

Dit rapport is opgesteld in opdracht van InnovatieNetwerk Groene Ruimte en Agrocluster en de Stichting Innovatie Glastuinbouw door:

*Dr.ir. H.F. de Zwart, Agrotechnology and Food Innovations (voorheen IMAG),
Wageningen*

Het rapport vormt een onderdeel van het programma “Glastuinbouw 2020”, speerpunt “Kas als Energiebron”.

Programmteam speerpunt “Kas als Energiebron”

Dr.ir. H.J. van Oosten (InnovatieNetwerk, SIGN)

Dr. H.J. Huizing (InnovatieNetwerk)

Energiezuinig verwarmen, koelen en ontvochtigen van een potplantengewas met Fiwihex warmtewisselaars

InnovatieNetwerk Groene Ruimte en Agrocluster

Postbus 20401

2500 EK Den Haag

tel.: 070 378 56 53

internet: <http://www.agro.nl/innovatienetwerk/>

Stichting Innovatie Glastuinbouw

Postbus 29773

2502 LT Den Haag

tel. : 070 338 27 55

internet : <http://www.lto.nl/>

ISBN: 90 - 5059 – 210 - 4

Overname van tekstdelen is toegestaan, mits met bronvermelding.

Rapportnr. 03.2.060 (serie achtergrondrapporten), Den Haag, december 2003

Voorwoord

Het “Concept voor een energieproducerende kas” (InnovatieNetwerk/SIGN rapportnr. 02.2.015) is zeer verrassend en uitdagend. Door een slimme combinatie van bestaande technologieën, die ten dele niet in de glastuinbouw bekend waren, lijkt het toekomstbeeld “Kas als Energiebron” ook nu al onder bepaalde omstandigheden haalbaar. Dit heeft InnovatieNetwerk en SIGN ertoe gebracht een aantal vervolgstappen te zetten om preciezer het belang van de kern van het concept, de revolutionaire warmtewisselaar van Fiwihex, te kunnen afwegen. In de eerste plaats is aan het IMAG opdracht gegeven een nauwkeurige beoordeling van de eigenschappen van de door Fiwihex geïmplementeerde warmtewisselaar te maken. Het IMAG heeft de warmtewisselaar in een laboratoriumopstelling nauwkeurig onderzocht en heeft de eerder beschreven eigenschappen ervan bevestigd. De resultaten van dit onderzoek zijn gepubliceerd in het rapport “Verwarmings-, koel- en ontvochtigingscapaciteit van Fiwihex warmtewisselaars” (InnovatieNetwerk/SIGN rapportnr. 03.2.017).

De begeleidingscommissie adviseerde op basis van dit onderzoek tot het zetten van een volgende stap, een experiment in een kas met een tuinbouwgewas.

In dit rapport beschrijft het IMAG de resultaten van deze eerste proef met de warmtewisselaar in een proefkas. Tijdens het experiment hebben zich een aantal praktische problemen voorgedaan, die echter alle konden worden opgelost. De verkregen informatie heeft bijgedragen aan het voorontwerp van Lek/Habo voor een energieproducerende kas (InnovatieNetwerk/SIGN rapportnr. 03.2.044). Ten slotte heeft het IMAG nieuwe scenarioberekeningen gemaakt op basis van aanvullende metingen van de verwarmings- en koelprestaties van de warmtewisselaars door Fiwihex.

De begeleidingscommissie was als volgt samengesteld:

Ir. T. van Wunnik (Projectbureau Duurzame energie, Arnhem)

Dr.ir. J. van Liere (Alphapowersystems, voorheen Kema, Arnhem)

J. Fransen (Lek-Habo, Ter Aar)

H. Adiharjo (Lek-Habo, Ter Aar)

S. Huisman (Tuinbouwondernemerr te Huissen)

Dr. H.J. Huizing (InnovatieNetwerk, Den Haag)

Dr.ir. H.J. van Oosten (InnovatieNetwerk en SIGN)

Tevens namen deel aan de discussie:
Dr.ir. F. de Zwart (IMAG, Wageningen)
Dr.ir. J. Bakker (IMAG, Wageningen)
Dr.ir. E. van Andel (Fiwihex, Almelo)
Dr.ir. E.E. van Andel (Fiwihex, Almelo)

*Dr. G. Vos, directeur InnovatieNetwerk
Groene Ruimte en Agrocluster.*

*F.H. Hoogervorst, voorzitter Bestuur
Stichting Innovatie Glastuinbouw.*

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting	1
Inleiding	5
1. Proefopstelling	7
1.1. Inleiding	7
1.2. Kascompartiment	8
1.3. Klimaatregeling	9
2. Meetresultaten	11
2.1. Kasluchttemperaturen, verwarmings- en koelvermogens	11
2.2. Energietotalen en temperatuurniveaus	15
3. Jaarrond gebruiksperspectief	17
3.1. Inleiding	17
3.2. Jaarbelastingduurkromme van koeling en verwarming	18
3.3. Uitgangspunten voor de prestaties van individueel geregelde Fiwihex warmtewisselaars	22
3.4. Effect van aantal warmtewisselaars en koude brontemperatuur	25
4. Conclusies en Aanbevelingen	29
4.1. Conclusies	29
4.2. Aanbevelingen	30
Bijlage: Histogrammen van verwarming en koeling	33

Samenvatting

In het ontwikkelingstraject naar energiezuinige kassen blijkt telkens weer dat kassen op jaarbasis feitelijk meer warmte als overschot moeten afvoeren dan dat ze in de winter nodig hebben om de kas te verwarmen. Om dit warmteoverschot te kunnen benutten en de kas behalve als teeltruimte ook als energiebron te kunnen gebruiken, moet de kas worden uitgerust met warmtewisselaars met een heel hoge warmte-overdrachtscoëfficiënt. Tegelijk moeten deze warmtewisselaars een zeer gering drukverlies hebben omdat anders het elektriciteitsverbruik veel te hard oploopt. Op grond van laboratoriumexperimenten lijken de Fiwihex warmtewisselaars aan deze voorwaarden te kunnen voldoen.

Teneinde de perspectieven op semi-praktijkschaal te beoordelen, ontwerpfouten te voorkomen en kinderziektes op te lossen, is in het voorjaar van 2003 een kleine kasafdeling op het IMAG uitgerust met een zestal Fiwihex warmtewisselaars. In deze afdeling zijn tevens kweektafels en een watergeef-unit aangebracht, zodat er potplanten geteeld konden worden en een praktijkgetrouw experiment kon worden uitgevoerd.

Tegen de achtergrond van de specifieke eigenschappen van het klimatiseringssysteem is een kasklimaatregelaar geïmplementeerd die de ventilatortoerentallen en het waterdebiet door de warmtewisselaars bestuurd heeft. Het leidende beginsel in de regeling was dat de verwarming plaatsvond met water van 27 °C dat zoveel mogelijk moest worden uitgeoeld en dat bij koeling van de kas water van 27 °C moest worden gemaakt. Op deze manier zou de kas in zijn eigen warmtebehoefte kunnen voorzien (warmteverliezen buiten beschouwing gelaten). Teneinde water van 27 °C uit de kas te kunnen verzamelen, moet de koeling pas in werking treden bij temperaturen boven de 27 °C. De verwarming kwam in werking bij temperaturen onder de 17 °C. In vergelijking met de gangbare praktijk betekent dit dat een aanzienlijk grotere marge tussen verwarmen en ventileren is aangehouden.

In de meetperiode, die 3 maanden heeft geduurd, heeft de kas net zoveel warmte geproduceerd als er voor de verwarming is gebruikt. De uitkoeling (tijdens het verwarmen), maar vooral de opwarming tijdens het koelen bleef echter sterk achter bij de verwachting die aan een eerder laboratoriumexperiment ontleend was. Hiervoor zijn een aantal plausibele verklaringen opgesteld. De eerste is dat de waterverdeling over de 6 warmtewisselaars verre van ideaal is geweest. Sommige kregen te veel water en andere te weinig. Deze constatering kon worden gedaan met de door Fiwihex ontwikkelde monitoring & control-apparatuur die aan het eind van het project beschikbaar kwam.

De koelcapaciteit bleef nog sterker dan de verwarmingscapaciteit achter ten opzichte van de verwachting omdat, naast de slechte verdeling van het water, ook de gewasverdamping lager was dan waar vooraf van werd uitgegaan. De lage verdamping

kwam enerzijds door de gebruikte gewassen (voornamelijk ficus) en anderzijds door de beperkte kasvulling.

Mogelijk zijn ook een aantal buisjes in de warmtewisselaars verstopt geraakt omdat het ijzerhoudende grondwater dat in de experimentele opstelling als koelwater werd gebruikt door contact met buitenlucht is gaan uitvlokken.

Ten slotte was het aantal warmtewisselaars (één op 4,5 m²) aan de lage kant, waardoor de warmtewisselaars vaak op de, minder gunstige, maximale capaciteit moesten werken.

Het praktijkexperiment heeft veel informatie gegeven over de problemen die bij de toepassing van de beoogde warmtewisselaars naar voren kunnen komen. Voor al de onderkende problemen zijn inmiddels oplossingen aangedragen of reeds voorhanden. Zo is er:

- monitoring & control-apparatuur ontwikkeld waarmee een gebruiker gealarmeerd kan worden indien sommige warmtewisselaars te veel of te weinig water krijgen;
- aangeraden om gebruik te maken van een schaduw scherm om de piek in de warmtebelasting af te vlakken;
- aangegeven dat bevochtigingsapparatuur gebruikt kan worden om een beperkte verdampingscapaciteit van het gewas aan te vullen.

Mede op grond van de ervaring die in het experiment is opgedaan, is een concept gegroeid waarin de praktische problemen zijn opgelost. Dit concept is door Lek-Habo beschreven in het document "Energieproducerende kas; voorontwerp voor een pilot". In deze installatie hebben de warmtewisselaars tijdens het verwarmen een effectieve warmteoverdracht van 100 W/K en tijdens het koelen 200 W/K¹.

De hoge warmteoverdracht tijdens het koelen wordt mogelijk gemaakt door de toepassing van vochtverstuivers die de kasluchtvochtigheid op 85 % houden. Extreem hoge koelbelastingen (>400 W/m²) worden voorkomen door een schaduw scherm. Dit scherm zal daarmee zo'n 400 uur per jaar dichtgetrokken worden.

Tevens is het concept voorzien van een warmtekrachtinstallatie (microturbine) voor de productie van CO₂ en elektriciteit voor de aandrijving van ventilatoren en pompen.

Met dit, ten opzichte van het kasexperiment verbeterd concept, zijn een aantal scenario's doorgerekend waarmee een indruk kan worden gekregen van het effect van de twee belangrijkste installatie-eigenschappen, namelijk:

- het aantal warmtewisselaars per m² kas;
- de keus van de temperatuur van de koude bron.

Deze berekeningen laten zien dat bij gebruik van een installatie waarin de eerder genoemde problemen zijn verholpen, het primaire energieverbruik van de kas varieert

tussen 2,5 en 7 m³ aardgas per m² kas per jaar (afhankelijk van de FiwiHex-dichtheid en de koude bron temperatuur). Dit gas wordt gebruikt in een gasturbine die de ventilatoren en pompen aandrijft. Het gasverbruik neemt af naarmate de FiwiHex-dichtheid toeneemt en naarmate er minder belang wordt toegekend aan de levering van warm water aan derden.

Het maximale warmwateroverschot (27 °C) bedraagt bijna 20 m³ water per m² kas per jaar. In dit geval bedraagt het primair energieverbruik van de kas 6,5 tot 7 m³ aardgas (afhankelijk van de FiwiHex-dichtheid). Indien dit warmwateroverschot door derden zou worden uitgeoeld naar 20 °C vertegenwoordigt dit een hoeveelheid warmte die overeenkomt met 19 m³ aardgasequivalenten. Gesteld zou dus kunnen worden dat de kas een netto energie-output levert van 19 – 6,75 is ruim 12 m³ aardgasequivalenten per jaar.

¹ Het temperatuurverschil dat voor de berekening van de uiteindelijke warmteoverdracht gebruikt moet worden, is het verschil tussen kasluchttemperatuur en de gemiddelde temperatuur van ingaand en uitgaand warmtewisselaarwater.

Inleiding

Een tuinbouwkas heeft in de Nederlandse zomer te maken met een groot warmteoverschot. Traditionele kassen zetten daarom in de zomer de ramen wijd open. Ingevangen zonne-energie wordt daarmee weggegooid en er wordt veel CO₂ aan de kaslucht toegevoerd om de CO₂-concentratie te verhogen.

Door nu dit warmteoverschot over te dragen op een koelmedium in plaats van het af te luchten, kan zonne-energie opgeslagen worden voor later gebruik en kan bij een veel kleinere CO₂-dosering een veel hogere concentratie gerealiseerd worden.

Teneinde bij de onttrekking van het warmteoverschot een hoog elektriciteitsverbruik te voorkomen, moet gebruikgemaakt worden van warmtewisselaars met een zo laag mogelijke drukval. Tevens moet het temperatuurverschil tussen uittredende lucht en water zo klein mogelijk zijn, wat maakt dat de warmtewisselaar een grote warmteoverdrachtscoëfficiënt moet hebben.

Met dezelfde warmtewisselaars als waarmee in de zomer warmte aan de kaslucht wordt onttrokken, kan in de winter ook worden verwarmd. De hoge warmteoverdrachtscoëfficiënt maakt het mogelijk dat dit met water van een lage temperatuur kan gebeuren. Dit belooft dat, indien het koelwater in de zomer voldoende in temperatuur stijgt (>27 °C), voor de verwarming geen extra verwarmingsapparatuur ingezet zou hoeven te worden.

De door de firma Fiwihex ontwikkelde warmtewisselaars bieden de gewenste combinatie van een lage drukval en een grote warmteoverdrachtscoëfficiënt, zodat overwogen wordt met deze warmtewisselaars een demonstratieopstelling te maken van het concept "Kas als Energiebron". Alvorens dit echter op een verantwoorde wijze te kunnen doen, zijn eerst in een experiment op kleine schaal het gedrag en de prestaties van deze luchtbehandelingsinstallaties bestudeerd.

Voorliggend verslag beschrijft eerst de ontwikkelde opstelling en de eigenschappen van de kasafdeling (hoofdstuk 1) en vervolgens de meetresultaten (hoofdstuk 2).

De meetresultaten en ervaringen van het experiment gaven aanleiding om belangrijke wijzigingen in de installatie en kasinrichting aan te brengen. In hoofdstuk 3 worden deze beschreven en worden scenario's doorgerekend m.b.t. een aantal belangrijke ontwerpparameters. De effecten hiervan worden beoordeeld aan de hand van berekende jaarrond prestaties.

In hoofdstuk 4 worden conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

1. Proefopstelling

1.1. Inleiding

Het in dit project uitgevoerde experiment is geënt op een energiezuinig klimatiseringssysteem waarbij met behulp van lucht/water-warmtewisselaars de kas in de winter boven de 17 °C wordt gehouden en in de zomer gekoeld wordt, indien de temperatuur boven de 27 °C komt. Deze ruime temperatuurgrenzen, gecombineerd met warmtewisselaars met een hoge warmteoverdrachtscoëfficiënt, moeten het mogelijk maken in de winter de kas te verwarmen met water van zo'n 27 °C en in de zomer de kas te koelen met water van rond de 18 °C. Uitgaande van de veronderstelling dat de hoge temperatuur waarboven de kas gaat koelen in de zomer resulteert in een reservoirwarmte op 27 °C en dit reservoir bij het verwarmen in de winter weer op 18 °C gebracht kan worden, zou het mogelijk moeten zijn om de kas zelfs zonder warmtepomp binnen de gestelde grenzen te kunnen houden. De elektrische energie voor de aandrijving van de ventilatoren in de warmtewisselaars en het verbruik van de pompen die het water tussen het warme en koude opslagreservoir verpompen zijn het enige energiegebruik dat dan nog rest.

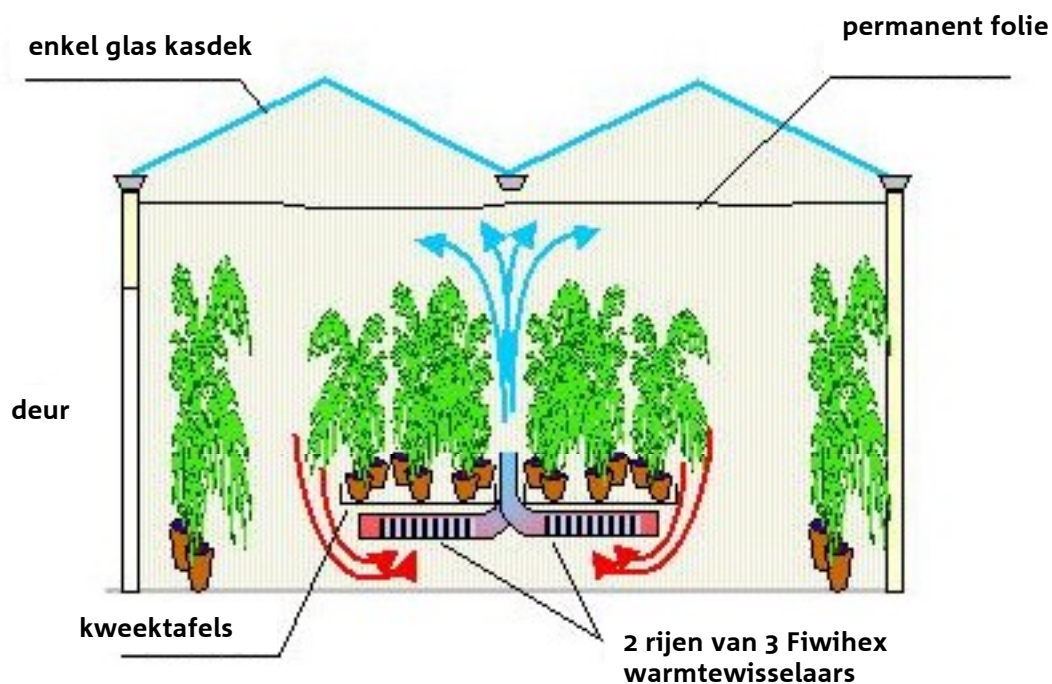
In het rapport "Verwarmings-, koel- en ontvochtigingscapaciteit van Fiwihex warmtewisselaars" (De Zwart, 2003) wordt geconcludeerd dat een potplantengewas geschikt zou kunnen zijn om in de genoemde temperatuurcondities te gedijen. Bovendien is de plaatsing van de warmtewisselaars in hun huidige uitvoeringsvorm goed mogelijk onder de (rol)tafels die in de potplantenteelt gebruikelijk zijn.

Derhalve is ter beoordeling van de werking van het op Fiwihex gebaseerde klimatiseringssysteem een klein kascompartiment met kweektafels en potplanten ingericht.

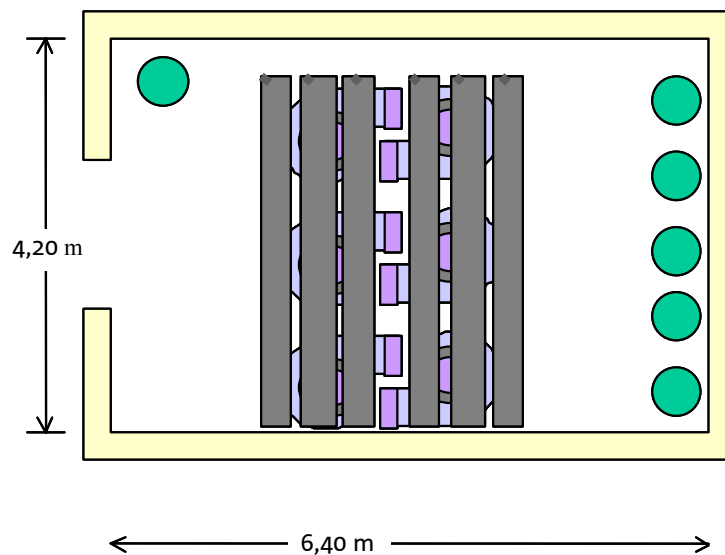
In paragraaf 1.1 wordt ingegaan op de inrichting van het compartiment en in paragraaf 1.2 wordt de klimaatregeling besproken.

1.2. Kascompartiment

Het IMAG beschikt over proefaccommodaties van verschillende afmetingen. De kleinste onderzoeksafdeling waarin omstandigheden gelden die vergelijkbaar zijn met praktijkkassen zijn de zogenaamde B-compartimenten. Dit zijn onderzoeksruimten met geïsoleerde wanden en een enkelglas kasdek van het Venlo-type (twee 3,20 kappen). De diepte van de cel is daarmee 6,40 meter en de breedte is 4,20 meter. In figuur 1.1. is een schets van deze teeltcel gemaakt.



Figuur 1.1. Zijaanzicht van het kascompartiment waarin het experiment heeft plaatsgevonden. De klimaatcel is 27 m² en heeft geïsoleerde wanden.



Figuur 1.2. Bovenaanzicht van het kascompartiment.

In de figuren is getoond dat de kweektafels met de daaronder geplaatste luchtbehandelingsinstallaties midden in het compartiment zijn geplaatst. Langs de randen van de cel zijn nog een aantal grote planten op schotels neergezet om de bladmassa in het kascompartiment vergelijkbaar te krijgen met die van een standaard productiekas. Het kasdek van de experimenteerruimte bestaat uit enkel glas. Omdat het concept dat in dit onderzoek centraal staat echter uitgaat van een dubbeldeks, goed isolerend kasdek materiaal, is een permanent foliescherm aangebracht. Dit scherm heeft eigenschappen die geoptimaliseerd zijn naar een hoge lichtdoorlatendheid en een kleine doorlatendheid voor infrarood. De combinatie van enkel dek en permanent folie geeft de teeltcel de isolatiegraad van een dubbeldeks kas.

In de teeltgoten circuleerde een constante waterstroom zodat het gewas constant van water en nutriënten werd voorzien (hydrocultuur). De planten die op de schotels stonden kregen met de gieter water.

1.3. Klimaatregeling

De klimaatregeling in het experiment is zeer eenvoudig. Wanneer de kasluchttemperatuur onder de 17 °C daalt worden de ventilatoren van de Fiwihex warmtewisselaars ingeschakeld, en wordt warm water (27 °C) naar de warmtewisselaars gestuurd. Om het verwarmingsvermogen te regelen kunnen het ventilatordebiet en het waterdebiet worden aangepast. Beide hebben om praktische redenen een minimumwaarde. Het waterdebiet is minimaal 0,5 liter/minuut per Fiwihex, wat neerkomt op een minimumdebiet van 6,6 liter/(m² uur). Afkoeling van 0,5 liter water per Fiwihex per minuut van 27 naar 18 °C betekent een verwarmingsvermogen van 26 W/m². Het ventilatortoerental is minimaal 10% van het maximaal vermogen, wat neerkomt op een luchtdebiet van ongeveer 20 liter lucht per Fiwihex per seconde.

Wanneer de warmtevraag van de kas toeneemt (wat blijkt uit een dalende temperatuur), wordt eerst bij minimaal debiet het luchtdebiet opgevoerd naar 100%. Vanwege het belang van een grote uitkoeling van het water gebeurt het opvoeren van het luchtdebiet in een smal traject, zodat reeds bij een warmtevraag van 25 W/m² het ventilator-toerental maximaal was. In dit praktijkexperiment betekende dit dat de ventilator op de meeste verwarmingsuren maximaal draaide².

Indien de kasluchttemperatuur boven de 27 °C kwam werd de warmtewisselaar in omgekeerde modus gebruikt. Ook in dat geval werden de bovengenoemde minima voor water- en luchtdebiet aangehouden. Het ventilatordebiet werd opgevoerd van 10 naar 100% in het kasluchttemperatuurgebied van 27 naar 28 °C. Boven de 28 °C werd het waterdebiet opgevoerd. In het begin van het experiment werd dit in een nauw temperatuurgebied gedaan (het debiet was maximaal als de kasluchttemperatuur boven de 30 °C was), maar aangezien dit om verschillende tekortkomingen van de experimentele uitvoeringswijze leidde tot een onacceptabel kleine opwarming van het water in de warmtewisselaar, is omstreeks half maart besloten grotere temperatuurafwijkingen toe te staan. Dit betekende dat het waterdebiet bij kasluchttemperaturen boven de 28 °C werd verhoogd met 11 liter/(m² uur) per graad overschrijding (bij een kasluchttemperatuur van 30 °C was het waterdebiet dus $6,6 + 2 \cdot 11 = 28,6$ liter/(m² uur)).

Tussen de 17 en 27 °C werd er noch verwarmd, noch gekoeld.

Naast de temperatuurregeling was er ook een luchtvochtigheidsbegrenzing. Deze regeling voerde buitenlucht naar binnen zodra de kaslucht een kleiner vochtdeficit had dan 2 gram/kg (84% RV bij 17 °C). Voor deze regeling is gekozen omdat het met het in dit experiment gebouwde systeem niet mogelijk was om met een aantal Fiwihex-en te ontvochtigen (koelen) en tegelijk met andere te verwarmen.

² In de verdere ontwikkeling van de Fiwihex warmtewisselaars heeft elke Fiwihex een eigen motortoerentalregelaar. Met deze regelaar, gecombineerd met een goede waterverdeling over de verschillende Fiwihex'en, wordt het expliciet mogelijk een gewenste uitkoeling van het water te realiseren tegen een minimaal elektriciteitsverbruik (zie ook hoofdstuk 3).

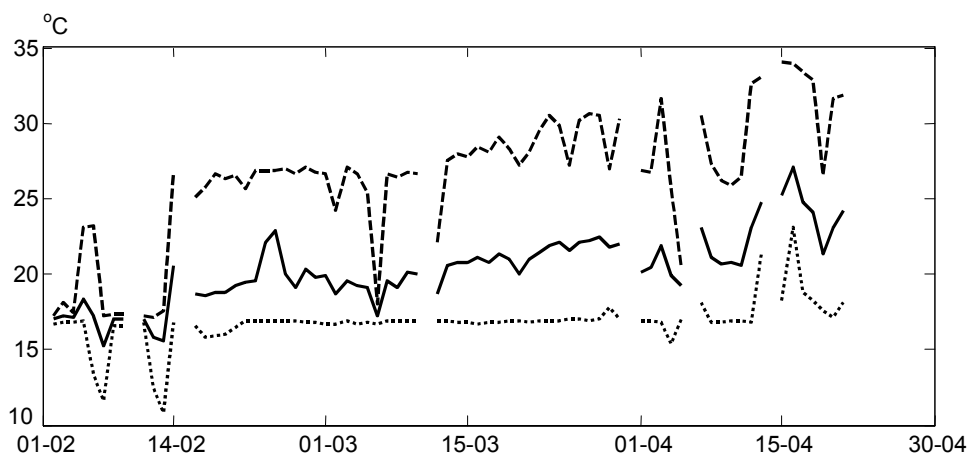
2. Meetresultaten

In dit hoofdstuk worden de meetresultaten getoond van het kasexperiment dat drie maanden heeft geduurd.

2.1. Kasluchttemperaturen, verwarmings- en koelvermogens

Met de in het vorige hoofdstuk beschreven opstelling zijn in de periode van 1 februari t/m 30 april metingen gedaan aan het kasklimaat, het verwarmings- en koelvermogen en de waterdebieten door de warmtewisselaars.

In onderstaande grafiek (figuur 2.1.) is de gemiddelde etmaaltemperatuur die in deze periode is gemeten, weergegeven en is het 10^{de} en 90^{ste} percentiel³ van het dagelijks temperatuurverloop getekend.



Figuur 2.1. Gemiddelde etmaaltemperatuur (getrokken lijn) en het 10^{de} en 90^{ste} percentiel (onderbroken lijnen) van de temperatuur die in de meetperiode is gemeten. Ontbrekende meetdata zijn herkenbaar aan kleine gaatjes in de grafiek.

In de eerste twee weken van februari traden wat kinderziektes op (een lekkende klep, problemen met de regeling van de ventilator voor aanvoer van buitenlucht), waardoor tot twee keer toe de temperatuur 's nachts diep is weggezakt.

De rest van de periode is de kas netjes op de ingestelde ondergrens van 17 °C begrensd gehouden (10^{de} percentiel niet onder de 17 °C).

Vanaf half februari werden ook vrijwel dagelijks temperaturen van 27 °C bereikt. In de eerste periode is deze temperatuur als een hard maximum gehanteerd en dus via een PI-regelaar gehandhaafd. In de voortgangsbespreking van 5 maart is echter besloten om een stijging boven deze temperatuur toe te staan. Derhalve is in de week daarna

³ Met het 10^{de} percentiel wordt die temperatuur bedoeld die minder dan 10% van de tijd onderschreden wordt en het 90^{ste} percentiel is de temperatuur die minder dan 10% van de tijd overschreden wordt.

het maximaal waterdebiet door de warmtewisselaars een heel stuk teruggebracht (van maximaal 90 liter/(m² uur) naar 33 liter/(m² uur)). Dit resulteerde tijdens het koelen in hogere watertemperaturen aan de uitgang van de warmtewisselaars, maar ook in hogere kastemperaturen.

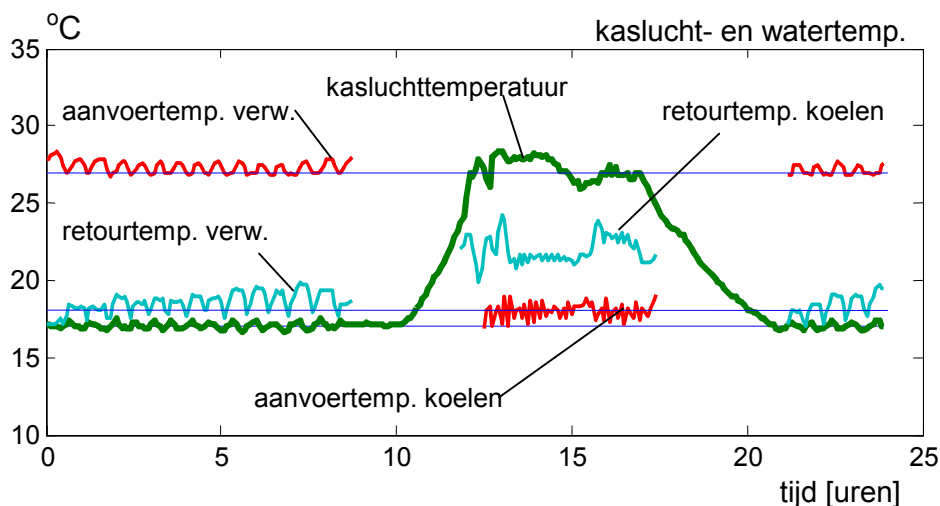
Toen in de tweede week van april de kastemperatuur echter regelmatig boven de 35 °C kwam is het maximale waterdebiet weer verhoogd naar 60 liter/(m² uur).

Deze noodgreep is een gevolg van de vermoedelijk slechte waterverdeling over de verschillende warmtewisselaars en de beperkte verdampingscapaciteit van het gewas. Het ware beter geweest als de kas zou zijn uitgerust met een luchtbevochtigings-systeem waarmee de luchtvochtigheid op waarden rond de 85% RV gehouden had kunnen worden.

In figuur 2.2. is een grafiek getekend van gemeten temperaturen op een dag waarop de warmtewisselaar zowel voor verwarming als voor koeling wordt gebruikt.

De figuur toont dat de kasluchttemperatuur netjes op de ingestelde waarden wordt gehouden. Tijdens het verwarmen wordt water van 27 graden aan de Fiwihex-en geleverd en geven de warmtewisselaars water van gemiddeld 19 °C terug.

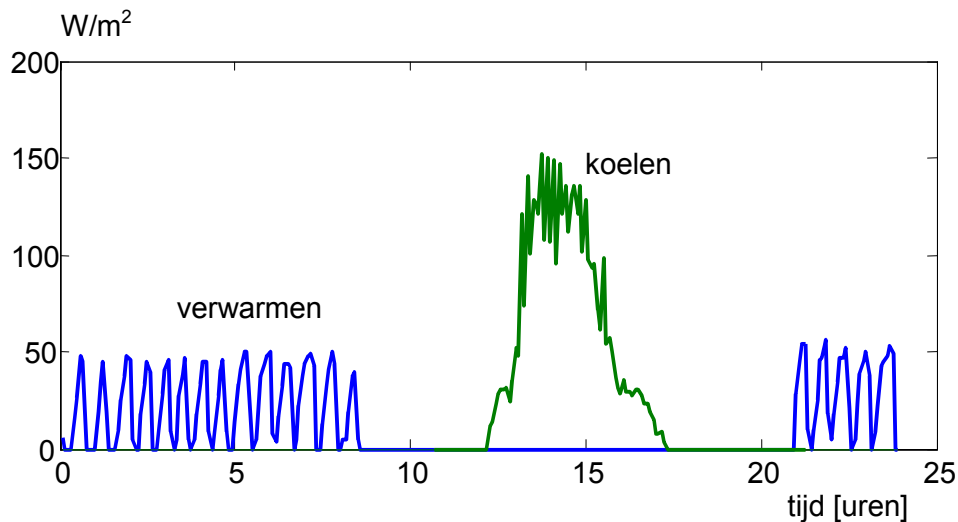
Tijdens het koelen wordt water van 18 °C de warmtewisselaars ingestuurd en wordt het water daar opgewarmd naar ongeveer 22 °C, met wat hogere temperaturen bij het begin en aan het einde van de koelperiode.



Figuur 2.2. Kaslucht- en watertemperaturen op een dag waarin zowel verwarmd als gekoeld wordt (20 maart 2003).

Opvallend in de grafiek is het feit dat de retourtemperatuur tijdens het verwarmen vrij dicht op de kasluchttemperatuur ligt (2 °C hoger), terwijl deze tijdens het koelen meer dan 5 °C van de kasluchttemperatuur af ligt. Dit wordt veroorzaakt door het veel grotere vermogen (een factor 5) dat tijdens het koelen over de warmtewisselaar wordt overgedragen. Dit vermogen is veel groter dan wat tijdens het verwarmen wordt overgedragen.

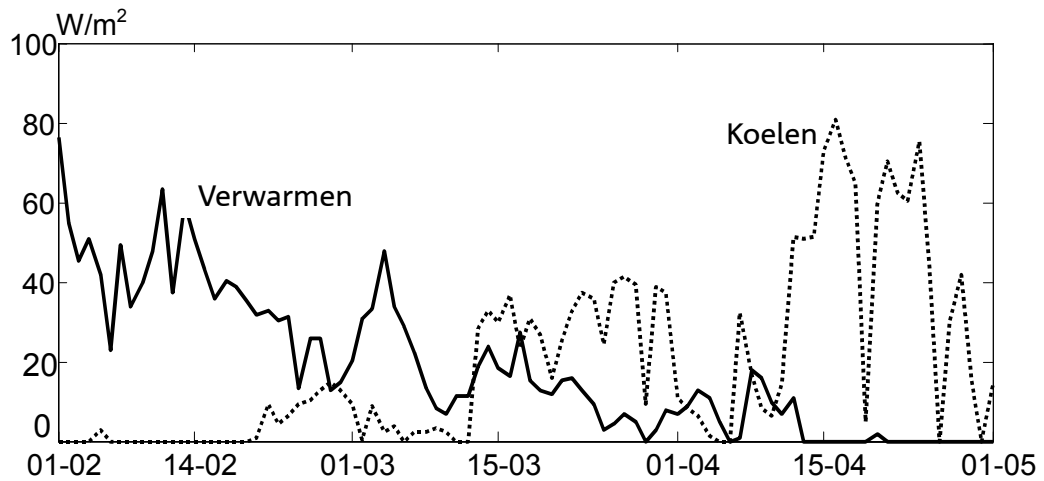
Het verwarmings- en koelvermogen staat afgebeeld in figuur 2.3.



Figuur 2.3. Verwarmings- en koelvermogen op 20 maart 2003.

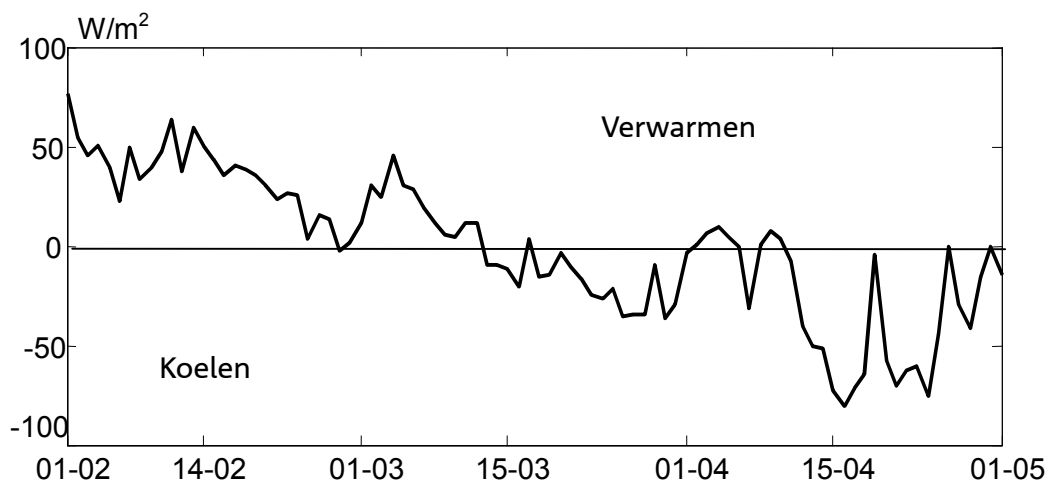
Het fluctuerende karakter van het verwarmingsvermogen wordt veroorzaakt door het feit dat de installatie een zeker minimumvermogen heeft (een minimumwaterdebiet van 6,6 liter/(m^2 uur)). Bij een beperkte warmtevraag leidt dit tot een aan/uit-regelkarakteristiek.

In het begin van de meetperiode werd er niet gekoeld en aan het eind van de meetperiode werd er niet verwarmd. Er is echter ook een groot aantal dagen waarop er zowel werd gekoeld als verwarmd. Dit blijkt goed uit figuur 2.4., waar het dagelijks gemiddeld verwarmings- en koelvermogen wordt getoond.



Figuur 2.4. Daggemiddeld verwarmingsvermogen (getrokken lijn) en daggemiddeld koelvermogen (gestippelde lijn).

Behalve als twee aparte lijnen kan het verwarmings- en koelvermogen ook als een nettolijn worden getoond. Op deze manier komt de dagelijkse warmtebehoefte of het dagelijkse warmteoverschot tot uiting. Dit is weergegeven in figuur 2.5.

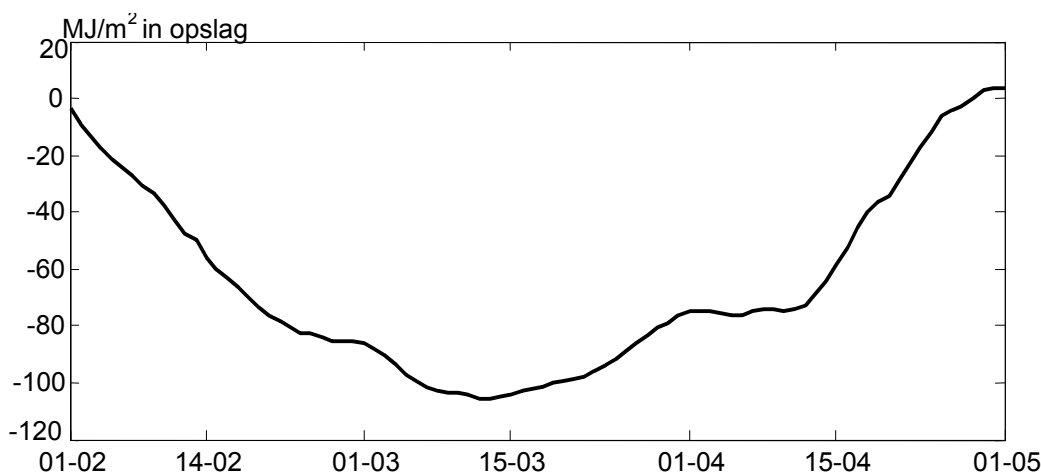


Figuur 2.5. Netto dagelijks gemiddeld verwarmingsvermogen (positieve waarden) of koelvermogen (negatieve waarden) gedurende de meetperiode.

Het verwarmen van de kas kost warmte en het koelen levert warmte op. In figuur 2.6. wordt de balans van warmtetekort en warmteoverschot getoond in de vorm van een cumulatie van de dagelijkse verwarming en koeling. Deze grafiek kan geïnterpreteerd worden als de hoeveelheid energie die in een energieopslagsysteem aanwezig zou zijn.

De figuur toont dat het minimumniveau van de opslag rond de -110 MJ/m^2 ligt. De figuur laat ook zien dat aan het eind van het experiment (1 mei) de energie-inhoud van

de opslag zelfs boven 0 is uitgekomen, wat betekent dat gedurende de proef meer warmte aan de kas is onttrokken dan er voor verwarming is gebruikt.



Figuur 2.6. Berekende energie-inhoud van een virtueel opslagsysteem. Een dalende lijn markeert onttrekking van energie en een opgaande lijn markeert een lading van het energieopslagsysteem.

2.2. Energietotalen en temperaturniveaus

De totale hoeveelheid energie die gedurende de meetperiode voor de verwarming is gebruikt, bedroeg 144 MJ/m² en er is in totaal 149 MJ/m² middels koeling aan de kaslucht onttrokken. Zoals ook bleek uit figuur 2.6. was de warmtehoeveelheid naar en vanuit de kas in de proefperiode daarmee vrijwel in balans.

Wanneer over de hele meetperiode wordt gekeken, is er voor het verwarmen 14,7 m³ water per m² gebruikt dat met een gemiddelde temperatuur van 26,3 °C werd aangevoerd en in de warmtewisselaar is afgekoeld naar gemiddeld 24 °C. In het begin van het experiment zijn er echter grote onbedoelde kortsluitstromen opgetreden, waardoor er met name bij het verwarmen erg grote watervolumes met kleine temperatuurverschillen zijn rondgepompt. Deze problemen zijn begin maart gelokaliseerd en verholpen.

Voor het koelen is 11,5 m³ water per m² gebruikt dat van een gemiddelde temperatuur van 17,9 °C is opgewarmd naar gemiddeld 21 °C.

Teneinde de opwarming en afkoeling te vergroten (die na het verhelpen van de onbedoelde kortsluiting nog steeds erg klein was) is per 17 maart besloten het maximale debiet dat door de Fiwihex-en stroomt te verminderen van maximaal 40 liter/minuut (900 m³/ha/uur) naar 15 liter per minuut (330 m³/ha/uur).

In dit beperktere tijdvak is 20 MJ/m² voor de verwarming gebruikt en was de gemiddelde temperatuur van het uitstromende water tijdens het verwarmen 21,2 °C. De uitkoeling van het water was daarmee vergroot van 2,3 naar 5,8 °C. Behalve door het verlaagde debiet komt dit echter ook omdat de gemiddelde warmtevraag vanaf maart fors lager lag dan in de eerste 6 weken van het experiment. De gemeten afkoeling blijft evenwel nog steeds ver achter bij de afkoeling van 9 °C die volgens metingen van Fiwihex bij geoptimaliseerde regeling in een vermogenstraject van 0 tot 500 W per Fiwihex gerealiseerd moet kunnen worden.

In dezelfde periode (17 maart tot het eind van het experiment) is 126 MJ/m² gekoeld. Dit betekent dat ruim 85% van de koeling in deze periode gevallen is. De gemiddelde opwarming van het water was in deze periode 3,5 °C (van 17,9 naar 21,4 °C) en daarmee aanmerkelijk hoger dan de 2,8 °C die volgt uit de berekening van de opwarming tijdens het koelen in de totale periode. De prijs voor deze grotere opwarming was in het experiment evenwel een kasluchttemperatuur die vaak rond de 35 °C lag.

Uit bovenstaande meetdata blijkt evenwel dat tijdens het verwarmen de warmte-wisselaars het water niet naar de voor koeling gewenste temperatuur van 18 °C brengen en tijdens het koelen geen water van 27 °C wordt geproduceerd. Anders gezegd: het hete en koude water dat voor het verwarmen en koelen wordt gebruikt komt terug als lauw water. Dit lauwe water is veel minder goed te gebruiken voor de klimatisering van de kas dan het oorspronkelijke warme en koude water. De warmte-balans gedurende de proef is dus weliswaar in kwantitatieve zin ongeveer op 0 uitgekomen, maar er is wel een groot kwaliteitsverlies van de temperatuur van het water opgetreden.

Er zijn echter veel aanwijzingen dat het grote kwaliteitsverlies van de watertemperatuur dat in het experiment naar voren kwam toe te schrijven is aan een slechte verdeling van het water over de Fiwihex en beperkingen aan de regeling van het waterdebiet. Ook de beperkte luchtvochtigheid tijdens het koelen heeft de koelcapaciteit van de installatie enorm beperkt. Bij de verwarming van de kas was met name het minimumdebiet te groot om een goede uitkoeling van het water te kunnen realiseren.

In het volgende hoofdstuk zullen berekeningen worden gedaan aan het perspectief van de Fiwihex-regelaars indien de tekortkomingen van het experiment worden opgelost, en de warmteoverdracht conform de door de firma Fiwihex gemeten 100 W/K bij verwarmen en 200 W/K bij koelen onder vochtige omstandigheden gerealiseerd zou worden.

3. Jaarrond gebruiksperspectief

3.1. Inleiding

Het concept rond het gebruik van Fiwihex warmtewisselaars omvat een maximalisatie van de warmteonttrekking uit een tuinbouwkas en de minimalisatie van het eigen warmtegebruik, zodat er een netto warmteoverschot beschikbaar komt voor derden. Het is dan ook van groot belang dat de kas zoveel mogelijk zonlicht invangt en zo weinig mogelijk warmte verliest. Het concept zoals dat wordt beschreven in “Energieproducerende kas; voorontwerp voor een pilot” gaat dan ook uit van het gebruik van een kas die is uitgerust met dubbeldeks zigzag-platen. Deze hebben een goede thermische isolatiegraad en een hoge lichtdoorlatendheid.

De bruikbaarheid van warmte voor derden neemt toe naarmate het temperatuur-niveau waarop die warmte beschikbaar komt hoger ligt. Aangezien de temperatuur van water dat uit een koelinstallatie komt nooit hoger kan zijn dan de temperatuur van het medium dat gekoeld wordt (zolang er tenminste geen externe energie aan de warmtewisselaar wordt toegevoegd zoals met bijvoorbeeld een warmtepomp het geval is), betekent de wens om warmte te kunnen leveren dat de kas flink in temperatuur moet zijn opgelopen alvorens de koeling wordt ingeschakeld. Daarom is in dit project uitgegaan van het inschakelen van de koeling bij kasluchttemperaturen die hoger zijn dan 27 °C. Het waterdebiet wordt vervolgens zodanig geregeld dat in een temperatuurtraject van 27 °C tot 30 °C het waterdebiet van 0 tot een maximaal niveau wordt opgevoerd. Indien het warmtewisselend oppervlak groot is, de koel-watertemperatuur laag en het maximaal waterdebiet toereikend, zal de kaslucht-temperatuur altijd onder die 30 °C gehouden kunnen worden. Echter, naarmate er meer concessies worden gedaan aan deze voorwaarden, zullen er meer momenten komen waarop de kas onacceptabel warm wordt. In het document “Energie-producerende kas; voorontwerp voor een pilot” wordt een middenweg bewandeld door tijdens de warmste perioden van het jaar het zonlicht via een reflecterend schaduw scherm te weren en op deze manier de koellast te beperken. Uiteraard gaat dit ten koste van de hoeveelheid warmte die aan de kas kan worden onttrokken en bij lichtminnende gewassen ten koste van een stukje productie, maar aan de andere kant leidt dit tot een beperking van de investering in extra warmtewisselend oppervlak dat slechts een klein deel van het jaar duidelijk rendement oplevert.

De koelcapaciteit van warmtewisselaars kan, behalve door het warmtewisselend oppervlak, ook worden vergroot door de temperatuur van het ingaande water te verlagen. Bij een verlaging van de koelwatertemperatuur kan het aantal Fiwihex-en per oppervlakte eenheid worden beperkt. Bovendien leidt een beperking van de

hoeveelheid water die met een ondergronds opslagsysteem moet worden uitgewisseld tot een vermindering van het elektriciteitsverbruik van pompen en beperkt de grotere koelcapaciteit het elektriciteitsverbruik van de ventilatoren van de warmtewisselaars. Een lagere koelwatertemperatuur verlaagt daarmee de behoefte aan primaire energie. De vermindering van het aantal m³ water dat dan in de zomer wordt verwarmd, leidt echter ook tot een geringere hoeveelheid water van 27 °C, en beperkt daarmee de mogelijkheid van de kas om warmte aan derden te leveren.

In dit hoofdstuk wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de invloed van keuzen in het aantal Fiwihex warmtewisselaars per m² en de temperatuur van het water dat naar de warmtewisselaars wordt gevoerd. Deze berekeningen worden gemaakt aan de hand van jaarbelastingduurkrommen voor koeling en verwarming voor een kas die is uitgerust met een zigzag kasbedekkingsmateriaal. De eigenschappen van deze kas worden belicht in § 3.2.

De koel- en verwarmingsprestaties hangen natuurlijk in grote mate af van de technische prestaties van de warmtewisselaars. Vanwege de tekortkomingen van de installatie die in het uitgevoerde experiment is gebruikt, wordt in de scenario-analyse geen gebruikgemaakt van de in het experiment gemeten prestaties, maar worden laboratoriumspecificaties als uitgangspunt genomen. In § 3.3. worden deze specificaties samengevat en toegelicht.

In § 3.4. worden de effecten van de koude brontemperatuur en het aantal warmtewisselaars doorgerekend in termen van primair energieverbruik van de kas en het aantal m³ water dat aan derden geleverd kan worden.

3.2. Jaarbelastingduurkromme van koeling en verwarming

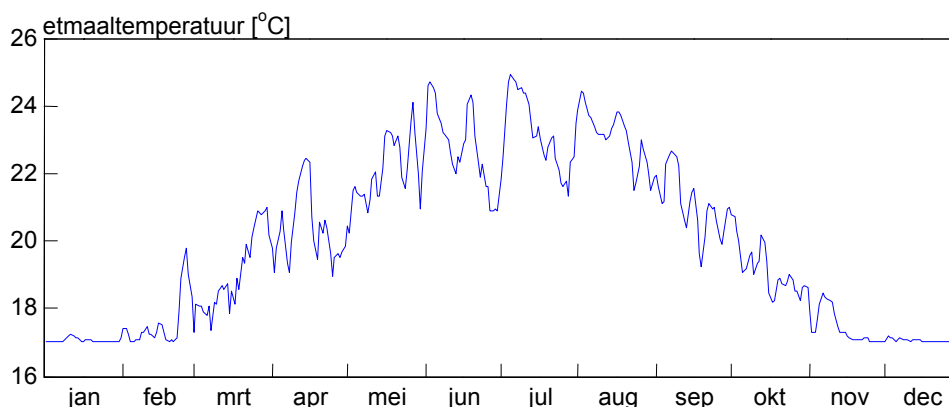
In het concept “Energieproducerende kas” wordt uitgegaan van een gesloten kas die in de zomer warmte verzamelt voor de verwarming in de winter en ten behoeve van de levering daarvan aan derden. De levering aan derden is mogelijk omdat een goed geïsoleerde kas meer warmte in de zomer over heeft dan dat er aan verwarmingsenergie in de winter nodig is.

Met behulp van het kasklimaat simulatiemodel KASPRO, dat door A&F (v.h. IMAG) al een aantal jaren wordt gebruikt en ontwikkeld, kan een beeld worden verkregen van het kasklimaat dat onder de gestelde klimaatregelaarinstellingen wordt gerealiseerd en de verwarmings- en koelbehoefte die hiermee gepaard gaat. In de berekeningen is slechts één punt anders dan wat in het rapport “Energieproducerende kas; voorontwerp voor een pilot” staat vermeld, namelijk het feit dat in de simulatie buitenlucht wordt gebruikt om de kaslucht te ontvochtigen, terwijl in het “voorontwerp” wordt beschreven dat ontvochtiging plaatsvindt door een aantal warmtewisselaars koud te

maken. Indien de kaslucht daardoor te koud wordt, wat zeker in de winter regelmatig het geval zal zijn, wordt het voelbare warmteverlies gecompenseerd door verwarming met andere warmtewisselaars.

De kas die in de simulaties wordt verondersteld, is dus wat minder gesloten dan de kas van het “voorontwerp”. Omdat ontvochtiging met buitenlucht altijd een lagere warmtebehoefte met zich meebrengt dan ontvochtigen aan een koud oppervlak + naverwarming (zie “Energiezuinige vochtregulatie door middel van warmtepompen”, De Zwart et. al., 2001) zal de kas die in het “voorontwerp” is gepresenteerd een wat hogere warmtevraag hebben dan de kas die in het simulatiemodel wordt verondersteld. Daar staat tegenover dat een volledig gesloten kas een lagere CO₂-behoefte zal hebben omdat het ventilatieverlies tot het uiterste voorkomen wordt. De ernst van deze grotere CO₂-behoefte kan echter pas worden beoordeeld in vergelijking met de beschikbaarheid van CO₂, bijvoorbeeld uit de WK-installatie die in het ontwerp is opgenomen om te voorzien in de elektriciteitsbehoefte van ventilatoren en pompen. Deze afweging is in dit stadium nog niet gemaakt.

In onderstaande figuur is het verloop van de etmaalgemiddelde temperatuur in het beoogde kasontwerp getoond.



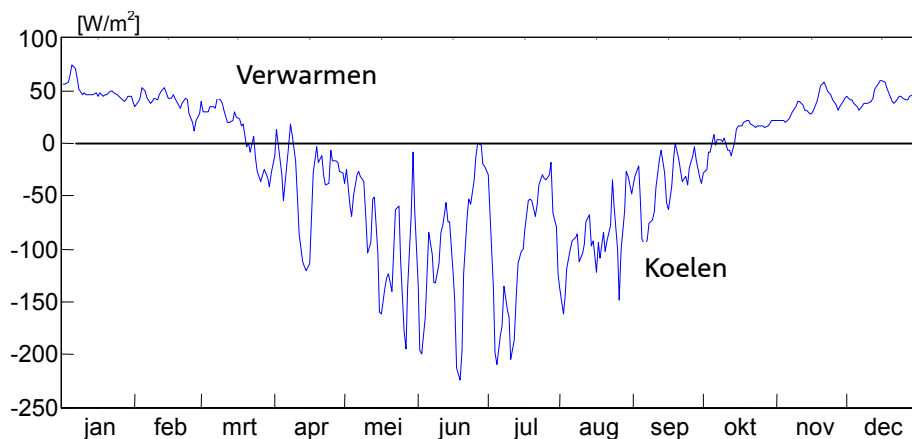
Figuur 3.1. Gesimuleerd verloop van de etmaalgemiddelde kasluchttemperatuur in een gemiddeld Nederlands jaar onder de gestelde klimaatinstellingen en bij een immer toereikende koel- en verwarmingscapaciteit.

De grafiek laat goed zien dat in de koude maanden november t/m februari de verwarming praktisch de hele dag aan staat. De temperatuur ligt daar immers strak op 17 °C, wat de ingestelde minimale kasluchttemperatuur is.

De figuur laat ook zien dat van februari tot oktober de gemiddelde temperatuur regelmatig al flink kan oplopen, wat aangeeft dat verreweg het grootste deel van het jaar de zon de kas overdag flink opwarmt.

Teneinde de kasluchttemperatuur en luchtvochtigheid binnen de gestelde grenzen te houden (17 en 27 °C en maximaal 85% RV) zal de klimaatinstallatie de kas koelen of verwarmen.

In onderstaande grafiek is het daggemiddelde koel- en verwarmingsvermogen afgebeeld.



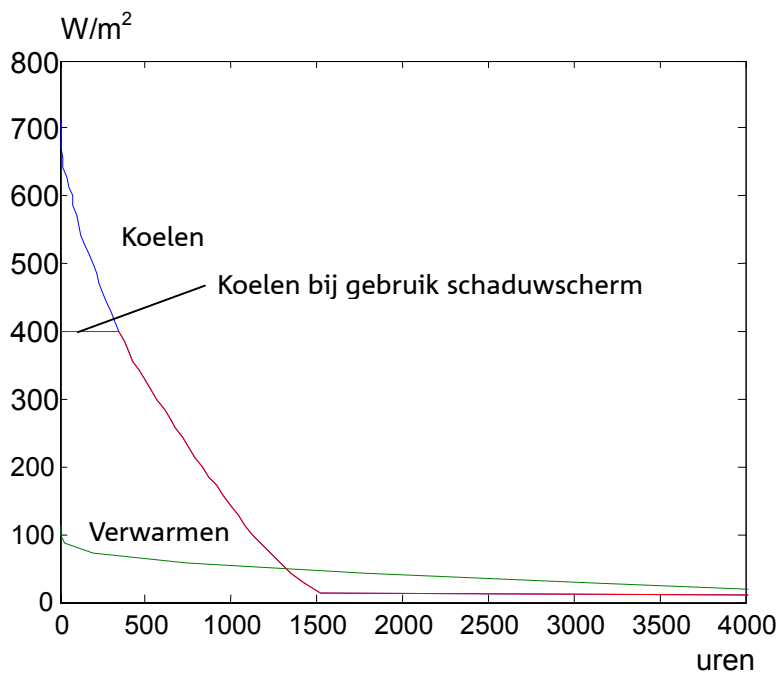
Figuur 3.2. Daggemiddeld verwarmings- en koelvermogen van een dubbeldeks gesloten kas die tussen 17 en 27 °C wordt gehouden in een gemiddeld Nederlands jaar.

De grafiek laat zien dat de benodigde koelvermogens aanzienlijk groter zijn dan de benodigde verwarmingsvermogens. Dit geldt voor de daggemiddelde vermogens, maar nog sterker voor de momentane verwarmings- en koelvermogens. Dit blijkt uit de jaarbelastingduurkromme die in figuur 3.3. wordt getoond.

De jaarbelastingduurkromme geeft aan dat het benodigde verwarmingsvermogen nooit boven de 100 W/m² uitkomt en dat er bovendien geen groot verschil is tussen het maximale en het gemiddelde vermogen. Bovendien blijkt uit de grafiek dat er veel uren zijn waarop de kas verwarmd moet worden om niet onder de gestelde 17 °C te zakken.

De jaarbelastingduurkromme voor de koeling laat zien dat de kas slechts 1500 uur gekoeld moet worden maar dat de vermogens die daarbij spelen veel groter zijn. De piek in de benodigde koelvermogens ligt rond de 650 W/m². Daarom is in het “voorontwerp”, mede op grond van de ervaring in het afgelopen experiment, een reflecterend schaduw scherm opgenomen. In de simulaties is ervan uitgegaan dat dit scherm zodanig wordt bestuurd dat het vereiste koelvermogen niet boven de 400 W/m² komt. De simulatie laat zien dat dit scherm zo’n 400 uur gebruikt zal worden. Het zal duidelijk zijn dat door het gebruik van het scherm een stukje van de potentiële warmwaterproductie van de kas wordt vernietigd omwille van een beperking van de maximale koelcapaciteit. Ook zal bij de teelt van een lichtminnend gewas met het gebruik van een schaduw scherm een stukje productieverlies optreden.

Gelukkig is de effectieve warmteoverdrachts capaciteit van een lucht/water-warmte-wisselaar bij de koeling van warme vochtige lucht ongeveer tweemaal zo groot als de effectieve warmte-overdrachts capaciteit voor de verwarming van koude lucht. Dat komt omdat bij koeling van vochtige lucht niet alleen voelbare warmte aan de lucht wordt onttrokken, maar door de condensatie ook latente warmte aan de lucht wordt onttrokken. Om een vochtige kaslucht te garanderen is er in het “voorontwerp” en de simulatie van uitgegaan dat de kaslucht zonodig kan worden bevochtigd. Dan nog is echter op grond van de jaarbelastingduurkromme duidelijk dat de vereiste warmte-uitwisselings capaciteit voor een luchtbehandelinginstallatie in een gesloten kas geheel bepaald wordt door de koelbehoefte.



Figuur 3.3. Jaarbelastingduurkromme van de gesimuleerde verwarmings- en koelbehoefte van een zoveel mogelijk gesloten kas met een dubbel kasdek en temperatuurgrenzen van 17 en 27 °C in een gemiddelde Nederlands jaar. De gesimuleerde kas gebruikt evenwel buitenlucht voor de ontvochtiging en is daarmee in de winter met name 's nachts niet volledig gesloten.

De totale hoeveelheid energie die voor de verwarming nodig is bedraagt 675 MJ/(m² jr) en de totale hoeveelheid die, na toepassing van het reflecterend scherm, aan de kas onttrokken moet worden, bedraagt 1250 MJ/(m² jr).

De data op grond waarvan de getoonde jaarbelastingduurkromme is getekend, zijnde een histogram met aantallen uren waarop een bepaald koel- of verwarmingsvermogen ingezet moet worden om de kas binnen de gestelde klimaatcondities te houden, is als input gebruikt voor een programma dat een gevoeligheidsanalyse van het ontwerp uitvoert.

Dit programma bepaalt aan de hand van het aantal m² kas per Fiwihex en de temperatuur van het water in de koude bron, het effect op het primaire energieverbruik van de kas, het aantal uren dat de kas ondanks de koeling warmer dan 30 °C is en de hoeveelheid water op 27 °C die voor derden beschikbaar is.

De gehanteerde data zijn vastgelegd in bijlage 1.

Deze berekeningen zijn gedaan met behulp van de warmtewisselingsprestaties en elektriciteitsverbruikscijfers van de Fiwihex warmtewisselaars zoals die in de volgende paragraaf worden gepresenteerd.

3.3. Uitgangspunten voor de prestaties van individueel geregelde Fiwihex warmtewisselaars

De warmteoverdracht van een Fiwihex warmtewisselaar kan worden geregeld met behulp van het waterdebiet en het luchtdebiet. Deze twee debieten dienen op elkaar afgestemd te zijn omdat een te klein luchtdebiet ten opzichte van het waterdebiet leidt tot onvoldoende uitkoeling (bij verwarmen) of opwarming (bij koelen). In het experiment kon het luchtdebiet niet per Fiwihex afzonderlijk worden geregeld en kon het waterdebiet niet onder een minimumwaarde worden geregeld (0,5 liter per Fiwihex per min, wat in de geplaatste configuratie neerkwam op 26 W/m² kas). Dit heeft tot een belangrijke beperking in de werking van het systeem geleid.

Om de prestaties te verbeteren heeft de firma Fiwihex de afgelopen maanden aan een regelaar gewerkt die voor elke Fiwihex afzonderlijk het luchtdebiet kan regelen. Deze regeling is zodanig dat middels het ventilatortoerental de uitgaande watertemperatuur dicht bij de aangezogen luchttemperatuur wordt gehouden. Komt deze uitgaande watertemperatuur meer dan 1 °C van de inkomende luchttemperatuur af te liggen, dan wordt het ventilatortoerental verhoogd. Ligt de uitgaande watertemperatuur minder dan 1 °C vanaf de inkomende luchttemperatuur, dan wordt het toerental verlaagd. Hiermee regelt elke Fiwihex zijn luchtdebiet zodanig dat een minimum aan elektriciteit wordt gebruikt en toch een goede uitkoeling of opwarming van het water wordt verkregen.

Aangenomen dat de uitgaande watertemperatuur tijdens het verwarmen van de kas (op 17 °C) 18 °C is en de ingaande watertemperatuur 27 °C is (de temperatuur van de warme bron), kan het waterdebiet dat door de Fiwihex moet stromen om dat vermogen af te geven gemakkelijk worden berekend uit:

$$\text{waterdebiet}_{\text{verwarm}} = P_{\text{verwarming}} / ((27 - 18) * 4,18e3) \quad [\text{liter/sec}]$$

waarin $P_{\text{verwarming}}$ het gewenste verwarmingsvermogen per Fiwihex is en waterdebiet de hoeveelheid water per seconde per Fiwihex.

Overschrijdt het over te dragen vermogen echter een zeker maximum, dan zal de warmte-overdracht van het water naar de lucht bij maximaal ventilatortoerental ontoereikend zijn en zal ofwel de uitstromende watertemperatuur gaan oplopen, ofwel het debiet moeten worden beperkt en het gewenste vermogen niet geleverd kunnen worden.

De huidige uitvoeringsvormen van de Fiwihex warmtewisselaars hebben een voelbare warmte-overdrachtscoëfficiënt van 100 W/K (regelmatig gemeten door de firma Fiwihex en ook in het eerdere laboratoriumexperiment bij A&F). Dit betekent dat het maximale vermogen waarbij nog kan worden voldaan aan de uitkoeling van het water tot 18 °C, 545 W per Fiwihex bedraagt.

Tot dit vermogen kan de warmtewisselaar aan de gewenste vermogensvraag voldoen en kan het elektrisch vermogen dat nodig is voor de ventilator afhankelijk worden gesteld van de warmteoverdrachtscoëfficiënt die voor dat over te dragen vermogen nodig is. De benodigde overdrachtscoëfficiënt is

$$\text{Alfa}_{\text{verwarm}} = P_{\text{verwarming}} / ((27+18)/2 - 17) \quad [\text{W/K}]$$

Het elektrisch vermogen dat nodig is om deze warmteoverdrachtscoëfficiënt te realiseren kan volgens opgave van de fabrikant worden berekend uit:

$$P_{\text{elek}_{\text{verwarm}}} = (\text{Alfa}_{\text{verwarm}}/25,5)^3 \quad | \quad \text{Alfa}_{\text{verwarm}} \leq 100 \quad [\text{W/Fiwihex}]$$

Bij de eerder genoemde 545 W verwarmingsvermogen leidt deze relatie tot het maximale elektriciteitsverbruik van de ventilator, zijnde 60 W.

In de koelmodus verloopt de berekening van het benodigde waterdebiet precies zoals bij het gebruik van de Fiwihex in de verwarmingsmodus. In de scenarioberekeningen zal de temperatuur van het water in de koude bron echter worden gevarieerd, zodat een iets algemenere formule wordt verkregen.

$$\text{waterdebiet}_{\text{koel}} = P_{\text{koel}} / ((27 - T_{\text{koudebron}}) * 4,18e3) \quad [\text{liter/sec}]$$

waarin P_{koel} het gewenste koelvermogen per Fiwihex is en waterdebiet weer de hoeveelheid water per seconde per Fiwihex. De temperatuur van de koude bron zal in de volgende paragraaf worden gevarieerd tussen 8 en 15 °C.

Het is duidelijk dat er in de bovengetoonde berekening van het waterdebiet voor de koeling wordt uitgegaan van water van 27 °C aan de uitgang van de warmtewisselaar. Ook hier geldt dat dit kan worden gerealiseerd tot een bepaald maximaal vermogen. Uitgaande van een kasluchttemperatuur tijdens koelen van 28 °C en een twee keer zo grote maximale warmteoverdrachtscoëfficiënt voor het koelen (dus 200 W/K), kan het

maximale vermogen waarbij de uittredende temperatuur één graad onder de luchttemperatuur kan worden gehouden, worden beschreven met:

$$P_{\text{koel}_{\text{max}}} = 200 * (28 - (27 + T_{\text{koudebron}})/2) \quad [\text{W/Fiwihex}]$$

Bij een brontemperatuur van 8 °C is het aldus gedefinieerde maximale koelvermogen per Fiwihex 2100 W en bij een brontemperatuur van 18 °C is dit 1100 W.

Wanneer het vermogen dat per Fiwihex geleverd moet worden groter is dan deze grenswaarde, is het elektriciteitsverbruik 60 W. Bij koelvermogens onder deze grens wordt het elektriciteitsverbruik berekend op een soortgelijke wijze als in de verwarmingsmode.

De benodigde overdrachtscoëfficiënt voor het koelen is dan:

$$\text{Alfa}_{\text{koel}} = P_{\text{koel}} / (28 - (27 + T_{\text{koudebron}})/2) \quad [\text{W/K}]$$

en het elektrisch vermogen dat nodig is om deze warmteoverdrachtscoëfficiënt te realiseren volgt volgens opgave van de fabrikant dan uit:

$$P_{\text{elek}_{\text{koel}}} = (\text{Alfa}_{\text{koel}}/51,2)^3 \quad | \quad \text{Alfa}_{\text{koel}} \leq 200 \quad [\text{W/Fiwihex}]$$

Samenvattend kan gesteld worden dat met bovenstaande formules kan worden vastgesteld tot welke verwarmings- en koelvermogens de Fiwihex warmtewisselaars de uitgaande watertemperatuur binnen één graad ten opzichte van de ingaande luchttemperatuur kunnen houden en welke elektrische vermogens daarmee gemoeid zijn. Boven deze kritische waarden is het ventilatorvermogen per Fiwihex 60 W en zal ofwel de bedoelde temperatuur van 27 °C, ofwel de beoogde kasluchttemperatuur niet worden gerealiseerd.

In de scenarioberekeningen die in de volgende paragraaf worden gepresenteerd, wordt de tweede optie gekozen en wordt een concessie gedaan aan de te realiseren kasluchttemperatuur.

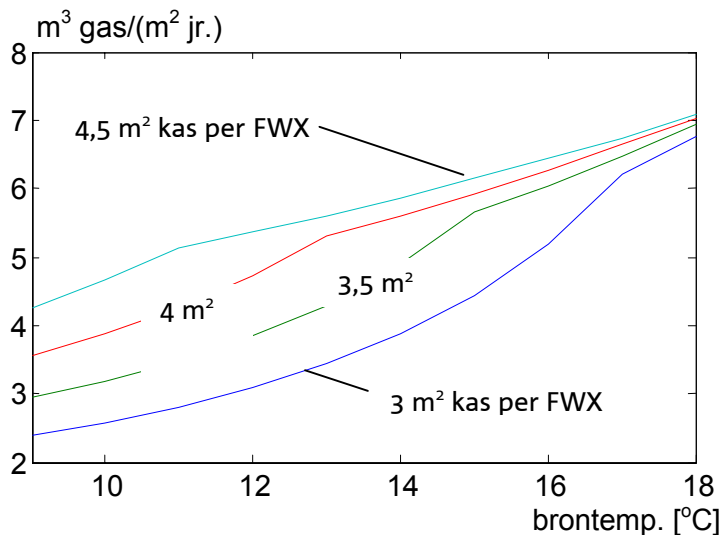
Door deze op te laten lopen stijgt echter ook de temperatuur van het uitgaande koelwater. Een beperkt koelvermogen leidt in dat geval dus tot een hogere gemiddelde temperatuur. Het aantal m³ water dat in de verschillende berekeningen voor derden beschikbaar is zou op deze manier niet met elkaar vergeleken kunnen worden. Om dit probleem te voorkomen wordt in een laatste stap van de berekeningen water dat met een bepaald debiet op hogere temperaturen dan 27 °C beschikbaar komt, omgerekend naar een groter debiet met de bedoelde 27 °C. Een bepaalde hoeveelheid koelwater op een gemiddeld hogere temperatuur wordt daarmee omgezet in een grotere hoeveelheid water van 27 °C. Daardoor kunnen in alle berekeningen m³ warmwaterproductie met elkaar worden vergeleken.

Eenzelfde verrekening is toegepast op de afvalwarmte van de microgasturbine die in het “voorontwerp” dienst doet als WKK-unit voor de invulling van de elektriciteitsbehoefte van pompen en ventilatoren. Een groter elektriciteitsverbruik leidt in dit geval tot een grotere hoeveelheid afvalwarmte van de turbine en dus tot een groter aantal m³ water dat op 27 °C aan derden ter beschikking kan worden gesteld. De toename van het wateroverschot verloopt langs twee processen. In de zomer wordt het waterdebiet van de koude naar de warme put ten behoeve van de koeling van de turbine vergroot en in de winter wordt een deel van de warmtebehoefte gedekt door de afvalwarmte van de turbine, waardoor het eigen gebruik van 27 °C water afneemt. Voor het elektrisch rendement van de turbine is 30% op onderwaarde genomen. Dit is het op dit moment best haalbare rendement voor turbines in deze klasse (rapport “De microturbine als ketelbranderventilator”, Swinkels en De Zwart, 2003). Het thermisch rendement is gesteld op 70%.

3.4. Effect van aantal warmtewisselaars en koude brontemperatuur

Met de berekeningen die in de vorige paragraaf zijn beschreven en de verwarmings- en koelvermogens die in de bijlage staan weergegeven, zijn het primair energieverbruik, het aantal m³ water van 27 °C dat aan derden kan worden aangeboden en het aantal uren dat de kaslucht de 30 °C overschrijdt, berekend.

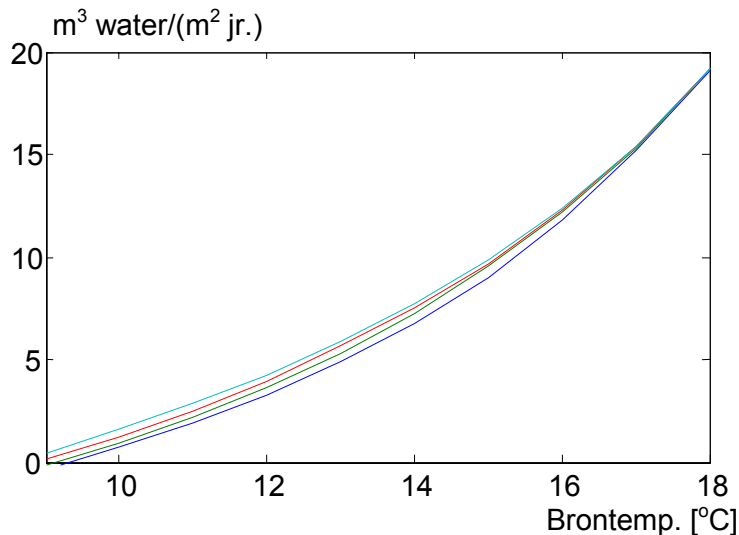
Figuur 3.4. toont het berekend primair energieverbruik van de kas als functie van de twee belangrijkste installatieparameters.



Figuur 3.4. Gasverbruik ten behoeve van de microturbine als functie van de temperatuur van de koude bron voor een viertal FiwiHex-dichtheden.

De grafiek laat zien dat het primair energieverbruik daalt naarmate de brontemperatuur lager wordt en de FiwiHex-dichtheid afneemt. De belangrijkste reden hiervoor is dat de benodigde warmteoverdrachtscoëfficiënt om een bepaald koelvermogen te leveren lineair afneemt met het temperatuurverschil tussen de gemiddelde warmtewisselaartemperatuur en de luchttemperatuur en het daarvoor benodigde elektrisch vermogen zelfs via een derdemachtsfunctie wordt berekend. Dit verklaart het kromme verloop van (gedeelten van) de curven. De rechte stukken ontstaan doordat de derdemachtsfunctie geldt zolang het maximaal koelvermogen niet wordt overschreden (zie § 3.2). Naarmate de FiwiHex-dichtheid kleiner wordt zal het maximaal koelvermogen per FiwiHex vaker bereikt worden. In dat geval loopt het primair energieverbruik op met de brontemperatuur omdat er bij hogere temperaturen meer liters water verpompt moeten worden. Voor dit verpompen van water over de aquifer wordt een bescheiden 0,25 MJ per m³ water in rekening gebracht.

Het vermogen dat bij koeling met een bepaald debiet door het aquiferwater wordt opgenomen, is lineair afhankelijk van het temperatuurverschil tussen ingaand en uitgaand water. De keerzijde van een beperking van het primair energieverbruik dat optreedt bij een verlaging van de temperatuur van de koude bron is dan ook dat er minder liters water van 27 °C worden geproduceerd naarmate de brontemperatuur daalt. In figuur 3.5. is dit effect getoond.

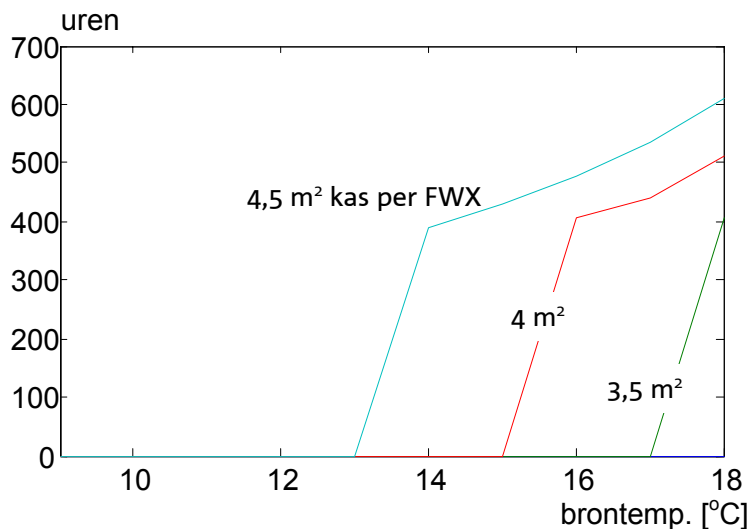


Figuur 3.5. Jaarlijks warmwateroverschot (27 °C) van de kas als functie van de temperatuur van de koude bron voor een viertal Fiiwihex-dichtheden.

De figuur laat zien dat bij gebruik van een koudwaterbron van zo'n 9 °C de hoeveelheid warm water die dan in de zomer op 27 °C gebracht wordt zo klein is geworden dat deze in de winter geheel voor de verwarming van de kas nodig is. De kas koelt in dat geval het water af naar 18 °C en een additionele koelinstallatie moet het water vervolgens verder terugkoelen naar 9 °C. Naarmate de temperatuur van de koude bron stijgt neemt de hoeveelheid water die aan derden ter beschikking kan worden gesteld toe tot een maximum van bijna 20 m³/m² kas. Wanneer wordt verondersteld dat derden dit water van 27 °C afkoelen naar 20 °C, dan komt hierbij een hoeveelheid warmte vrij van bijna 19 m³ aardgasequivalenten. Onder deze uitgangspunten kan in figuur 3.5. de eenheid van de y-as in plaats van m³ water/m² jaar ook worden omschreven als m³ aardgasequivalenten. Als derden het water niet naar 20 °C afkoelen maar naar andere temperaturen, gaat deze numerieke gelijkheid niet meer op. Opvallend in deze figuur is dat de Fiiwihex-dichtheid vrijwel geen invloed heeft. Dit komt voort uit het uitgangspunt dat bij overschrijding van het maximale koelvermogen de kas niet extra geventileerd wordt, maar dat een oplopende kasluchttemperatuur geaccepteerd wordt.

In de kas zoals beschreven in het "voorontwerp" zouden in dat geval enkele ramen geopend worden, waardoor de warmteonttrekking uit de kas via de Fiiwihex-en zou afnemen (ten gunste van koeling met buitenlucht) en daarmee het warmwateroverschot.

Als laatste punt van aandacht in de gevoeligheidsanalyse wordt het effect van de temperatuur van de koude bron en de Fiiwihex-dichtheid op het aantal uren dat de kaslucht boven de 30 °C komt bestudeerd aan de hand van figuur 3.6.



Figuur 3.6. Aantal uren waarop de kasluchttemperatuur de 30 °C overschrijdt als functie van de temperatuur van de koude bron voor een drietal Fiwihex-dichtheden.

De figuur laat zien dat bij gebruik van één Fiwihex op 3 m² kas zelfs bij een brontemperatuur van 18 °C onder de gestelde kasklimaatregeling (geen temperatuurregeling tussen 17 en 27 °C en een reflecterend scherm dat de warmtebelasting onder de 400 W/m² houdt), nooit capaciteitsproblemen ontstaan. Bij een afnemende Fiwihex-dichtheid wordt het belang van een koude bron steeds groter.

De hoekige vorm van de grafieken komt direct voort uit de hoekige vorm van de jaarbelastingduurkromme (zie figuur 3.3.).

De configuratie die in het “voorontwerp” wordt voorgesteld, namelijk één Fiwihex per 3,5 m² bij een koude brontemperatuur van 12 °C zal dus in een gemiddeld Nederlands jaar, mede door het gebruik van het schaduw scherm, altijd voldoende koelcapaciteit kunnen leveren.

4. Conclusies en Aanbevelingen

4.1. Conclusies

Praktijkexperiment

- Het praktijkexperiment heeft laten zien dat de Fiwihex warmtewisselaars de kas prima konden verwarmen, zij het dat de uitkoeling van het water belangrijk achterbleef bij de verwachting.
- De warmteonttrekking die in het kasexperiment in de koelmodus is gerealiseerd, bleef ver achter bij de verwachting, waardoor de koeling belangrijk tekortschoot en de kasluchttemperatuur vaak te hoog werd.

- De achterblijvende prestaties in het praktijkexperiment hebben een aantal plausibele redenen.

Zo was de Fiwihex-dichtheid van één op 4,5 m² kas erg klein en was bovendien de waterverdeling over de zes verschillende warmtewisselaars verre van optimaal.

Door het gebruik van ijzerhoudend grondwater als koelwater in een open systeem is roestvorming opgetreden, waardoor mogelijk een deel van de dunne buisjes die in de Fiwihex warmtewisselaars zitten (een inwendige diameter van 1,2 mm) verstopt is geraakt. Bovendien bleek dat de verdampingscapaciteit van het gewas te laag was om een hoge luchtvochtigheid in de kas te realiseren, zodat de warmtewisselaars nauwelijks profijt konden behalen uit extra koelcapaciteit door condensatie.

In de laatste plaats kon het luchtdebiet door de verschillende warmtewisselaars niet individueel geregeld worden, waardoor niet altijd een goede afstemming van lucht- en waterdebiet kon worden gerealiseerd.

- Het praktijkexperiment heeft veel waardevolle informatie opgeleverd over de robuustheid van de toegepaste elektronica ten behoeve van de regeling van de individuele warmtewisselaars. Dit heeft geleid tot een grondige herziening van het oorspronkelijke ontwerp.

Scenario-analyse

Met behulp van gesimuleerde vraagpatronen voor koeling en verwarming, gecombineerd met in laboratoriumomstandigheden gemeten prestaties voor koelen en verwarmen met individueel geregelde warmtewisselaars, is een scenario-analyse uitgevoerd naar de invloed van de belangrijkste ontwerpparameters voor een kas met Fiwihex warmtewisselaars. De conclusies hieruit zijn:

- Afhankelijk van de temperatuur van de koude bron en bij gebruik van een reflecterend schaduw scherm dat de koellast begrenst op 400 W/m^2 , biedt het gebruik van een FiwiHex-dichtheid van één per 3 m^2 voor alle koude bron-temperaturen vanaf 18 °C voldoende koelcapaciteit om de kas onder de 30 °C te houden. Bij een kleinere FiwiHex-dichtheid moet de brontemperatuur worden verlaagd om voldoende capaciteit te verkrijgen.
- Het verlagen van de temperatuur van de koude bron en het vergroten van de FiwiHex-dichtheid leiden tot een verlaging van het primaire energieverbruik dat door een microturbine wordt gebruikt om elektriciteit voor pompen en ventilatoren te produceren. Het minimum ligt op $2,5 \text{ m}^3$ gas per m^2 per jaar. Bij een brontemperatuur van 18 °C komt het primaire energieverbruik op ongeveer $7 \text{ m}^3/\text{m}^2$ per jaar.
- Het maximale warmwateroverschot (27 °C) bedraagt bijna 20 m^3 per m^2 kas per jaar. In dit geval bedraagt het primair energieverbruik van de kas $6,5$ tot 7 m^3 aardgas (afhankelijk van de FiwiHex-dichtheid). Indien dit warmwateroverschot door derden zou worden uitgeoeld naar 20 °C vertegenwoordigt dit een hoeveelheid warmte die overeenkomt met 19 m^3 aardgas-equivalenten. Gesteld zou dus kunnen worden dat de kas een netto energie-output levert van 19 minus $6,75$ is ruim 12 m^3 aardgas equivalenten per jaar.

4.2. Aanbevelingen

De gunstige resultaten die in de scenarioberekeningen naar voren komen zijn gebaseerd op verwarmings- en koelprestaties van individuele warmtewisselaars op laboratoriumschaal.

Alvorens beslissingen te nemen over de bouw van een complete kas zoals beschreven in “Energieproducerende kas; voorontwerp voor een pilot” is het aanbevelenswaardig om de werking van een serie individueel geregelde FiwiHex warmtewisselaars in combinatie met een centraal geregeld waterdebiet op een soortgelijke schaal als het experiment waarover in dit document is gerapporteerd, te beproeven. Met name de werking van een ontvochtigingsunit zoals in het “voorontwerp” is geschetst, zou moeten worden getoetst alvorens dit op grotere schaal te bouwen. In § 3.2. is al beargumenteerd dat een volledig gesloten kas een grotere warmtebehoefte heeft. Wanneer hieraan wordt toegevoegd dat met een allocatie van een aantal warmtewisselaars voor de ontvochtiging het warmtewisselend oppervlak voor de verwarming zal afnemen (sommige warmtewisselaars zullen immers in dat geval voor ontvochtiging worden gebruikt) wordt het effect op de toename van het elektriciteitsverbruik nog sterker.

Er is dus alle reden om ook op het punt van de simultane ontvochtiging en verwarming een nadere analyse uit te voeren. Eerst ten aanzien van de wenselijkheid, waarbij de toename van het energieverbruik moet worden afgezet tegen de vermindering van de CO₂-behoefte, en vervolgens ten aanzien van een ontwerp.

Bijlage: Histogrammen van verwarming en koeling

Verwarming

Verwarmingsvermogensklasse	aantal uren per jaar
0 – 10	247
10 – 20	415
20 – 30	1301
30 – 40	961
40 – 50	874
50 – 60	593
60 – 70	359
70 – 80	150
80 – 90	43
90 – 100	16
100 – 110	8

Koeling

Koelvermogensklasse	aantal uren per jaar
0 – 40	270
40 – 80	175
80 – 120	125
120 – 160	121
160 – 200	120
200 – 240	105
240 – 280	96
280 – 320	109
320 – 360	91
360 – 400	427