12.3	4.6
Croton 'Iceton'		37.1	33.6	936	262.6	26.0	8.0	-	-	4.8	1.9
Dracaena 'Surprise'		32.2	24.2	568	371.0	39.8	24.9	-	-	4.6	3.2
Dracaena 'Song of India'			28.5	-	-		30.8	-	-		5.1 planter
Ficus elastica		76.7	46.8	-	-	145.2	71.5	-	-	18.8	8.8
Ficus benjamina		46.6	36.0	-	-		60.9	-	-		13.5 planter
Schefflera		38.3	25.2	-	-	69.0	51.1	-	-	10.3	6.6
		Extra lengte in EPK Extra bladopp. in EPK Extra versgewicht in EPK Extra bloemen in EPK Extra drooggewicht in EPK									
verschillen		in cm	% t.o.v ref	in cm ²	% t.o.v ref	in gram	% t.o.v ref	in aantal	% t.o.v ref	in gram	% t.o.v ref
Anthurium 'Silence'		-0.6	-1	337	39	31.0	50	11.6	109	5.3	62.4
Anthurium 'Saxo'		-1.0	-2	20	2	24.2	36	9.0	155	4.3	45.4
Areca		-0.1	0			33.5	50				
Croton 'Petra'		-2.0	-5			19.2	25			8.2	66.6
Croton 'Iceton'		6.1	16	494	53	17.3	66			4.2	86.5
Dracaena 'Surprise'		4.2	13	310	55	26.5	66			3.1	66.1
Dracaena 'Song of India'											
Ficus elastica		2.8	4			25.3	17			4.6	24.6
Ficus benjamina		5.1	11								
Schefflera		1.7	4			2.5	4			2.8	27.6
Gemiddeld			4.4		37.1		39.4		132.3		54.2

Opplanting 4							wk 11, 2008 - wk 26, 2008				
	EPK										
	lengte [cm]		bladoppervlak [cm ²]		versgewicht [g]		bloemen		drooggewicht [gram]		
	eind	begin	eind	begin	eind	begin	eind	begin	eind	begin	
Anthurium 'Saxo'	38.2	29.2	706	208	46.9	11.0	10.2	14.0	7.6	1.8	
Anthurium 'Champion'	41.9	27.4	376	135	32.9	6.9	0.8	14.2	5.1	1.1	
Areca	118.9	98.8	-	-	-	-	-	-	-	-	
Croton 'Petra'	38.7	27.4	888	333	43.1	16.7	-	-	8.0	3.0	
Croton 'Mrs Iceton'	45.7	25.0	2055	449	62.9	15.0	-	-	11.8	3.2	
Dracaena 'Song of India'	46.4	29.8	2037	450	115.7	20.5	-	-	21.4	3.8	
Dracaena 'Surprise'	37.3	28.5	1638	328	114.6	18.5	-	-	14.2	2.8	
Ficus benjamina 'Exotica'	122.7	79.4	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ficus longifolia	143.2	86.5	-	-	-	-	-	-	-	-	
Schefflera amatus	130.8	70.7	-	-	-	-	-	-	-	-	
	REF										
Anthurium 'Saxo'	44.4	29.4	768	208	46.4	11.0	5.0	6.2	6.4	1.8	
Anthurium 'Champion'	44.2	29.4	377	135	28.4	6.9	0.0	2.4	4.0	1.1	
Areca	115.6	95.9	-	-	-	-	-	-	-	-	
Croton 'Petra'	40.2	27.5	877	333	39.8	16.7	-	-	6.8	3.0	
Croton 'Mrs Iceton'	34.3	25.5	1274	449	33.5	15.0	-	-	6.2	3.2	
Dracaena 'Song of India'	37.5	26.7	1371	450	71.6	20.5	-	-	11.1	3.8	
Dracaena 'Surprise'	34.9	28.7	1328	328	87.8	18.5	-	-	11.1	2.8	
Ficus benjamina 'Exotica'	118.0	77.0	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ficus longifolia	128.7	86.7	-	-	-	-	-	-	-	-	
Schefflera amatus	117.0	69.2	-	-	-	-	-	-	-	-	
Extra lengte in EPK Extra bladopp. in EPK Extra versgewicht in EPK Extra bloemen in EPK Extra drooggewicht in EPK											
verschillen	in cm	% t.o.v ref	in cm ²	% t.o.v ref	in gram	% t.o.v ref	in aantal	% t.o.v ref	in gram	% t.o.v ref	
Anthurium 'Saxo'	-6.2	-14	-62	-8	0.5	1	5.2	104	1	18.8	
Anthurium 'Champion'	-2.3	-5	-1	0	4.5	16	0.8		1	27.5	
Areca	3.3	3									
Croton 'Petra'	-1.5	-4	11	1	3.3	8			1	17.6	
Croton 'Mrs Iceton'	11.4	33	781	61	29.4	88			6	90.3	
Dracaena 'Song of India'	8.9	24	666	49	44.1	62			10	92.8	
Dracaena 'Surprise'	2.4	7	310	23	26.8	31			3	27.9	
Ficus benjamina 'Exotica'	4.7	4									
Ficus longifolia	14.5	11									
Schefflera amatus	13.8	12									
Gemiddeld		7.1		21.0		34.2		104.0		45.8	

Opplanting 5		wk 25, 2008 - wk 42, 2008									
EPK											
lengte [cm]		bladoppervlak [cm ²]		versgewicht [g]		bloemen [gram]		drooggewicht [gram]			
eind	begin	eind	begin	eind	begin	eind	begin	eind	begin	eind	begin
Anthurium 'Saxo'	48.7	35.1	1327	706	105.8	46.9	19.6	10.0	14.8	7.6	
Anthurium 'Champion'	53.9	41.9	525	596	56.7	42.8	3.4	0.0	8.4	6.3	
Anthurium 'Season'	55.5	41.8	1208	656	91.8	42.0	12.0	3.8	14.0	6.9	
Croton 'Petra'	52.2	41.5	2589	1003	142.7	44.8			27.2	7.8	
Croton 'Mrs Iceton'	56.5	31.3	1576	213	66.0	6.8			11.2	1.4	
Dracaena 'Surprise'	39.4	33.0	736	536	83.6	32.9			12.2	5.5	
Ficus benjamina 'Exotica'	83.2	61.0									
Ficus longifolia	108.3	63.1									
Schefflera amatus	108.8	58.3									
REF											
Anthurium 'Saxo'	46.5	36.0	1123	706	82.2	46.9	14.2	10.0	12.0	7.6	
Anthurium 'Champion'	51.8	43.2	628	596	54.9	42.8	2.4	0.0	7.8	6.3	
Anthurium 'Season'	54.0	42.2	1062	656	80.9	42.0	8.4	3.8	12.2	6.9	
Croton 'Petra'	44.9	42.4	1698	1003	95.2	44.8			17.8	7.8	
Croton 'Mrs Iceton'	54.0	31.5	805	213	36.9	6.8			6.0	1.4	
Dracaena 'Surprise'	41.8	34.2	537	536	91.6	32.9			12.8	5.5	
Ficus benjamina 'Exotica'	72.9	58.8									
Ficus longifolia	88.3	63.9									
Schefflera amatus	97.6	60.9									
		Extra lengte in EPK Extra bladopp. in EPK Extra versgewicht in EPK Extra bloemen in EPK Extra drooggewicht in EPK									
verschillen		in cm	% t.o.v ref in cm ²	% t.o.v ref in gram	% t.o.v ref in gram	% t.o.v ref in aantal	% t.o.v ref in gram	% t.o.v ref in gram	% t.o.v ref		
Anthurium 'Saxo'		2.2	5	204	18	23.6	29	5.4	38	3	23.3
Anthurium 'Champion'		2.1	4	-103	-16	1.8	3	1.0	42	1	7.7
Anthurium 'Season'		1.5	3	146	14	10.9	13			2	14.8
Croton 'Petra'		7.3	16	891	52	47.5	50			9	52.8
Croton 'Mrs Iceton'		2.5	5	771	96	29.1	79			5	86.7
Dracaena 'Surprise'		-2.4	-6	199	37	-8.0	-9			-1	-4.7
Ficus benjamina 'Exotica'		10.3	14								
Ficus longifolia		20.0	23								
Schefflera amatus		11.2	11								
Gemiddeld			8.3		33.5		27.6		39.8		30.1

Bijlage II.

Kwaliteitsbeoordeling opplanting 2 – 5

Kwaliteitsbeoordeling opplanting 2							
			plantvorm	lengte/breedte verhouding	bladkleur	totaal indruk	
epk	Areca		3.5	3.5	2.4	3.2	minder
ref	Areca		4.4	4.1	4.3	4.1	
epk	Anthurium	sierra	4.1	3.9	4.0	3.9	beter
ref	Anthurium	sierra	3.3	3.3	3.8	2.8	
epk	Anthurium	silence	4.1	4.1	3.8	3.3	gelijk
ref	Anthurium	silence	4.3	3.8	4.6	3.4	
epk	Croton	sunny star	3.6	3.2	4.8	3.9	beter
ref	Croton	sunny star	4.1	4.1	3.2	3.2	
epk	Croton	red batik	4.1	3.9	3.7	3.8	minder
ref	Croton	red batik	4.0	4.1	4.3	4.3	
epk	Dracaena	song of india	3.8	3.8	4.3	3.9	gelijk
ref	Dracaena	song of india	3.8	3.9	4.0	3.9	
epk	Dracaena	surprise	3.8	3.9	3.8	3.8	beter
ref	Dracaena	surprise	4.0	3.7	4.1	3.3	
epk	Ficus B.		3.7	4.0	3.3	3.8	minder
ref	Ficus B.		4.3	4.1	4.1	3.4	
epk	Ficus long.		4.3	4.4	4.0	4.3	gelijk
ref	Ficus long.		4.0	4.0	4.6	4.0	
epk	schefflera		3.3	3.1	3.9	3.4	gelijk
ref	schefflera		3.7	3.5	3.9	3.6	

Kwaliteitsbeoordeling 3 ^e opplanting							
			plantvorm	lengte/breedte verhouding	bladkleur	totaal indruk	
epk	Areca		4.0	4.3	3.3	3.8	slechter
ref	Areca		4.0	3.5	4.3	3.8	
epk	Anthurium	saxo	4.8	4.8	4.0	4.3	beter op plantvorm en lengte/breedte
ref	Anthurium	saxo	3.0	2.8	4.0	3.0	
epk	Anthurium	silence	4.8	4.5	4.0	4.3	idem
ref	Anthurium	silence	3.5	3.5	4.0	3.5	
epk	Croton	petra	3.8	3.8	3.5	3.8	vrijwel geen verschil
ref	Croton	petra	3.8	3.8	3.3	3.8	
epk	Croton	iceton	4.0	3.5	4.3	4.0	beter op alle punten
ref	Croton	iceton	3.5	3.3	3.3	3.3	
epk	Dracaena	song of india					
ref	Dracaena	song of india					
epk	Dracaena	surprise	4.3	4.3	4.3	4.3	beter op alle punten
ref	Dracaena	surprise	3.3	3.3	3.3	3.3	
epk	Ficus	elas.					
ref	Ficus	elas.	4.3	4.0	4.3	4.3	beter op alle punten
epk	Ficus		4.0	3.5	3.5	3.5	
ref	Ficus						
epk	schefflera		4.0	4.0	4.3	4.3	beter op alle punten
ref	schefflera		3.5	3.5	3.5	3.5	

Kwaliteitsbeoordeling 4^e opplanting							
			plantvorm	lengte/breedte verhouding	bladkleur	totaal indruk	
epk	Areca		4.3	4.0	2.5	3.4	minder, vooral op kleur
ref	Areca		4.4	4.4	4.5	4.4	
epk	Anthurium	saxo	4.6	4.6	3.9	4.1	beter op plant
ref	Anthurium	saxo	3.8	3.5	4.5	3.5	
epk	Anthurium	champion	4.3	4.3	3.1	3.9	beter op plant
ref	Anthurium	champion	3.8	3.5	4.1	3.7	
epk	Croton	petra	3.6	3.8	3.8	3.6	minder
ref	Croton	petra	4.0	4.4	3.5	3.8	
epk	Croton	iceton	3.9	3.9	4.0	4.0	gelijk
ref	Croton	iceton	3.5	4.1	3.3	3.8	
epk	Dracaena	song of india	4.6	4.8	3.9	4.4	gelijk
ref	Dracaena	song of india	4.3	4.0	4.5	4.3	
epk	Dracaena	surprise	4.4	4.6	3.1	3.9	gelijk
ref	Dracaena	surprise	4.3	4.0	4.0	4.0	
epk	Ficus B.		4.5	4.3	3.9	3.8	minder
ref	Ficus B.		4.6	4.6	4.6	4.6	
epk	Ficus long.		4.7	4.7	4.1	4.7	iets betere plant, minder kleur
ref	Ficus long.		4.3	4.0	4.8	4.4	
epk	schefflera amatus		4.4	4.4	4.7	4.4	gelijk
ref	schefflera amatus		4.3	4.5	4.5	4.5	

Kwaliteitsbeoordeling opplanting 5							
	samenvatting		plantvorm	lengte/breedte verhouding	bladkleur	totaal indruk	
epk	Anthurium	saxo	4.0	4.1	3.6	4.1	beter
ref			3.3	3.3	4.0	3.4	
epk	Anthurium	champion	3.0	3.0	3.3	3.4	gelijk
ref			3.0	3.1	3.6	3.3	
epk	Anthurium	season	4.0	3.9	3.6	4.1	beter
ref			3.0	3.0	3.3	2.5	
epk	Croton	petra	4.0	3.9	4.3	4.2	beter
ref			3.7	3.4	3.0	3.1	
epk	Croton	iceton	3.7	3.8	4.1	4.2	beter
ref			3.3	3.1	3.1	3.0	
epk	Dracaena	surprise	3.3	3.6	3.3	3.6	minder
ref			3.7	3.8	3.9	4.0	
epk	Ficus B.		3.7	4.0	3.4	3.8	gelijk
ref			3.3	3.8	4.3	3.8	
epk	Ficus long.		3.8	4.4	4.1	4.2	beter
ref			3.3	3.5	4.2	3.6	
epk	schefflera amatus		3.3	3.8	3.4	3.6	minder
ref			3.0	3.5	4.3	3.9	

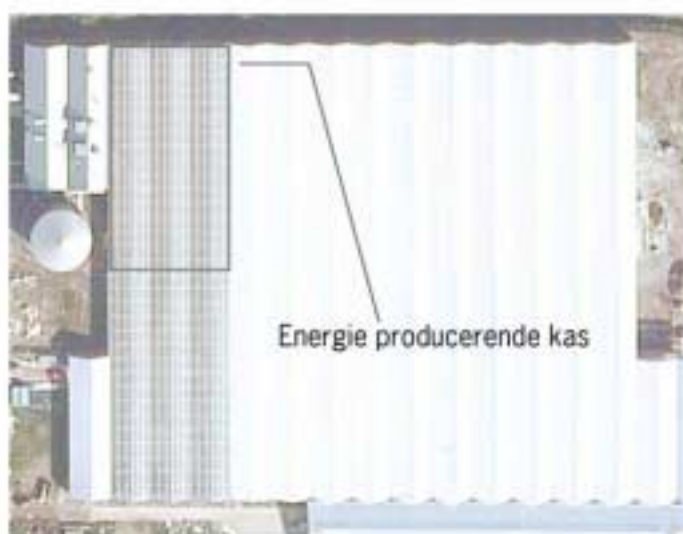
Bijlage III.

Integraal verslag tussenrapportage



Tussenrapportage Energie en Teelt in de Energieproducerende kas

H.F. de Zwart, F. van Noort & J.C. Bakker



Nota 491

© 2007 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

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

In opdracht van:



Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Bornsesteeg 65, 6708 PD Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 47 70 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inleiding

Bij de nieuwbouw van de potplantenkas van Stef Huisman in 2005 deed zich de gelegenheid voor om bij deze coöperatief ingestelde tuinder een praktijkexperiment op te zetten van een Energieproducerende Kas. De verwachtingen van dit concept waren gebaseerd op:

- positieve ervaringen met gedetailleerde metingen aan een ronde FiWiEx warmtewisselaar (oktober 2002)
- een niet probleemloos, maar toch verwachtingen schepend experiment met 6 ronde FiWiEx-en in een proefcompartiment van 27 m² (voorjaar 2003)
- het rapport “Energieproducerende Kas; Voorontwerp voor een pilot” (juni 2003)

Met de gegevens die op dat moment voor handen waren heeft Lek/HABO een nauwgezet uitvoeringsplan voor het experiment Energieproducerende Kas geschreven. Daarin wordt een samenhangend concept gepresenteerd, inclusief kwantitatieve gegevens waarmee de verwachtingen handen en voeten worden gegeven (het rapport “Bouw en inrichting Energieproducerende Kas”; december 2004).

Nadat er op grond van deze beschrijving een ‘Go’ voor dit experiment door de stuurgroep Kas als Energiebron was gegeven is de uitwerking en realisatie van start gegaan, resulterend in een officiële opening van de Energieproducerende Kas in juni 2006.

In het traject tussen de ‘Go’ en de oplevering zijn er veel zaken gewijzigd waarbij de hoofddoelstelling van het experiment (het aantonen dat het mogelijk is uit een kas meer energie te onttrekken dan er aan primaire energie aan moet worden toegevoerd) steeds in het vizier is gehouden. Sommige zaken zijn aangepast uit praktische overwegingen, sommige zaken door wijziging van inzicht en sommige zaken zijn veranderd omdat de omstandigheden daartoe noopten.

In hoofdstuk 1 van deze tussenrapportage worden alle wijzigingen ten opzichte van het oorspronkelijke plan gepresenteerd.

Van de meeste wijzigingen zou verwacht mogen worden dat deze sterk positief zouden bijdragen aan de hoofddoelstelling van het project, namelijk het aantonen dat een kas een groot netto energieoverschot kan opleveren. Er zijn echter twee zaken die het perspectief van de Energieproducerende kas in hoge mate verminderen die buiten de directe invloedssfeer van het experiment vallen (de kasconstructie en de gebruikswijze van de kas). Hoofdstuk 2 gaat uitgebreid op de effecten van alle wijzigingen in.

Een speciaal onderdeel dat in de Energieproducerende Kas is gebruikt is het Zigzag-kasdek. De ervaringen hiermee worden apart beschreven in hoofdstuk 3.

Behalve de resultaten m.b.t. het energieplaatje en het Zigzag-materiaal is er ook uitgebreid gekeken naar het effect van de sluiting van de kas op de gewasproductie. Hierop wordt in hoofdstuk 4 nader ingegaan.

De ervaring van ruim een jaar met een innovatief project als “de Energieproducerende Kas” heeft veel ervaringen en leerpunten opgeleverd. De meest in het oog springende punten komen aan bod in hoofdstuk 5.

Tenslotte wordt in hoofdstuk 6 de voorlopige conclusies op basis van de huidige resultaten tegen de achtergrond van de oorspronkelijke doelstellingen beschreven. Hierbij wordt een antwoord gegeven op de volgende 4 hoofdvragen:

- hoe pakken de onderzoeksdoelstellingen in de praktijk uit?
- waardoor zijn de afwijkingen veroorzaakt?
- welke bijstellingen in het onderzoek worden voor het komende onderzoeksjaar voorgesteld?
- welke voorlopige conclusies zijn al te trekken?

1 Van uitvoeringsplan naar realisatie

Sinds de 'Go' voor het uitvoeringsplan Energieproducerende Kas zoals dat door Lek/HABO is beschreven, en wat de basis heeft gevormd voor het project is er veel veranderd.

Tijdens het bouwproces zijn er vier principiële zaken veranderd en is daarnaast de uitvoeringsvorm van de FiWiHEx radicaal aangepast. Bovendien is de uiteindelijke wijze waarop de tuinder van de kas gebruik maakt zeer sterk gewijzigd ten opzichte van de teeltwijze waar in het uitvoeringsplan vanuit was gegaan. In dit hoofdstuk worden al deze wijzigingen genoemd en van commentaar voorzien. Hoofdstuk 2 gaat in op de consequenties van al deze wijzigingen.

1.1 Principieel veranderde zaken

De principiële veranderde zaken zijn:

1. Het gebruik van een scheidingswisselaar
2. Het gebruik van een warmtepomp
3. Het afzien van de koeltoren en de 'gemiddelde aquifers'
4. Het afzien van de fysieke integratie van een microturbine

Ad 1.

Het gebruik van een scheidingswisselaar tussen het aquifer-circuit en het tuin-circuit is lange tijd een steeds weer terugkerend punt geweest. Het achterwege laten van een dergelijke wisselaar heeft grote voordelen, maar geeft ook risico's zoals afzettingen van zouten of afscheiding van gassen in het bovengrondse deel en verstoppingproblemen in het ondergrondse deel. Het doorslaggevend argument om uiteindelijk toch een scheidingswisselaar te gebruiken was echter simpelweg de provinciale regelingen in deze.

Er is gekozen voor een scheidingswisselaar met een zeer gering temperatuurverlies (een typisch verlies van 1 °C). Het feit dat er een scheidingswisselaar moest worden toegepast impliceerde echter dat inzet van een warmtepomp onontkoombaar werd (zie verder Ad 2.)

Ad 2.

In verschillende notities van Dr. Ir. E. van Andel, in een tweetal notities van H.F. de Zwart en in de voorstudie en het uitvoeringsplan van Lek/HABO wordt gesproken over de mogelijkheid om een kas d.m.v. FiWiHEx warmtewisselaars te verwarmen en te koelen zonder gebruik te maken van een warmtepomp en daarbij warmte over te houden voor een gebruiker. In al deze documenten wordt er in dat geval gebruik gemaakt van een zeer groot warmtewisselend oppervlak in de warmtewisselaars (ordegrootte 0.4 m² uitwisselend oppervlak per m² kas) en van een ruime bandbreedte tussen de stooklijn en de ventilatielijn. In de voorstudie van Lek/HABO was er bovendien nog een microturbine waarmee een niet onbelangrijke hoeveelheid hoogwaardige warmte beschikbaar kwam.

Tevens wordt in al deze rapporten (met uitzondering van de quick scan van H.F. de Zwart) geen rekening gehouden met het temperatuurverloop van het aquiferwater in de tijd (wat bij een aquifer die conform de provinciale eisen thermisch in balans moet zijn altijd het geval zal zijn) en wordt er géén scheidingswisselaar toegepast.

In de derde plaats zal als een andere afnemer het warmteoverschot uit de kas gaat gebruiken dit water geleverd krijgen van 25 °C en dit water op een voldoende laag temperatuurniveau weer moeten terugleveren, anders heeft het voor het gebruik in de EPK onvoldoende koelpotentieel.

In de vierde plaats laat de studie van de Zwart en Campen (Jaarrond berekeningen aan de energieproducerende tuinbouwkas, 2005) duidelijk zien dat het niet gebruiken van een warmtepomp een koeltoren nodig maakt, wat tevens de vernietiging van een groot warmtelevering potentieel betekent, iets wat omwille van de energiedoelstellingen absoluut ongewenst is.

Op basis van deze nadelige consequenties bij de afwezigheid van een warmtepomp is besloten dat er alleen met vertrouwen de pilot kon worden opgezet wanneer de installatie werd uitgerust met een warmtepomp.

Ad 3.

Het oorspronkelijke in het uitvoeringsplan beoogde gebruik van 4 bronnen met een gemiddelde temperatuur van 25 °C voor de warme en 12 °C voor de koude bron was gebaseerd op de watertemperaturen die uit de kas zouden zijn gekomen wanneer er zonder warmtepomp zou worden ontvochtigd en verwarmd.

Met de introductie van de warmtepomp is de noodzaak van twee extra bronnen komen te vervallen, wat aanzienlijke kostenbesparingen en vereenvoudiging van de installatie heeft opgeleverd, maar waar uiteraard wel de extra kosten voor de warmtepomp tegenover staan.

Ad 4.

De schaal van het experiment is klein, en uiteindelijk zelfs de helft ten opzichte van de in eerste instantie voorgestelde schaal. Warmtekracht/installaties die qua schaal zouden passen bij het experiment zijn navenant zeer klein, zodat deze installaties niet representatief zijn voor WKK in de glastuinbouw. Daarom, en omdat door inzet van de warmtepomp de hoogwaardige warmte-output van de WKK gemist kan worden, is besloten geen warmte/kracht unit in de installatie op te nemen.

Bij een werkelijke praktijktoepassing van energieproducerende kassen op grote schaal zal zonder twijfel wél een warmte/kracht-unit worden gebruikt, niet in de laatste plaats in verband met de CO₂ voorziening. In de analyse van de gegevens en de vertaling naar de resultaten voor praktijktoepassing wordt dit daarom meegenomen.

Een reden waarom deze beslissing betrekkelijk gemakkelijk genomen kon worden is dat de WK inmiddels een zodanig standaard apparaat in de tuinbouw is, dat het grootste deel van de doelgroep goed zal kunnen leven met het achteraf rekenkundig toevoegen van een WK-unit. Hierop wordt in het volgende hoofdstuk nader in gegaan.

1.2 Verandering van de FiWiHEX uitvoering

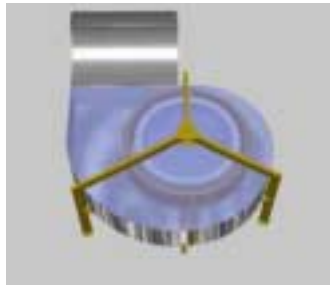
Naast de vier principiële punten die in de uiteindelijke uitvoering veranderd zijn ten opzichte van het oorspronkelijke voorstel is er één onderdeel dat qua uiterlijk en inpassing een ware metamorfose heeft ondergaan, maar wat functioneel gezien gelijk gebleven is, dat is de FiWiHEX warmtewisselaar.

Na inspanningen van HSH, de fabrikant van de FiWiHEX warmtewisselaars, om de ronde prototypen die tot in 2004 in omloop waren, seriematig en tegen acceptabele kosten te kunnen produceren bleek na een aantal maanden dat dit niet mogelijk was. Het weven van de matjes lukte, na aanvankelijke productieproblemen zeer goed, maar het insteken van de matjes in de ronde headers lukte slechts met zeer grote moeite. Het solderen van de verbindingen op een zodanige wijze dat alle 420 gaatjes dicht waren en het soldeer niet in de headers was gelopen bleek echter een onoverkomelijk probleem. Toen is besloten tot een radicaal ander weg, mede gezien het vooruitzicht dat er voor de Energieproducerende kas ruim 600 op een bepaald tijdstip geproduceerd moesten worden.

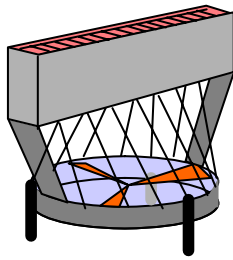
In de zomer van 2005 is besloten dat er geen ronde FiWiHEX-en met slakkenhuis gemaakt zouden worden, maar dat een lineaire FiWiHEX zou worden ontwikkeld waarbij uitgangspunt was dat de Lineaire FiWiHEX vergelijkbaar moest presteren met het oorspronkelijke concept.

Toen de eerste lineaire warmtewisselaars in juni 2005 beschikbaar kwamen en op een soortgelijke wijze konden worden doorgemeten als in oktober 2002 met de ronde FiWiHEX was gedaan, is vastgesteld dat de warmte-overdracht inderdaad vergelijkbaar was met die van de ronde FiWiHEX-en (zie Bijlage I).

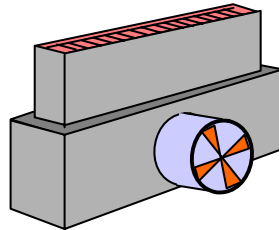
Een praktisch probleem was toen nog wel de keuze van een geschikte ventilator (zowel qua prijs als qua maatvoering) en de selectie hiervan heeft tot eind 2005 geduurd en vanaf begin januari 2006 konden de eerste FiWiHEX-en in de kas worden geplaatst.



Ronde FiWiEx-en
Bouwjaar <2004



Eerste prototypen
Zomer 2005



Uitvoeringsvorm Huissen,
Bouwjaar 2006



De problemen rond de totstandkoming van de FiWiEx-en hebben ertoe geleid dat de kas ongeveer een half jaar later is opgeleverd dan oorspronkelijk de bedoeling was.

1.3 Verandering van de gebruikswijze van de kas

Aangepaste temperatuurinstellingen

In alle documenten van voor 2007 met betrekking tot het concept Energieproducerende Kas wordt impliciet of expliciet uitgegaan van ver uit elkaar gelegen stook- en koellijnen, namelijk stoken bij 17 °C en koelen bij 27 °C. Beide instellingen zijn bij het uiteindelijke gebruik van de Energieproducerende kas anders, waarbij vooral de (veel) hogere stooktemperatuur (20 °C) de meest opvallende wijziging is. De koellijn ligt op 26 °C, wat wil zeggen dat er iets meer gekoeld wordt, maar vooral dat het water dat uit de warmtewisselaars terug komt een graad kouder is. De bandbreedte is door deze aanpassingen dus afgenomen van 10 naar slechts 6 °C).

Er is uiteraard een aantal keren met de betreffende tuinder besproken waarom de oorspronkelijke van 17 en 27 °C in het vooronderzoek en ontwerpberoeeningen als grenzen zijn aangenomen terwijl vanaf dag 1 dat de Energieproducerende Kas in gebruik werd genomen andere temperaturen zijn gesteld (de koeltemperatuur lag eerst zelfs op 25 °C). Het antwoord is dat deze ruime grenzen altijd door de ondernemer zijn opgevat als incidentele, acceptabele grenswaarden, maar niet als 'streefwaarden'. Overigens zijn de nu bij Hydro Huisman toegepaste temperatuurinstellingen (20 en 26 °C) ten opzichte van de gemiddelde tropische potplantenteler nog steeds ruim, vooral voor wat betreft de koellijn.

Gebruik schaduwsschermen

Een tweede, nog belangrijker punt is het gebruik van het schaduwsscherm. In de voorstudie en in het uitvoeringsplan van Lek/HABO wordt het schaduwsscherm genoemd als noodmaatregel die oververhitting van de kas bij onverhoopt te kleine koelvermogens helpt voorkomen.

In de berekeningen was daarom het gebruik van het schaduwsscherm altijd buiten beschouwing gebleven. De dagelijkse praktijk bij de teelt in de Energieproducerende Kas is echter anders; het schaduwsscherm wordt systematisch ingezet als teeltmaatregel en niet uitsluitend als noodmaatregel. In de zomer van 2007 werd het schaduwsscherm al gesloten bij een stralingsintensiteit buiten boven de 500 W/m² (in het begin van het jaar lag dit niveau nog lager, 400 W/m²). Dit betekent dat er op 650 van de ongeveer 1300 uur per jaar waarin de koeling actief is, er ook geschermd wordt. Het scherm is een bandjes weefsel waarbij 2/3 van deze bandjes reflecterende aluminium strips zijn en 1/3 lichtdoorlatend. Daarmee wordt in gesloten toestand 2/3 van de straling weer gereflecteerd wat bevestigd is door metingen met een lichtmeter. Omdat de verzameling van energie in een Energieproducerende kas gebaseerd is op maximale benutting van het zonlicht, heeft reflectie van 2/3 van het zonlicht gedurende de lichtrijkste helft van het jaar grote implicaties op de warmteoogst. In het volgende hoofdstuk wordt aangetoond dat meer dan de helft van de tegenvallende warmteoogst dan ook aan dit schermgebruik worden toegeschreven. Overigens wordt de op dit moment toegepaste strategie voor het schaduwsscherm onder potplantentelers als revolutionair gekwalificeerd omdat men normaal gesproken bij vergelijkbare teelten bij nog lagere stralingsniveaus overgaat tot het gebruik van schaduwsschermen.

1.4 Afzien van actieve ontvochtiging

In de voorstudie en in het "Bouw en inrichtingsplan" werd gebruik gemaakt van actieve ontvochtiging, om de kas ook tijdens perioden met warmtevraag te kunnen ontvochtigen. Dit betekent dat een aantal warmtewisselaar blokken koud water laten circuleren (12 °C) zodat hier waterdamp kan condenseren, terwijl andere blokken de kaslucht weer verwarmen.

Met de installatie uit het "Bouw en inrichtingsplan" was dit mogelijk, maar alleen ten kosten van de vernietiging van een grote hoeveelheid warmte (ordegrootte 250 MJ).

In het uiteindelijke systeem, met warmtepomp, treedt deze vernietiging niet op waardoor er in principe een groter warmteoverschot aan derden geleverd kan worden. De ervaring en ook berekeningen laten zien dat deze toename van dit laagwaardige warmteoverschot in geen verhouding staat tot de toename van de daarvoor noodzakelijke kostbare elektriciteit. Daarom is besloten om vanaf de zomer niet langer gebruik te maken van actieve ontvochtiging. Op basis daarvan is ook besloten om te stoppen met het produceren van de hiervoor benodigde dubbel uitgevoerde FiWiHEX-blokken.

2 Effecten van wijzigingen op de energieproductie

Zoals in het vorige hoofdstuk beschreven zijn er in het traject van Uitvoeringsplan tot Realisatie veel zaken aangepast die invloed hebben op het uiteindelijke resultaat wat mogelijk sterk af zal wijken van de oorspronkelijke verwachting.

In het document "Bouw en inrichting Energieproducerende Kas" van (Lek/HABO, december 2004) zijn de volgende verwachtingen voor het ontwerp beschreven:

- Het eigen elektriciteitsverbruik van de Energieproducerende kas bedraagt 35 kWh/(m² jr), waarvan 25 kWh voor de FiWiHEX-ventilatoren en 7 kWh voor de bronpompen. Het resterende deel van het verbruik zit in de koeltoren.
- De elektriciteitsproductie van de WKK bedraagt 16 kWh per jaar.
- Het gasverbruik van deze WKK bedraagt 6.7 m³/(m² jaar).
- De levering van warmte aan 'derden' bedraagt 455 MJ/(m² jaar), maar ook de afvalwarmte van de Micro Gasturbine kan aan derden worden geleverd (87 MJ/(m² jaar)), waardoor het totaal aan leverbare warmte 542 MJ/(m² jaar) wordt.

Om uit deze getallen de netto energieproductie te berekenen moet het primaire energieverbruik dat nodig is voor de extra benodigde elektriciteit het openbare net, worden uitgerekend. Deze hoeveelheid is $35 - 16 = 19$ kWh, wat bij een conversierendement van 43% in het openbare net neerkomt op 5.1 m³ aardgas per m² per jaar. Het totale naar de Energieproducerende kas toe te rekenen gasverbruik komt daarmee op $(6.7 + 5.1 =) 11.8$ m³/(m² jaar). Als de warmtelevering aan derden wordt gewaardeerd in aardgas equivalenten kan er 17.2 m³ aardgas equivalenten per m² per jaar worden geleverd. De netto energieproductie komt dan uit op 5.2 m³/(m² jaar). (in het "Bouw en Inrichtingsplan" staat 5.1, een gevolg van andere afrondingen)

Wanneer deze verwachtingen worden vergeleken met de resultaten over 2007 (t/m half september gemeten en vervolgens voor de rest van het jaar geëxtrapoleerd), vallen er grote verschillen op.

Gemeten energieverbruik

Het elektriciteitsverbruik van de Energieproducerende kas zoals die in Huissen is gerealiseerd bedraagt 72 kWh per m² per jaar, wat iets meer dan 2 maal zo hoog is als het oorspronkelijk verwachte gebruik. De FiWiHEX-ventilatoren gebruiken daarvan 18 kWh per m² per jaar, de pompen die water over de bronnen en in de kas laten circuleren, gebruiken 13 kWh per m² per jaar en de warmtepomp gebruikt 41 kWh per m² per jaar.

Het lijkt het er dus op dat het vooral de warmtepomp is die het verschil maakt maar deze conclusie is voorbarig omdat als de warmtepomp er niet zou zijn geweest, het verbruik van de FiWiHEX ventilatoren veel hoger en dat van de pompen enigszins hoger zijn geweest. Dit wordt hierna verder besproken.

Warmtelevering/ energieproductie

De warmtelevering vanuit de Energieproducerende Kas in Huissen gaat naar het vloerverwarmingssysteem van de rest van het bedrijf. Deze levering bedraagt over 2007 naar verwachting 300 MJ/(m² jaar). Puur op basis van de vergelijking van ingaande en uitgaande megajoules zou de kas dus *nét* energieproducerend zijn: 72 kWh komt overeen met 260 MJ, waardoor er een 40 MJ overschot ontstaat (=1.3 m³ aardgas equivalenten).

Als er echter gerekend wordt met het omzettingsrendement van hoogwaardige energie (gas) naar elektriciteit en het centrale rendement op 43% wordt gesteld, dan is de kas zoals die op dit moment in Huissen bedreven wordt, *niet* energieproducerend. De productie van 72 kWh elektriciteit kost namelijk 19 m³ aardgas en wanneer het warmteoverschot wordt omgerekend in aardgas-equivalenten vertegenwoordigt dit 9.5 m³ aardgas zodat het netto verbruik op 9.5 m³ aardgas per m² per jaar zou moeten worden gesteld.

Correctie voor toepassing van WKK zoals in oorspronkelijk ontwerp

Wanneer er wordt verondersteld dat de productie van elektriciteit door WKK op het eigen bedrijf zou plaatsvinden, zoals oorspronkelijk beoogd (en op praktijkschaal ook haalbaar), wordt bovenstaande berekening echter genuanceerd.

Het elektriciteitsverbruik van de kas zou in dat geval dalen naar ongeveer 60 kWh/(m² jaar). Het gasverbruik zou op 16 m³/(m² jaar) uitkomen, maar het leverbare warmte-overschot zou naar 18 m³/(m² jaar) zijn toegenomen. Daarmee zou een kleine positieve netto energieproductie van 2 m³/(m² jaar) zijn gerealiseerd.

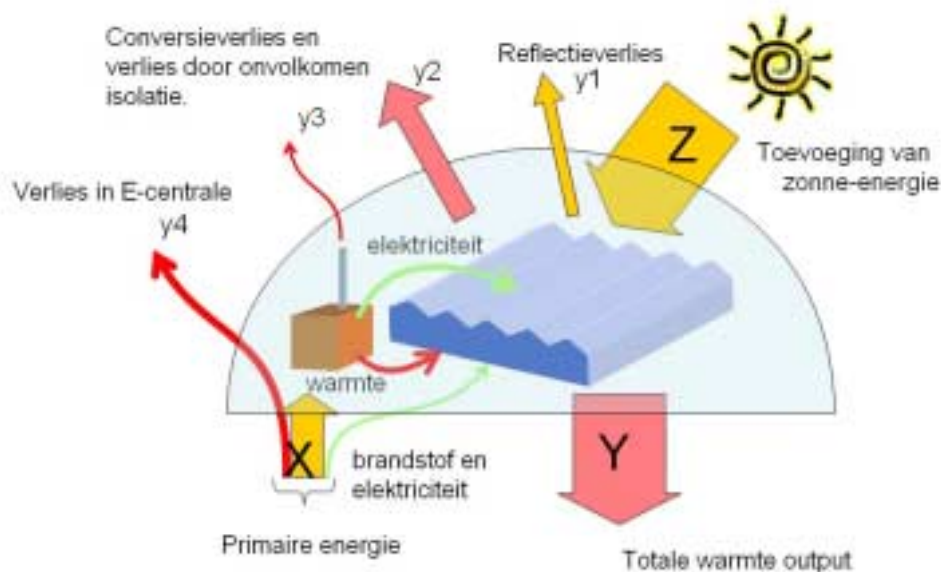
De gemeten gegevens bevestigen dus, dat ondanks de grote aanpassingen die er hebben plaatsgevonden vanaf het "Bouw en inrichtings"-plan tot heden, een kleine positieve energieproductie is gerealiseerd (zij het kleiner dan de verwachting 2 in plaats van 5.1 m³/(m² jaar)).

Daarnaast heeft het onderzoek, de ervaring en landelijke en zelfs internationale aandacht voor het project Energieproducerende Kas tot nu toe grote waarde voor de innovatie van de tuinbouwsector. Het project in Huissen heeft onder andere naast de daadwerkelijk tot nu toe gemeten energieverbruik en -productie, geleid tot verschillende resultaten:

- Vele groepen tuinders, beleidsmakers en andere geïnteresseerden zijn actief bezig met de problematiek en het perspectief van Energieproducerende kassen (o.a. in het Synergie Platform).
- Is er veel ervaring opgebouwd m.b.t. de gewasreactie van potplanten in goed geconditioneerde kassen (temperatuur én luchtvochtigheid), met een duidelijke groeiversnelling als perspectief.
- Nieuwe, voor tuinders en installateurs toegankelijke simulatiemodellen tot stand gekomen waarmee gedetailleerde berekeningen, speciaal voor kassen met luchtbehandelingsystemen kunnen worden gemaakt.
- Kwantitatieve informatie en gebruikerservaringen met het Zigzag-materiaal beschikbaar gekomen.

Nadere analyse van de diverse ingrepen met behulp van simulatie

Om de invloed van elk van de individuele ingrepen (hoofdstuk 1) ten opzichte van het oorspronkelijke ontwerp te kunnen bepalen is dankbaar gebruik gemaakt van verbeterde simulatiesoftware om het gedrag van Energieproducerende kassen te kunnen bepalen. Er is daarbij steeds gekeken naar de invloed van een dergelijke wijziging op de netto energieproductie. Hierbij wordt steeds teruggegrepen op het onderstaande plaatje, waarbij de netto energieproductie volgt uit de berekening van $Y - X$.



Figuur 2.1. Hoofdkomponenten in de energiebalans rond een energieproducerende kas.

De basis voor het positieve verschil tussen die primaire energie input (X) en de warmtelevering (Y) van een energieproducerende kas ligt, zoals in de figuur getoond, vooral in het feit dat er sprake is van een relatief grote gratis zonne-energie input (Z) die daardoor buiten de berekening kan worden gehouden.

Figuur 2.1 laat zien dat de minimalisatie van de verliesposten y_1 , y_2 , y_3 en y_4 de sleutel is tot maximalisatie van het verschil tussen X en Y. In het extreme geval waarbij alle verliesposten 0 zijn, is de energieproductie van de kas gelijk aan de instraling van de zon: in Nederland ongeveer $113 \text{ m}^3 \text{ a.e. per m}^2 \text{ per jaar}$.

Bij de analyse van de effecten van de verschillende wijzigingen op de uiteindelijke energieproductie is gebruik gemaakt van KASPRO als basis simulatiemodel. Op basis van KASPRO is inmiddels een vereenvoudigde versie ontwikkeld die kan worden ingezet voor de analyse van Gesloten en energieproducerende kassen. Met behulp van deze modellen zijn een aantal veranderingen geanalyseerd:

Effect van het toevoegen van een scheidingswisselaar

De scheidingswisselaar geeft een zeker temperatuurverlies waardoor er voor de opslag of onttrekking van warmte meer water moet worden verpompt en waardoor de warmteoverdracht van lucht op water in de zomer iets moeilijker zal gaan. De consequentie hiervan is dat het elektriciteitsverbruik per eenheid warmte die in de kas moet worden gebracht of per eenheid koeling groter is.

Berekeningen laten zien dat het gebruik van een warmtewisselaar die in de praktijk een temperatuurverlies van 1.5°C oplevert en dat dit het jaarlijkse stroomverbruik van de kas met ongeveer $10 \text{ kWh per m}^2 \text{ per jaar}$ heeft vergroot. Als er wordt uitgegaan van gebruik van WKK dan betekent deze 10 kWh een stijging van het gasverbruik met $2.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ en een vergroting van het schoorsteenverlies (y_3 in Figuur 2.1) met ongeveer 8 MJ . Omdat er van deze 2.6 dus slechts 10% via de schoorsteen (y_3) de 'kaasstolp' verlaat, geeft deze 2.6 m^3 toename van X dus een 2.34 m^3 toename van Y en slechts een vermindering van de netto energieproductie van $0.26 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$.

Conclusie

De scheidingswisselaar leidt in de huidige installatie van de Energieproducerende kas slechts een daling van de netto energieproductie van $0.26 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$. De toepassing van de scheidingswisselaar is gezien de eventuele risico's en ook de huidige wet en regelgeving dus een zeer goede keuze.

Effect van het toevoegen van een warmtepomp

Het concept zoals dat in het "Bouw en inrichtingsplan" is beschreven kende optimistische uitgangspunten voor wat betreft de prestatie van de warmtewisselaars en het kasdek. Achteraf gezien was met die installatie het nu gehanteerde kasklimaat niet te realiseren geweest. Het halen van een kasluchttemperatuur van 17°C met water van 25°C was al aan de grens van de mogelijkheden dus het handhaven van de kas op 20°C zou niet zijn gelukt. Zelfs los van dit feit is vanuit de doelstelling van een hoge netto energieproductie, de inzet van de warmtepomp alleen maar toe te juichen. Immers, het oorspronkelijke ontwerp in het "Bouw en inrichtingsplan" omvatte een koeltoren die maar liefst $955 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ zou hebben vernietigd om te kunnen ontvochtigen en om over voldoende koelcapaciteit voor de zomer te kunnen beschikken. Het gebruik van de warmtepomp maakt het mogelijk om deze behoeften in te vullen zonder warmte te vernietigen en dat tegen een extra elektriciteitsverbruik van $41 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ jaar})$.

Wanneer de elektriciteit met een eigen WKK wordt opgewekt, moet hiervoor 11 m^3 gas worden ingekocht, waarvan ruim 5 m^3 in de vorm van hoogwaardige warmte in de output van de Energieproducerende Kas terugkomt én er kan een vernietiging van 30 m^3 aardgas equivalenten (dat is 955 MJ) worden voorkomen.

Het toevoegen van de warmtepomp in plaats van de koeltoren leidt dus, afgaande op de getallen die in het "Bouw en inrichtingsplan" genoemd worden tot een toename van de netto energieproductie van $30 + 5 - 11 = 24 \text{ m}^3$.

Conclusie

Een warmtepomp is feitelijk een "conditio sine qua non" in de energieproducerende kas als een kasklimaat wordt gewenst zoals dat in de tropische potplantenteelt gebruikelijk is. Gebruik van een warmtepomp in plaats van een warmtevernietiging door een koeltoren geeft het perspectief op een verhoging van de netto energieproductie met $24 \text{ m}^3 \text{ a.e. per m}^2 \text{ per jaar}$.

Effect van het afzien van het gebruik van een koeltoren en de ‘gemiddelde aquifers’

Het gebruik van de koeltoren en de gemiddelde buffers was gekoppeld aan het feit dat er in het oorspronkelijke concept geen warmtepomp gebruikt zou worden. Het schrappen van de koeltoren kan dus eigenlijk niet als los onderdeel worden gezien. Toch is het goed om op deze plaats nog even op te merken dat de koeltoren in het oorspronkelijke concept een enorme verliespost vanuit de ‘kaasstolp’ van Figuur 2.1 zou zijn geweest, namelijk $30 \text{ m}^3 \text{ a.e. per m}^2 \text{ per jaar}$. Ter vergelijking, de gemiddelde warmtevraag van de kasafdelingen bij Hydro Huisman liggen rond de $18 \text{ m}^3 \text{ per m}^2 \text{ per jaar}$ en zijn dus ruim 1,5 keer kleiner dan wat er in het oorspronkelijke concept via de koeltoren vernietigd zou worden.

Effect van het afzien van de fysieke integratie van een microturbine

Een belangrijke reden van het afzien van de fysieke integratie van een microturbine (kleine WKK) was de ongunstige schaafeffecten bij een machine van de beoogde capaciteit en het feit dat het effect van een WK-unit op het perspectief gemakkelijk te berekenen is. In Figuur 2.1 is te zien dat elke kWh elektriciteit die niet vanuit het openbare net hoeft te worden ingekocht een verkleining van de verliespost y_4 geeft (warmtevernietiging in de centrales van het openbare net) en een veel kleinere vergroting van de verliespost y_3 . Rekenvoorbeeld: de productie van 1 kWh elektriciteit met een rendement van 0.43 leidt in een centrale tot een verlies van $0.20 \text{ m}^3 \text{ a.e. aan afvalwarmte (} y_4 \text{)}$. Wanneer deze kWh “binnen de kaasstolp” wordt geproduceerd met een WKK is hiervoor 0.26 m^3 gas nodig en bij een schoorsteenverlies van 10% leidt dit tot een verlies van 0.026 m^3 aardgas equivalenten (y_3). De warmte en elektriciteit die eveneens uit deze m^3 worden gemaakt leiden niet tot een vergroting van de overige verliesposten y_2 en y_1 en leiden dus tot een vergroting van de warmte-output Y .

Conclusie

Elke kWh elektriciteit die door een lokale WKK wordt geproduceerd in plaats van uit het openbare net leidt tot een verbetering van de energieproductie met 0.174 m^3 aardgas equivalenten. Dit getal geldt bij het huidige rendement in het openbare net (43%) en onder de aanname van een goed rendement van de WK-unit (eveneens 43%).

Effect van de verandering van de FiWiHEX uitvoering

In Bijlage I is een uitgebreide verhandeling beschreven over de vergelijking van de thermische prestaties van de ronde FiWiHEX-en en de lineaire. De conclusie hieruit is dat de prestaties vrijwel gelijk zijn (bij koelen is lineair iets beter en bij verwarmen is rond iets beter, wat te maken heeft met de verschillende beschikbare oppervlakken tijdens koelen en verwarmen).

In het oorspronkelijke “Bouw en inrichtingsplan” werd voor de FiWiHEX ventilatoren een elektriciteitsverbruik van $25 \text{ kWh per m}^2 \text{ per jaar}$ aangenomen en de ervaringen in de Energieproducerende Kas wijzen op een verbruik van $18 \text{ kWh per m}^2 \text{ per jaar}$.

Conclusie

Het thermisch gedrag van de FiWiHEX-warmtewisselaars heeft geen nadeel ondervonden van de vernieuwde uitvoeringsvorm en het elektriciteitsverbruik van de ventilatoren is met slechts $18 \text{ kWh per m}^2 \text{ per jaar}$ fors lager dan de verwachting. Die was namelijk $25 \text{ kWh per m}^2 \text{ per jaar}$.

Vanuit tuinbouwkundig oogpunt is de gewijzigde uitvoeringsvorm overigens zeer positief omdat de lineaire warmtewisselaars veel praktischer zijn qua inbouwbaarheid.

Effect van de verandering van de gebruikswijze van de kas

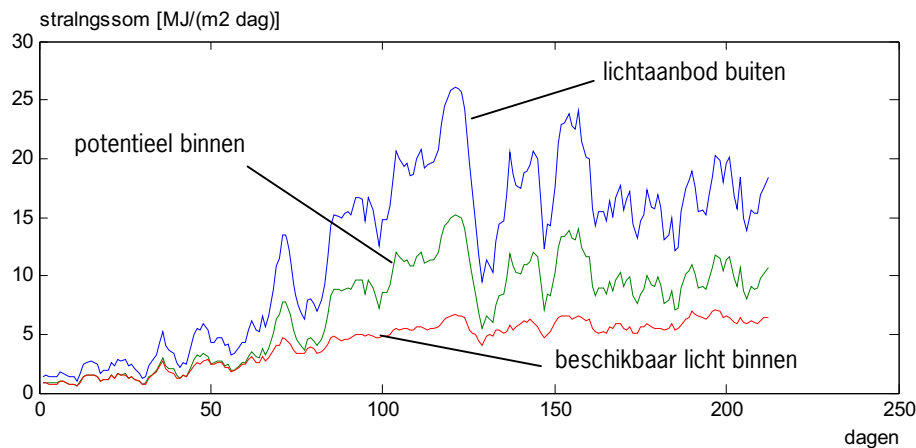
Ten aanzien van het gebruik van de kas zijn er twee zaken die grote consequenties hebben voor de netto energieproductie van de Energieproducerende kas:

- verandering van de stooktemperatuur van 17 naar $20 \text{ }^\circ\text{C}$ en
- gebruik van het schaduwscherm.

De verhoging van de teelttemperatuur heeft direct gevolg op de omvang van de verliespost y_2 in Figuur 2.1 en het schermgebruik leidt tot een verhoogde reflectie, dus tot een vergroting van y_1 .

Berekeningen aan het effect van het verhogen van de stooktemperatuur van 17 naar $20 \text{ }^\circ\text{C}$ laten zien dat het warmteverlies van de kas hierdoor met $210 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ toeneemt. Uit de berekeningen blijkt ook dat bij de huidige

uitvoering van de Energieproducerende Kas uitgevoerd de stooklijn zou worden verlaagd naar de oorspronkelijk aangenomen 17 °C, dat dan de netto energieproductie met bijna 7 m³/(m² jaar) aardgas equivalenten zou toenemen. Het effect van het schermgebruik is nog aanzienlijk groter. Onderstaande grafiek laat zien dat in de lichtrijke zomermaanden soms meer dan de helft van het licht, dat potentieel in warmte had kunnen worden omgezet, door het scherm wordt tegengehouden.



Figuur 4.2. Lichtsom buiten de kas, het potentiële licht binnen de kas en binnen de kas en de feitelijke lichthoeveelheid onder het schaduw scherm in 2007. De buitendata zijn gemeten, de binnendata zijn berekend aan de hand van de bekende transmissiewaarden en schermstanden. De data zijn met een 5 daags lopend gemiddelde filter afgevlakt.

Het schermgebruik vindt vanuit teeltkundig oogpunt plaats, maar het zal duidelijk zijn dat hiermee ook veel licht, waarvan de energie verzameld had kunnen worden, uit de kas wordt gehouden. Het effect van het schermgebruik is berekend op een daling van de netto energieproductie van 420 MJ per m² per jaar, ofwel ruim 13 m³ aardgas equivalenten per jaar.

Het schermgebruik is daarmee de belangrijkste factor die verantwoordelijk is voor de zeer lage netto energieproductie.

Effect van het achterwege laten van actieve ontvochtiging

Doordat er niet langer actief ontvochtigd wordt zullen de ramen vooral 's nachts af en toe een beetje open gaan. Hiermee gaat op jaarbasis ongeveer 250 MJ per m² per jaar aan voelbare en latente warmte verloren, wat dus een drukkend effect heeft van bijna 8 m³ aardgas equivalenten op de netto energieproductie. Dit wordt echter voor lief genomen omdat in geval actief zou worden ontvochtigd het jaarlijkse elektriciteitsverbruik met ruim 25 kWh zou oplopen. Gegeven de waarde van de misgelopen laagwaardige warmte (€ 1,50) en de kosten van de benodigde elektriciteit (meer dan € 1,50) is dit vooralsnog een verstandige keuze.

Eindconclusie ten aanzien van energieproductie

Elk van de doorgevoerde veranderingen heeft in negatieve of positieve zin invloed op de behaalde energieprestatie van de EPK in Bergerden. De overall resultaten laten zien dat mits de installatie daadwerkelijk was uitgevoerd met een eigen WK er sprake zou zijn van een beperkte maar positieve energielevering. Het grote verschil tussen de potentiële energieproductie en de gemeten energieproductie is het gevolg van het aangepaste temperatuurniveau maar vooral door de verhoogde inzet van het schaduw scherm.

Ook de lagere lichttransmissie van het kasdek heeft de netto energieproductie verlaagd. Hierop gaat het volgende hoofdstuk nader in.

3 Het Zigzag-kasdek materiaal

Vanuit het belang van een hoge lichttransmissie en een laag warmteverlies (dus de beperking van de verliesfactoren y_1 en y_2 in Figuur 2.1) is in het ontwerpstadium van de Energieproducerende kas gekozen voor de toepassing van het ZigZag® polycarbonaat kasdek van General Electric.

Op het moment dat de beslissing genomen moest worden waren er nog nauwelijks praktijkgegevens over dit nieuwe kasdek beschikbaar.

De belofte was dat de lichtdoorlatendheid vergelijkbaar zou zijn met die van enkel glas, terwijl het warmteverlies vergelijkbaar zou zijn met andere dubbelwandige polycarbonaat platen.

Er blijkt echter in de praktijk een verschil te bestaan tussen de lichtdoorlatendheid van kasdekmaterialen *sec*, de lichtdoorlatendheid van een kasdek als geïntegreerd geheel van een kasconstructie én de doorlatendheid van het kasdek tijdens het normale gebruik.

Dit hoofdstuk belicht eerst de materiaaleigenschappen zoals die volgens de specificaties zijn opgegeven en zoals deze bleken te zijn voor een willekeurige plaat uit de stapel reserveplaten die bij Hydro Huisman liggen opgeslagen. Vervolgens wordt ingegaan op de lichtdoorlatendheid van de kas met Zigzag-plaat. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van metingen in de kas bij Hydro Huisman, maar ook van metingen bij een min of meer vergelijkbare ZigZag-kas in Noord Holland (Bak). Ook is de Zigzag-kas vergeleken met andere breedkappers, waaronder die met enkel glas. Het warmteverlies dat met het Zigzag-materiaal wordt gerealiseerd wordt in § 3.4 besproken.

Het blijkt dat de overall doorlatendheid van het kasdek beduidend lager uitkomt dan de 78% waarmee in eerdere studies (Zwart, 2005; Kempkes, 2007) is gerekend. Uiteraard heeft dit direct invloed op het energieproductie-potentieel van de kas. In § 3.5 wordt ingegaan op het gevolg van een andere lichtdoorlatendheid en een andere warmtedoorgangcoëfficiënt op dit potentieel.

3.1 De lichttransmissie van ZigZag-platen in vergelijking met enkel glas

Licht dat door transparante materialen heen dringt en bij de overgang van het ene naar het andere materiaal te maken krijgt met een verandering van brekingsindex zal in een zekere mate gereflecteerd worden. Licht dat niet wordt gereflecteerd kan door het materiaal worden geabsorbeerd en doorgelaten. De gangbare kasdekmaterialen zijn van dun materiaal zodat de absorptie klein is. Het grootste deel van het opvallende licht wordt dus doorgelaten. Net als glas heeft Zigzag-materiaal ook een duidelijke reflectie, maar de speciale vorm en de goed gekozen hoek zorgt ervoor dat een deel van die reflecties naar binnen gericht zijn zodat ze toch in de kas komen.

In het Lichtlaboratorium van Wageningen UR Glastuinbouw is meetapparatuur aanwezig waarmee de lichttransmissie van kasdekmaterialen kan worden gemeten. De voor ZigZag-plaat geschikte meetopstelling kan de loodrechte en de diffuse transmissie meten.

In mei 2007 is vanuit de voorraad met reserveplaten op de zolder van Hydro Huisman een stuk ZigZag-plaat meegenomen naar het laboratorium. Onderstaande tabel laat de resultaten van de meting aan de kale plaat zien, samen met vergelijkbare gegevens voor glas en de fabrieksspecificaties voor het ZigZag-materiaal.

Tabel 3.1. Lichtdoorlatendheid van enkel glas, gemeten en gespecificeerde lichttransmissie van het 2 laags GE Lexan Zigzag-kasdek materiaal dat is toegepast in het kasdek van de Energieproducerende Kas in Huissen.

Materiaal	Diffuse transmissie	Loodrechte transmissie
Enkel glas	0.83	0.90
Ongereinigd ZigZag uit de voorraad van Huisman	0.752	0.894
Gereinigd ZigZag uit de voorraad van Huisman	0.772	0.905
ZigZag Volgens specificaties	0.79-0.80	0.89-0.90

Het ZigZag-materiaal scoort voor de loodrechte transmissie in alle opzichten goed. Zowel in vergelijking met glas, als bij de vergelijking van het materiaal uit de voorraad van Huisman met de oorspronkelijke fabrieksspecificaties is er niets op het materiaal aan te merken.

De doorlatendheid voor diffuus licht is voor de ZigZag-plaat lager dan voor glas. De fabrieksspecificaties geven dit al aan, maar de monsters uit de voorraad van Huisman laten een nog iets lagere lichtdoorlatendheid zien, zelfs na reiniging. Al met al is de transmissie van een praktische ZigZag-plaat 6 %-punten lager dan de diffuse transmissie van enkel glas.

In de oorspronkelijke jaarrond simulaties (De Zwart & Campen, 2005), is met de diffuse doorlatendheid volgens fabrieksspecificaties gerekend (0.80) zodat het verschil tussen praktische plaat eigenschappen en theoretische uitgangspunten indertijd een 3% overschatting van de lichttransmissie is gemaakt.

3.2 De lichttransmissie van de constructie

Eén van de mooie eigenschappen van de ZigZag-plaat is dat de plaat een grote inwendige stijfheid heeft en dat de platen zonder glasroeden in elkaar geklikt kunnen worden. De traditionele extra lichtonderscheppende delen die kenmerkend zijn voor breedkappers zijn daarom in de simulaties in het vooronderzoek achterwege gelaten. Er is toen met 10% lichtonderschepping door de constructie gerekend, aangevuld met 2 %-punten voor de scherminstallatie. De overall diffuse transmissie op gewasniveau waarmee toen is gerekend kwam daarmee op $(0.80 \cdot 0.88) = 0.70$.

Bij metingen in de kas zoals die nu bij Hydro Huisman staat blijkt deze doorlatendheid echter een stuk lager namelijk 58% (gemeten op 26 oktober 2006), 51% (gemeten op 24 april 2007) en 56% (gemeten op 25 mei 2007). De laagste waarde, 51%, is gemeten na een lange droge periode waarin, omdat er geen reiniging van het kasdek had plaatsgevonden, er zonder twijfel een aanzienlijke hoeveelheid stof op het kasdek lag. De meting in mei, nadat er in de voorafgaande week veel regen was gevallen, geeft dan ook weer een waarde aan die in de buurt ligt van de 58% die in oktober het jaar daarvoor bij betrekkelijk nieuw materiaal was gemeten.

Al deze waarden zijn echter aanzienlijk lager dan de 70% waarmee in alle voorstudies gerekend is.

Deze lage waarde zal deels met vervuiling van het dek te maken hebben (een ZigZag-dek is moeilijker schoon te maken dan een vlak dek) en deels met het aantal constructiedelen dat in het dek is verwerkt.

Dit aantal constructiedelen is groter dan indertijd verwacht omdat de platen niet op 8 meter lengte konden worden gemaakt (de lengte om in één keer van goot naar nok te komen). Zoals te zien de foto van Figuur 2.1 zijn er ten behoeve van de onderlinge koppeling van de platen op 1/3 en 2/3 van het kasdek vrij forse gordingen gemaakt.



Figuur 3.1. Constructie van het Zigzag-kasdek waarbij forse gordingen noodzakelijk zijn voor de onderlinge koppeling van de ZigZag-platen.

Het overall effect van de zwaardere constructie en de wat lagere diffuse doorlatendheid van het plaatmateriaal in vergelijking met de fabrieksspecificaties is dat de lichtdoorlatendheid van de totale kasconstructie een factor 0.15 lager is dan in de berekeningen van april 2005 is aangenomen.

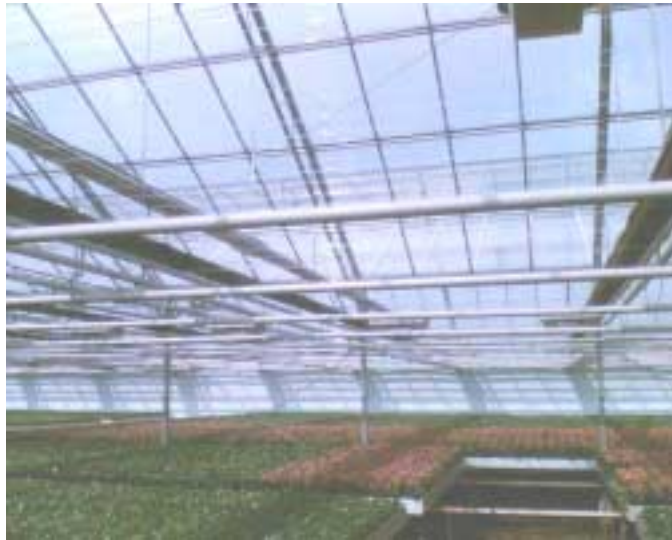
3.3 De lichttransmissie van de Energieproducerende kas in vergelijking met andere kassen

Gezien het belang van een hoge lichttransmissie voor de energieproductie dringt de vraag zich op hoe de geconstateerde lichttransmissie zich verhoudt tot de lichttransmissie van glazen kassen. Om hier een overzicht van te geven is dezelfde meetprocedure als die voor de EPK is toegepast gebruikt om de transmissie van een drietal andere kassen.

In de eerste plaats is gekeken naar de lichttransmissie van een glazen breedkapper van dhr Jansen te Huissen (JaBro plant B.V.).

Nevenstaande foto geeft een indruk van diens kasconstructie.

Het betreft hier wel glas dat met een lage-emissie coating is behandeld (Hortiplus®) en het zijn smalle ruiten (83 cm). De diffuse lichttransmissie van deze kas op plantniveau bleek 42%.



Figuur 3.2. Kasconstructie bij Jabro Plant B.V.

In de tweede plaats is de lichttransmissie van de glazen breedkapper van de heer Corn Bak (Assendelft) in het kader van het project “Gewasgroei en energiegebruik in kassen onder een Lexan-Zigzag-kasdek in vergelijking met verschillende soorten kasdekken” gemeten (Kempkes & Van Os, 2006). Onderstaande foto geeft een impressie van de constructie van die kas.



Figuur 3.3. De glazen breedkapper van Corn Bak te Assendelft.

In het bovengenoemde project is twee keer de lichtdoorlatendheid volgens de in Bijlage III beschreven methode uitgevoerd. Op 6 april 2005 werd een lichtdoorlatendheid van 60% van het glazen kasdek gemeten en op 10 maart 2006 werd 70% gemeten. Het grote verschil is toegeschreven aan mogelijke krijtresten die tijdens de eerste meting nog op het dek zaten. Het gebruik van krijt is in de potplantenteelt, en dus bij vrijwel alle breedkappers, wijdverbreid.

Gecombineerd met het geringe belang dat in de potplantenteelt aan een hoge lichttransmissie wordt toegekend is dit de belangrijkste reden voor de moeizame verzameling van goede representatieve metingen voor glazen breedkappers die met de Energieproducerende Kas vergeleken kunnen worden.

Overigens heeft Corn Bak ook een Zigzag-afdeling met een constructie die vergelijkbaar is als die van de Energieproducerende Kas. Bij de Zigzag-kas van Corn Bak zijn lichttransmissies van 58 en 59% gemeten, dus vrijwel gelijk aan de eerste metingen aan de Energieproducerende Kas.

Conclusies

Uit de tot nu toe uitgevoerde metingen kan worden geconcludeerd dat de veronderstelling dat het Zigzag-kasdek tot een vergelijkbare lichtdoorlatendheid komt als een glazen kas, niet ondersteund wordt door de resultaten.

Het plaatmateriaal laat diffuus licht minder goed door dan glas⁵, maar vooral de forse constructie die nodig is doordat de platen korter zijn dan oorspronkelijk beoogd in de productie, geeft een belangrijke verlaging.

3.4 De warmte-doorgang van de kas met Zigzag-kasdek

Behalve de lichtdoorlatendheid beïnvloedt ook de isolatiegraad van het dek de potentiële energieproductie van de Kas Als Energiebron.

In de oorspronkelijke jaarrond-berekeningen uit 2005 is gerekend met een gemiddelde warmte-doorgang van $2.8 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ voor het plaatmateriaal. Het totale warmteverlies van de kas is aanzienlijk groter. In de eerste plaats omdat een kas altijd een zekere hoeveelheid lek heeft, in de tweede plaats omdat het dek onder een hoek staat en in de derde plaats omdat condensatie van waterdamp tegen het koude dek het effectieve warmteverlies van de kas vergroot (het heat-pipe principe). Bovendien is het warmteverlies sterk wisselend met de windsnelheid en met de virtuele hemeltemperatuur.

In de meetopstelling in Huissen wordt de warmtestroom gemeten in de vorm van warm water naar de kas.

Bovendien is bekend welk elektrisch vermogen de ventilatoren afgeven (ps. dit is een niet onaanzienlijke bijdrage, namelijk al gauw 10% van de hoeveelheid die via het water naar de kas wordt gevoerd). Uit deze totale energietoevoer en het temperatuurverschil tussen de kas en de buitenlucht wordt een effectieve k-waarde van $3 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ verkregen. Deze is bij de EPK gebaseerd op de combinatie van het kasdek en het gesloten energiescherm omdat tijdens verwarmen het energiescherm 's nachts altijd gesloten is.

Conclusie

De conclusie uit deze berekeningen is dat de Energieproducerende kas een k-waarde heeft rond de $3 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ en dat indien het simulatiemodel KASPRO wordt gevoed met de oorspronkelijk aangenomen specificaties het berekende warmteverbruik goed overeenkomt met het gemeten warmteverbruik. Qua warmteverlieskarakteristiek voldoet de Energieproducerende kas dus goed aan de vooraf verwachte specificaties.

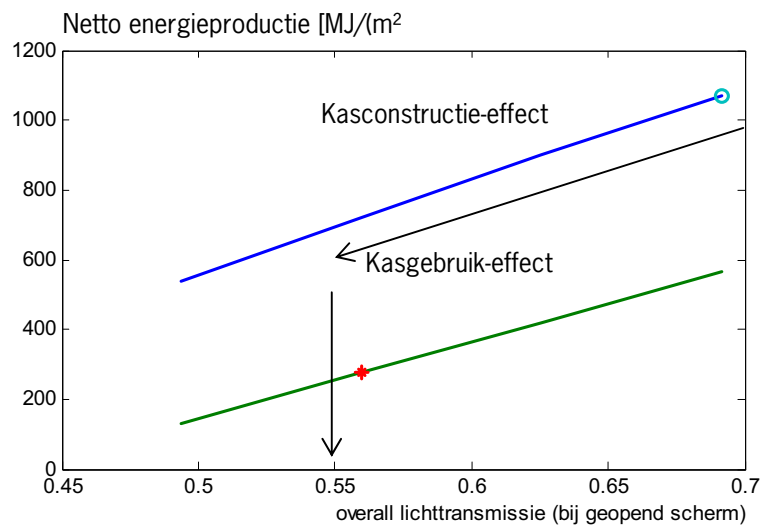
⁵ De diffuse doorlatendheid is voor kassen het belangrijkste kenmerk omdat er op jaarbasis in Nederland meer diffuus dan direct licht invalt, maar vooral omdat dit het geval is in sombere perioden waarin elk beetje licht welkom is.

3.5 Effect van een hogere lichtdoorlatendheid en een andere warmtedoorgang

Zoals blijkt uit Figuur 2.1 in Hoofdstuk 2 zijn de verliescomponenten y_1 (samenhangend met de lichttransmissie) en y_2 (de warmtedoorgang) van grote invloed op de netto energieproductie. De in 3.2. gemeten 15% lagere lichttransmissie heeft dus een negatief effect op het uiteindelijke resultaat. Via simulatie is geanalyseerd wat het effect is van de terugval die deze lagere lichttransmissie heeft veroorzaakt.

Figuur 3.4 toont de toename van de netto energieproductie bij verhoging van de lichttransmissie en het effect van het gebruik van het schaduwscherm.

De huidige gemiddelde transmissie van 56% is als centraal punt genomen en alle overige parameters zijn gelijk gehouden.



Figuur 3.4. Effect van een verlaging en een verhoging van de overall lichttransmissie en het effect van het gebruik van een schaduwscherm op de netto energieproductie.

Uit de figuur blijkt dat het effect van de lichttransmissie lineair doorwerkt op de netto energieproductie (dus het verschil tussen X en Y in Figuur 1.1). Dit effect is aangeduid met het "Kasconstructie effect" en brengt de netto energieproductie van 1080 MJ/(m² jaar) naar 720 MJ/(m² jaar). Naast het statische effect van de verminderde lichttransmissie van de constructie die nou eenmaal is zoals die is, is er echter ook een effect van het gebruik van de kas in de vorm van de inzet van het schaduwscherm wat de netto energie productie met 420 MJ/(m² jaar) verlaagd (zie Hoofdstuk 2). Dit schermgebruik brengt de netto energieproductie dus terug naar 300 MJ/(m² jaar). Het intensieve schermgebruik (en de eigenschappen van het scherm) geven dus een nog grotere verlaging van de netto energieproductie dan de geringere lichtdoorlatendheid van het kasdek (inclusief constructie).

4 Gewasgroei en -ontwikkeling in de Energieproducerende kas

De inhoud van dit hoofdstuk van de tussenrapportage overlapt met een deel van de resultaten die in het eindrapport bij hoofdstuk 7 worden beschreven

5 Ervaringen en leerpunten naar aanleiding 1½ jaar Energieproducerende kas

De Energieproducerende Kas in Huissen is een innovatieproject waarin veel nieuwe technieken door de betrokken installateurs en kasklimaatcomputer leveranciers voor de eerste keer zijn samengebracht. Het project is dan ook niet vrijgebleven van kinderziektes, maar ook de wijze waarop er vanuit tuinbouwtechnologisch en teeltkundig opzicht gebruik gemaakt kan worden van de installatie heeft zich gedurende de looptijd van het project ontwikkeld. In dit hoofdstuk zijn, min of meer chronologisch, ervaringen beschreven die kunnen helpen om problemen in de toekomst voor te zijn of adequater te verhelpen.

Verkeerd om aangesloten warmtewisselaar

Het aquiferwater is door middel van een warmtewisselaar gescheiden van het water dat door de FiWiHEX-en en de rest van het circuit stroomt. De specificaties van de warmtewisselaar geven aan dat er bij een schone installatie een temperatuurverlies van ongeveer 1 °C verwacht mag worden.

Toen de installatie in bedrijf werd genomen en de eerste meetdata beschikbaar kwamen bleek er een veel groter temperatuurverlies op te treden (5 tot 6 °C).

Omdat er in deze beginfase nog op veel punten onduidelijkheden lagen, werd de oorzaak in allerlei zaken gezocht, zoals fout aangesloten sensoren, onregelmatige regeling en verkeerd aangestuurde kleppen. Uiteindelijk bleek de abusievelijk verwisseling van twee aansluitflenzen op de warmtewisselaar de oorzaak waardoor deze als meestroom-warmtewisselaar was aangesloten in plaats van als tegenstroom warmtewisselaar.

Nadat de aansluiting van de warmtewisselaar was gecorrigeerd (wat overigens nog heel wat voeten in de aarde had wegens de compacte bouw van de installatie) presteerde de warmtewisselaar volgens verwachting.

Opwarming van het water tijdens het koelen

De oorspronkelijke gedachte van de Kas Als Energiebron was dat het gebruik van de FiWiHEX warmtewisselaar het retour water uit de kas, de luchttemperatuur tot op 1 °C zou kunnen naderen. Hoewel een groot aantal metingen aan FiWiHEX-warmtewisselaars laten zien dat dit weliswaar kan, maar alleen bij hoge lucht debieten en bij een lage koellast is deze maximale opwarming van het koelwater een eigen leven gaan leiden zonder verder rekening te houden met de daarbij geldende randvoorwaarden. In de besturingssoftware voor de Energieproducerende kas was dan ook de regeling zodanig gemaakt dat geregeld werd naar een uitgaande watertemperatuur die 1 °C onder de luchttemperatuur lag.

Het gevolg van deze regeling was dat de ventilatoren tijdens het koelen bijna altijd volop stonden te draaien met het bijbehorende stroomverbruik van 60 kW. Desondanks dit bleef de watertemperatuur nog altijd ongeveer 3 °C van de kasluchttemperatuur liggen. Gezien het hoge elektriciteitsverbruik is toen intuïtief besloten dat de ventilatoren zachter moesten draaien en dat een veel geringere opwarming van het water moest worden geaccepteerd.

Inmiddels is de kennis over het gedrag van de kas en de FiWiHEX-en zodanig toegenomen dat er kwantitatieve optimalisering software is worden ontwikkeld die aangeeft dat dit inderdaad een verstandige beslissing is geweest.

In 2007 was het temperatuurverschil tussen kaslucht en uitgaande FiWiHEX watertemperatuur gemiddeld 6.5 °C.

Ook het ontwerp pakket Synergie-Kompas, een tool waarmee tuinders kunnen rekenen aan alle varianten m.b.t. (semi) gesloten kassen, gaat nu expliciet in op het effect van de ventilatorregeling op het elektriciteitsverbruik dat met de koeling samenhangt.

Schoon werken

Al in het "Uitvoeringsplan Energieproducerende Kas " (Lek/HABO) is melding gemaakt van de noodzaak om schoon te werken. In dit Uitvoeringsplan lag de nadruk op het voorkomen van verstoppingen in de dunne buisjes van de FiWiHEX warmtewisselaars.

Ondanks het gebruik van afdekkappen en andere voorzorgmaatregelen is er echter op enig moment een brok beton in het Aquifercircuit terecht gekomen die uiteindelijk in de voetklep van de koude bron is terecht gekomen. De consequentie van dit brok beton was echter geen verstopping, maar juist een klep die niet langer goed sloot. Hierdoor werd de druk in aquifercircuit op maaiveld niveau tijdens rust (dus als er niet gekoeld en niet verwarmd wordt) 0. Het regelsysteem was evenwel ingericht op het in stand houden van een minimale druk van 1 bar zodat de aquiferpomp dag en nacht water vanuit de ene naar de andere put pompte. Het heeft een paar dagen geduurd eer deze onverwachte complicatie en bijwerkingen werden ontdekt en het probleem werd gelokaliseerd. Vervolgens leek het probleem door het impuls-gewijs heen en weer pompen van water te zijn verholpen, maar na een aantal dagen bleek het probleem te zijn teruggekeerd.



Uiteindelijk, 3 weken na de analyse van het probleem en 4 weken na het ontstaan van het probleem, is de put waarvan het probleem verwacht werd gelicht en bleek het in de foto getoonde brok beton de oorzaak van het probleem. Een vervelende consequentie van het feit dat de bronpomp bleef lopen, ook als er geen warmte uit de kas werd geoogst, is dat de temperatuur-opbouw in de warme bron voor een groot deel weer teniet is gedaan door de onbedoelde bijmenging met koud water gedurende de nacht.

Het water dat hierdoor in de eerste koude periode van de Energieproducerende kas (de periode oktober 2006 t/m maart 2007) vanuit de warme bron kon worden opgepompt was niet veel warmer dan 14 °C.

Vervuiling van filters

Na een periode goed te hebben gewerkt begon de verwarmingscapaciteit van de verwarmingsinstallatie in oktober 2006 plotseling sterk terug te lopen. Toen er simultaan een paar koude nachten optraden zakte de kaslucht zelfs tot onder de 15 °C, waarop de kasklimaatcomputer allerlei alarmen ging afgeven.

Na een uitgebreide inspectie van alle relevante punten bleek er een veel te kleine flow door het FiWiHEX circuit te stromen, wat een gevolg was van verstopte filters.

Bij het reinigen van de filters bleek de verstopping niet het gevolg van zand of ander grof materiaal maar een vettige substantie die, gecollageerd met zeer fijne ijzerhydroxidedeeltjes de fijne filters die in het circuit zijn opgenomen vrijwel volledig afsloten.



Het vet is hoogstwaarschijnlijk soldeervet dat indertijd tijdens de assemblage van de FiWiHEX-en in Polen gebruikt is. Deze verdenking komt voort uit de constatering dat wanneer nieuwe warmtewisselaars de eerste keer met water doorstroomd werden de eerste liters water melkachtig wit waren. Pas na een liter of 20 kwam er dan helder water uit de warmtewisselaars.

Nadat de filters gereinigd waren en het systeem was gevuld en ontluicht werkte alles weer naar behoren en naar wens.

Sinds bovenbeschreven ervaring wordt het filter regelmatig gecontroleerd, maar is de extreme verstopping zoals in oktober 2006 niet meer geconstateerd. Ook is er niet langer sprake van een vettige substantie.

Twee kasklimaatbesturingssystemen

Nadat in de beginperiode het regelsysteem voor de Energieproducerende kas geheel autonoom draaide is vanaf oktober 2006 een koppeling aangebracht tussen de Hoogendoorn kasklimaatcomputer en de computer voor de Energieproducerende kas (het TCS systeem). Dit werkte niet direct vlekkeloos. Ook hier heeft het een hele tijd geduurd eer alle mogelijke oorzaken waren afgevinkt en het uiteindelijk probleem werd gevonden. Het probleem bleek te liggen in het feit dat de Hoogendoorn computer twee signalen stuurde, namelijk een gevraagd vermogen en een setpoint temperatuur. De TCS gebruikte het temperatuursignaal in plaats van het vermogenssignaal waardoor beide systemen niet goed op elkaar reageerden. Het probleem is uiteindelijk opgelost door de temperatuurregeling uit de TCS te halen en deze geheel op het Hoogendoorn vermogenssignaal te laten werken.

Hydraulische kortsluiting

In november van 2006 was het gemeten warmte- en elektriciteitsverbruik van de Energieproducerende kas zeer hoog. Op koude dagen leek er zelfs sprake van onvoldoende verwarmingscapaciteit. Omdat het onwaarschijnlijk was dat het kasdek zo'n groot warmteverlies had ging de verdenking in de richting van lek. Immers in die tijd was de CO₂-concentratie ook niet veel hoger dan de buitenconcentratie.

Half december is er daarom zorgvuldige in-situ observaties gedaan waarbij de CO₂-dosering als tracer-gas werd gebruikt. Dit leidde tot de conclusie dat er met de lek van de kas niets aan de hand was.

Uiteindelijk werd in januari door nauwgezet analysewerk van Lek/HABO ontdekt dat het hoge warmteverbruik voor een groot deel schijn was en werd veroorzaakt door hydraulische interactie tussen koud- en een warmwaterstroom. Deze mogelijke interactie valt in het principeschema op papier niet op, maar in de praktijk wel omdat de twee circuits fysiek maar 20 cm uit elkaar lagen zonder dat er een klep tussen zat. Op papier lijkt deze klep niet nodig omdat er geen netto water van het ene naar het andere circuit kan stromen, maar in de praktijk was er blijkbaar wel een grote warmte-overdracht (door turbulente wervelingen). Door deze warmte-overdracht ging een groot deel van de door de warmtepomp geproduceerde warmte direct weer naar zijn eigen verdamper. De grote warmteproductie ging dus lang niet volledig naar de kas, maar werd voor een belangrijk deel in het warmtepomp circuit rond gepompt. Dit verklaarde het schijnbaar hoge verbruik, gecombineerd met het reële hoge elektriciteitsverbruik. Het probleem is opgelost door een extra klep te monteren, waarna het warmteverbruik van de kas zich volgens verwachting ging gedragen en de warmtepomp aanzienlijk minder elektriciteit ging gebruiken.

Verstopping en verkeerd aangesloten blokken

Nadat in januari 2007 alle grote problemen waren verholpen kwam er ruimte voor aandacht aan details. Zo zijn er in april en juni 2007 herhalingsmetingen uitgevoerd met betrekking tot de eventuele terugloop in de warmteoverdracht capaciteit van de warmtewisselaars (zie ook volgende kopje).

Hieruit kwam naar voren dat de warmtewisselaars gemiddeld 10% zijn teruggelopen ten opzichte van hun overdrachtskarakteristiek een jaar tevoren, maar dat er één blok was die grotendeels verstopt bleek.

Naar aanleiding van dit voorval is een eenvoudige meetmethode ontwikkeld die het mogelijk maakt om snel en gemakkelijk verdachte warmtewisselaars te kunnen identificeren. Deze methode maakt gebruik van een hand-held infrarood-thermometer waarmee de 'ventilatorblad-en-rooster-temperatuur' kan worden gemeten. Door met deze temperatuurmeter de temperatuur van de ijzeren onderdelen over de breedte van de uitblaasopening te meten kan de gemiddelde temperatuur en de gradiënt over de uitgeblazen luchttemperatuur worden bepaald. Wanneer de ingaande water- en luchttemperatuur en het luchtdebiet zoveel mogelijk constant worden gehouden duidt een gemiddeld klein verschil tussen ingaande en uitgaande luchttemperatuur op een slecht doorlatend blok. Ook de gradiënt over de breedte van de uitblaasopening geeft interessante informatie. Is deze gradiënt groot (meer dan 1 graad verschil tussen warmste en koudste punt) dan duidt dit op een gedeeltelijk verstopte warmtewisselaar. Het bleek dat ongeveer 5% van de warmtewisselaarblokken een (deels) verminderde doorlaat heeft. Het gericht doorspuiten van deze blokken met water met hogere druk en in omgekeerde richting zal de performance van deze blokken in veel gevallen kunnen verbeteren, maar het mag duidelijk zijn dat dit de performance van de totale installatie nauwelijks beïnvloed.

Bij het uitvoeren van de bovenbeschreven metingen bleek overigens dat ongeveer 3 procent van de FiWiHEX-blokken (er zitten twee van deze blokken per warmtewisselaar) niet goed was aangesloten (dus niet in tegenstroom maar in meestroom-richting).

Terugloop warmteoverdracht FiWiHEX

Alle warmtewisselaars hebben last van vervuiling maar de ernst hiervan en de invloed op de warmteoverdracht hangt helemaal af van de snelheid waarmee dit gebeurt.

De FiWiHEX warmtewisselaars kunnen aan de binnenkant (in de buisjes) vervuilen, wat gemeten zou kunnen worden aan de hand van de hydraulische weerstand, en aan het luchtzijdige oppervlak. Vervuiling aan de luchtzijdige kan het beste bestudeerd worden door te kijken of de warmteoverdracht karakteristiek in de tijd verloopt.

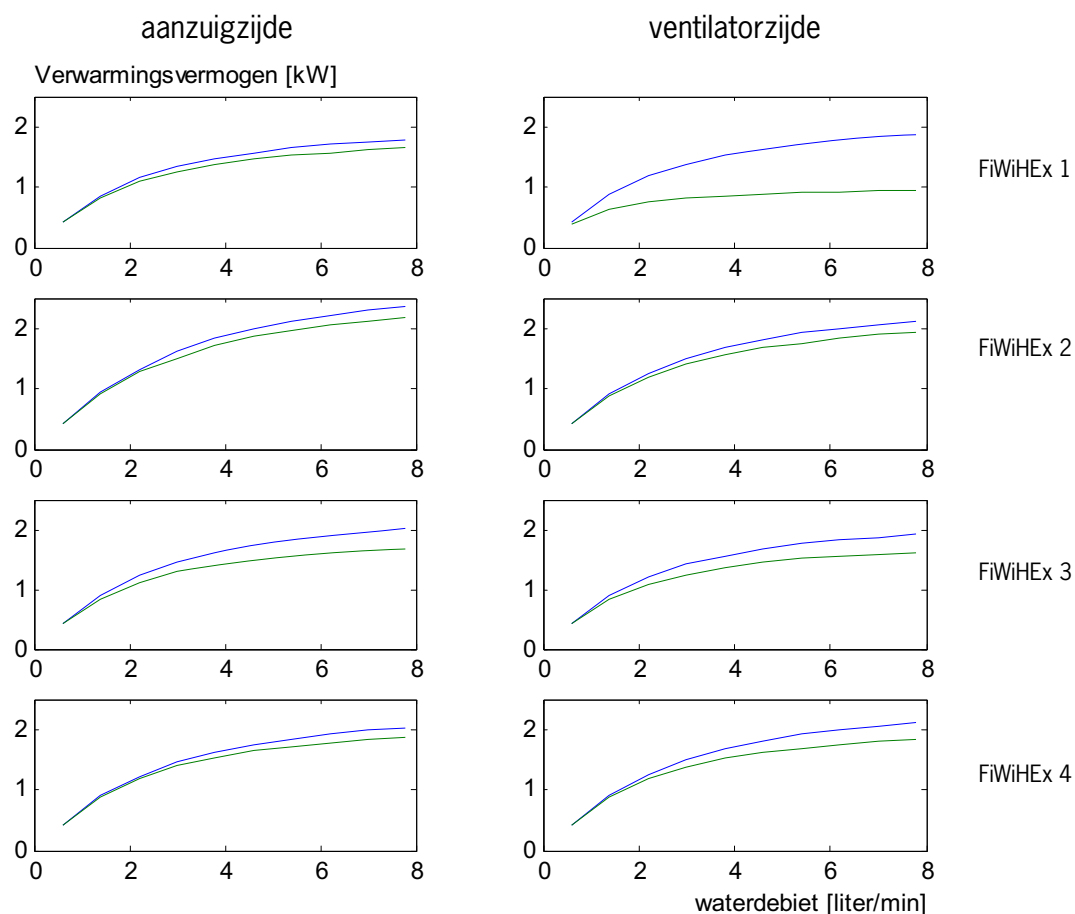
Om deze overdracht karakteristiek in de tijd te kunnen volgen zijn 4 warmtewisselaars (met elk 2 blokken) geselecteerd welke met een mobile meetopstelling zijn doorgemeten. Er wordt gebruik gemaakt van de gemeten warmte-overdracht bij verwarmen. Bij deze meting wordt water over het FiWiHEX-blok gecirculeerd waarbij er een constant

elektrisch verwarmingsvermogen aan dat water wordt toegevoerd. De ventilator zuigt gedurende de meting een bepaalde constante luchthoeveelheid door het blok. Na verloop van tijd (ongeveer een kwartier) ontstaat er een evenwichtssituatie waarin de gemiddelde watertemperatuur een paar graden boven de ingaande luchttemperatuur stabiliseert. Hoe beter de warmteoverdracht in de warmtewisselaar, hoe dichter deze evenwichtstemperatuur bij de ingaande luchttemperatuur komt te liggen.

Per FiWiHEX blok zijn op deze manier in augustus en september 2006 een aantal meetpunten verzameld en in de zomer van 2007 is dit opnieuw gedaan.

Aan de hand van de 16 setjes meetpunten (4x2 in 2006 en 4x2 in 2007) zijn 16 karakteristieken bepaald voor de warmteafgifte van de FiWiHEX warmtewisselaar blokken als functie van het waterdebiet, het luchtdebiet en de aanvoerwatertemperatuur.

In onderstaande figuur worden de resultaten van deze karakteristieken getoond waarbij omwille van de overzichtelijkheid alleen het waterdebiet is gevarieerd.



Figuur 5.1 Verband tussen waterdebiet en afgegeven vermogen bij een ingaande luchttemperatuur van 20 °C, een warmwatertemperatuur van 30 °C en een luchtdebiet van 1800 m³/uur (0.5 liter per seconde) voor de 8 doorgemeten blokken in 2006 (blauw) en 2007 (groen).

De grafieken laten zien dat één blok zeer sterk is teruggelopen (het blok dat het dichtst bij de ventilator zit van FiWiHEX 1). Van alle andere blokken is de warmteoverdracht gemiddeld genomen ongeveer 10% teruggelopen, maar het is goed zichtbaar dat zo'n terugloop pas goed te merken is bij wat hogere vermogens.

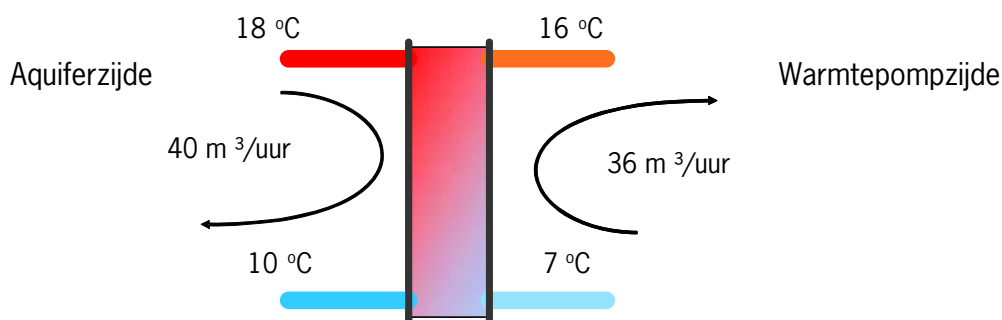
Behalve de thermische overdracht kan de meetopstelling ook worden gebruikt om het waterzijdig drukverlies over de blokken te meten. Het blijkt dat, met uitzondering van dat ene blok dat al genoemd is, het drukverlies niet is opgelopen en in sommige situaties zelfs gedaald is.

Hieruit is geconcludeerd dat de teruglopende warmteoverdracht te geweten moet worden aan uitwendige vervuiling door stof etc.

In de projectgroepvergadering is afgesproken dat deze hypothese getoetst zal worden door één van de blokken met perslucht of een hoge druk reiniger schoon te spuiten en de warmte-overdracht voor en na te vergelijken.

Terugloop warmteoverdracht scheidingswisselaar

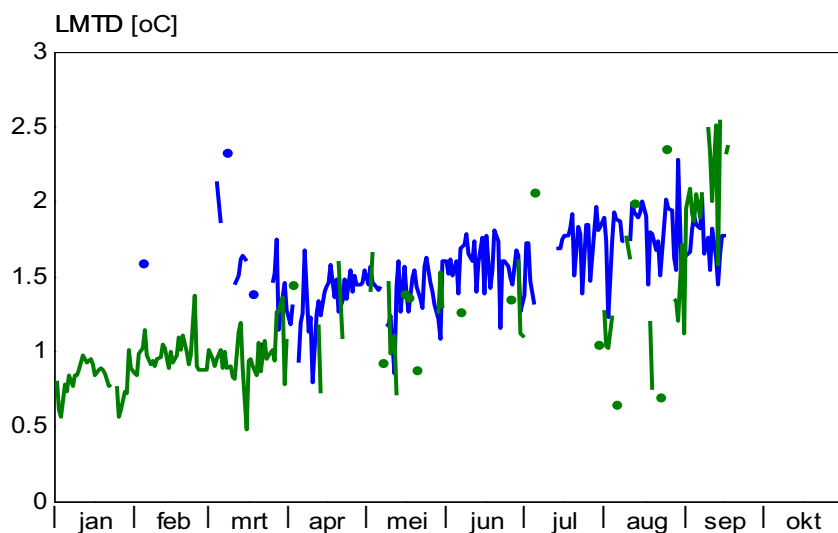
De scheidingswisselaar is voorzien van temperatuur sensoren op alle vier de aansluitleidingen zodat het temperatuurverlies over dit apparaat continu gemeten kan worden. Het temperatuurverlies wordt uitgedrukt als Logarithmic Mean Temperature Difference (LMTD). De betekenis wordt getoond in de onderstaande tekening.



In dit voorbeeld volgt de LMTD uit

$$\text{LMTD} = ((18-16) - (10-7)) / \log((18-16) / (10-7)) = 2.47 \text{ K}$$

Wanneer de ontwikkeling van de LNMTD in de tijd wordt geplott ontstaat de volgende grafiek voor 2007 tot nu toe.



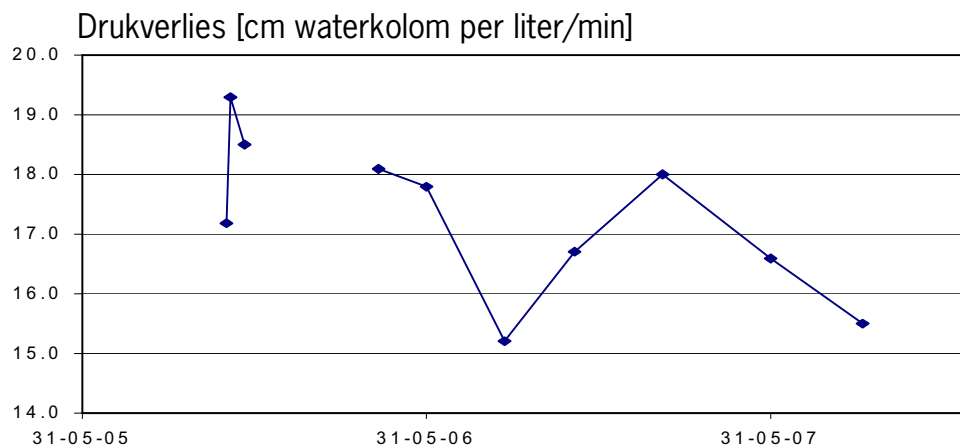
Figuur 5.2. Ontwikkeling van het logaritmisches gemiddeld temperatuurverlies over de scheidingswisselaar van de Energieproducerende kas in 2007. De groene lijn is de LMTD tijdens ontladen, de blauwe lijn geldt voor de laadperiode.

De grafiek toont een duidelijke opgaande trend zodat overwogen zou moeten worden om de scheidingswisselaar een keer uit elkaar te halen om hem schoon te maken.

Ervaringen met de duurproef aan de FiWiHEX warmtewisselaar die op direct aquiferwater is aangesloten

In de kelder van het Technotron gebouw van WUR Agrotechnology & Food Innovations staat een FiWiHEX warmtewisselaar uit de allereerste serie (zomer 2005) die nu al bijna 2 jaar in een aan/uit schema wordt doorstroomd met water dat direct uit een aquifer wordt gepompt.

Van tijd tot tijd wordt hier het drukverschil bij het toegepaste waterdebiet (3 liter per minuut) opgenomen. Tot nu toe blijkt dat het drukverlies niet oploopt, maar eerder langzaam afneemt.



Figuur 5.3. Ontwikkeling van het drukverlies over een FiWiHEX die met direct aquiferwater wordt doorstroomd.

De directe doorstroming van een FiWiHEX met aquiferwater leidt dus niet tot verstopping, althans niet met de waterkwaliteit die onderaan het Veluwemassief wordt aangetroffen.

Dit is gunstig omdat dit zou kunnen betekenen dat systemen zonder scheidingswisselaar in principe voor wat betreft de FiWiHEX ook mogelijk zouden zijn. Er is echter nog geen informatie over de eventuele inwendige aantasting van het materiaal als gevolg van de doorstroming.

IJkfactoren van de stralingsmeter

Bij vergelijking van de metingen van de stralingsmeter die door de Hoogendoorn computer wordt gebruikt met stralingsgegevens van het meteostation van Wageningen UR (een speciaal AgroMeteo-Station) blijken de metingen van Hydro Huisman een stelselmatig 20% hogere waarde aan te geven.

Dit probleem is opgelost door op alle punten waar van deze stralingsgegevens gebruik wordt gemaakt een correctie uit te voeren.

6 Beantwoording hoofdonderzoeksvragen

In de projectbeschrijving van het WUR onderzoeksproject beschreven in “Projectvoorstel Kas Als Energiebron” worden een aantal vragen benoemd die in een meetperiode van bijna 2 jaar antwoord moeten krijgen. Vrij vertaald zijn deze vragen:

1. Realiseert de energieproducerende kas inderdaad een warmte-overschot?
2. Is het primair energieverbruik van de kas kleiner dan 11 m³ a.e.?
3. Is er een productieverhoging?
4. Is het klimaat goed regelbaar?
5. Is de energieproducerende kas financieel haalbaar?

In dit hoofdstuk worden al deze hoofdvragen langsgelopen.

Ad 1.

In hoofdstuk 2 van dit rapport wordt ingegaan op de resultaten die aan de metingen in de Energieproducerende kas over 2007 ontleend zijn. Hier wordt geconcludeerd dat over 2007 verwacht mag worden dat de kas met een positieve energiebalans van 2 m³ a.e. per m² jaar nét energieproducerend zal zijn. Dit getal is duidelijk lager dan de 5.1 m³ a.e. per jaar die als positieve energiebalans uit de berekeningen in het rapport “Bouw en inrichting Energieproducerende Kas” van Lek/HABO volgt, maar er zijn dan ook vele punten in de actuele situatie anders dan oorspronkelijk gedacht. Veranderingen die positief uitwerken, maar ook veranderingen die negatief uitwerken. Een aantal veranderingen (de scheidingswisselaar, het gebruik van de warmtepomp, de gewijzigde uitvoering van de FiWiHEX) blijken slechts een kleine invloed op de netto energieproductie te hebben.

Het afzien van het gebruik van de koeltoeren, met een potentiële groei van het netto overschot tot 30 m³ a.e. per m² per jaar (mogelijk gemaakt door de introductie van de warmtepomp) gaf het potentieel een enorme opwaartse beweging. De aanzienlijk lagere doorlatendheid van het kasdek (een verslechtering van de netto productie van 11 m³), de hogere stooktemperatuur (goed voor een vermindering van 7 m³) en het intensieve gebruik van schaduw-schermen (een vermindering van het potentieel van 13 m³) deden dit potentieel weer teniet.

De energiebalans is in de huidige situatie, net als in het “Bouw en inrichtingsplan” alleen positief als er van het gebruik van WKK wordt uitgegaan. Het effect van het gebruik van WKK wordt in hoofdstuk 2 nader uitgelegd aan de hand van de bespreking van het feit dat er, anders dan in het “Bouw en inrichtingsplan” geen Micro Gasturbine wordt gebruikt.

Ad 2.

Het hoogwaardige energieverbruik van de energieproducerende kas ligt op 72 kWh/m² per jaar.

1 kWh is 3.6 MJ en de verbrandingswaarde van aardgas 31.65 MJ/m³ zodat er zou kunnen worden gesteld dat er 8.1 m³ aardgas equivalenten aan hoogwaardige energie worden toegevoerd.

In dat geval gaat men echter voorbij aan het feit dat elektriciteit in Nederland met een gemiddeld opwekkingsrendement van 43% wordt opgewekt, zodat er voor de noodzakelijke 72 kWh in de centrale feitelijk 19 m³ aardgas is verbruikt.

De kas voldoet daarmee dus niet aan de doelstelling dat er minder dan 11 m³ a.e. aan primaire energie benodigd is. De oorzaak hiervan is de warmtepomp, die ongeveer de helft van het verbruik opsoupeert, maar onontbeerlijk is voor het realiseren van het gewenste klimaat.

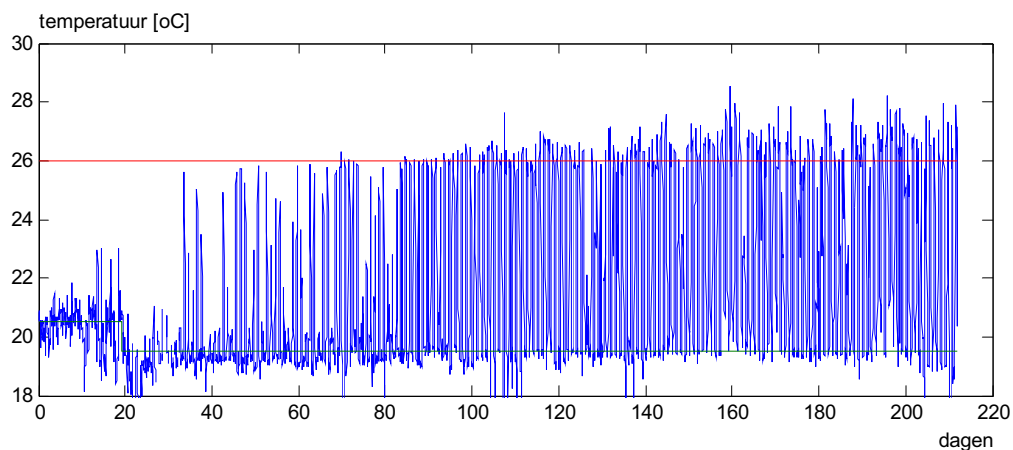
Dit absolute verbruik aan primaire energie kan alleen omlaag als de kas beter geïsoleerd wordt en/of als er lagere teelttemperaturen zouden worden gebruikt.

Ad 3.

Hoofdstuk 4 laat zien dat er in de zomermaanden een duidelijke teeltversnelling zou kunnen worden gerealiseerd. Op dit moment is er echter de stellige overtuiging dat op dit punt nog lang niet het maximale is bereikt en wordt in nauw overleg met de tuinder gezocht naar mogelijkheden om volgend jaar op dit punt nog wat meer te bereiken. De kwaliteit van het gewas is voor bijna alle gewassen goed, maar niet significant beter.

Ad 4.

Bij aanvang van het experiment waren er regelmatig zorgen over de regelbaarheid van het klimaat, vooral met betrekking tot de vraag of het in de kas niet te warm of te koud zou worden. Onderstaande figuur met alle temperatuurmetingen van de afgelopen periode laat zien dat deze zorgen niet terecht zijn gebleken.



De temperatuur is de hele zomer slechts incidenteel een keer boven de 28 °C geweest en, behoudens de storingen eind januari, slechts sporadisch een keer onder de 19 °C.

De luchtvochtigheid en CO₂-concentratie zijn eveneens goed regelbaar. Het systeem is dus uitstekend in staat gebleken de gewenste condities te handhaven.

Ad 5.

Berekeningen aan de financiële haalbaarheid van het concept zullen pas aan het eind van het project worden uitgevoerd.

7 Conclusies

- Het uiteindelijke systeem wijkt op een groot aantal punten af van het oorspronkelijke ontwerp maar desondanks mag over 2007 verwacht worden dat de kas met een positieve energiebalans van 2 m³ a.e. per m² jaar nèt energieproducerend zal zijn.
- Het Zigzag-kasdek heeft een lagere lichtdoorlatendheid dan een glazen kas, vooral door de forse extra kasconstructie die nodig is doordat de platen korter zijn dan oorspronkelijk beoogd. Er is nog een duidelijke doorontwikkeling nodig (bijvoorbeeld langere platen en uitgekiende roeden, nok en goot-profielen) om de lichttransmissie van het dek verder te verbeteren, voordat brede toepassing in de tuinbouw interessant wordt.
- De energiebalans is in de huidige situatie, net als in het “Bouw en inrichtingsplan” alleen positief als er van het gebruik van WKK wordt uitgegaan.
- Het hoogwaardige energieverbruik van de energieproducerende kas ligt op 72 kWh/m² per jaar, bij opwekking in een centrale wordt daarvoor 19 m³ aardgas verbruikt. Dit komt neer op een besparing van globaal 50% ten opzichte van het gemiddelde verbruik van 40 m³/m² in Nederland. Deze besparing komt evenwel voor een belangrijk deel voort uit de hoge isolatiewaarde van de kas en minder uit het Energieproducerende kas principe. De overige kasafdelingen van Hydro Huisman, met een vergelijkbaar stookregime, gebruiken immers ongeveer 22 m³/m² per jaar.
- Als er rekening wordt gehouden met het verschil tussen de waarde van een warmteoverschot en de kostprijs van elektriciteit, blijkt het economisch aantrekkelijker om bij gelijktijdige verwarmings- en ontvochtigingsbehoefte te stoken met de ramen op een kiertje dan te ontvochtigen met behulp van mechanische ontvochtiging. De beslissing van HSH om niet langer dubbel uitgevoerde blokken te maken is dan ook zeker te billijken.
- De regelbaarheid van het klimaat in het systeem is goed. Temperatuur, luchtvochtigheid en CO₂-concentratie zijn goed regelbaar en het systeem is dus uitstekend in staat gebleken de gewenste condities te handhaven.
- De warmteoverdracht van de warmtewisselaars is gemiddeld genomen ongeveer 10% teruggelopen, maar de consequenties hiervan zijn pas goed te merken is bij wat hogere vermogens.
- De directe doorstroming van een FiWiHex met aquiferwater (met waterkwaliteit zoals die onderaan het Veluwe-massief wordt aangetroffen) heeft tot nu toe niet tot verstopping geleid.
- De gewasgroei laat in het voorjaar en de zomer bij een aantal gewassen een duidelijke teeltversnelling zien. Dit biedt perspectief voor een verkorting van de teeltcyclus van de gebruikte potplanten en daarmee van de totaal jaarrond productie.
- Ondanks de duidelijk gemeten positieve effecten op gewasomvang is de beoordeling van de gewascommissie gemiddeld genomen neutraal en laten de meeste gewassen geen betere kwaliteit zien.
- Doordat de gebruikte tropische potplanten relatief hoge temperaturen en lage lichtintensiteiten vragen kan, met de nu opgedane kennis, worden gesteld dat met deze teelt niet de maximale potentie van een Energieproducerende Kas (een hoge netto energieproductie), bereikt kan worden. Gewassen met een hogere lichtbehoefte en een lagere minimumtemperatuur (bv vruchtgroenten) zijn voor het bereiken van deze doelstelling meer geschikt.

Bijstellingen in het onderzoek

- De belangrijkste bijstelling die voor het onderzoek wordt voorgesteld is om niet langer in de winterperiode de teeltkundige gewaswaarnemingen te doen. Het klimaat is in de Energieproducerende kas dan immers vrijwel identiek aan het klimaat in de referentiekas.
- Een tweede wijziging in de aanpak van het gewaskundige onderzoek is dat in de proefopzet zal worden toegestaan dat de eindmeting in de Energieproducerende kas eerder plaatsvindt dan in de referentiekas. Alleen zo kan immers de mogelijke teeltversnelling in beeld worden gebracht.

Bijlage I.

Kwantitatieve vergelijking van de ronde FWX met de lineaire

In de oorspronkelijke opstelling zouden er 15 ronde FiWiHEX warmtewisselaar per repeterende eenheid van 57.6 m². Elke ronde FiWiHEX zou zijn opgebouwd uit 60 matjes van 0,15 x 0,13 cm. Dit betekent dat het matjes oppervlak 1.188 m² per ronde FiWiHEX zou zijn geweest.

9 Van zulke FiWiHEX-en zouden al naar gelang de behoefte met warm of met koud water kunnen worden gevoed (bij respectievelijk verwarmen of koelen) en 6 zouden uitsluitend voor het koelen kunnen worden gebruikt. Het totale warmtewisselend oppervlak dat bij het verwarmen zou kunnen worden ingezet was in de oorspronkelijke opzet 0.1856 m² per m² kasoppervlak.

Bij het koelen zou 0.3094 m² koelend oppervlak per m² gebruikt zijn.

In de nieuwe situatie worden 3 lineaire FiWiHEX warmtewisselaars per repeterende eenheid van 57.6 m² geplaatst. Deze bestaan ieder uit 2 FiWiHEX-blokken, die opgebouwd zijn uit 113 matjes van 0,15 x 0,15 cm. Het totale matjesoppervlak in zo'n lineaire FWX is dus $0.15 \times 0.15 \times 113 \times 2 = 5.085$ m².

Wanneer er moet worden verwarmd én ontvochtigd wordt het bovenste blok voor de verwarming en het onderste blok voor de ontvochtiging gebruikt. Het beschikbare VO voor het verwarmen is dan $5.085 \times 3/2 / 57.6 = 0.1324$ m² per m² kas. Dit zal een veel voorkomende situatie zijn. In een zeer koude periode zal er echter niet gauw behoefte zijn aan simultane ontvochtiging en verwarming en kunnen de beide blokken in serie ten behoeve van de verwarming worden ingezet. Het totale VO is dan 0.2648 m² per m² kas.

Bij het koelen zullen altijd de beide blokken gebruikt kunnen worden en zal een VO van 0.2648 m² beschikbaar zijn.

De conclusies van de geometrische vergelijking van de twee typen warmtewisselaars luidt dus dat er met de Lineaire FWX 10% minder VO geplaatst gaat worden dan dat er oorspronkelijk bij toepassing van de ronde FWX zou worden toegepast.

Bij het simultaan verwarmen en ontvochtigen is het beschikbare VO voor verwarmen met de lineaire FiWiHEX ruim 28% kleiner (maar het VO voor ontvochtigen 28% groter).

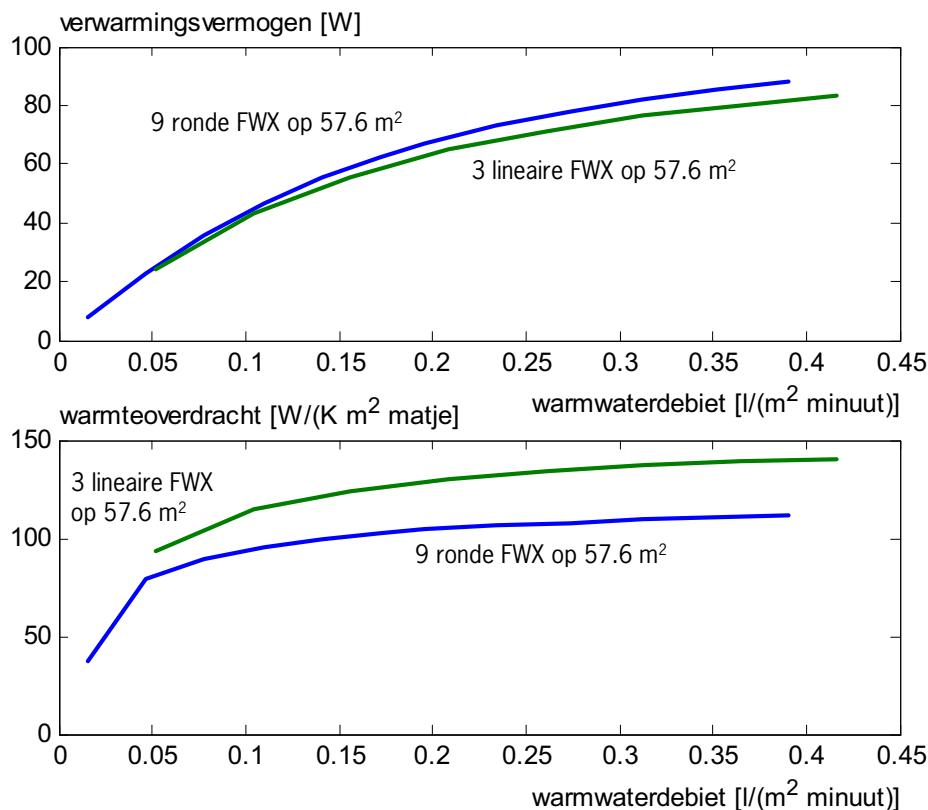
Eén en ander blijkt ook uit onderstaande tabel.

	Oorspronkelijke ronde FWX	Lineaire FWX
Totaal matjesoppervlak	0.3094 m ² per m ² kas	0.2648 m ² per m ² kas
bij uitsluitend verwarmen	0.1856 m ² per m ² kas	0.2648 m ² per m ² kas
verwarmen + ontvochtigen	0.1856 m ² per m ² kas	0.1324 m ² per m ² kas
Koelen / ontvochtigen	0.3094 m ² per m ² kas	0.2648 m ² per m ² kas

Het door de bank genomen kleinere beschikbare VO hoeft geen probleem te zijn in geval de warmte-overdracht van de Lineaire FiWiHEX beter is dan die van de oorspronkelijke ronde warmtewisselaar.

Aangezien van allebei de FiWiHex uitvoeringsvormen een simulatiemodel is ontwikkeld en gevalideerd is kan deze vergelijking gemakkelijk worden gemaakt.

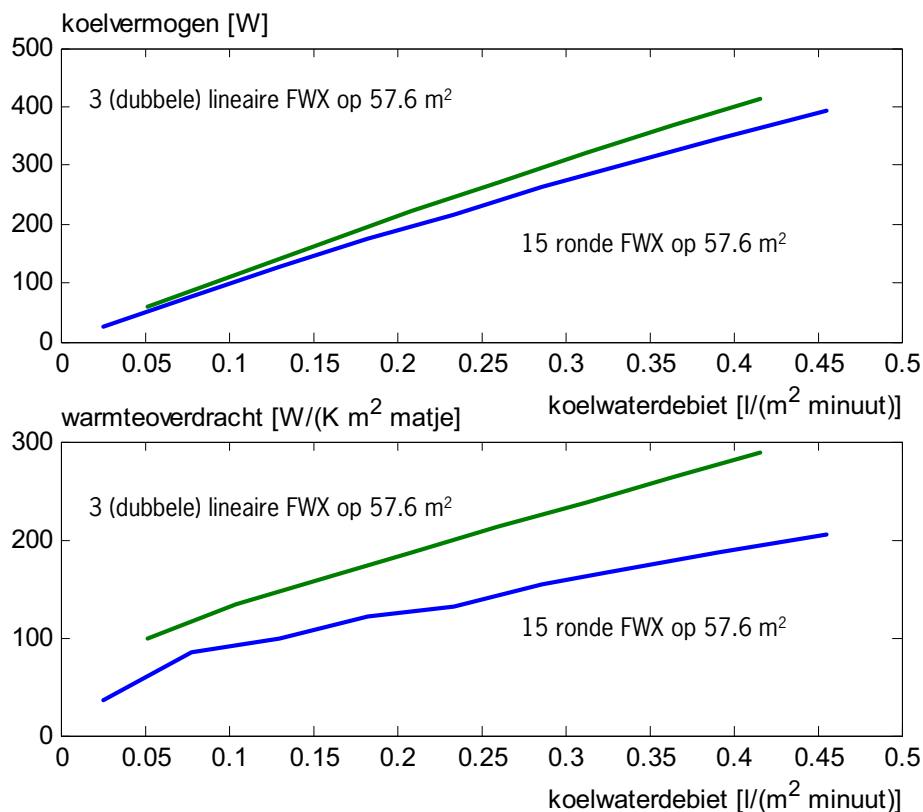
In onderstaande grafiek is het verwarmingsvermogen dat van de oorspronkelijke FiWiHex opstelling en van de opstelling met de Lineaire FiWiHex verwacht mag worden getekend als functie van het waterdebiet bij een kasluchttemperatuur van 18 °C en een aanvoerwatertemperatuur van 25 °C getekend. Het ventilatiedebiet is 0.03 m³/s per m² kas (108 m³/uur per m² kas, een ventilatievoud van 20).



Figuur 1. Vergelijking van de verwarmingskarakteristieken van het oorspronkelijke concept met 9 ronde FiWiHex-en en het uiteindelijke concept met 3 lineaire FiWiHex-en, alles omgerekend naar een m² kas. De ingaande luchttemperatuur is 18 °C, de ingaande watertemperatuur 25 °C en het luchtdebiet is 0.03 m³/(s m²_{kas})

De conclusie uit deze grafiek is dat de warmteoverdracht van de lineaire FiWiHex duidelijk beter is dan die van de ronde, maar dat het 28% geringere VO tot een net iets kleiner verwarmingsvermogen leidt. Uiteraard kan dit in koude perioden gemakkelijk worden gecompenseerd door een hogere aanvoerwatertemperatuur.

In onderstaande grafiek is een soortgelijke vergelijking gemaakt voor de koelsituatie



Figuur 2. Vergelijking van de koelkarakteristieken van het oorspronkelijke concept met 15 ronde FiWiHex-en en het uiteindelijke concept met 3 lineaire FiWiHex-en, alles omgerekend naar een m² kas. De ingaande luchtcondities zijn 28 °C en 90% RV, de ingaande watertemperatuur is 12 °C en het luchtdebiet is 0.03 m³/(s m² kas). Er wordt gesproken over dubbele lineaire FWX-en omdat, anders dan bij het verwarmen, bij het koelen beide blokken in de lineaire FWX in serie kunnen worden gezet.

De conclusie uit deze grafiek is dat de warmteoverdracht van de lineaire FiWiHex tijdens het koelen veel gunstiger is dan die van de ronde. Ondanks het kleinere oppervlak van de matjes is de koelprestatie van de lineaire FiWiHex dan ook beter dan die van de oorspronkelijk bedachte configuratie met ronde FiWiHex-en.

Over de vergelijking van het elektriciteitsverbruik valt niets te zeggen omdat de ronde FiWiHex nooit met de uiteindelijke ventilator uitgerust is geweest en er nog geen elektriciteitsverbruiksmetingen met de nu gebouwd wordende lineaire FiWiHex zijn gedaan. Qua ordegrrootte zal het verbruik niet veel verschillen, maar bij het gelijktijdig verwarmen en ontvochtigen (zo'n 2000 uur per jaar) zal het verbruik van de ventilatoren in de lineaire FWX beduidend lager zijn.

Bijlage II.

Gewaskundige beoordelingscommissie

Ten behoeve van een zo goed mogelijke beoordeling van de handelswaarde van de gewassen die in de Energie-producerende kas kunnen worden voortgebracht is telkens na afloop van een oppotronde een bijeenkomst met een aantal vooraanstaande potplantentuinders georganiseerd.

In deze commissie hadden zitting:

- B. Evers, gewasbeoordelaar VKC, werkzaam in uitgangsmateriaal.
- J. Eeuwens, ingehuurde gewasspecialist, voorheen rozenkweker.
- R. Janssen, teler van Begonia en Euphorbia.
- P. Rikken, teler van Hedera.
- G. Tolkamp, teeltverantwoordelijke van Stef Huisman.
- F. van Noort, gewasspecialist Wageningen UR Glastuinbouw

Bijlage III.

Meting van de transmissie van het kasdek

Om de diffuse lichttransmissie van een kas inclusief constructie te kunnen bepalen wordt gebruik gemaakt van een set van twee sensoren die op simultane momenten de lichtintensiteit buiten de kas en de lichtintensiteit in de kas meten. Deze metingen worden uitgevoerd op een bewolkte dag zodat er een mooie diffuse instraling is.

Een meetserie begint steeds met een bepaling van het meetsignaal van de mobiele binnensensor en de vast op te stellen buitensensor wanneer deze naast elkaar worden gehouden.

Omdat beide sensoren in deze opstelling precies hetzelfde licht ontvangen is de transmissie per definitie 1.

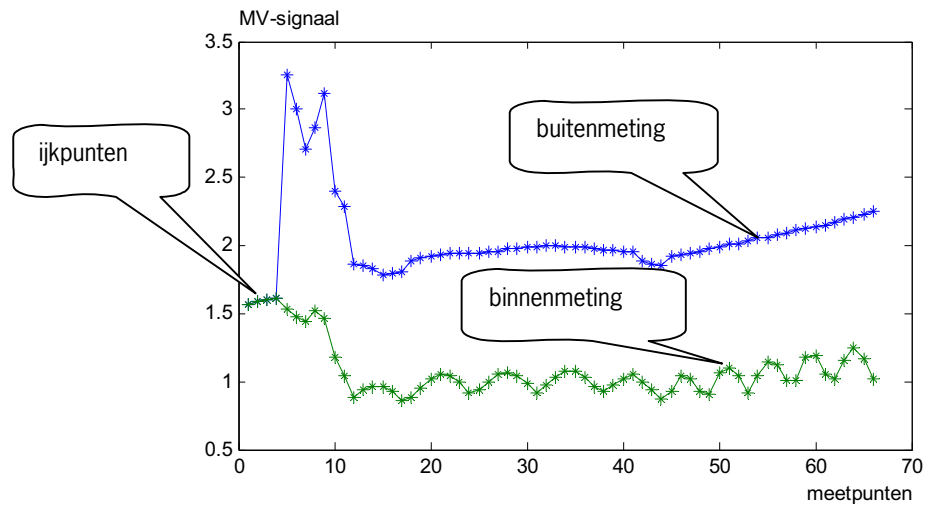
Vervolgens wordt de mobiele sensor mee naar binnen genomen en worden er op een groot aantal plaatsen in de kas metingen uitgevoerd.



Figuur III.1. Ijking van de mobiele binnensensor met de vast op te stellen buitensensor.

De meetwaarden die met de mobiele sensor worden gedaan, plus de bijbehorende tijdstippen worden opgeslagen en door deze te vergelijken met de meetwaarde die de buitensensor op diezelfde tijdstippen gemeten heeft kan de transmissie worden bepaald.

Figuur III.2 toont een typisch resultaat van zo'n meet sessie. Een typisch patroon is de lage doorlatendheid onder de goot en de hogere doorlatendheid onder de nok.



Figuur III.2. Voorbeeld resultaat van een meetsessie voor de bepaling van de diffuse lichttransmissie van een kas.

De deling van goed gekozen punten op de binnenlijn door de punten van de buitenlijn geeft de diffuse transmissie.



Dit onderzoek is mede gefinancierd door het Programma Kas als Energiebron.

Kas als Energiebron is het innovatie- en actieprogramma voor aanzienlijke vermindering van CO₂-emissie en sterk verminderde afhankelijkheid van fossiele energie voor de glastuinbouw in 2020. Kas als Energiebron is een door vele partijen gedragen en ondersteund co-innovatieprogramma.

LTO Glaskracht Nederland, het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van LNV zijn initiatiefnemers, trekkers en financiers van het Programma Kas als Energiebron.

De Energieproducerende Kas is mede mogelijk gemaakt door:

