

Energiezuinige ontvochtingstechnieken

Feije de Zwart



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH



Referaat

Naarmate kassen beter geïsoleerd worden, wordt de warmtevraag van de tuinbouw steeds meer gedomineerd door de gewasverdamping. Beperking van de verdamping is dus de eerst aangewezen weg om energie te besparen, maar een minimum-verdamping blijft nodig voor het gewas.

Om dit zo energie-zuinig mogelijk te laten verlopen zijn interne ontvochtigingssystemen in opkomst. Deze maken het mogelijk om het overmatig vocht uit de kaslucht te condenseren op een koud oppervlak om daarmee latente warmte terug te winnen.

In dit project zijn de perspectieven van twee ontvochtiger-typen beproefd. Een 'stekker-ontvochtiger' met een efficiëntie van 1.9 liter/kWh en een luchtbehandelingskast waarmee 3 liter per kWh kan worden ontvochtigd. Beide efficiënties zijn inclusief het stroomverbruik voor de luchtverdeling via slurven onder de goot.

Dit rapport laat zien dat dit type ontvochtigers enorm kan helpen om met behulp van groene stroom zonder fossiele energie de tuinbouw te verwarmen. Hierbij speelt de warmtepomp de hoofdrol. Om volledig met de warmtepomp te kunnen verwarmen is seizoensbuffering noodzakelijk en moet de ontvochtiger warmte kunnen oogsten voor opslag.

Dit project is gefinancierd door Kas Als Energiebron, het onderzoeksprogramma dat wordt ondersteund door het ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur en LTO-Glaskracht Nederland.

Abstract

As greenhouses become better insulated, their heat demand is increasingly dominated by crop evaporation. Limiting evaporation is therefore the first way to save energy, but minimum evaporation remains necessary.

To make this as energy-efficient as possible, internal dehumidification systems are emerging. These allow the condensation of excess moisture from the greenhouse air on a cold surface while recovering the latent heat.

In this project, the prospects of two types of dehumidifiers were tested. A 'plug-in dehumidifier' with an efficiency of 1.9 litres/kWh and an air treatment unit that works with an efficiency of 3 litres/kWh. Both efficiencies include the power consumption for air distribution through sleeves under the gutter.

This report shows that these internal dehumidifiers can play a big role in heating greenhouses without fossil fuels. In this, the heat pump plays the leading role. In order to be able to heat completely with the heat pump, seasonal heat storage is necessary and for that the dehumidifier should be able to harvest heat for storage.

The project is funded by Kas Als Energiebron, a research program supported by the Ministry of Agriculture Fisheries, Food security and Nature and LTO-Glaskracht Nederland.

Rapportgegevens

Rapport WPR-1436

Projectnummer: 3742348200

DOI: <https://doi.org/10.18174/691983>



Ministerie van Landbouw, Visserij,
Voedselzekerheid en Natuur



**KAS ALS
ENERGIEBRON**

Disclaimer

© 2025 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research,

Businessunit Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, wur.nl/plant-research

Kamer van Koophandel-nr.: 09098104 | BTW-nr.: NL 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vervaelvoudigd, 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 Stichting Wageningen Research.

Stichting Wageningen Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen

Adresgegevens

Wageningen University & Research, Businessunit Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Postbus 644, 6700 AP Wageningen

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen

T +31 (0)317 48 56 06

T +31 (0)317 48 60 01

wur.nl/glastuinbouw

wur.nl/glastuinbouw

Inhoud

Inleiding	5
1 Verschillende ontvochtigingstechnieken	7
2 Praktijkexperimenten met latente warmte terugwinning	13
2.1 Resultaten met directe latente warmte terugwinning	14
2.1.1 Klimatiseringssysteem en energiegebruik	15
2.1.2 Gewasproductie	22
2.2 Resultaten met bufferbare latente warmte-terugwinning	24
2.2.1 Teeltklimaat en energiegebruik	26
2.2.2 Gewasproductie	31
2.3 Conclusies uit twee jaar experimenten met ontvochtiging met latente warmteterugwinning	33
3 Perspectief bij andere omstandigheden dan in de proeven	34
3.1 Van experiment naar simulatiesettings	34
3.1.1 Gebruik van de AVS-D ontvochtiger voor seizoensbuffering.	37
3.1.2 Gebruik van de beide ontvochtigers in een belichte komkommerteelt.	40
3.1.3 Energieverbruik bij verlaagde luchtvochtigheid	42
4 Conclusies	45
Literatuur	47

Inleiding

Naast de beheersing van de temperatuur, de lichtintensiteit en de CO₂-concentratie is de beheersing van de luchtvochtigheid een belangrijk aspect van de kasklimaatregeling. Met de luchtvochtigheidsbeheersing is een substantiële hoeveelheid energie gemoeid maar nieuwe technieken maken het mogelijk om die ontvochtiging op een energiezuiniger manier te laten verlopen.

Het laagst hangend fruit met betrekking tot energiezuinige ontvochtiging is: minder ontvochtigen. Dit mechanisme is de reden dat de vanaf ongeveer 2010 in zwang gekomen geforceerde buitenlucht-inblaassystemen als energiezuinig te boek staan. Het simpelweg vervangen van schermkier- en raamregeling voor de beheersing van de luchtvochtigheid door het inblazen van buitenlucht maakt de ontvochtiging echter nauwelijks efficiënter, ook al niet omdat de ventilatoren het elektriciteitsverbruik van de kas doen toenemen. Het systeem gaat pas energiebesparing opleveren als de nauwkeuriger stuurmogelijkheid die het oplevert wordt benut voor het toestaan van een gemiddeld hogere luchtvochtigheid.

Aan dat verhogen van de luchtvochtigheid in de kas zit echter een tuinbouwkundige grens. Een hogere luchtvochtigheid leidt in de regel tot een hogere ziektedruk, waardoor tuinders daar terughoudend mee zijn. Bovendien zijn tuinders bezorgd over de teruglopende gewasverdamping bij het aanhouden van een hogere luchtvochtigheid.

Gegeven de noodzaak voor ontvochtiging is het relevant om te zoeken naar systemen die die ontvochtiging op een energie-efficiëntere realiseren. Hoofdstuk 1 geeft een overzicht van de beschikbare technieken en de belangrijkste kenmerken daarvan. Het overzicht laat zien dat vooral systemen die de waterdamp-kringloop beter gesloten kunnen krijgen het energieverlies van de kas substantieel kunnen verlagen.

Om kennis en ervaring met zulke systemen op te doen, en deze te delen met de glastuinbouwsector heeft Wageningen UR met financiering van het onderzoeksprogramma Kas Als Energiebron en support van Van Dijk Heating twee uitvoeringsvormen van ontvochtigers die de waterdamp-kringloop meer kunnen sluiten bestudeerd. Hiervoor werd een onbelichte komkommerteelt gebruikt. De resultaten, besproken in hoofdstuk 2, geven een beeld van de technische specificaties en het effect op het energieverbruik. Er blijkt een forse verlaging van de warmtevraag en/of verduurzaming van de warmtevraag mogelijk. En, doordat de kas met zo'n systeem meer gesloten is, geeft het ook nog een kleine verlaging van het CO₂-verbruik. De meetresultaten laten zien dat het resterende gasverbruik in deze teelten tot onder de 10 m³/(m² jaar) kon worden gebracht bij een elektriciteitsverbruik van rond de 30 kWh/(m² jaar).

De teelten in het experiment waren echter wat korter dan in de praktijk, en dus wort er in hoofdstuk 3 met behulp van modelsimulaties gekeken naar het energieverbruik bij een 6 weken langere teelt. Ook wordt er gerekend aan het perspectief voor een belichte komkommerteelt.

Als er in een belichte teelt gebruik wordt gemaakt van seizoensbuffering dan blijkt een kas met het bestudeerde ontvochtigingssysteem vrijwel volledig met een warmtepomp te kunnen worden verwarmd. Een volledig gasloze teelt is daarmee mogelijk. De combinatie van de energiezuinige ontvochtiger, een goed scherm-systeem en de hoge luchtvochtigheid waarmee in het experiment geteeld is, maakt dat het elektriciteitsverbruik voor de verwarming dan ongeveer 75 kWh/(m² jaar) bedraagt.

Hoofdstuk 3 legt de achtergrond van deze prestatie uit en laat zien dat dit mogelijk gemaakt wordt door de toepassing van seizoensbuffering.

Hoofdstuk 3 laat ook zien dat, ondanks het feit dat de toegepaste techniek energie-efficiënte ontvochtiging mogelijk maakt, er nog steeds een duidelijke toename van het energiegebruik is wanneer de luchtvochtigheid wordt verlaagd en het gewas meer gaat verdampen.

In hoofdstuk 4 beschrijft de conclusies die uit dit onderzoek kunnen worden getrokken.

1 Verschillende ontvochtigingstechnieken

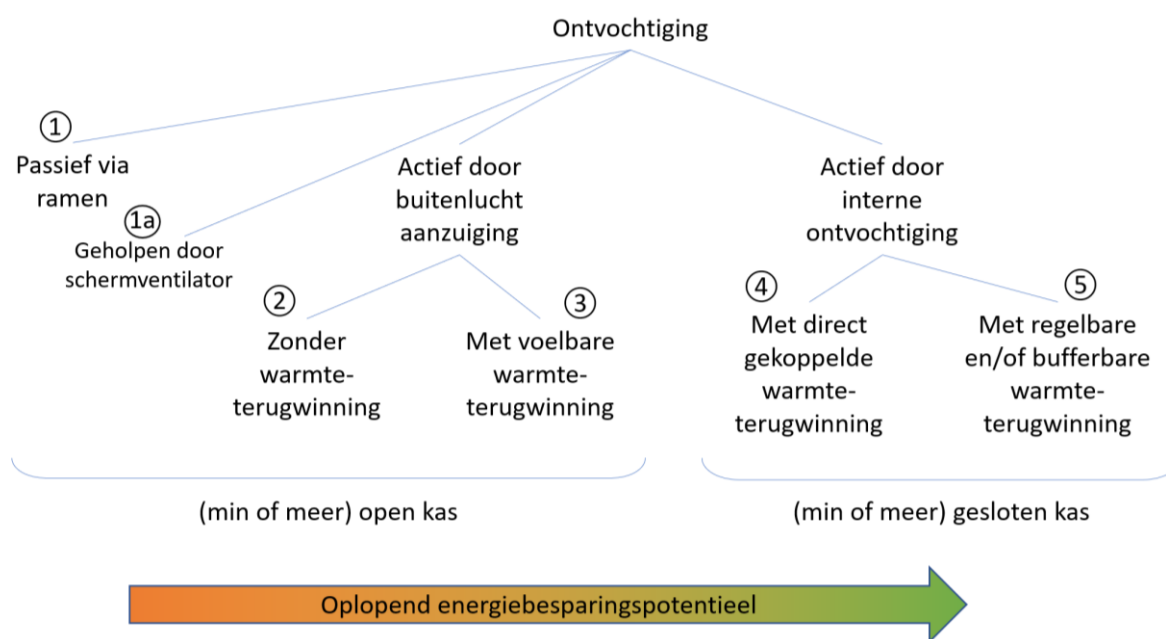
De gemakkelijkste manier waarmee kassen ontvochtigd kunnen worden is het openzetten van ramen. Of eigenlijk is de nóg eenvoudigere wijze waarop vocht wordt afgevoerd de condensatie tegen het kasdek en het verlies via lek. Dit zijn echter niet-geregelde vormen van ontvochtiging en worden daarom niet als ontvochtigings'techniek' gerekend.

Het open zetten van ramen is een vrij passieve vorm van ontvochtiging, die nog iets gestimuleerd kan worden door het gelijktijdig opstoken van de verwarming.

Met de opkomst van Het Nieuwe Telen zijn er echter vele verschillende varianten van actieve ontvochtiging ontwikkeld. Bij al deze technieken is er een geregelde hoeveelheid lucht die door de kas wordt geblazen in plaats van dat er gebruik gemaakt wordt van passieve luchtuitwisseling. Hierdoor ontstaat er een meer gerichte luchtstroom zodat de hoeveelheid ontvochtiging nauwkeurig kan worden gedoseerd. En het voorkomen van te veel ontvochtiging is de eerste mogelijkheid om energie te besparen.

Substantiële besparing op energie wordt echter alleen gerealiseerd als er daarnaast gebruik wordt gemaakt van warmte terugwinnende ontvochtigingssystemen.

Schematisch kunnen ontvochtigingssystemen worden geclassificeerd zoals in onderstaand schema.



Figuur 1 Schematische weergave van ontvochtigingssystemen.

Voor al deze technieken wordt in het navolgende middels een eenvoudige schets en een beschrijving de kern van de werking van de techniek uiteengezet. Hierbij wordt de nummering uit het schema in figuur 1 aangehouden.

1. Passief via de ramen

Als in een kas de ramen worden opengezet zal er kaslucht worden uitgewisseld met buitenlucht en omdat de buitenlucht in Nederland bijna altijd minder vocht bevat dan de kaslucht, althans voor gewassen die rond de 18°C of warmer gestookt worden, wordt er hierdoor vocht afgevoerd. De luchtuitwisseling tussen kaslucht en buitenlucht hangt af van de raamstand (en natuurlijk ook het raamoppervlak en de al dan niet aanwezigheid van insectengaas), de windsnelheid en het temperatuurverschil tussen binnen en buiten. Daarnaast is het aantal schermen en de luchtdoorlatendheid van die schermen van grote invloed op de vochtafvoer.

Bij windrig weer en volledig geopende ramen kunnen Nederlandse kassen al gauw $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ uur})$ lucht uitwisselen en als het buiten 15 °C is en 80%RV en in de kas 18 °C en 85%RV kan hiermee $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ uur}) \times (13.3 \text{ gr}/\text{m}^3 - 10.4 \text{ gr}/\text{m}^3) = 144 \text{ gr}/(\text{m}^2 \text{ uur})$ worden ontvochtigd. Die 13.3 en 10.4 gr/m³ zijn de absolute vochtgehaltes van respectievelijk de kaslucht en de buitenlucht onder de genoemde omstandigheden.

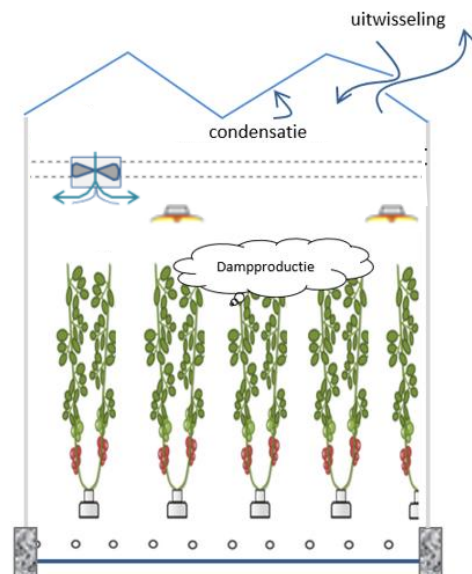
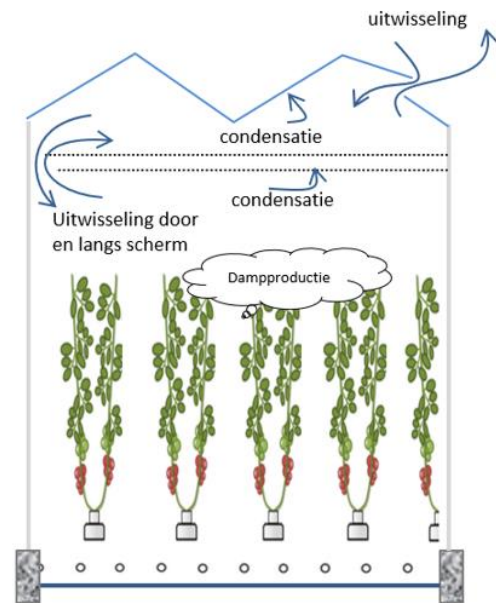
Naarmate het buiten kouder of droger wordt en in de kas warmer of vochtiger, neemt de vocht-afvoer capaciteit toe. Afgezet tegen de verdamping van het gewas, die onder donkere omstandigheden tussen de 10 gr/(m² uur) voor weinig verdampende gewassen en 30 gr/(m² uur) voor veel verdampende gewassen ligt, is de ontvochtigingscapaciteit via de ramen in principe meestal ruim voldoende en kan de hoeveelheid afgevoerd vocht worden geregeld door de ramen naar behoefte open te zetten. Dat er bij deze vorm van ontvochtiging veel energie verloren gaat is duidelijk. Met het openen van de ramen wordt de kas die in het ontwerp zorgvuldig kier-vrij is gebouwd doelbewust 'lek' gemaakt.

Als er schermen gebruikt worden om licht af te schermen, de kas te isoleren of de uitstraling te beperken kunnen deze een te grote obstructie voor de vocht-uitwisseling vormen en kunnen er schermkieren getrokken worden. Ook hier blijkt weer dat er isolatie wordt opgeofferd om voldoende afvoer van vocht te realiseren.

1a. Passief via de ramen, geholpen door schermventilator

Vooral in kassen met belichting, waardoor de vochtproductie, en dus ook de ontvochtigingsbehoefte aanzienlijk kan zijn (ordegrootte 70 gr/(m² uur)), kunnen schermen een te grote obstructie zijn om het vocht op passieve manier af te voeren. In dat geval kunnen scherm-ventilatoren helpen om zonder grote schermkieren het vocht toch afgevoerd te krijgen.

De benodigde raamstanden boven het gesloten scherm worden hierdoor gemiddeld kleiner. Een schermventilator maakt de ontvochtiging iets energiezuiniger omdat de kas door het gesloten houden van de schermen iets minder straling verliest. Echter, omdat schermventilatoren vooral in de belichte teelt worden toegepast waar perioden met een te hoog vochtgehalte vaak samenvallen met perioden waarin de kas door de warmte-input van de lampen toch al te warm was zullen schermventilatoren nauwelijks bijdragen aan de verlaging van de verwarmingsbehoefte.



2. Actieve ontvochtiging zonder warmteterugwinning

Met de opkomst van Het Nieuwe Telen zijn tuinders ontvochtigingssystemen gaan gebruiken die berusten op het nauwkeurig gedoseerd inblazen van buitenlucht. In vrijwel alle gevallen wordt de buitenlucht vanuit een paar punten van buiten aangezogen en via slurven met gaatjes door de kas verdeeld. Er zijn systemen waar de lucht bovenin de kas wordt ingeblazen en systemen waar de lucht van onderaf wordt ingeblazen.

Vaak wordt de lucht bij intrede opgewarmd naar de kasluchttemperatuur om een egale horizontale temperatuurverdeling te bevorderen en condensatie op de slurf te voorkomen.

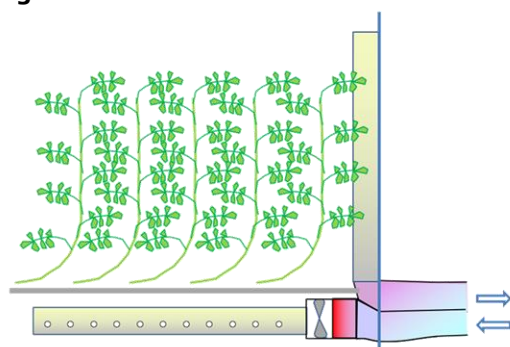
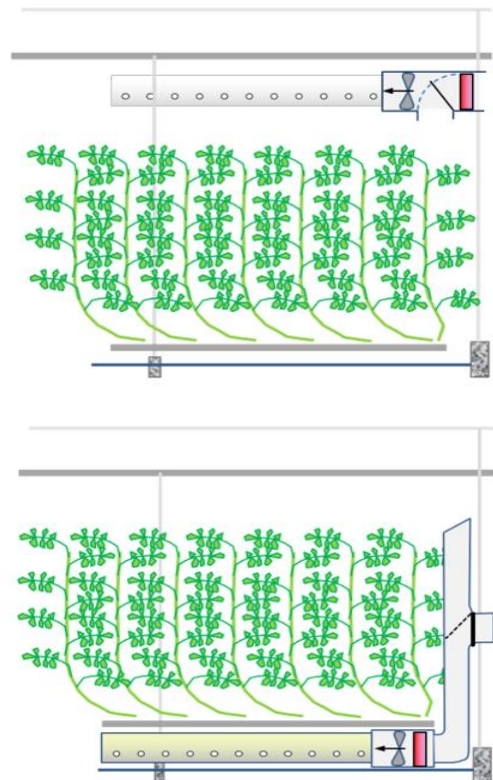
Vanuit energetisch oogpunt maakt het echter niet uit of de buitenlucht meteen al op kasluchttemperatuur wordt ingebracht of dat het als koude lucht wordt ingeblazen en via de buisverwarming wordt opgewarmd. In beide gevallen betreft de directe energiebehoefte voor deze vorm van ontvochtiging de opwarming van een x-aantal m³ buitenlucht naar de kasluchttemperatuur en het maakt niet uit waar dat gebeurt.

Soms wordt gesteld dat het vooraf opwarmen een efficiëntere vorm van verwarmen is omdat de gebruikte verwarmingsblokken met een lage watertemperatuur kunnen werken en dus het rendement van de verwarmingsapparatuur verbeteren. In principe is dit waar, maar uit kosten oogpunt worden de verwarmingsblokken vaak klein gehouden, waardoor er toch vrij warm water voor de verwarming moet worden gebruikt. Ook is het aandeel van de opwarming van de buitenlucht in de totale verwarmingsbehoefte klein, en dan met name in de koudere periodes, zodat deze potentiële efficiency verbetering nauwelijks zoden aan de dijk zet. Vandaar ook dat er in de praktijk vaak kleine verwarmingsblokken (= verwarmingsblokken met een klein verwarmend oppervlak) worden gebruikt.

Naast het besparende effect van een precies regelbare ontvochtigingsdebiet levert dit type ontvochtigingsapparaat een energie-besparend effect doordat het een gerichte luchtstroom vanuit het kascompartiment naar de ruimte boven het scherm levert. Hierdoor wordt de noktemperatuur wat hoger, en daardoor de schermtemperatuur en wordt het stralingsverlies vanuit de kas wat kleiner.

3. Actieve ontvochtiging met voelbare warmteterugwinning

De essentie van een ontvochtigingssysteem met voelbare warmte-terugwinning is dat niet alleen de lucht-inlaat bij een specifieke opening plaatsvindt maar ook (tenminste een deel) van de lucht-uitlaat. Een dergelijk ontvochtigingssysteem wordt ook wel een balansventilatiesysteem genoemd en de terugwinning van voelbare warmte wordt ook wel met warmte-recuperatie aangeduid. Het systeem heeft specifieke inblaas- en uitblaasventilatoren. Bekende merknamen van een ontvochtigingssysteem met voelbare warmteterugwinning zijn het Air-en-Energy systeem van Maurice Kassenbouw en de AVS-WTW van Van Dijk Heating. Ook in de moderne utiliteitsbouw wordt dit type luchtbehandelingssystemen veel gebruikt om gebouwen van frisse lucht te voorzien met een beperkt warmteverlies.



Het principe van het apparaat is dat de uitgaande vochtige en warme kaslucht naar buiten wordt geleid terwijl het, gescheiden door een dunne plaat, langs de tegelijkertijd binnenkomende buitenlucht stroomt. De buitenlucht warmt hierdoor op. Hiermee komt de buitenlucht al bijna op kasluchttemperatuur de kas binnen, zodat het voelbare warmteverlies van het 'gewone' buitenlucht systeem deels wordt voorkomen. Als de warmtewisselaar in de elkaar kruisende luchtstromen heel groot zou zijn, komt de droge buitenlucht op dezelfde temperatuur binnen als de af te voeren vochtige kaslucht. In dat geval zou 100% van de voelbare warmte teruggewonnen worden. In de praktijk is de warmtewisselaar echter beperkt van afmeting en vaak is ook het uitgaande debiet wat kleiner dan het ingaande luchtdebiet. Hierdoor zijn de terugwin percentages in de praktijk ergens tussen de 70 en 80%.

Concreet betekent dit dat bij een 10 °C temperatuurverschil tussen de binnen- en buitenlucht de binnenkomende lucht maar 3 tot 2 °C kouder is dan de kaslucht.

In geval de kaslucht behoorlijk vochtig is en de buitenlucht koud zal er zeker waterdamp in de warmtewisselaar condenseren en stroomt er bij gebruik water uit de warmtewisselaar. Daarom wordt vaak gezegd dat deze apparaten niet alleen voelbare, maar ook latente warmte terugwinnen. Het klopt dat er latente warmte wordt gewonnen, maar het wordt niet 'terug'gewonnen. De latente warmte helpt om de temperatuur van de ingaande lucht omhoog te krijgen, dus om het voelbare warmteverlies te verminderen. De passieve lucht/lucht wisselaar in deze ontvochtiger brengt de ingaande lucht nooit op een hogere temperatuur dan de af te voeren kaslucht en kan dus nooit meer dan de voelbare warmte worden terugwinnen. De latente warmte van de kaslucht speelt wel een rol in die zin dat naarmate de kaslucht vochtiger is het terugwinnen van voelbare warmte gemakkelijker gaat en het terugwin-rendement hoger zal zijn.

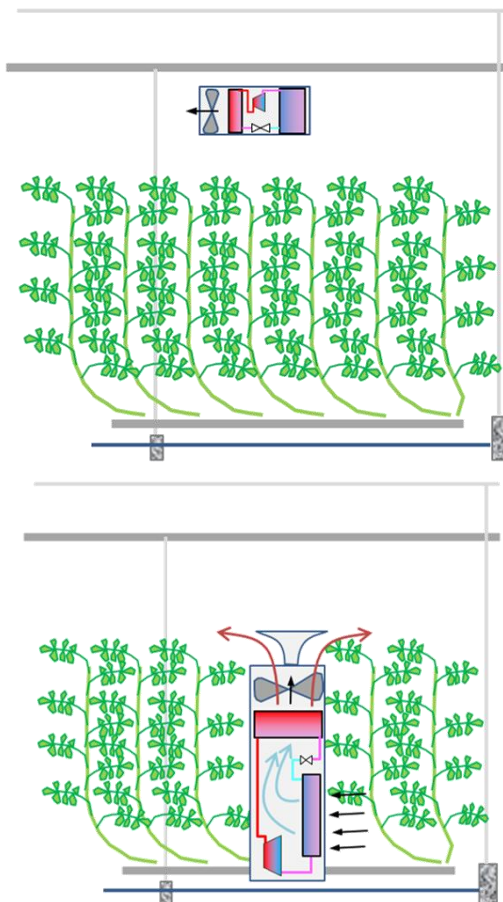
Het feit dat het balansventilatiesysteem de uitgaande lucht vanonder het scherm trekt maakt dat er met deze vorm van ontvochtiging geen (bij 100% balansventilatie), of in ieder geval een veel kleinere (bij bijvoorbeeld 80% balansventilatie), gerichte luchtstroom door het scherm optreedt. Het gewas krijgt met dit systeem dus met wat meer uitstraling te maken, waardoor het overal besparingseffect op het warmtegebruik wat kleiner is dan verwacht zou worden op basis van de teruggewonnen voelbare warmte.

4. Interne ontvochtiging met direct gekoppelde warmteterugwinning

Vanwege de toenemende energiekosten loont het steeds meer om bij ontvochtiging gebruik te maken van volledige warmteterugwinning, dus zowel de voelbare warmte als de latente warmte. In de consumentenmarkt is dit te zien in de steeds gebruikelijker wordende warmtepomp wasdroger in plaats van de wasdroger met een slang naar buiten. De apparaten kenmerken zich door hun eenvoud aangezien ze alleen een stekker en een water-uitloop hebben (uiteeraard naast de lucht in- en uitlaat).

Voor de glastuinbouw kennen we deze 'stekker-ontvochtigers' als de DryGair, de VanWijk-ontvochtiger en de Vifra-ontvochtiger en recent heeft Bosman-vanZaal de OptiDry aan dit rijtje toegevoegd. En in het kasexperiment waarover in het volgende hoofdstuk verslag wordt gedaan is een ontvochtigings-systeem op dit principe gebouwd op basis van DryFast bouwdrogers.

Alle uitvoeringsvormen hebben gemeen dat het hart van het systeem wordt gevormd door een koelblok, een elektrisch aangedreven compressor en een verwarmingsblok. Daarnaast heeft de luchtbehandelingskast een ventilator die de lucht er doorheen trekt. De compressor trekt een onderdruk in het koelblok waardoor het daar aanwezige koudemiddel gaat verdampen en de koelbloktemperatuur ver onder de kasluchttemperatuur trekt.



Aan de perszijde van de compressor wordt het koudemiddel heet zodat het verwarmingsblok veel warmer wordt dan de kasluchttemperatuur. Als er lucht door de machine getrokken wordt condenseert er vocht op het koude blok, waardoor de lucht wordt ontvochtigd. De lucht koelt daardoor natuurlijk ook af, maar omdat de lucht daarna door het verwarmingsblok stroomt, wordt deze weer opgewarmd. De afkoeling en condensatie op het koude blok komt doordat de compressor voelbare én latente warmte aan het koelblok onttrekt. Deze voelbare en latente warmte wordt door de compressor op hogere temperatuur aan het verwarmingsblok afgeleverd. Alle voelbare en latente warmte die tijdens de ontvochtiging aan de kaslucht wordt onttrokken wordt daarmee teruggewonnen. Het terugwinnen van voelbare warmte is in feite een 'sigaar uit eigen doos', want die voelbare warmte was juist daarvoor op het koelblok 'verloren geraakt'. De latente warmte is echter te zien als energie-winst omdat het eerst energie in de vorm van waterdamp was, maar nu in de vorm van voelbare warmte aan de kaslucht wordt afgegeven. Op kasniveau is dit 's nachts overigens ook geen energie-winst omdat het gewas gedurende de nacht precies ook deze latente warmte aan de kaslucht onttrekt bij de gewasverdamping. Als er zonlicht of kunstlicht op het gewas valt is de latente warmte die bij de ontvochtiger vrij komt wél als winst op te vatten. Overdag is namelijk niet zozeer de kaslucht de bron van energie voor de verdamping, maar het geabsorbeerde licht.

Doordat deze 'stekker-ontvochtigers' latente warmte omzetten in voelbare warmte en omdat de compressor elektriciteit gebruikt, is de lucht die uit de machine komt altijd warmer dan de lucht die er in stroomt. Als de kaslucht erg vochtig is (bijvoorbeeld 90%) belooft de temperatuurverhoging 5 - 8 °C (afhankelijk van de hoeveelheid lucht die door de ontvochtiger wordt geblazen).

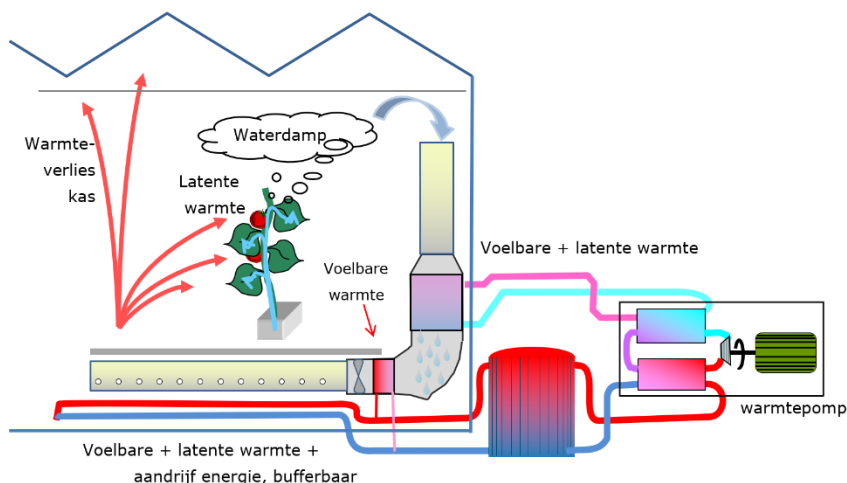
Als vuistgetallen voor een stekker-ontvochtiger kan gehanteerd worden dat bij een systeem dat $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ uur})$ rondblaast om $20 \text{ gram}/(\text{m}^2 \text{ uur})$ te ontvochtigen, de uitblaas $20 \text{ W}/\text{m}^2$ verwarming leveren met lucht die 6.5 °C warmer is dan de kaslucht.

Het belangrijkste prestatie-getal van stekker-ontvochtigers is het aantal kWh elektriciteit dat gebruikt wordt per liter ontvochtiging. De nu bekende installaties laten daarbij een range zien van 2 liter per kWh tot 4 liter per kWh, maar de gecommuniceerde prestatiecijfers worden niet altijd genoemd voor dezelfde luchtcondities. Een systeem dat bijvoorbeeld 2.5 liter per kWh in lucht van 18 °C en 60%RV noemt is mogelijk in het gebruik in een kas vergelijkbaar met een systeem dat 3.5 liter per kWh noemt voor lucht van 25 °C en 85%RV. Nu er steeds meer gebruik gemaakt wordt van dit soort systemen in de glastuinbouw zullen er gaandeweg meer prestatiecijfers onder praktijk-omstandigheden beschikbaar komen zodat de beter presterende installaties onderscheiden kunnen worden van de minder presterende installaties.

5. Interne ontvochtiging met bufferbare warmteterugwinning

Het feit dat interne ontvochtigers met direct gekoppelde warmteterugwinning de latente warmte direct weer aan de kaslucht afgeven is 's nachts meestal geen probleem. Immers, verwarming is nodig omdat het gewas verdampt en dus warmte aan de kaslucht onttrekt. De interne ontvochtigers creëren op die momenten een gesloten energie-kringloop voor de verdamping en voegen daar nog het elektriciteitsverbruik van de compressor aan toe. Met 5 tot $10 \text{ W}/\text{m}^2$ is dit additionele energie-input die al gauw nodig is om het temperatuurverschil tussen binnen en buiten in stand te kunnen houden.

Zodra er echter (zon)licht in de kas komt is het de absorptie van dat licht dat de energie-input voor de verdamping wordt, waardoor de warmte-output van een 'stekker-ontvochtiger' al gauw te veel gaat worden. Uiteraard zou de kas dan kunnen gaan kieren en luchten (= de isolatiegraad verlagen), maar als er later in het etmaal ook perioden zijn waarin er meer warmte nodig is dan er vanuit de ontvochtiging beschikbaar komt is het vanuit energie-oogpunt beter om het energieverlies door kieren en luchten te voorkomen en het energie-overschot te gaan bufferen.



Deze functionaliteit wordt geboden door de luchtbehandelingskasten die met een watergevoed koelblok en een watergevoed verwarmingsblok en een centraal opgestelde warmtepomp die voor het warme en het koude water zorgt. Aangezien de koppeling tussen de warmtepomp en het koel- en verwarmingsblok met water plaatsvindt kunnen voorraden aan warm of koud water relatief gemakkelijk worden gerealiseerd. In de bovenstaande tekening is de warme kant van de warmtepomp van een buffer voorzien, maar dat zou ook de koude kant kunnen zijn. In de praktijk gebouwde installaties hebben vaak zelfs zowel een warme als een koude buffer, al was het alleen al om met een wat kleiner warmtepomp-vermogen de piek-behoeftes in verwarming of koeling op te kunnen vangen.

Luchtbehandelingskasten op basis van een verwarmingsblok en koelblok die met een warmwater en koelwatercircuit met een centrale warmtepomp gekoppeld zijn komen op steeds meer bedrijven voor. De technologie is vrij eenvoudig en het feit dat er ook mee ontvochtigd kan worden in 'klamme' perioden (denk aan de herfstperiode) spreekt tuinders aan.

Het ontvochtigingsprincipe is al vele jaren bekend (de Zwart, 2012) en er is een hele lijst van tuinbouwondernemers die met behulp van dit principe hun energieverbruik reduceren (Terlaak, Duivestijn, Optiflor, Koppert Cress, Lans en vele anderen). Uit vorige rapportages over de werking en de teeltkundige mogelijkheden zijn gepubliceerd rond een aantal successievelijke onderzoeksjaren in de fossielvrije tomatenteelt (Helmus, 2023).

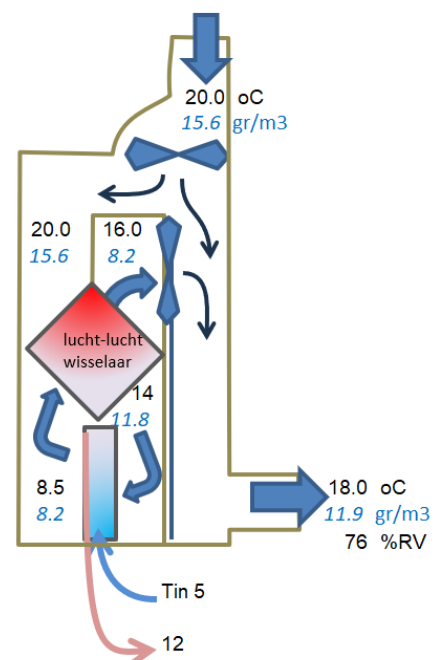
En, zeer recent (2025) is er gepubliceerd over de voorlopige resultaten van een 'fossievrije belichte komkommerteelt' bij Botany in het kader van het Interreg project 'Energlik'

(<https://interregvlaned.eu/projecten/energlik/realisaties/vrijwel-volledige-warmterecuperatie-door-dampdichte-schermmaterialen-en-interne-ontvochtiging-in-een-belichte-komkommerteelt>).

In het voorliggende project is in het tweede jaar gewerkt met een verbeterd ontwerp van de luchtbehandelingskast waarmee de latente warmte uit de kaslucht wordt gewonnen. Het betreft een systeem waarmee het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp per eenheid ontvochtiging fors kan worden verlaagd. De warmtepomp die de warmte en koude voor de huidige standaard luchtbehandelingskasten verzorgt, gebruikt daarvoor gemiddelde 0.5 kWh per liter. Anders gezegd, de gebruikelijke luchtbehandelingskasten leveren een ontvochtigingsprestatie van 2 liter per kWh en zijn daarmee vergelijkbaar met de minst efficiënte stekker-ontvochtigers.

De verbetering die in dit project is ontwikkeld en gedemonstreerd, is dat er naast het standaard koelblok ook een passieve lucht-lucht wisselaar in de luchtbehandelingskast is geplaatst. Deze passieve wisselaar geeft een voorkoeling van de te ontvochtigen kaslucht met behulp van de koude lucht die uit het koelblok komt. In het nevenstaande plaatje wordt de kaslucht van 20 °C in de passieve wisselaar voorgekoeld naar 14 °C. Bij die voorkoeling vindt ook al een stuk ontvochtiging plaats. Het koelblok koelt en droogt de lucht verder naar 8.5 °C en een absolute luchtvochtigheid van 8.2 gram/m³ (dat is bij die temperatuur een RV van 95%). Deze koude lucht wordt op de weg terug naar de kas in de passieve wisselaar teruggewarmd naar 16 °C. Door deze ontvochtigde lucht te mengen met onbehandelde kaslucht kan de lucht uiteindelijk met 18 °C de kas in worden geblazen. Een soortgelijke luchtbehandelingsunit wordt ook in het Energlik-project gebruikt, maar met dit verschil dat in het Energlik-project het koelblok niet met koud water wordt gevoed, maar met vloeibaar gemaakte CO₂. Het koelvermogen komt dan door de energie-onttrekking die gepaard gaat aan de expansie van het vloeibare CO₂ tot gasvorming CO₂ (alles in een gesloten systeem). Een warmtepomp maakt de CO₂ weer vloeibaar en maakt de daarbij vrijkomende energie beschikbaar voor de kasverwarming.

In beide projecten zorgt de passieve wisselaar ervoor dat het stroomverbruik voor de ontvochtiging ongeveer gehalveerd kan worden. Bovendien is met dit systeem nog maar weinig na-verwarming nodig en kan de luchtbehandelingskast zonder verwarmingsblok worden uitgevoerd.



2 Praktijkexperimenten met latente warmte terugwinning

Teneinde zorgvuldig gemeten prestatiecijfers van nieuwe ontwikkelde energiezuinige ontvochtigingsapparatuur te verzamelen zijn er in 2023 en 2024 gedetailleerde metingen gedaan aan de vocht- en warmtehuishouding in een onbelichte komkommerteelt in de zogenaamde 'Winterlichtkas' van de onderzoeksfaciliteit van Wageningen UR in Bleiswijk. De Winterlichtkas is een proefkas van 500 m² die deze naam heeft gekregen omdat er bij de bouw in 2016 heel veel aandacht is besteed aan een maximale lichtdoorlatendheid, zodat er vooral in de winter zoveel mogelijk natuurlijk licht binnen komt. Dit heeft vorm gekregen in de toepassing van zeer grote ruiten (3.00 x 2.00 meter), opengewerkte tralies en poten en zorgvuldig geïnstalleerde schermssystemen. De diffuse lichttransmissie van deze proefkas bedraagt 72%. Dit is zeer hoog voor een proefkas van beperkte afmetingen, en vergelijkbaar met de lichttransmissie van moderne kassen.

Bij de bouw was deze kas voorzien van een ontvochtigingssysteem met voelbare warmte-terugwinning, een Van Dijk AVS-WTW (de afkorting staat voor Actief Ventilatie Systeem-WarmteTerugWinning). De bestaande luchtbehandelingskast had een aanzuigpunt bovenin de kas en een luchtverdeelsysteem met slurven onder de teeltgoten.

Om ervaring op te kunnen doen met het telen met lage watertemperaturen in het verwarmingssysteem is de kas voorzien van extra verwarmingsbuizen in het ondernet. Dit grotere VO, en de toepassing van een scherm-systeem bestaande uit drie schermlagen, maakt dat de benodigde aanvoertemperatuur van de verwarming bijna nooit boven de 45 °C uitkomt.

Het verwarmingssysteem is voorzien van een warmtemeter en stroom-verbruikende apparaten zijn aangesloten op een elektriciteitsmeter, waardoor de energiestromen nauwkeuring in kaart gebracht kunnen worden.



De kas is voorzien van een apart geregeld gevelnet, waardoor de geveleffecten, die in kleine proefkassen altijd substantieel zijn, zoveel mogelijk kunnen worden weggenomen. Om condensatie van vocht tegen de gevel zoveel mogelijk te voorkomen (omdat hierdoor de ontvochtigingsbehoefte van de proefkas lager zou zijn dan die van een praktijkkas op grote schaal) is de gehele gevel voorzien van een transparante niet geperforeerde folie als extra laag voor de toch al relatief hoge isolatiewaarde van de dubbelwandige kanaalplaten die in de gevel zijn gebruikt.

Ten behoeve van de experimenten rond energiezuinige ontvochtiging is in 2023 de oorspronkelijke AVS-WTW unit omgebouwd tot een luchtbehandelingskast met volledige latente warmteterugwinning in de vorm van een 'stekker-ontvochtiger' (zie pagina 10). Hiertoe zijn er drie elektrische bouwdrogers in de bestaande omkasting ingebouwd. De ventilatoren voor de aanzuiging van de lucht uit de kas en de verspreiding van de behandelde lucht door de kas konden blijven zitten. En daar waar de ontvochtigingscapaciteit van de AVS-WTW geregeld werd door meer of minder buitenlucht aan te voeren regelde de omgebouwde kast de ontvochtigingscapaciteit door 1, 2 of 3 bouwdrogers aan te zetten. Paragraaf 2.1 bespreekt de installatie in meer detail en bespreekt de resultaten van $\frac{3}{4}$ jaar komkommerteelt met deze ontvochtiger.

In najaar 2023 is een tweede type interne ontvochtiger geplaatst, namelijk een luchtbehandelingskast met passieve tussenkoeler (zie pagina 13). Hiervoor heeft Van Dijk Heating een nieuw ontwerp gemaakt voor een luchtbehandelingskast met vrijwel dezelfde inbouwmaten als de AVS-WTW. Hierdoor kon deze nieuwe luchtbehandelingskast op de bestaande luchtkanalen worden aangesloten, maar er moest wel van een additionele koelwateraansluiting worden gemaakt. Daarvoor is een separate koelmachine geplaatst. Het koelwatervermogen dat de luchtbehandelingskast vanuit deze koelmachine betrok kon nauwkeurig worden gemeten. In paragraaf 2.2 worden de resultaten van dit tweede onderzoeksjaar besproken.

Beide uitvoeringsvormen van de ontvochtiging vallen in de categorie die de hoogste energiebesparing kan opleveren omdat ze de kas gedurende de winterperiode grotendeels gesloten kunnen houden. Het verschil zit in de mogelijkheid om energie te oogsten en te bufferen. Het beproefde 'stekker-systeem' kon dat niet, terwijl met de luchtbehandelingskast de benutting van de verzamelde warmte in principe over een etmaal, of zelfs langer kan worden uitgesmeerd.

Beide systemen hebben gemeen dat het gesloten houden van de kas het verlies van CO₂ in de winter beperkt.

2.1 Resultaten met directe latente warmte terugwinning

Vanaf de winter van 2022, toen de energieprijzen opeens sterk toenamen, is er een duidelijke ontwikkeling te zien in het gebruik van energiezuinige ontvochtigingssystemen, en dan vooral in de toepassing van 'stekker-ontvochtigers'. Dit is goed te begrijpen vanwege de eenvoudige installatie. De apparaten hebben slechts een stekker en een water-afvoer, en meestal een eigen ventilator om de lucht door het apparaat te leiden (in sommige installaties wordt de droge lucht die uit de ontvochtiger komt met additionele luchtverdeelsystemen verder verspreid).

Vooraf potplantentelers, waar de gewassen in de regel laag blijven, konden zonder grote ingrepen in hun kas een forse daling van de warmtevraag realiseren door de plaatsing van een DryGair ontvochtiger, of systemen van Vifra of Van Wijk. Uiteraard gaat dit wel gepaard met een duidelijke stijging van de elektriciteitsvraag.

In de hoog-opgaande groentegewassen vond deze ontwikkeling niet plaats, onder andere vanwege zorgen over de luchtverdeling. De laatste tijd zijn er dan ook ontwikkelingen waarbij stekker-ontvochtigers tevens voorzien zijn van luchtverdeelsystemen.

2.1.1 Klimatiseringssysteem en energiegebruik

Om toch ervaringen en prestatiecijfers van stekker-ontvochtigers voor groentegewassen te kunnen verzamelen en publiceren is in 2023 een teeltexperiment met een onbelichte komkommerteelt uitgevoerd in een proefkas van Wageningen UR in Bleiswijk.

De kas van 500 m² was tot dan uitgevoerd met een luchtbehandelingskast met voelbare warmterugwinning door middel van een balans-ventilatie-systeem (AVS-WTW). De kast bood precies voldoende ruimte om drie bouwdrogers te kunnen bergen die samen de beoogde ontvochtigingscapaciteit van 20-25 gr/(m² uur) zouden moeten kunnen leveren.



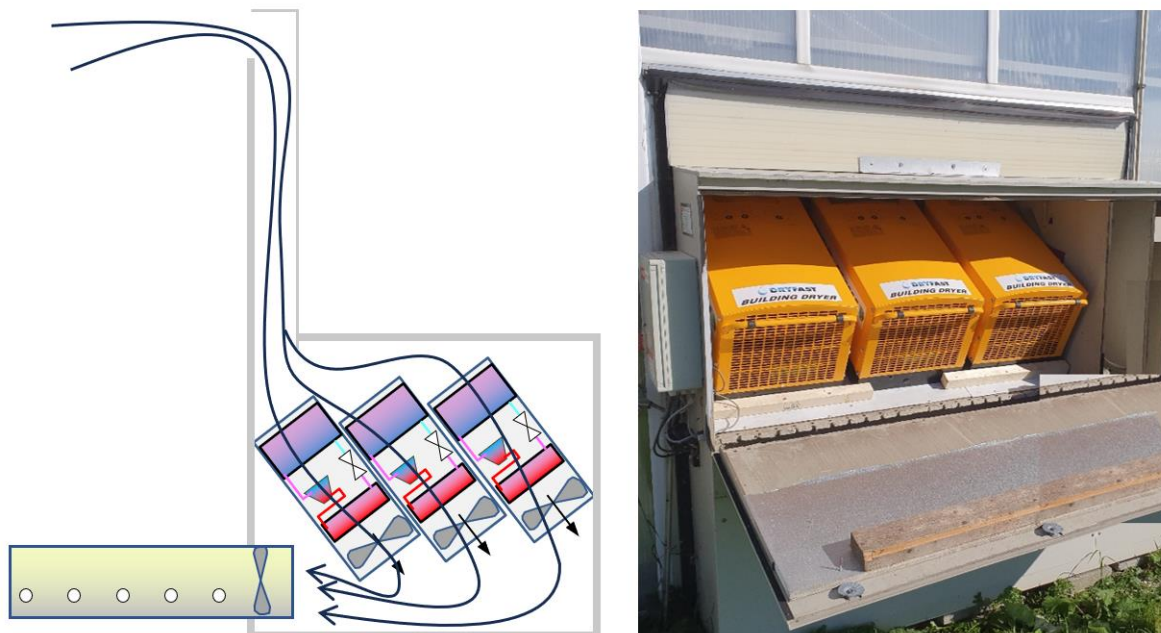
Figuur 2 De omgebouwde luchtbehandelingskast die na verwijdering van de lucht-lucht wisselaar die typisch is voor een balansventilatiesysteem met WTW plaats biedt aan 3 bouwdrogers.

De getoonde bouwdrogers (Dryfast DF800 F) hebben onder gemiddelde kasluchtomstandigheden (18 °C, 85% RV) een ontvochtigingscapaciteit van 4 liter per uur bij een stroomverbruik van 1.8 kW en zouden daarmee een ontvochtigingsefficiëntie van 2.2 liter/kWh moeten kunnen realiseren.

Drie van deze units tegelijk zouden dus 12 liter/uur moeten kunnen ontvochtigen, wat toegepast op een teeltoppervlak van 500 m² neerkomt op $12/500 = 24$ gram/(m² uur).

Een volgroeid, onbelicht komkommernegewas verdampt onder donkere, winterse omstandigheden 20 tot 30 gram per m² per uur en 's nachts nog wat minder. Deze randvoorwaarden maken dat de getoonde luchtbehandelingskast de proefkas naar verwachting veruit de meeste uren in de winter geheel gesloten kan houden terwijl de luchtvochtigheid niet te hoog oploopt.

Door gebruik te maken van drie van deze drogers, die onafhankelijk aan en uit geschakeld kunnen worden was de ontvochtigingscapaciteit in drie stappen regelbaar.



Figuur 3 Principeschets van het eenvoudige binnenwerk van de omgebouwde luchtbehandelingskast.

Gezien het feit dat de ontvochtigingscapaciteit in donkere, koude perioden naar verwachting altijd genoeg is kon de kas worden voorzien van goed isolerende schermssystemen die zo min mogelijk vocht doorlaten. Sterke nog, vochtdoorlatendheid is ongewenst omdat dit zou betekenen dat latente warmte uit de kasruimte verdwijnt richting het nok-compartiment waar het z'n warmte aan het dek of via lek kwijtraakt.

Ontvochtigingssystemen en goed isolerende schermen gaan dus goed samen en in dit experiment is dit vormgegeven door te kiezen voor drie schermen. Het bovenste scherm was een gealuminiseerd scherm voor een maximale isolatiegraad tijdens de nacht. Overdag liep dit scherm open wanneer er buiten meer dan 20 W/m^2 globale straling werd gemeten.

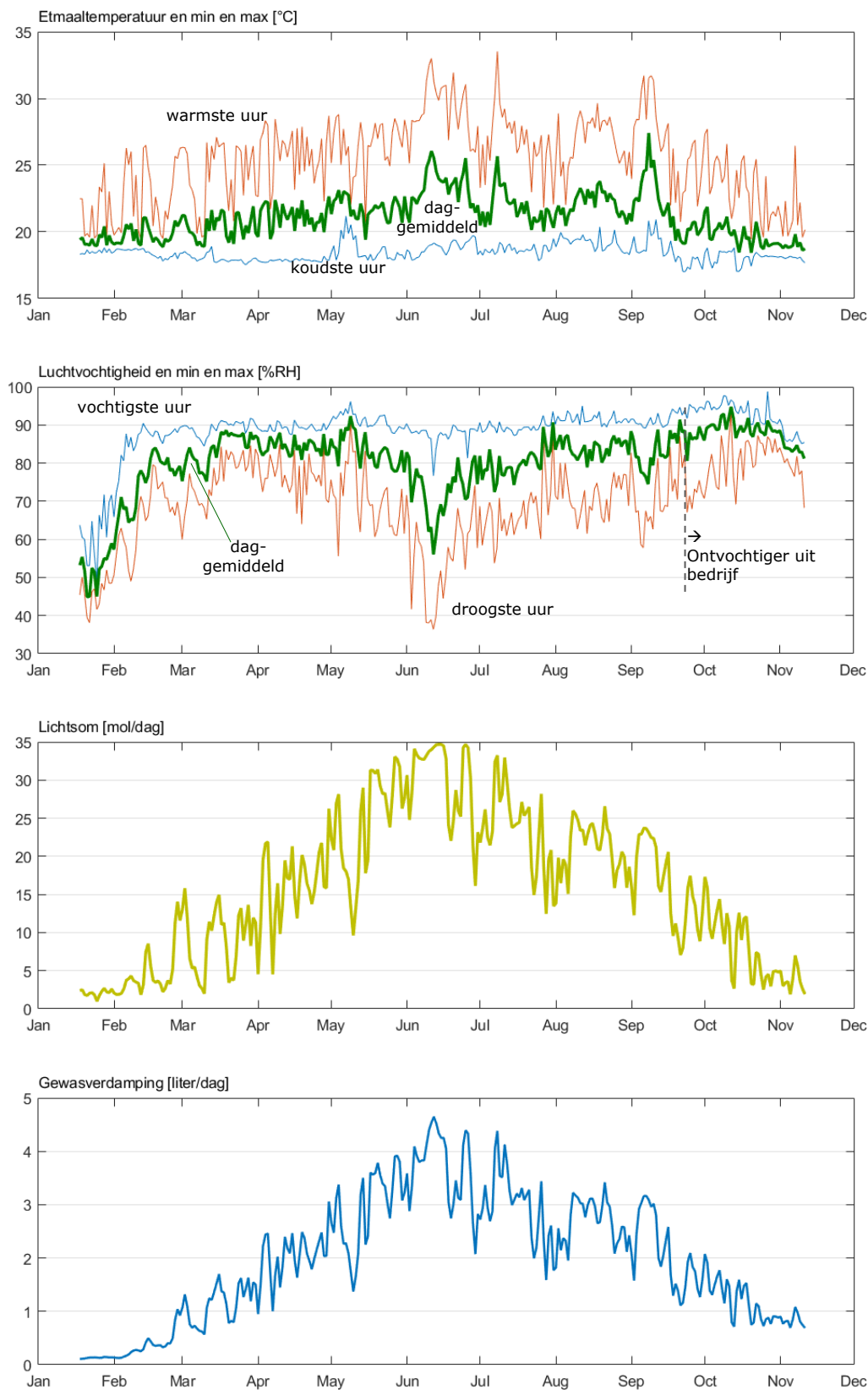
Het middelste scherm was een standaard transparant doek. Vanwege z'n transparantie werd dit scherm ook overdag gebruikt. Het criterium om het overdag gesloten te houden was de combinatie van temperatuur en zonlicht. Hoe kouder de buitentemperatuur, hoe meer zonlicht er moest zijn alvorens het scherm werd opengetrokken. Bij $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ moest er meer dan 300 W/m^2 zijn om het scherm open te laten lopen en pas bij $16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ liep dit scherm open zodra het licht werd. Voor de temperaturen er tussenin werd een interpolatie gemaakt, dus bij bijvoorbeeld $8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ buitentemperatuur liep het scherm open bij 150 W/m^2 . Deze instellingen leidden tot 4200 scherm-uren.

Het onderste scherm was een nieuw type vochtscherm. Dit is een goed transparant schermdoek wat in principe geen vocht doorlaat. Vanaf de start van de teelt tot half april liep dit vochtscherm gelijk op met het energiescherm. In de zomermaanden werd het vochtscherm minder gebruikt. Het vochtscherm maakte 3200 schermuren.

Anders dan gebruikelijk in de komkommerteelt is in 2023 slechts 1 planting gebruikt. Er is dus geen (korte) periode zonder gewas in de zomer. De teelt startte op 18 januari als plant van 30 cm hoogte en werd geruimd op 12 november. Dit was mogelijk door tijdens de teelt tweemaal aan te aarden. De teelt duurde daarmee bijna 10 maanden.

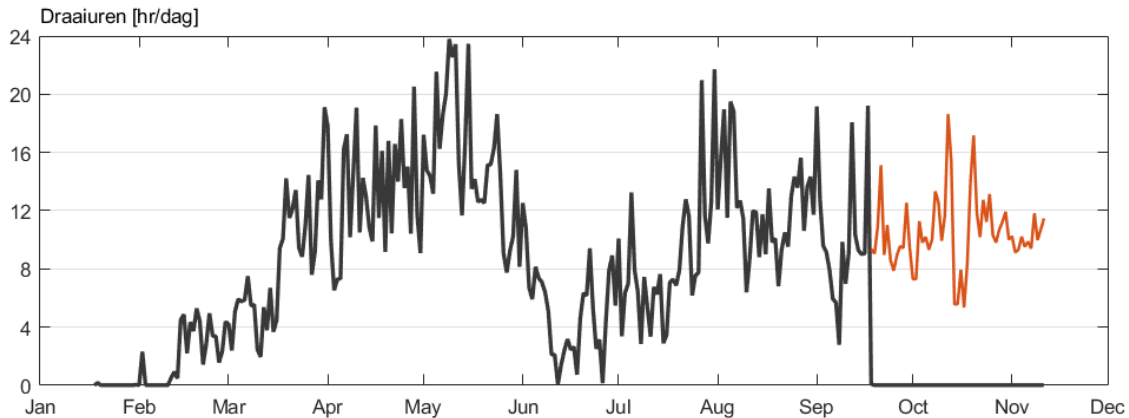
Er werd een standaard stook-profiel gebruikt. Dit betekent bij planten een vlakke stooklijn op $19 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Na 2 weken werd er een klein verschil ($1 \text{ }^{\circ}\text{C}$) tussen dag en nacht aangehouden. Vanaf maart was het ingestelde verschil tussen dag en nacht $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en vanaf mei was dit $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$. En waar nodig om de etmaaltemperatuur voldoende naar beneden te drukken werd er soms naar een nóg lagere nachttemperatuur geregeld. Deze temperatuurstrategie resulteerde in een RTR van $19 + 0.14 \cdot \text{DLI}$.

Onderstaande figuur toont de etmaalgemiddelde temperatuur en de daglichtsommen en de dagelijkse gewasverdamping over deze twee komkommercycli van deze teelt.



Figuur 4 Belangrijkste karakterisering van de teeltomstandigheden.

De grafiek met betrekking tot de luchtvochtigheid is een belangrijke indicatie voor de werking van de ontvochtiging. De grafiek laat zien dat in het begin het gewas klein is en dus maar weinig verdampt. In combinatie met de lage buitentemperaturen in februari blijft de luchtvochtigheid in de kas laag en zal de ontvochtiger uit blijven. Omdat het een onbelichte teelt betreft groeit het gewas maar langzaam en duurt het ongeveer 4 weken voordat er momenten op de dag komen dat de luchtvochtigheid boven de 87% komt en de ontvochtiger substantieel draaiuren gaat maken. Dit wordt getoond in figuur 5.



Figuur 5 *Geregistreeerde equivalente vollast draaiuren van de ontvochtiger per dag. Vanaf 18 september wordt de ontvochtigingsinstallatie omgebouwd en draaien de bouwdrogers niet meer. De dunne rode lijn toont hoe het simulatiemodel verwacht dat het vervolg zou zijn geweest naar het einde van de teelt.*

Pas vanaf eind maart is het gewas volgroeid en is de vochtproductie zodanig dat de gemiddelde luchtvochtigheid boven de 85% komt en de vochtigste uren rond de 90% RV liggen. Vanaf die tijd is de ontvochtiger dus volop aan het werk. Halverwege mei is de combinatie van de stand van het gewas en de buitenomstandigheden zodanig dat de ontvochtiger vrijwel de hele dag op volle capaciteit draait (alle drie de bouwdrogers aan).

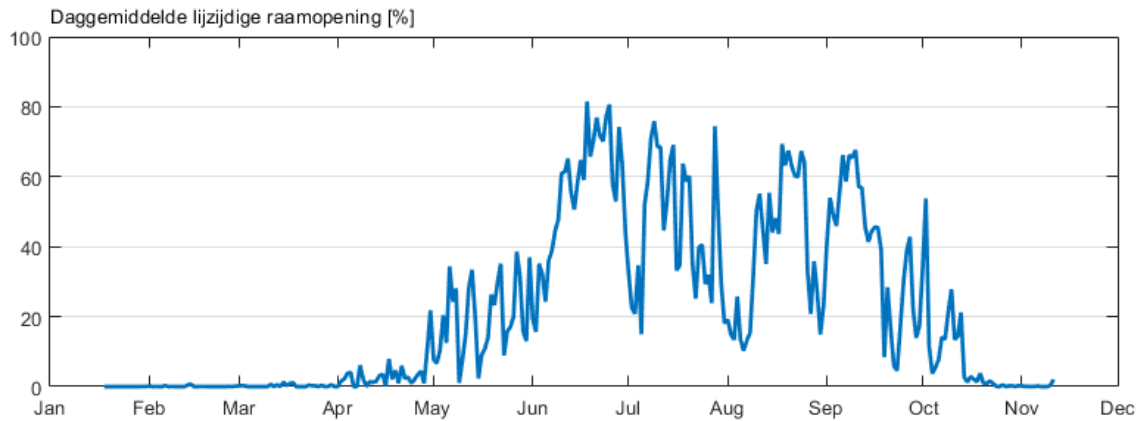
Naarmate het voorjaar vordert, de dagen lengen en de hoeveelheid zonlicht oploopt komen er echter meer en meer uren waarop de ramen van de kas geopend worden om het warmte-overschot af te voeren. De ontvochtiger gaat dan minder draaiuren maken en op een paar dagen gaat de ontvochtiger zelfs helemaal niet aan.

Begin augustus draait de ontvochtiger gemiddeld weer de helft van de tijd.

Vanaf 18 september is er geen geregistreeerde activiteit van de ontvochtiger meer omdat toen het ontvochtigingssysteem werd omgebouwd naar het systeem dat in 2024 beproefd zou worden. De data die voor de periode daarna zijn getoond zijn dan ook niet de geregistreeerde data, maar draaiuren op grond van berekeningen uitgaande van ongewijzigd beleid.

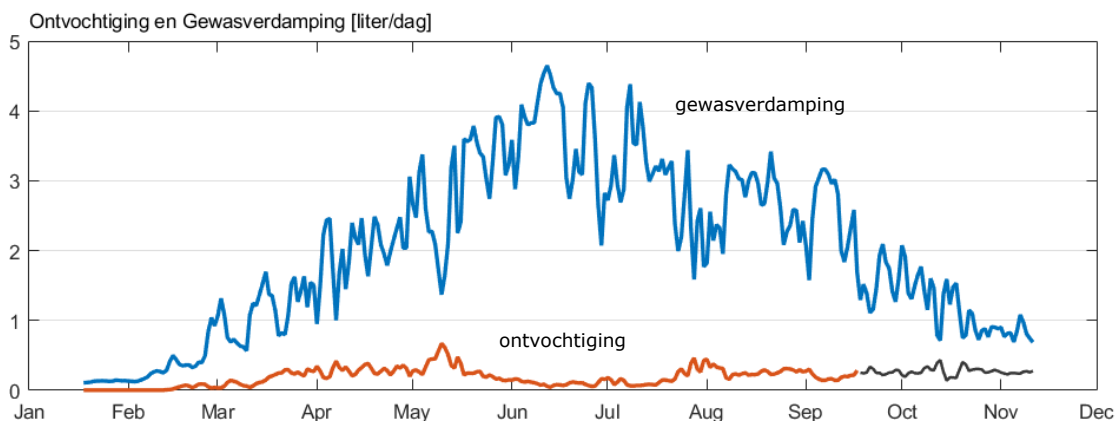
Het feit dat de ontvochtiger in de eerste maanden z'n werk doet en de ramen gesloten kunnen blijven, wordt getoond in onderstaande grafiek. Pas vanaf april gaan de ramen soms een beetje open.

In de zomer en in het najaar gaan de ramen vooral open op temperatuur.



Figuur 6 Geregistreeerde daggemiddelde lijzijdige raamopening in 2023. De klimaatregelaar opent altijd eerst de lijzijdige ramen en dan pas de windzijde, dus als de lijzijdige ramen dicht zijn is de kas maximaal gesloten.

De grafiek met betrekking tot de luchtvochtigheid laat zien dat de ontvochtiger voldoende capaciteit had om de maximale luchtvochtigheid rond de 90% te houden, met uitzondering van de eerste weken van mei. Onderstaande grafiek toont de gemeten hoeveelheid water die de ontvochtiger per dag aan de kaslucht onttrok. Naast de hoeveelheid die via de ontvochtiger is afgevoerd is ook de vochtproductie van het gewas in dezelfde grafiek geplaatst zodat in één oogopslag een indruk wordt verkregen van het aandeel van de ontvochtiger in vochthuishouding in de kas.

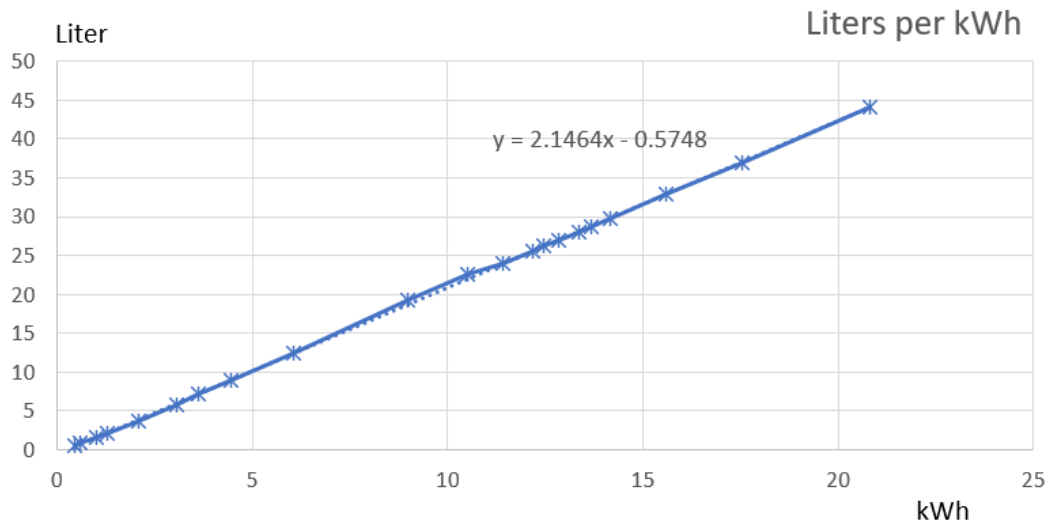


Figuur 7 Geregistreeerde hoeveelheid ontvochtiging, en gewasverdamping. De lijn vanaf 18 september laat zien hoe de ontvochtiger bij ongewijzigd beleid tot het eind van de teelt zou hebben gewerkt.

Figuur 7 laat zien dat de hoeveelheid vocht die middels de ontvochtiger wordt onttrokken maar een klein deel is van de gewasverdamping. In voorjaar en zomer komt dit doordat het overgrote deel van de gewasverdamping overdag plaatsvindt. En omdat overdag de ramen vaak open gaan om de overtemperatuur in de kas kwijt te raken, wordt er tevens veel waterdamp met de ventilatie op temperatuur afgevoerd. Verder heeft een kas, ook bij zorgvuldige bouw en installatie van schermen nog altijd een behoorlijk lekverlies. En tenslotte condenseert er altijd vocht op het glas.

Op grond van de metingen aan de kas, aangevuld met het verwachte vervolg als de ontvochtiger tot het eind van de teelt zou hebben gewerkt kan geconcludeerd worden dat voor een onbelichte komkommerteelt een 'stekker-ontvochtiger' ongeveer 10% van de gewasverdamping 'afvangt'. Zoals verderop in dit rapport naar voren zal komen is deze fractie bij een belichte teelt een stuk hoger omdat de belichting tot extra verdamping leidt, juist in de delen van het jaar dat de ramen veel minder vaak open hoeven om overtollige warmte af te voeren. Dit is met name het geval wanneer er wordt belicht met hoog-efficiënte LED's.

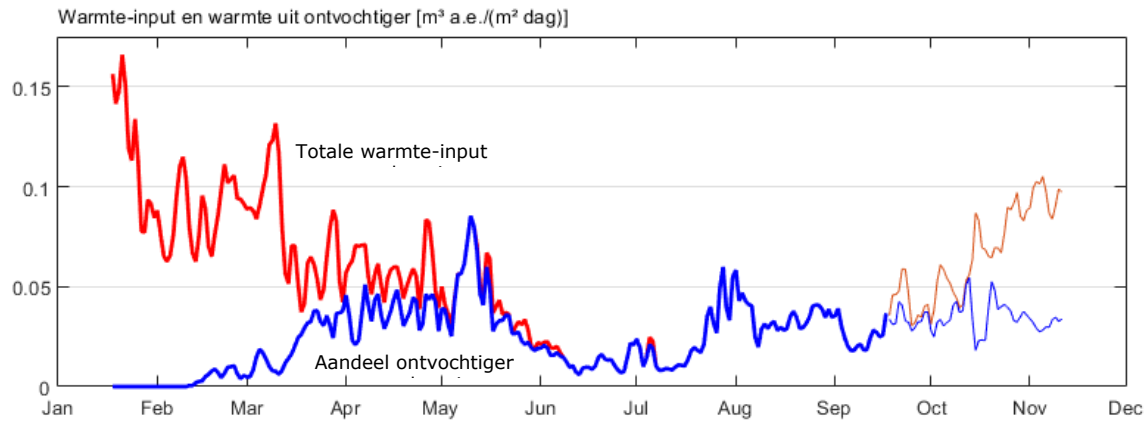
De energetische efficiency van de hier beproefde 'stekker-ontvochtiger' kan worden bepaald door de totale hoeveelheid water die uit de luchtbehandelingskast stroomt te delen door het stroomverbruik. Onderstaande grafiek toont de ontwikkeling van deze lijn.



Figuur 8 Ontwikkeling van het cumulatief geregistreerde stroomverbruik per m² en de geregistreerde hoeveelheid liters per m² aan waterafvoer van de ontvochtiger. De punten zijn de opname-momenten van de meterstanden die gemiddeld eens per 14 dagen plaatsvonden.

Figuur 8 laat zien dat het aantal liters ontvochtiging in een zeer constante verhouding tot het elektriciteitsverbruik staat. De geconstateerde efficiency van (afgerond) 2.15 liter per kWh geeft aan dat er qua efficiency zeker nog een verbeteringsslag mogelijk is om het stroomverbruik te verlagen. Naast het stroomverbruik van de ontvochtigers kwam er in het geval van het experiment in de Winterlichtkas nog 2.5 kWh/m² bij voor de verdeling van de lucht via de slurven. De overall efficiëntie van de ontvochtiger komt daarmee op 1.9 liter per kWh.

Ondanks de ogenschijnlijk kleine bijdrage van de ontvochtiging in de vochtbeheersing van de kas (Figuur 7) leidt de toepassing van de hier gebruikte stekker-ontvochtiger tot een forse afname van de verwarmingsbehoefte via de buizen. Figuur 9 toont de warmte-input naar de kas vanuit het verwarmingssysteem en vanuit de ontvochtiger.



Figuur 9 Warmte-input naar de kas via de verwarmingsbuizen en door de ontvochtiger. Vette lijnen zijn gemeten, dunne lijnen na 18 september zijn berekend, uitgaande van ongewijzigd beleid.

Aan het begin van de teelt, waar het gewas nog maar weinig verdampt en de ontvochtiger niet gebruikt wordt, komt alle warmte vanaf de verwarmingsbuizen. Die warmtevraag van gemiddeld $0.72 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ week})$ in de eerste 3 weken (eind januari – half februari) is laag door het intensieve schermgebruik.

Vanaf half maart begint de ontvochtiger een substantieel deel van de verwarming te verzorgen en van mei tot oktober komt praktisch alle warmte van de ontvochtiger. De buisverwarming wordt in die periode dus niet gebruikt.

De data m.b.t het energieverbruik na 18 september (dun getekend in figuur 9) zijn berekend met een simulatiemodel dat getuned is op de data uit het eerste deel van de teelt (veruit de langste periode). Als de data uit de metingen, aangevuld met de berekende waarden voor de laatste twee maanden worden opgeteld dan bedroeg de totale warmtevraag van de kas $15.8 \text{ m}^3 \text{ a.e./m}^2$, waarvan $7.6 \text{ m}^3 \text{ a.e./m}^2$ door het ontvochtigingssysteem is geleverd.

Dit is de warmtevraag exclusief verliezen langs de gevel. Voor een kas op praktijkschaal (4 ha) is het gevelverlies in de regel 10% van het totale verbruik, en zou de kas dus $17.4 \text{ m}^3/\text{m}^2$ hebben gebruikt. De warmte-output vanuit de ontvochtiger per m^2 wordt in principe niet beïnvloedt door de schaalgrootte van het bedrijf (want vooral afhankelijk van de verdamping van het gewas).

De warmtevraag die uit andere bron dan uit de ontvochtiger zou moeten worden gedekt is de totale warmtevraag minus de bijdrage van de ontvochtiger en komt op $17.4 - 7.6 = 9.8 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

Het gemeten elektriciteitsverbruik van de ontvochtiger tot 18 september was 20.5 kWh/m^2 voor de ontvochtigers + 2.5 kWh/m^2 voor de luchtcirculatie en zou over de gehele teelt 30 kWh/m^2 zijn geweest.

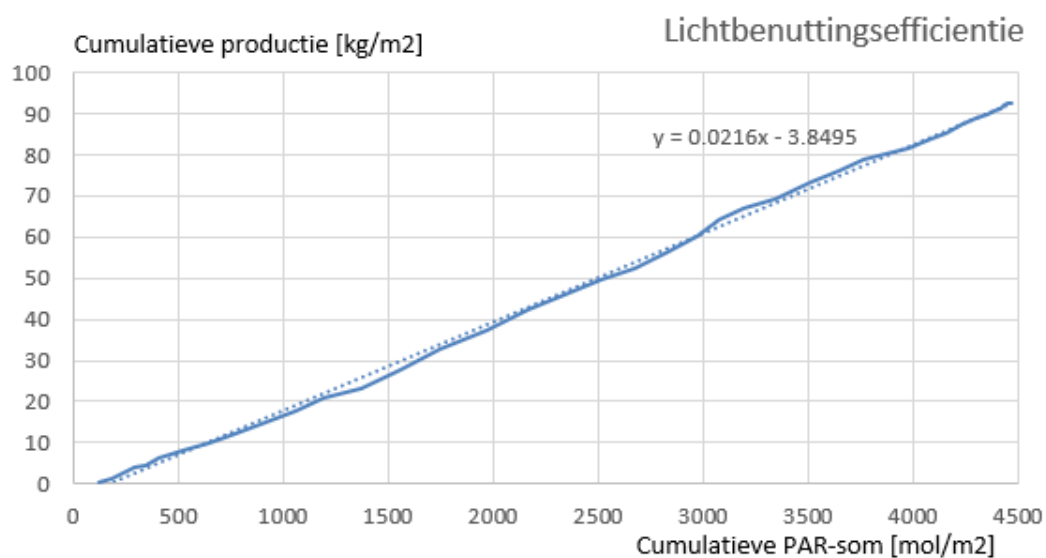
2.1.2 Gewasproductie

Het telexperiment is uitgevoerd met het komkommerras "Uprtrace". De stengeldichtheid was 3.4 planten per m². De planten stonden op steenwolmatten en water en nutriënten werden via druppelaars toegediend. De watergift werd zodanig gestuurd dat tussen de 30 en 35% van het irrigatiewater terugkwam als drain. Zorgvuldige bladsnoei zorgde voor een mooi open gewas (zie foto).



Figuur 10 Impressie van het komkommergewas in de Winterlichtkas.

De teelt liep zeer regelmatig, wat blijkt uit de grafiek waar de cumulatieve productie is uitgezet tegen de cumulatieve hoeveelheid PAR-licht in de kas.

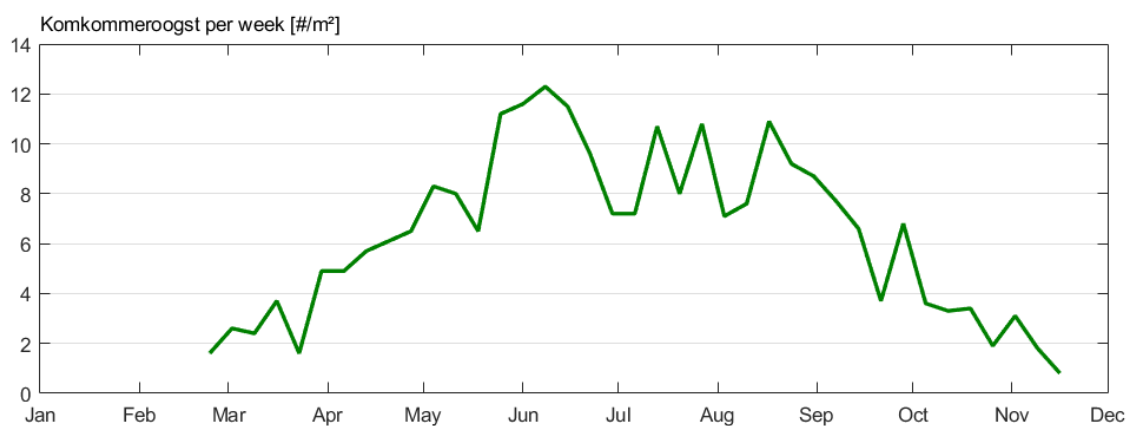


Figuur 11 Geregistreerde lichtbenuttingsefficiëntie van de komkommerteelt in de winterlichtkas in 2023.

De totale productie kwam iets boven de 90 kg/m² en bij een gemiddeld vruchtgewicht van 380 gram per stuk betekende dit dat er bijna 250 komkommers per m² zijn geoogst.

Omdat het hier een onbelichte teelt betreft vindt de productie vooral in de zomermaanden plaats.

Onderstaande grafiek toont de productie in aantallen komkommers per week.



Figuur 12 Komkommeroogst in de winterlichtkas over het jaar 2023.

Indien het energieverbruik zou worden uitgedrukt in het verbruik per komkommer dan zou de hier beproefde combinatie van kas, scherminstallatie, ontvochtigingssysteem en teeltwijze op een verbruik van gemiddeld 0.04 m³ a.e. aan warmte en 0.1 kWh per komkommer uitkomen.

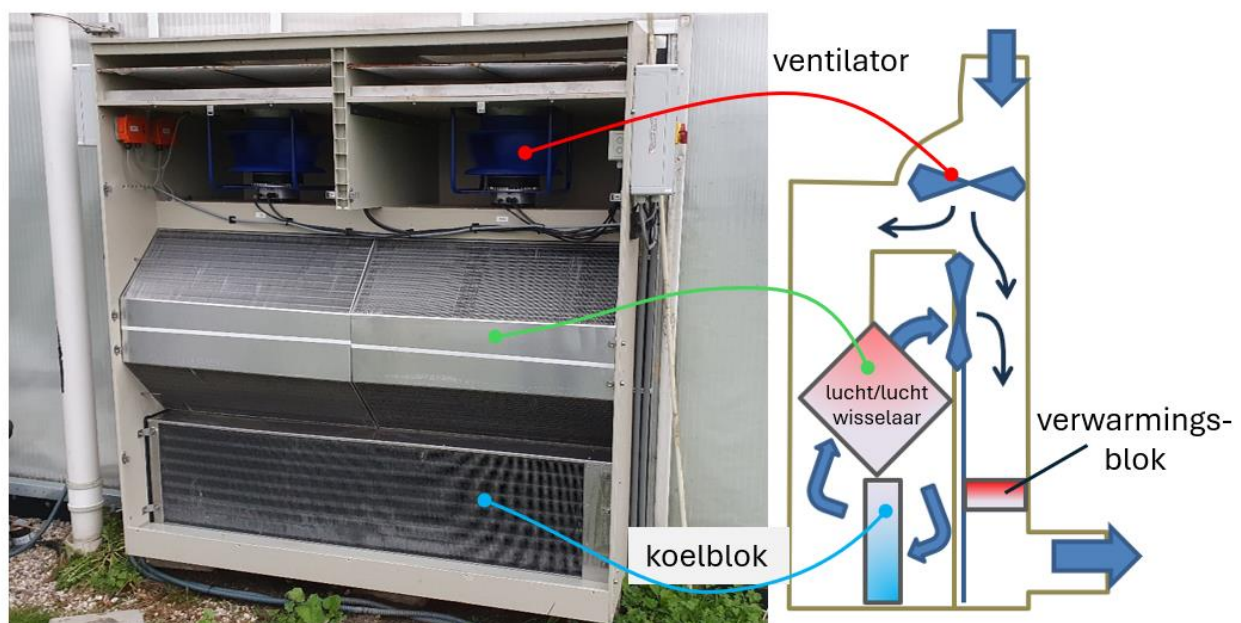
2.2 Resultaten met bufferbare latente warmte-terugwinning

De reductie in de warmtevraag van de proefkas met de ontvochtiger op basis van directe warmte-terugwinning is substantieel, maar er is nog steeds een resterende warmtevraag rond de $10 \text{ m}^3 \text{ a.e./m}^2$ per jaar.

De sleutel voor een verdere verlaging van de energievraag is door meer gebruik te maken van de benutting van warmte-overschotten en deze te bufferen (zie hoofdstuk 1, systeem 5). Dit kan met ontvochtigingssystemen op basis van een luchtbehandelingskast met een koelblok, maar in de regel gebruiken deze relatief veel elektriciteit.

In gesprek met Van Dijk Heating, een toonaangevende producent van energiebesparende ontvochtigingsapparatuur in de glastuinbouw, ontstond het idee om ontvochtigingsapparatuur op basis van een luchtbehandelingskast met koel- en verwarmingsblok te modificeren, zodanig dat het stroomverbruik per eenheid ontvochtiging laag blijft, maar de mogelijkheid om energie te bufferen overeind blijft.

Om dit idee uit te werken en te kunnen beproeven heeft Van Dijk heating een luchtbehandelingskast ontwikkeld zoals schetsmatig besproken op pagina 13. In de figuur hieronder is die schets afgebeeld, naast een foto van de daadwerkelijke luchtbehandelingskast (met geopende 'motorkap').



Figuur 13 Een blik op het binnenwerk van de luchtbehandelingskast die in 2024 gebruikt is voor het tweede energiezuinige ontvochtigingsexperiment, samen met de schetsmatige weergave.

De verbetering van de efficiëntie wordt gerealiseerd door de lucht/lucht tussenkoeler die een voorkoeling van de lucht realiseert voordat de te ontvochtigen lucht bij het koelblok komt. En, dezelfde lucht/lucht wisselaar geeft een stuk terugwarming nadat de lucht het koelblok gepasseerd is. Omdat door praktische- en kostenoverwegingen de terugwarming in de lucht/lucht wisselaar niet 100% is komt de lucht niet helemaal op de oorspronkelijke temperatuur terug. In het algemeen zijn tuinders niet blij met een systeem dat bij ontvochtiging koudere lucht inblaast, en daarom heeft het ontwerp toch ook nog een verwarmingsblok. Hierdoor kan de ingeblazen lucht naar de gewenste temperatuur worden verhoogd.

De winst van het systeem is dat daar waar een standaard luchtbehandelingskast bijvoorbeeld 40 W koelvermogen nodig heeft om 30 gr/uur te kunnen ontvochtigen en de lucht dan weer met 20 W verwarmingsvermogen moet verwarmen om de lucht op kasluchttemperatuur te kunnen inblazen, het hier getoonde systeem naar verwachting half zoveel koelvermogen, en half zoveel verwarmingsvermogen nodig heeft voor dezelfde ontvochtigingscapaciteit.

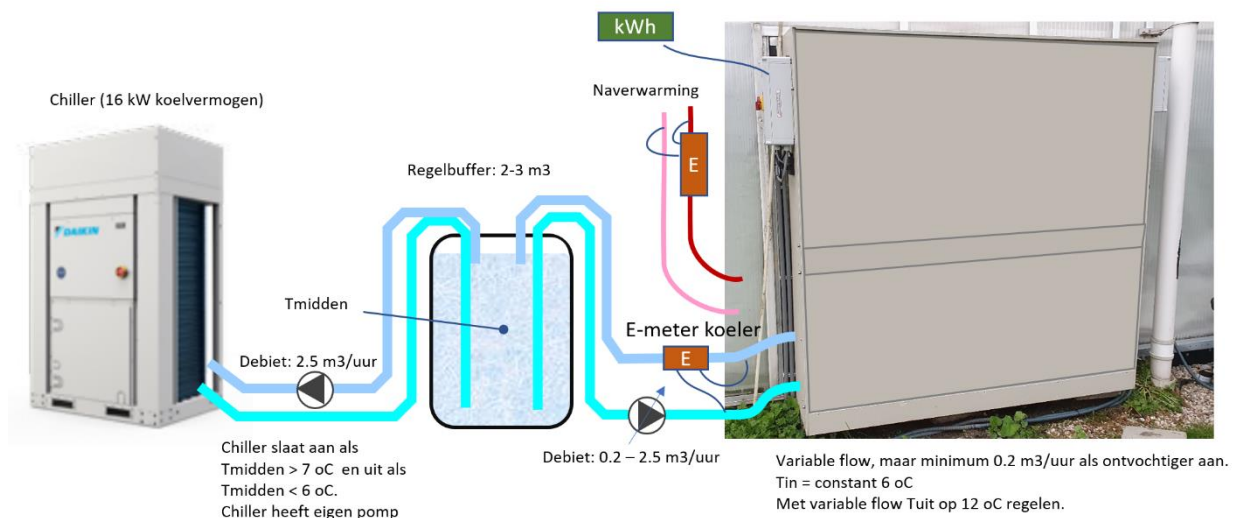
De warmtepomp waarmee het koelvermogen moet worden geproduceerd zal dus half zoveel elektriciteit gebruiken.

Het nieuwe ontwerp heeft de typebenaming AVS-D gekregen.

Teneinde de werking van het ontwerp op semi-praktijkschaal te beproeven is de luchtbehandelingskast die in Figuur 2 was getoond vervangen door de hierboven getoonde kast. De inbouwmaten waren vrijwel gelijk en de AVS-D kon op het reeds aanwezige lucht-distributiesysteem worden aangesloten. In de kasafdeling veranderde er dus niets.

Installatietechnisch vereiste de inbouw van de AVS-D wel de nodige aanpassingen want waar de stekker-ontvochtiger alleen stroom nodig heeft moet de AVS-D van koelwater worden voorzien. De gekozen configuratie had ook nog een verwarmingsblok.

Omdat de Winterlichtkas geen koelwatersysteem heeft is er buiten de kas een chiller geplaatst die een voorraadvat met koud water gekoeld hield. Schematisch was de opstelling zoals in figuur 14 getoond.



Figuur 14 Koudwatervoorziening en verwarmingsvoorziening en de daarbij behorende energiemeters (E) voor het experiment met de AVS-D in de Winterlichtkas in Bleiswijk.

In het experiment kon de werking van de ontvochtiger onder realistische teeltomstandigheden worden beproefd omdat de luchtbehandelingskast was geïnstalleerd en werd bestuurd op precies dezelfde wijze als waarop dat op praktijkschaal zou gebeuren. Als de luchtvochtigheid in de kas te hoog opliep ging de ontvochtiger aan, waarbij het ventilatortoerental werd opgeregeld naarmate de luchtvochtigheid verder van het setpoint af lag (een P-regeling). De koelwatertemperatuur-regeling stuurde ondertussen het koudwaterdebiet zodanig dat de uitgaande temperatuur op 12 °C werd gehouden. Ook regelde de kasklimaatcomputer de naverwarming zodanig dat de ontvochtigde lucht op kasluchttemperatuur werd ingeblazen. De door de luchtbehandelingskast gebruikte elektriciteit, het koelvermogen en het verwarmingsvermogen werden via energiemeters bijgehouden. De water-uitloop van de ontvochtigingskast werd via een literteller gemeten.

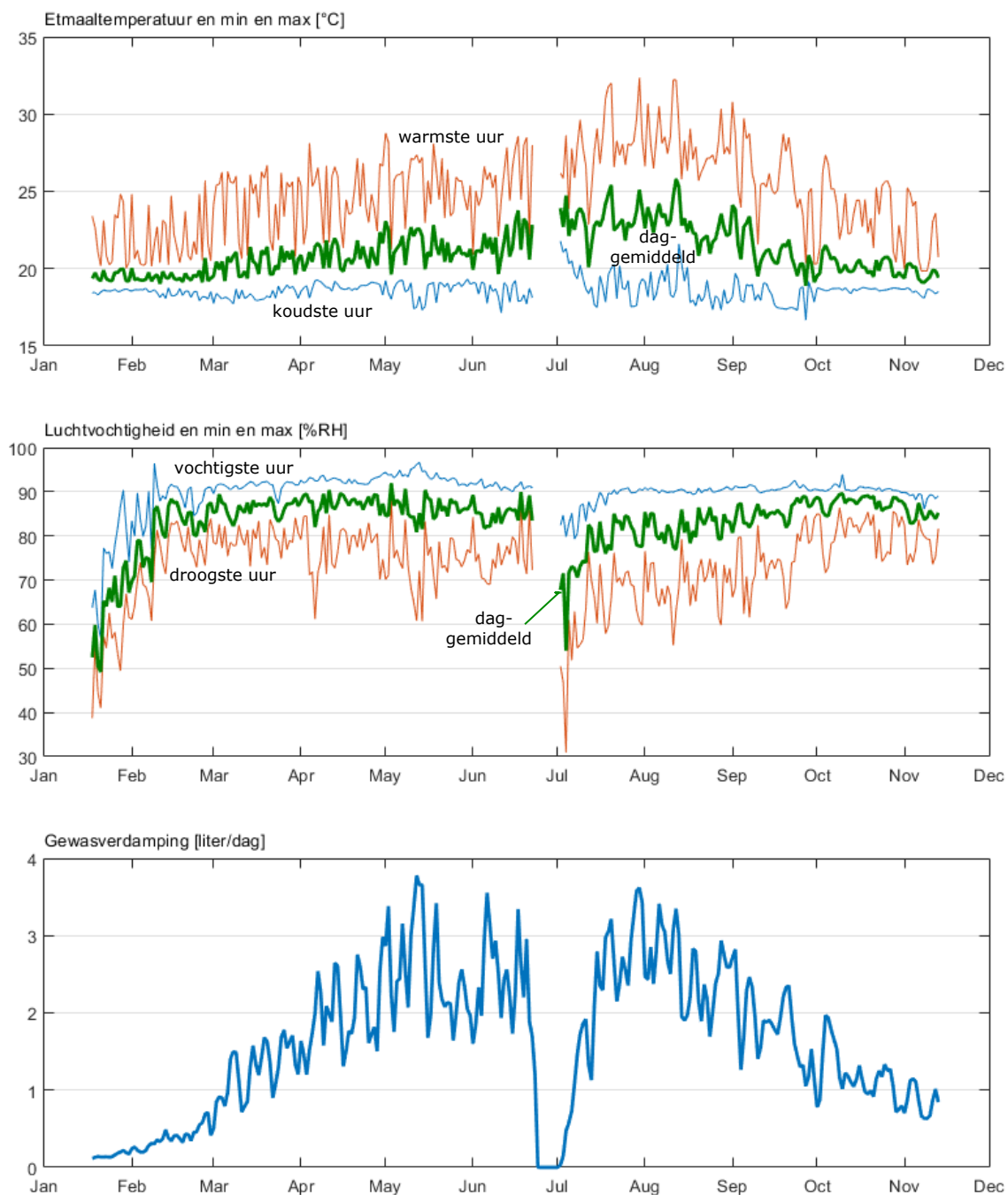
Naast het warmteverbruik voor de naverwarming werd ook het warmteverbruik van de buisverwarming in de kas op 5 minuten-basis bijgehouden zodat over het verloop van de teelt een goede registratie van de warmtevraag werd verkregen. Samen met de registratie van de koelbehoefte kon vervolgens worden berekend in welke mate de warmtevraag kon worden ingevuld met de warmteproductie uit een warmtepomp, uitgaande van een warmtepomp als machine die de benodigde koude voor het koelblok van de ontvochtiger levert.

De in figuur 13 getoonde chiller, was er dus alleen voor het experiment en de getoonde 'E-meter koeler' vormde de basis voor de berekening van het gebruiksperspectief.

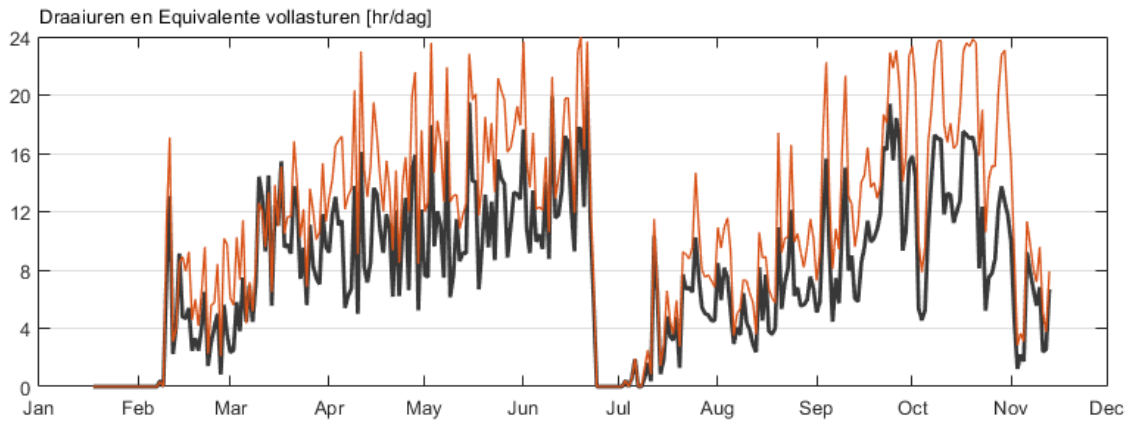
2.2.1 Teeltklimaat en energiegebruik

Het nieuw ontwikkelde ontvochtigingssysteem is beproefd in een onbelichte komkommerteelt, weer startend op 18 januari en lopend tot 14 november 2024. Anders dan in de vorige teelt is er twee keer geplant. Op 22 juni 2024 werd de eerste teeltcyclus geruimd en op 2 juli werden de nieuwe planten weer op de mat gezet. De kas was hetzelfde als in het jaar ervoor, maar het bovenste schermdoek was vervangen door een dubbel donkerdoek. 'Dubbel' in de zin dat er twee schermdoeken plat op elkaar lagen, dus zonder spouw. Zo'n dubbel schermdoek heeft een hogere isolatiegraad dan een enkel doek.

Onderstaande grafieken tonen de gemiddelde etmaaltemperatuur, luchtvochtigheid en gewasverdamping.



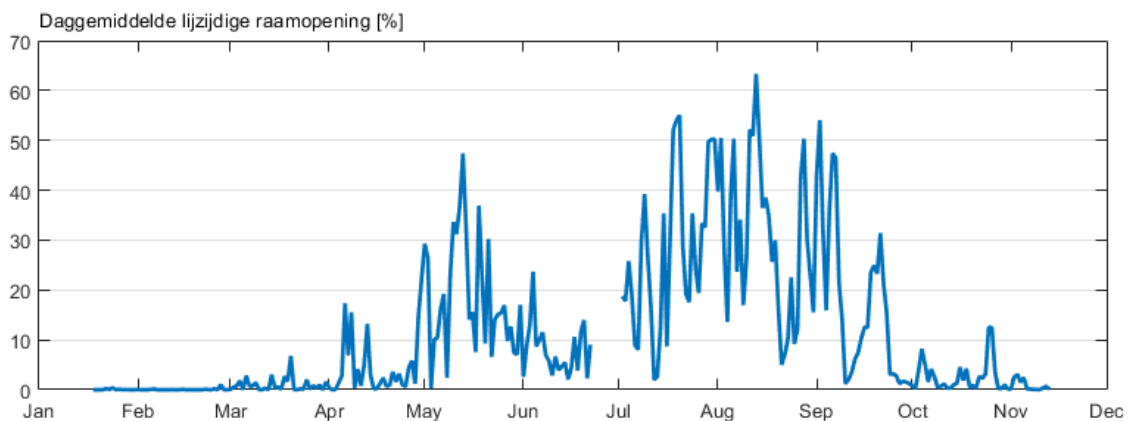
Figuur 15 Kasluchttemperatuur, luchtvochtigheid en gewasverdamping.



Figuur 16 Geregistreeerde draaiuren (rode lijn) en equivalente vollast draaiuren (zwarte lijn) van de ontvochtiger per dag.

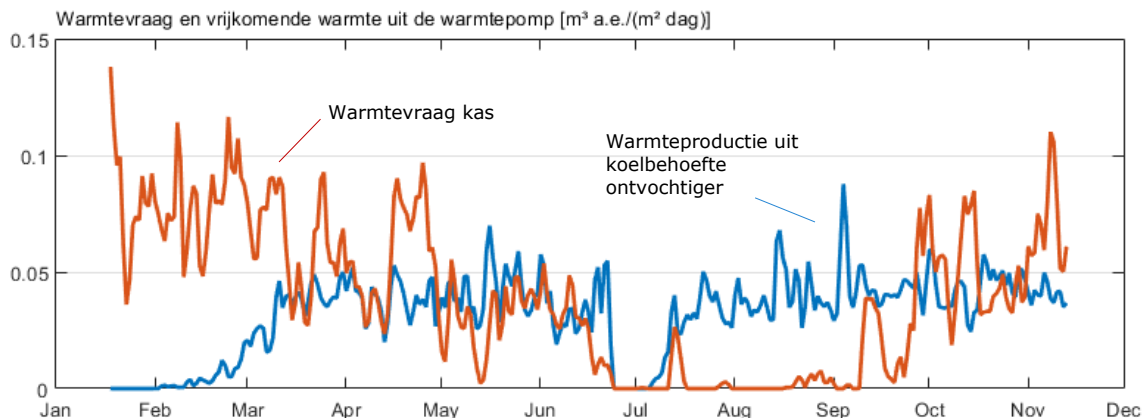
Anders dan in 2023, waar er ruim anderhalve maand overheen ging voordat de ontvochtigingsapparatuur ingezet werd, was er dit jaar al na een maand een ontvochtigingsvraag. Dit kwam vooral door de hogere isolatiegraad van het schermstelsel en de verhoogde luchtdichtheid daarvan.

Tot half maart was de inzet nog beperkt, met gemiddeld zo'n 8 draaiuren per dag, waarvan gemiddeld op zo'n 60% van de capaciteit, maar vanaf eind maart tussen de 10 en 16 equivalente vollast-uren per dag. De ontvochtiger maakt dat de ramen van de kas tot begin april niet of bijna niet geopend hoeven te worden en ook toen het in het najaar koud werd gingen ze bijna niet meer open. Dit is te zien in figuur 17.



Figuur 17 Daggemiddelde raamstand van de lij-zijdige ramen (de ramen die altijd als eerste geopend worden).

Als de ontvochtiger aan gaat wordt er vooral latente warmte en een beetje voelbare warmte aan de kaslucht onttrokken die door een warmtepomp omgezet kan worden in warmte voor de verwarming van de kas. Onderstaande grafiek toont de gemeten warmtevraag van de kas, samen met de warmte die een warmtepomp produceert bij het gebruik van de ontvochtiger zoals in de proef. De gemeten warmtevraag bedroeg $11.9 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Dit is voor een (bijna) jaarrond komkommerteelt een zeer lage warmtevraag. Deze warmtevraag is zo laag vanwege een combinatie van een iets kortere teeltperiode, intensief gebruik van schermen die ook nog eens bovengemiddeld luchtdicht zijn, een ontvochtiger met een lucht-lucht tussenkoeler waardoor de lucht tijdens de ontvochtiging maar weinig afgekoeld wordt en het telen op een hoge luchtvochtigheid. In het volgende hoofdstuk zal de bijdrage van deze verschillende componenten in het totaalplaatje uiteengezet worden.



Figuur 18 Geregistreeerde warmtevraag van de kas (exclusief gevel-effecten) en potentiële warmteproductie door een warmtepomp bij de productie van koelvermogen voor de AVS-D ontvochtiger.

Net als in het experiment in 2023 is de warmtevraag in de eerste periode groter dan de warmte die aan het ontvochtigingsproces ontleend kan worden. In figuur 16 is de blauwe lijn de hoeveelheid warmte die per dag aan de warme kant van de warmtepomp vrij komt bij de productie van het koude water dat nodig is voor het koelblok in de ontvochtiger. Hierbij is uitgegaan van de gemeten koudebehoefte (zie figuur 14), welke is omgerekend naar de warmteproductie door een warmtepomp, uitgaande van een COP 4. Vaak worden er hogere waarden voor de COP van een warmtepomp genoemd, maar daarbij gaat het in de regel om warmtepompen die slechts een deel van de warmtevraag invullen. Om (in principe) de volledige warmtevraag van de kas door een warmtepomp in te kunnen vullen zal de warmtepomp in de regel gebruik moeten maken van een warmtebuffer. En om de omvang van de warmtebuffer binnen de perken te houden zal de uitgaande temperatuur van de warmtepomp richting de 60 °C gaan. Gecombineerd met een koude temperatuur van 6 °C is een COP van 4 dan al een scherp uitgangspunt.

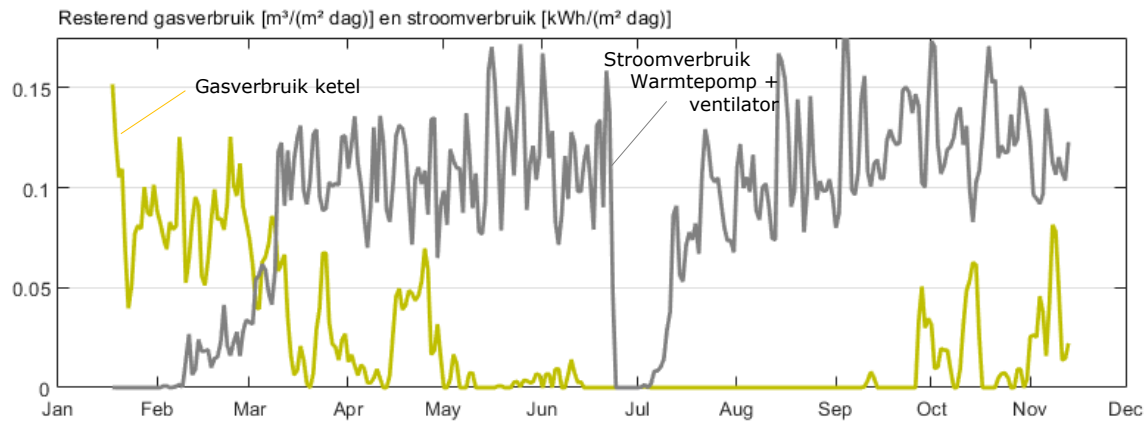
Het is duidelijk dat er van mei tot oktober een zodanige hoeveelheid warmte tijdens het ontvochtigingsproces vrijkomt dat in die periode vrijwel de gehele warmtevraag hiermee kan worden ingevuld. Daar waar de rode lijn in figuur 18 boven de blauwe lijn ligt, zal er warmte uit een andere bron moeten worden betrokken. Als dat een aardgas-ketel is zou er daarvoor 5.8 m³/m² in deze teelt nodig zijn geweest. In een praktijkkas is de warmtevraag vanwege de gevel-verliezen wat groter en zou de ketel 6.8 m³/m² aardgas hebben gebruikt.

Het elektriciteitsverbruik voor het rondblijzen van de lucht door het systeem is gemeten en was 4.6 kWh/m².

Uitgaande van de eerder genoemde COP van de warmtepomp (COP=4) zou het elektriciteitsverbruik dat hoort bij de gemeten ontvochtiging 21 kWh/m² zijn geweest. De kWh-meter op de chiller die in het experiment gebruikt is gaf een iets lagere waarde, 19 kWh/m², wat zou duiden op een COP 4.3. In de verdere berekeningen wordt echter toch met COP=4 gerekend om de eerder genoemde reden dat bij de inrichting van het energiesysteem (het 'ketelhuis') van een kas waarin dit soort ontvochtigers zijn opgenomen, warmte op een wat hogere temperatuur zal worden gebufferd.

Naast het stroomverbruik van de warmtepomp gebruikt de ontvochtiger elektriciteit voor de luchtcirculatie. Deze is in het experiment bepaald op 4.6 kWh/m², zodat het totale stroomverbruik op 25.6 kWh/m² uitkomt.

Deze teelt doorvertalend naar praktijkschaal en dus rekening houdend met praktijkconforme gevelverliezen zou het energieverbruik er zoals onderstaand hebben uitgezien.

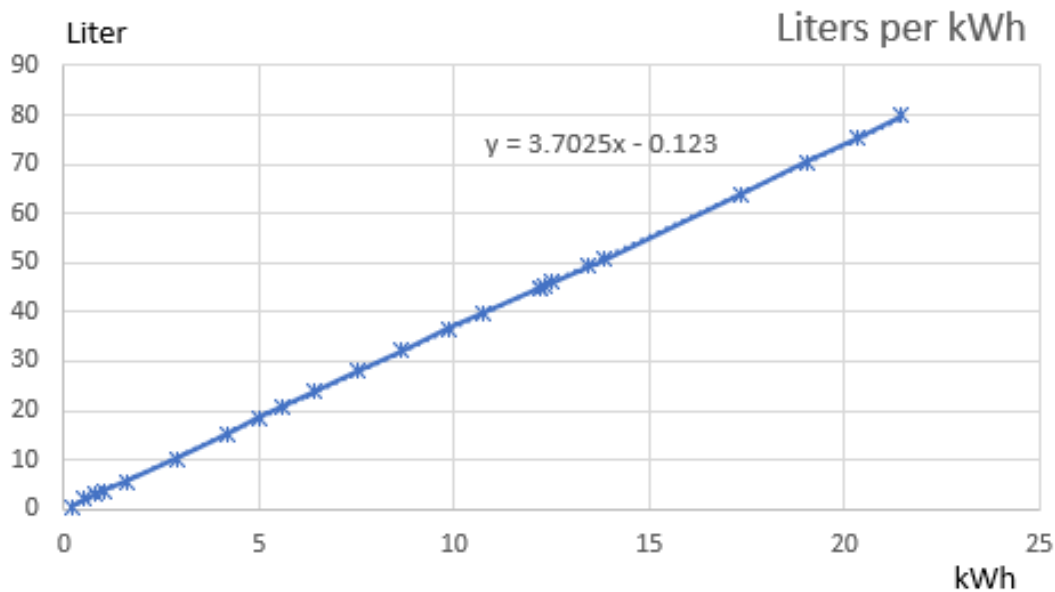


Figuur 19 Gasverbruik en stroomverbruik van een praktijkteelt met de installaties zoals beproefd in de winterlichtkas in 2024. Geregistreerde warmtevraag van de kas (exclusief gevel-effecten) en potentiële warmteproductie door een warmtepomp bij de productie van koelvermogen voor de AVS-D ontvochtiger.

Uit figuur 19 blijkt dat vanaf het moment dat het komkommernewas volgroeid is en in productie, het gemiddelde elektriciteitsverbruik rond de 0.1 kWh/m² per dag ligt (en daarmee rond de 25 kWh/(m² jaar) uitkomt. Uit figuur 18, waar de warmtevraag en het aanbod van warmte uit het ontvochtigingsproces zijn getoond, blijkt echter dat een deel van de warmte, namelijk de warmte die tussen half juli en half september vrijkomt, niet benut wordt. Het zou in de praktijk kunnen dat in die periode de ontvochtiger minder gebruikt had kunnen worden. De buitenomstandigheden zijn dan immers zodanig dat groentekassen nauwelijks warmte verliezen. Aan de andere kant zou het uitzetten van de ontvochtiger in die periode tot een vochtiger en warmer kasklimaat hebben geleid wat mogelijk minder gunstig voor de gewasgroei zou zijn geweest. Het eerder genoemde elektriciteitsverbruik van 25.6 kWh/(m² jaar) is daarmee een bovengrens. Een terughoudender gebruik van de ontvochtiger in de nazomer zou het stroomverbruik hebben verlaagd, zonder het gasverbruik te laten toenemen.

Ook voor dit type ontvochtiger kan het stroomverbruik per liter ontvochtiging worden berekend. Tijdens het experiment is de hoeveelheid water uit de ontvochtiger bijgehouden en de hoeveelheid koude die daarvoor nodig was. Door deze hoeveelheid koude door 3 te delen (als een warmtepomp een COP 4 heeft dan betekent dit 4 kWh warmte per kWh stroom en (4-1)=3 kWh koude). Onderstaande figuur toont de aldus berekende relatie tussen stroomverbruik en de gemeten hoeveelheid water uit de ontvochtiger.

Bij vergelijking van deze figuur met de soortgelijke figuur op pagina 28 valt direct op dat deze luchtbehandelingskast met tussenkoeler veel meer liters ontvochtiging heeft geleverd bij een vergelijkbaar stroomverbruik. De energie-efficiëntie van de ontvochtiger die in 2024 is gebruikt is daarmee hoger.



Figuur 20 Ontwikkeling van het cumulatief geregistreerde koudeverbruik per m², gedeeld door 3 (om koudeverbruik om te rekenen in stroomverbruik van een warmtepomp met COP 4) en de geregistreerde hoeveelheid liters per m² aan de waterafvoer van de ontvochtiger. De punten zijn de opname-momenten van de meterstanden.

De getoonde ontvochtigingsefficiëntie van 3.7 liter per kWh (de helling van de getoonde lijn) is echter exclusief het verbruik van de ventilator voor de luchtcirculatie. Als het verbruik van de circulatieventilator bij het stroomverbruik van de chiller wordt opgeteld wordt de overall efficiëntie 3 liter per kWh. Het grote verschil tussen deze twee efficiënties laat zien dat de homogene verdeling van gedroogde kaslucht over de teeltruimte een behoorlijke impact heeft op het overall elektriciteitsverbruik. Dit bleek ook al bij de efficiëntie van de stekker-ontvochtiger, die 2.15 liter/kWh was zonder het verbruik van de luchtcirculatieventilatoren, maar naar 1.9 liter/kWh zakt als de luchtcirculatieventilatoren in de berekening worden meegenomen.

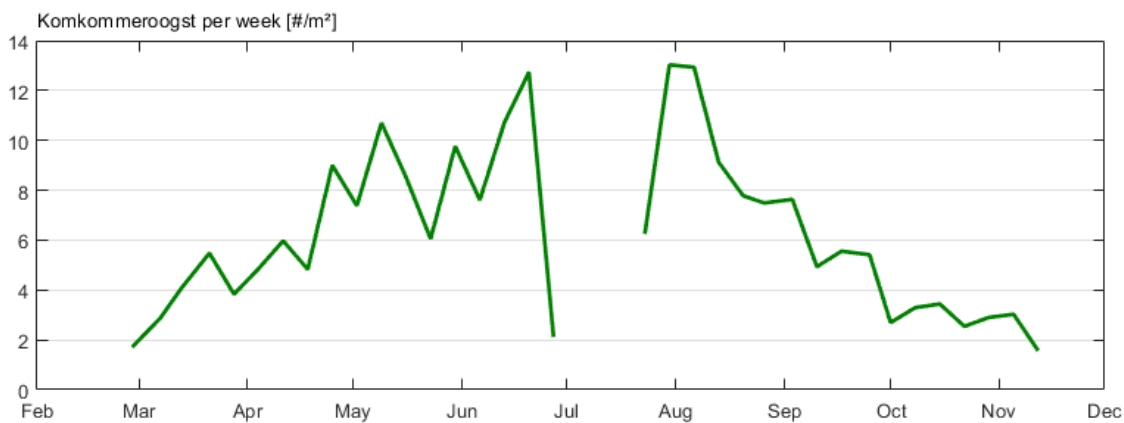
2.2.2 Gewasproductie

Ook in dit tweede teeltexperiment is weer gebruik gemaakt van het komkommerras "Uptrace". De plantdichtheid was 1.7 planten per m², waarop na de 1e oogst een extra kop is aangehouden, waardoor de stengeldichtheid op 3.4 planten per m² uit kwam.



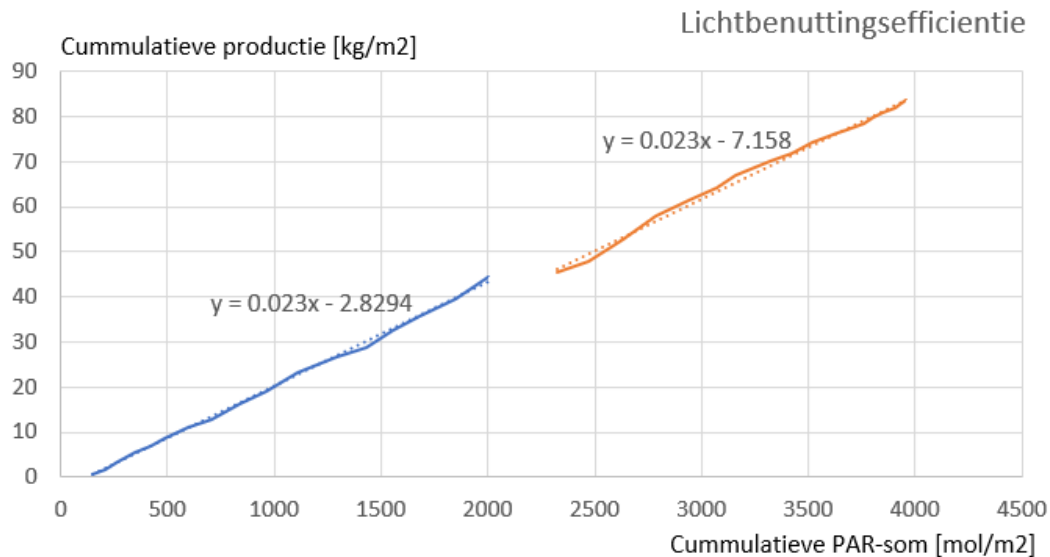
Figuur 21 *Komkommernegewas in de Winterlichtkas in 2024.*

Zoals eerder al aangegeven bestond dit teeltjaar uit twee teelten achter elkaar. Hierdoor is er in de zomer een korte periode zonder oogst. De productie in stuks per m² per week is getoond in onderstaande grafiek.



Figuur 22 *Komkommeroogst in stuks per week in het teeltexperiment in de Winterlichtkas in 2024.*

Uiteraard is de wegvallende productie in de zomer in termen van stuks/m² een nadeel, maar aangezien de productprijzen in de die periode vaak laag zijn weegt dit niet zo zwaar ten opzichte van het voordeel dat een jong gewas weer een frisse start kan maken en de productiviteit in de na-zomer en herfst op peil blijft. De geregistreerde oogstwaarnemingen laat dan ook zien dat de 2^e teelt een precies gelijke productiviteit levert als de 1^e teelt. Uitgaande van de lichtsommen die in de kas gemeten zijn was de lichtbenuttingsefficiëntie 23 gram versgewicht per mol PAR, wat bijna 10% meer is dan de 21 gram versgewicht per mol PAR die in 2023 behaald is.



Figuur 23 Lichtbenuttingsefficiëntie in de twee achtereenvolgende teelten in de Winterlichtkas in 2024.

Een lichtbenuttingsefficiëntie van 23 gram per mol PAR is voor komkommer praktijk-conform zodat gesteld kan worden dat het ontvochtigingssysteem geen effect op de gewasproductie heeft gehad. Overigens wordt hier nog even herhaald dat de lichtbenuttingsefficiënties steeds is berekend vanaf het moment van eerste oogst.

2.3 Conclusies uit twee jaar experimenten met ontvochtiging met latente warmteterugwinning

De twee achtereenvolgende experimenten met ontvochtigingsapparaten waarmee de kas deels, en vooral in de winter, gesloten kan worden gehouden laten zien dat met deze apparatuur de resterende warmtevraag enorm kan worden verlaagd. Het sluiten van de ramen beperkt het energieverlies van de kas en de latente warmte die bij de ontvochtiging vrijkomt draagt bij aan de invulling van de warmtevraag.

De combinatie van de ontvochtigingsinstallaties met latente warmte-terugwinning, het intensief gebruik van meerdere schermen, de hoge luchtvochtigheid die tijdens de teelt geaccepteerd werd en de iets kortere teeltperiode (300 dagen) maakte dat in beide jaren het gasverbruik onder de $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ per jaar uit kwam. In 2023 was dit $9.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ en in het tweede jaar was dit $6.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$. Beide waarden gelden voor een situatie waarin ook de gevelverliezen zoals die in een praktijkkas zouden optreden zijn meegenomen.

De komkommerproductie was marktconform. In 2023 werd $92 \text{ kg}/\text{m}^2$ geplukt bij een lichtbenuttingsefficiëntie 21.6 gram per mol, en het tweede jaar $83 \text{ kg}/\text{m}^2$. De lichtbenuttingsefficiëntie was in het tweede jaar met 23 gram per mol iets hoger, maar omdat de komkommers in het tweede jaar in twee cycli werden geteeld kwam de totale productie lager uit.

Om het gasverbruik tot deze lage waarde te brengen was elektriciteit nodig. In 2023 kwam dit op $30 \text{ kWh}/\text{m}^2$ en in 2024 was dit $26 \text{ kWh}/\text{m}^2$.

Wanneer de energie-efficiëntie wordt uitgedrukt in energiegebruik per kg product dan was die bij de beproefde 'stekker-ontvochtiger' 0.04 m^3 a.e. aan warmte en 0.12 kWh aan elektriciteit per komkommer (uitgaande van een gemiddeld vruchtgewicht van 380 gram).

Het ontvochtigingssysteem op basis van de luchtbehandelingskast met lucht/lucht tussenkoeler had hetzelfde elektriciteitsverbruik per komkommer (0.12 kWh), en een lager gasverbruik (0.03 m^3 a.e. per komkommer). Het feit dat het stroomverbruik per komkommer ondanks het efficiëntere ontvochtigingssysteem niet lager was kwam door de iets lagere productie in 2024.

Ten behoeve van de transitie naar een glastuinbouw zonder fossiele energie biedt het tweede systeem wat beproefd is de meeste perspectieven. Behalve dat het systeem nu al in het laagste resterende gasverbruik resulteerde biedt het de mogelijkheid om duurzame warmte vanuit zomerse overschotten te verzamelen en in een seizoensopslagsysteem te bufferen. Deze mogelijkheid is in het experiment niet in praktische zin uitgezocht, maar de verzamelde data en prestaties maakt het mogelijk om dit potentieel verder te verkennen. Hier wordt in het volgende hoofdstuk aandacht aan geschonken.

In dat hoofdstuk wordt ook gekeken naar het potentieel van de beide beproefde systemen onder andere omstandigheden dan in de proef is toegepast. Zo wordt er gekeken naar de resultaten indien de efficiënte ontvochtigers worden gebruikt om bij een wat lagere luchtvochtigheid te telen en wordt het perspectief berekend voor een belichte komkommerteelt.

3 Perspectief bij andere omstandigheden dan in de proeven

3.1 Van experiment naar simulatiesettings

De resultaten van de experimenten in '23 en '24 laten een forse daling van het gasverbruik zien bij een niet al te hoog elektriciteitsverbruik. De energiegebruikscijfers, en met name het resterende gasverbruik over het tweede jaar zijn ook nog eens flink lager dan die in het eerste jaar. De productie was het eerste jaar wat hoger dan die in het tweede jaar. De verschillen worden veroorzaakt door een combinatie van effecten van de toegepaste ontvochtigingstechnologie, jaarlijkse variatie in buitenomstandigheden, verschillen in teeltwijze en een aanpassing aan het schermstelsel.

Om deze invloedsfactoren zo goed mogelijk van elkaar te kunnen onderscheiden is gebruik gemaakt van het simulatiemodel Kaspro, wat is uitgebreid met modules die het gedrag van de stekker-ontvochtiger uit 2023 en de AVS-D uit 2024 beschrijven. Voor de stekker-ontvochtiger wordt daarbij gebruik gemaakt van de geconstateerde ontvochtigingsefficiëntie van 1.9 liter per kWh (dat is inclusief het verbruik voor de luchtverdeling) en voor de AVS-D van een ontvochtigingsefficiëntie van 3.0 liter/kWh (ook inclusief het verbruik voor de luchtverdeling). Tevens is het feit dat het eerste type de kaslucht proportioneel met de hoeveelheid ontvochtiging verwarmt in het model ingebouwd. De AVS-D kan, net als in werkelijkheid, de lucht tijdens het ontvochtigen op onveranderde temperatuur uitblazen, maar ook wat koelen, indien gewenst. Daardoor kan de AVS-D ook als energie-oogster worden ingezet.

Het simulatiemodel berekent het dynamisch gedrag van de kas in interactie met het gewas en het ontvochtigingssysteem. Het model heeft daarvoor een stooklijn, een ontvochtigings-setpoint en een ventilatielijn nodig en deze zijn ontleend aan het teeltexperiment in 2023. Als 'standaardschermstrategie' is de gebruikswijze van de schermen zoals die in 2023 is toegepast gebruikt.

Het temperatuurverloop dat in 2023 is toegepast is enigszins af te lezen uit figuur 4, maar om de temperatuur-regeling onafhankelijk van de apparatuur te kunnen definiëren moet bij vergelijk van systemen niet de stooklijn gelijk zijn, maar de resulterende kasluchttemperatuur.

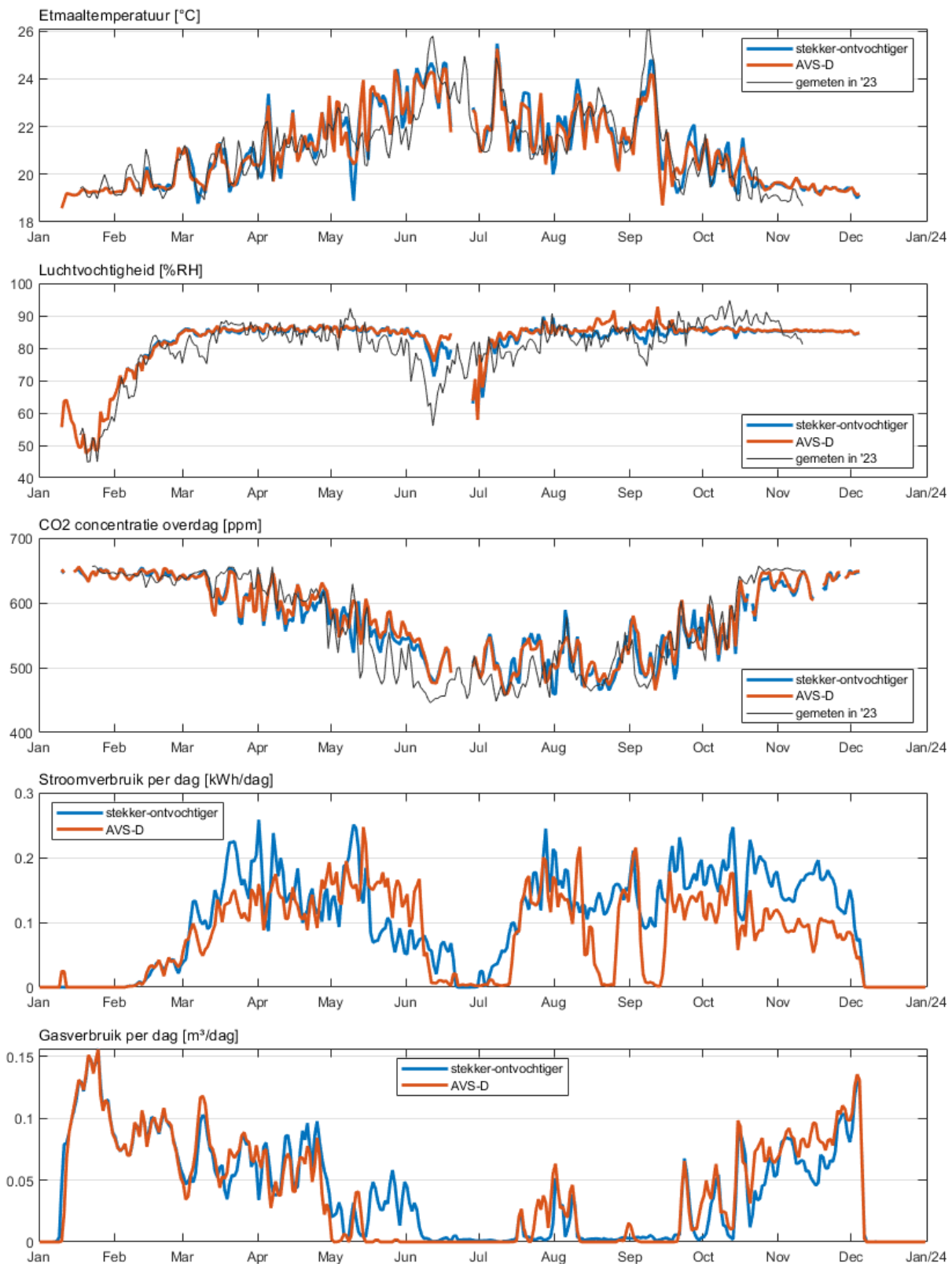
Bij vergelijking van de twee ontvochtigingssystemen is bij gelijk gehouden stooklijn de resulterende temperatuur niet per se gelijk omdat de stekker-ontvochtiger een temperatuur-opdrijvend effect heeft. Tijdens de teelt is daar door de teelt-manager op gereageerd door waar nodig de stooklijn te verlagen om op de gewenste etmaaltemperatuur te komen. Voor goede vergelijking tussen de systemen is daarom het temperatuur-profiel over de dag uit het experiment overgenomen, maar is het niveau van dit profiel waar nodig iets omhoog of iets omlaag geschoven om uit te komen op een RTR (=Ratio Temperature Radiation) die overeenkwam met die in het experiment in 2023. Afgaande op de lichtsommen en etmaaltemperaturen die in 2023 gemeten zijn was de RTR $19 + 0.14 \times \text{DLI}$, waarin DLI staat voor 'Daily Light Integral', de dagelijkse PAR-som op gewasniveau.

Het teeltexperiment is in 2023 bewust aan de late kant begonnen, juist om de trage plantontwikkeling tegen relatief hoge stookkosten te voorkomen en omdat het gewas als één lange teelt is uitgevoerd is de teelt vrij vroeg gestopt. Het is voor een onbelichte komkommerteelt echter gebruikelijk om wat eerder te planten, een snelle teeltwisseling in de zomer toe te passen en dan met de tweede teelt tot begin december door te gaan. Voor de vergelijkende berekeningen tussen de twee systemen is daarom uitgegaan van een 1^e teeltcyclus van 10 januari tot 20 juni en een tweede cyclus van 28 juni tot 5 december.

Voor de luchtvochtigheidsregeling zijn de setpoints uit 2023 overgenomen en die waren (het grootste deel van het jaar) 3 gr/m³ overdag en 2.5 gr/m³ 's nachts (de kasklimaatregeling had een vocht-regeling op basis van verzadigingsdeficit).

Voor de CO₂-dosering wordt, net als in het experiment in 2023, overdag een setpoint van 650 ppm gehanteerd. In de winter, met gesloten ramen wordt deze concentratie ook gehaald, maar in de zomer zal de concentratie vanwege de beperkte doseercapaciteit waarmee in het experiment gewerkt is (60 kg/(ha uur)) vaak niet veel hoger dan 500 tot 550 ppm kunnen komen. Deze lage doseercapaciteit is gekozen omdat in teelten waarin geen of weinig fossiele energie wordt gebruikt een beduidend lagere doseercapaciteit gebruikt zal worden dan vandaag de dag gebruikelijk.

De grafieken in figuur 23 tonen de belangrijkste kasklimaat en energieverbruiks-patronen voor de twee ontvochtigingssystemen, gesimuleerd in een komkommerteelt zoals hierboven beschreven.



Figuur 24 Berekend kasklimaat en energieverbruik voor de beide typen ontvochtigers, werkend volgens de prestaties zoals die het experiment vastgesteld zijn. Om de leesbaarheid te verbeteren zijn de daggemiddelde waarden met een voortschrijdend gemiddelde filter een beetje afgevlakt.

De grafieken in figuur 24 laten zien dat het simulatiemodel de kasluchttemperaturen voor de twee systemen gemiddeld genomen gelijk weet te houden (want strevend naar een RTR van $19+0.14 \times \text{DLI}$) en dat de luchtvochtigheid netjes geregeld wordt en goed in de buurt ligt van de luchtvochtigheden die in het experiment zijn gemeten. Uiteraard zit er een behoorlijk verschil rond de teeltwisseling in de zomer omdat er in de simulatie een week geen gewas is, gevolgd door een periode met weinig gewas, waar er in 2023 in de zomer is doorgeteeld.

Qua energieverbruik is duidelijk te zien dat stekker-ontvochtiger gemiddeld meer elektriciteit gebruikt dan de berekeningen met de AVS-D ontvochtiger. Het berekende jaarverbruik komt op 37 kWh/(m² jaar) voor de stekker-ontvochtiger en 29 kWh/(m² jaar) voor de AVS-D-ontvochtiger. Dit is in lijn met de experimentele resultaten, waar we ook zagen dat de kas in 2024 beduidend minder stroom gebruikte dan in 2023.

Het berekende gasverbruik laat zien dat er perioden zijn waarin de kas met stekker-ontvochtiger wat meer gas verbruikt, maar vooral in het najaar gebruikt de kas met stekker-ontvochtiger minder gas. Op jaarbasis berekent het simulatiemodel voor de kas met stekker-ontvochtiger een gasverbruik van 14.2 m³ en voor de kas met AVS-D een jaarverbruik van 14.4 m³ aardgas. Dit lijkt in tegenspraak met de experimentele resultaten waar in 2024 niet alleen een lager stroomverbruik, maar ook een lager gasverbruik werd geconstateerd.

Deze ogenschijnlijke discrepantie wordt veroorzaakt doordat er tussen de twee experimenten niet alleen verschil zat in het toegepaste ontvochtigingssysteem, maar ook in het schermstelsel. Bovendien is het buitenklimaat in de twee jaren natuurlijk verschillend. Daarbij zijn de berekende gasverbruiken sowieso hoger dan in het experiment omdat er 5 extra teeltweken in de winter zijn bijgekomen, die bij een winters verbruik van rond de 0.1 m³/(m² dag) in een additioneel verbruik van 3.5 m³ resulteren.

Om deze effecten te ontrafelen zijn in onderstaande tabel de totaalverbruiken getoond zoals hierboven genoemd, maar ook voor het geval de vergelijking zou worden gedaan met de buitenomstandigheden van 2024 en wanneer er in beide gevallen met het schermstelsel dat in 2024 is toegepast zou zijn gewerkt.

Tabel 1 *Berekende energieverbruiken en ontvochtiging van de beide ontvochtigingssystemen bij gelijke kasklimaat- en teeltcondities over de twee successievelijke jaren en bij gebruik van het schermstelsel uit 2023 of het schermstelsel uit 2024.*

Simulatie-case		Gas m ³ /m ²	Elektriciteit kWh/m ²	Ontvochtiging liter/m ²
schermstelsel 2023 en buitenklimaat 2023	Stekker-ontvochtiger	14.2	37	71
	AVS-D	14.4	29	92
schermstelsel 2023 en buitenklimaat 2024	Stekker-ontvochtiger	14.1	38	72
	AVS-D	14.2	28	88
schermstelsel 2024 en buitenklimaat 2023	Stekker-ontvochtiger	11.2	37	71
	AVS-D	11.7	28	89
schermstelsel 2024 en buitenklimaat 2024	Stekker-ontvochtiger	11.0	38	72
	AVS-D	11.3	27	85

De tabel laat zien dat bij elke vergelijking tussen de twee systemen de ontvochtiging met de stekker-ontvochtiger tot het laagste gasverbruik leidt en de ontvochtiging met de AVS-D tot het laagste stroomverbruik.

De tabel laat ook zien dat de berekende verbruiken nauwelijks over de twee jaren verschillen zolang er hetzelfde scherm wordt gebruikt, maar dat het beter isolerende bovenste scherm een fors effect op het gasverbruik heeft (ordegrootte 3 m³/(m² jr)). Het feit dat het resterende gasverbruik in het experiment in 2024 lager was dan in het experiment in 2023 komt dus door de verbetering van het schermstelsel en niet door de AVS-D. De AVS-D zorgt vooral voor een verlaging van het stroomverbruik, maar dat gaat gepaard met wat extra gasverbruik.

Verlaging van het elektriciteitsverbruik voor de ontvochtiging was het primaire doel van de lucht/lucht tussen-koeler in de luchtbehandelingskast en dat blijkt in het experiment goed gelukt.

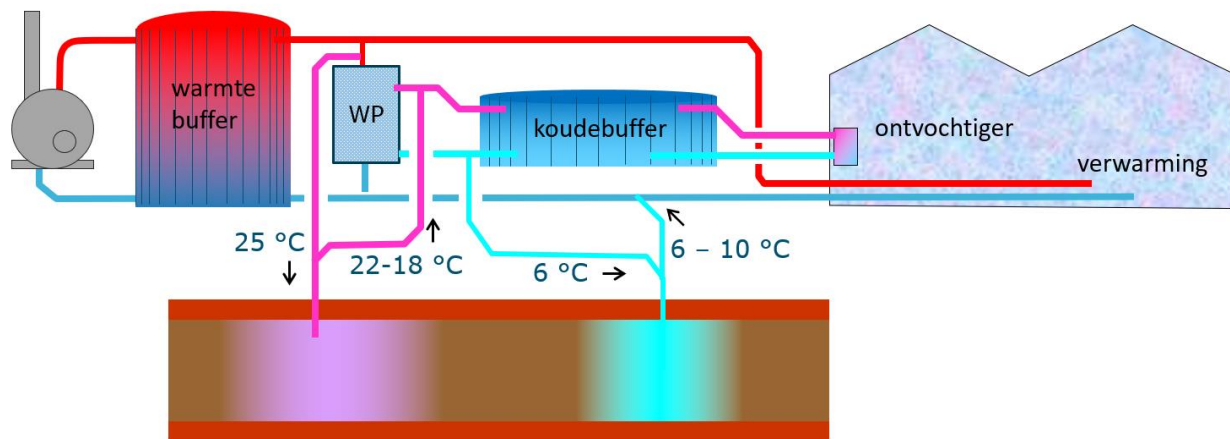
Het feit dat de luchtbehandelingskast ook warmte kan oogsten en kan opslaan in een seizoensbuffer is tot nu toe echter nog niet genoemd. Deze mogelijkheid heeft de AVS-D wel, terwijl de hier gebruikte stekker-ontvochtiger deze mogelijkheid niet heeft. Het additionele besparingspotentieel wat hiermee behaald kan worden wordt besproken in de volgende paragraaf.

3.1.1 Gebruik van de AVS-D ontvochtiger voor seizoensbuffering.

In figuur 17 (pagina 27) bleek al dat er tijdens het experiment momenten waren waarop er ontvochtigd werd terwijl de daarbij vrijkomende warmte niet gebruikt kon worden voor een duurzame kasverwarming. In het experiment in 2024 werd deze warmte vernietigd.

De grafiek in figuur 17 laat tevens zien dat er perioden zijn waarin er wel een warmtevraag was, maar geen of een ontoereikende hoeveelheid geoogste warmte. Als de warmte-overschotten in een seizoensopslag zouden worden opgeslagen zou de warmtepomp ook in perioden met een schaarste aan duurzame energie kunnen draaien.

Het energiesysteem zou er dan uitzien zoals in onderstaande figuur.



Figuur 25 Schets van een verwarmingssysteem waarin overschotten aan warmte die uit de kas geoogst wordt via een seizoensopslagsysteem kan worden verzameld ten behoeve van de verwarming in de winter.

Het schema toont de warmtepomp als centrale component in het verwarmingssysteem. De warmtepomp maakt warmte die direct gebruikt kan worden voor de kasverwarming of opgeslagen kan worden in de warmtebuffer. Daarbij wordt tegelijkertijd koud water gemaakt, wat in de koudebuffer wordt ondergebracht. Al dan niet parallel aan de koudeproductie onttrekt de ontvochtiger koud water aan de koudebuffer en warmt dit tijdens het ontvochtigings- en/of koelproces op naar 12 °C. Dit 'opgewarmde' water¹ vormt, via de warmtepomp in het voor- en najaar de belangrijkste energiebron voor de kasverwarming. Als de AVS-D hartje zomer, en/of bij de teeltwisseling wordt aangezet zal het duidelijk zijn dat de koudebuffer al gauw helemaal opgewarmd is naar 12 °C omdat de geringe warmtevraag in die periode maakt dat de warmtebuffer niet of nauwelijks ontladen wordt en de warmtepomp dus stil staat.

¹ Tussen aanhalingstekens omdat 12 °C natuurlijk nog steeds koud water is, maar beslist opgewarmd ten opzichte van 6 °C.

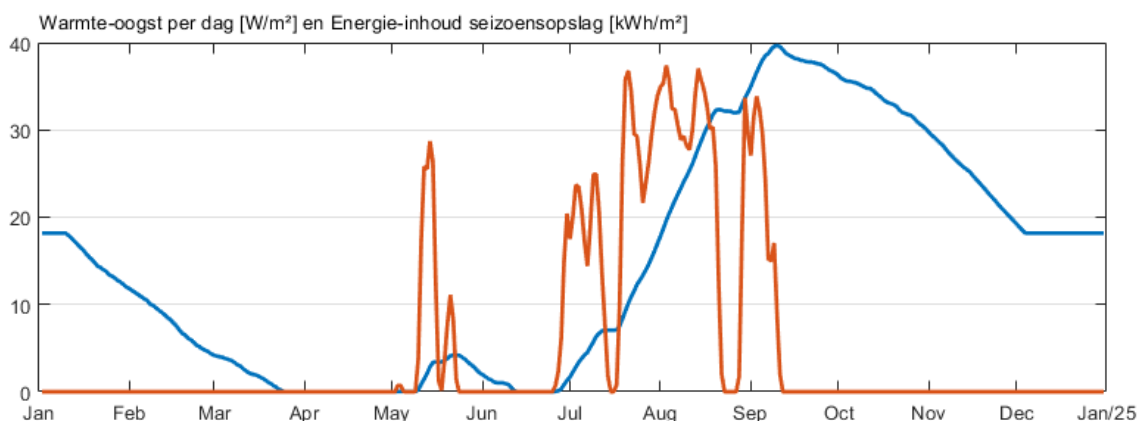
De in figuur 24 getoonde koppeling met een seizoensopslagsysteem maakt het mogelijk om in die situatie warmte in een seizoensbuffer op te slaan door water van 6 – 10 °C uit de koude put te pompen, dit op te warmen naar 25 °C en naar de warme bron te pompen.

Als in het najaar en/of de winter de ontvochtiger te weinig warmte uit het ontvochtigingsproces oplevert om de warmtepomp te kunnen laten draaien kan er warmte aan het opgewarmde seizoensopslagsysteem worden onttrokken. Dit water zal niet meer de oorspronkelijke 25 °C zijn, maar altijd een stuk warmer dan de 6 °C waarnaar de warmtepomp het water kan afkoelen. Ook bij watertemperaturen ver onder de 25 °C waarmee de energie was opgeslagen kan het seizoensopslagsysteem warmte blijven leveren.

Zelfs als alle warmte die in de zomer is opgeslagen aan de aquifer onttrokken is kan er nog warmte aan worden onttrokken omdat er dan water van 10-11 °C uit de bron zal komen (de natuurlijke diepe bodemtemperatuur in Nederland). Uitkoeling van grondwater van 10 °C naar 6 °C levert nog steeds een bron van warmte. Toch spreken we in dit geval van een seizoensopslagsysteem dat 'leeg' is vanwege de wettelijke verplichting om een WKO-systeem systemen (Warmte/Koude opslag) thermisch in balans te houden.

Het heen en weer pompen van water over de aquifer kost elektriciteit. De hoeveelheid zal in de praktijk afhankelijk zijn van de bodemgesteldheid en het temperatuurverschil tussen warme en koude buffer. Bij het relatief grote temperatuurverschil dat in deze berekeningen wordt gebruikt is een COP van 25 een redelijk getal. Dit betekent dat het 1 kWh aan pompvermogen kost om 25 kWh aan warmte in de aquifer op te slaan of er aan te onttrekken.

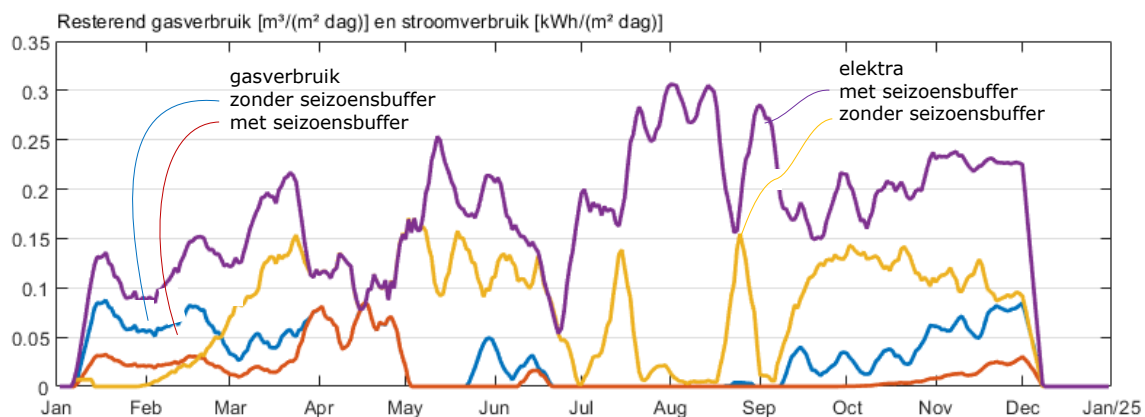
Zo'n seizoensopslagsysteem is in balans wanneer er op jaarbasis evenveel warmte wordt opgeslagen als onttrokken. Figuur 26 toont de hoeveelheid energie die met het systeem zoals in 2024 in de Winterlichtkas beproefd opgeslagen had kunnen worden. De figuur laat zowel het daggemiddelde vermogen zien waarmee warmte-overschotten worden opgeslagen en de cumulatieve hoeveelheid energie in het opslagsysteem.



Figuur 26 Energie-inhoud van het seizoensopslagsysteem (blauwe lijn) en het gemiddeld vermogen per dag waarmee warmte-overschotten uit de kas kunnen worden geoogst.

De figuur laat zien dat er aan het eind van de zomer uiteindelijk 40 kWh/m² aan energie in de seizoensopslag is ondergebracht en dat deze voorraad eind april is opgebruikt. De blauwe lijn moet dus 'cyclisch' worden gelezen.

Figuur 27 toont het resterende gasverbruik en het elektriciteitsverbruik van de situatie waarin warmteoverschotten in een seizoensopslag-systeem worden opgeslagen, in vergelijking met de situatie waarin het ontvochtigingssysteem (en warmtepomp) alleen op een etmaalbuffer is aangesloten.



Figuur 27 Resterend gasverbruik en elektriciteitsverbruik in geval de AVS-D alleen in combinatie met etmaalbuffers wordt gebruikt (blauwe en gele lijn) en wanneer de AVS-D ook wordt gebruikt om in de zomer energie te oogsten om deze via een seizoensopslagsysteem later te kunnen gebruiken. De lijnen zijn afgevlakt met een 7-daags voortschrijdend gemiddelde-filter om de leesbaarheid van de grafiek te vergemakkelijken.

Ook in figuur 27 is weer de uitruil tussen elektriciteitsverbruik en gasverbruik te zien. In de periode van warmte-oogst (juli – september) verbruikt de kas waarin de AVS-D voor energie-oogst en opslag wordt gebruikt aanzienlijk meer elektriciteit dan de kas waar alleen etmaalbuffers worden gebruikt. Deze investering in elektriciteitsverbruik maakt dat er in de rest van het jaar, minder gas wordt verbruikt. Het gebruik van de AVS-D voor de oogst van warmte voor het vullen van een seizoensopslag, en het daardoor mogelijk gemaakte toegenomen gebruik van de warmtepomp in de winter verhogen het elektriciteitsverbruik op jaarbasis van 27 kWh (het oppervlak onder de gele lijn) naar 59 kWh (het oppervlak onder de paarse lijn).

Het gasverbruik neemt af van 11.3 m³/(m² jr) naar 4.8 (m³/(m² jr). De besparing op gasverbruik door de toepassing van seizoensbuffering en een warmtepomp kost daarmee 4.9 kWh per bespaarde m³ aardgas equivalent.

Het intensiever gebruik van de ontvochtiger/koeler heeft naast het effect op het elektriciteitsverbruik en resterend gasverbruik ook effect op de hoeveelheid water die teruggewonnen wordt. Voor de volledigheid is ook het CO₂-verbruik en het berekende effect op productie bekeken.

Het totaal aan effecten wordt in onderstaande tabel samengevat, samen met deze kentallen voor de 'stekker-ontvochtiger'.

Tabel 2 Belangrijkste prestatie-kenmerken van de AVS-D ontvochtiger met en zonder seizoensbuffering. Er is overall weer uitgegaan van het kasklimaat zoals in 2023 werd nagestreefd, maar het effect van de seizoensbuffering is berekend met het kassysteem en buitenklimaat van 2024. De twee regels met betrekking tot de 'stekker-ontvochtigers' zijn toegevoegd om de resultaten met de AVS-D in perspectief te kunnen plaatsen.

		Gas m ³ /m ²	Electra kWh/m ²	Water liter/m ²	CO ₂ kg/m ²	Prod [%]
Schermst. '24, buitenkl. '24	AVS-D zonder seizoensbuf.	11.3	27	85	14.9	100
	AVS-D met seizoensbuf.	4.8	59	127	14.6	100
	Stekker-ontvochtiger	11.3	38	73	15.1	100
Schermst. '23, buitenkl. '23	Stekker-ontvochtiger	14.2	37	71	15.3	104

Doordat de ontvochtiger meer draaiuren maakt indien hij ook voor de oogst van warmte voor het vullen van een seizoensbuffer wordt gebruikt wordt er ook meer water teruggewonnen. De ongeveer 40 liter water die extra wordt teruggewonnen zal vooral in de zomer zijn, dus in perioden waarin het regenwaterbassin regelmatig aangevuld zal moeten worden met grond- of leidingwater. Met een gemiddeld zomers waterverbruik van een komkommengewas van 4 tot 5 liter per m²/dag zal het extra gebruik van de ontvochtiger het moment waarop water moet worden ingenomen met een ruime week uitgesteld kunnen worden.

Het extra elektriciteitsverbruik voor de situatie mét seizoensbuffer ten opzichte van de situatie zonder seizoensbuffer is 32 kWh/m². De extra hoeveelheid water die onttrokken wordt is 42 liter. Het stroomverbruik voor deze extra liters (0.76 kWh/liter) is meer dan twee keer zo hoog als het stroomverbruik voor de eerste 85 liter (0.32 kWh/liter). Dit komt omdat bij de benutting van warmte uit de seizoensbuffer, de energie twee keer over de warmtepomp is gelopen. Eerst toen de warmte werd verzameld in de zomer, en later toen de warmte vanuit de seizoensbuffer moest worden opgewerkt. Bovendien is er elektriciteit gebruikt voor het infiltreren en onttrekken van water als energiedrager voor de seizoensbuffer.

3.1.2 Gebruik van de beide ontvochtigers in een belichte komkommerteelt.

In de grafiek van figuur 25 is te zien dat de seizoensbuffer vanaf halverwege de herfst snel 'leegloopt' en vroeg in het voorjaar leeg is. Dat komt omdat het aanbod van zonlicht, waaruit het ontvochtigingssysteem via de onttrekking van latente warmte de energie voor de warmtepomp betreft, in die periode klein is en de warmtevraag hoog.

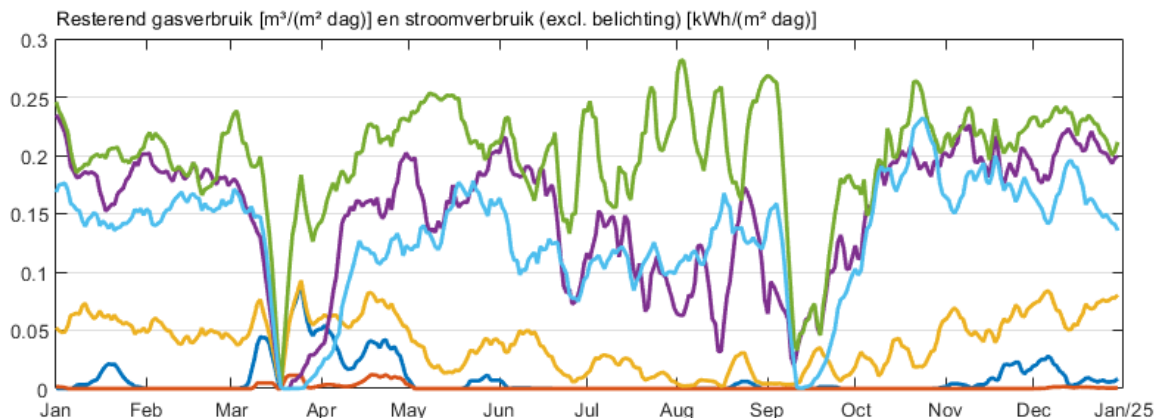
Dit is heel anders in een belichte teelt. Als er bij gebruik van belichting wordt gerekend met een lichtintensiteit van bijvoorbeeld 220 µmol/(m² s), 18 uur belichting en LED's met een efficiency van 3.2 µmol/J dan wordt er de winter door dagelijks zo'n 1.2 kWh/m² aan elektrische energie aan de kas toegevoerd. Dat is door de bank genomen een factor 10 meer dan het verbruik van de ontvochtiging en qua warmte-inhoud ongeveer 0.14 m³ a.e. m² per dag. Dit is meer dan de resterende gasbehoefte die we aflezen uit bijvoorbeeld figuur 26.

Nou kunnen deze getallen niet zonder meer met elkaar vergeleken worden, want bij een hogere lichtintensiteit hoort een hogere teelttemperatuur en bij meer licht gaat een plant ook meer verdampen. En verdamping kost energie. Echter, daar waar in een standaard kas een hogere verdamping vaak leidt tot een toename van het bewust op een kier zetten van ramen en schermen, vormt de toegenomen verdamping door het grotere licht-aanbod voor een kas met een intern ontvochtigingssysteem een toename in de hoeveelheid energie die vanuit de kas onttrokken kan worden.

Figuur 28 toont een grafiek die vergelijkbaar is aan figuur 27 maar dan voor een belichte komkommerteelt. Voor deze berekening is uitgegaan van twee teelt-cycli. De eerste van 15 september tot 15 maart en de tweede van 22 maart tot 8 september. Qua schermstelsel is uitgegaan van de schermen zoals die in het eerste experiment zijn gebruikt, dus drie schermen, waarvan het bovenste scherm een donkerdoek, het onderste scherm het vocht-doek en het middelste scherm een standaard energiescherm. De schermen worden volgens dezelfde (intensieve) strategie gebruikt, resulterend in 3200 schermuren voor het donkerdoek, 4600 uren voor het energiedoek en 3900 uren voor het vochtscherm.

De belichting wordt gebruikt van 1 oktober tot 5 maart. Qua lichtintensiteit is uitgegaan van 220 µmol/(m² s) en maximaal 18 uur belichting per dag. De bijdrage van de lampen is daardoor maximaal 14.2 mol/(m² dag) en het stroomverbruik van de belichting komt op maximaal 1.24 kWh/(m² dag). Als er meer dan 200 W/m² aan zonlicht is gaan de lampen overdag uit en de belichting vult aan tot een lichtsom van maximaal 20 mol/(m² dag).

De temperatuur-regeling wordt, net als in het experiment geregeld met RTR op 19 +0.4xDLI en de luchtvochtigheid wordt, net als in het experiment op 3 gr/m³ overdag en 2.5 gr/m³ 's nachts geregeld. Omdat een belicht gewas meer verdampt dan een onbelicht gewas is de ontvochtigingscapaciteit verhoogd naar 50 gr/(m² uur).



Figuur 28 Resterend gasverbruik en elektriciteitsverbruik van de warmtepomp/ontvochtiger in een belichte komkommerteelt bij gebruik van een 'stekker-ontvochtiger' (gele en turquoise lijn), een AVS-D in combinatie met etmaalbuffers (blauwe en paarse lijn) en wanneer de AVS-D ook wordt gebruikt om in de zomer energie te oogsten om deze via een seizoensopslagsysteem later te kunnen gebruiken (rode en groene lijn).

De lijnen zijn afgevlakt met een 7-daags voortschrijdend gemiddelde-filter om de leesbaarheid van de grafiek te vergemakkelijken.

De grafiek toont opnieuw de algemene trend van uitruil tussen gas- en elektriciteitsverbruik. De AVS-D met seizoensbuffering leidt tot het hoogste stroomverbruik (66 kWh voor de warmtepomp, inclusief het stroomverbruik voor de WKO-pompen), maar vrijwel geen gasverbruik meer ($0.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$).

Bij gebruik van de stekker-ontvochtiger is het stroomverbruik in verband met de ontvochtiging 47 kWh per m^2 per jaar, maar is er een fors resterend gasverbruik ($14.5 \text{ m}^3/\text{m}^2$).

Voor de AVS-D ontvochtiger met alleen etmaalbuffers valt op dat die niet zoveel meer stroom verbruikt dan de stekker-ontvochtiger, maar het resterend gasverbruik wel enorm kan verlagen. Dit komt omdat er in een intensief belichte teelt ($220 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$, 18 uur per dag) in een kas met een goede scherm-installatie in de winter overdag warmte kan worden verzameld ten behoeve van de verwarming in het onbelichte 6 uur van de nacht. Als de ontvochtiging met een stekker-ontvochtiger plaats vindt, zal er overdag vaak een warmteoverschot zijn waardoor er moet worden gekierd, terwijl er in de onbelichte nacht moet worden bijgestookt. Dit is ook te zien aan de veel kleinere hoeveelheid water die met de ontvochtiger wordt teruggewonnen (91 liter, waar de AVS-D op het dubbele uitkomt) en het hogere CO_2 -verbruik. Beiden worden veroorzaakt door het groetere lekverlies vanuit de kas.

Als de kas zou zijn ontvochtigd met buitenlucht aanzuiging, met of zonder voelbare warmteterugwinning (balansventilatiesysteem), worden de warmteverliezen uiteraard heel veel groter en is er geen energiebron voor een warmtepomp. In dat geval zou alle warmte vanuit de ketel geleverd moeten worden en komt het gasverbruik op respectievelijk 29.6 en $23.1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jr})$. Ook het CO_2 -verlies is dan groter, namelijk zo'n 28-29 $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ jr})$.

Tabel 3 Belangrijkste jaarrond prestatie-cijfers van de twee typen ontvochtiger in een belichte komkommerteelt, waarbij voor de AVS-D gekeken is naar de situatie met en zonder en zonder seizoensbuffering. De stroomverbruiken voor de belichting zijn in alle gevallen gelijk (160 kWh/(m² jr)). In alle berekeningen is uitgegaan van een intensief geschermd kas (3 beweegbare schermen, waarvan twee transparant) waarin met een behoorlijk hoge luchtvochtigheid is geteeld (gemiddeld 87% RV). Ter vergelijking is ook het berekende gasverbruik getoond indien de kas zou zijn ontvochtigd met een buitenlucht-aanzuigsysteem bij overigens dezelfde teeltcondities.

	Gas	Electra (kWh/m ²)		Water	CO ₂
	m ³ /m ²	Ontv. / Warmtep.	belichting	liter/m ²	kg/m ²
AVS-D zonder seizoensbuffer	2.6	55	160	181	21.3
AVS-D met seizoensbuffer	0.3	66	160	196	21.0
Stekker-ontvochtiger	14.5	47	160	91	24.2
Ontvocht. met buitenlucht inblaas	29.6	6	160	0	29.6
Ontvochtiging. met balansventilatie	23.1	11	160	118	27.9

Tabel 3 laat overigens ook nog zien dat het stroomverbruik voor belichting een heel stuk groter is dan het stroomverbruik voor de ontvochtiging en verwarming. Op jaarbasis gaat 70 tot 77% van de elektriciteit naar de belichting. Op dagbasis in de winter is het aandeel van de belichting nog hoger. Warmtepompen en ontvochtiging gebruiken dan gemiddeld rond de 0.22 kWh/(m² dag) (zie figuur 28), terwijl de belichting op de winterse dagen ruim vijf keer zoveel gebruikt (de eerder genoemde 1.24 kWh/(m² dag).

De berekeningen laten zien dat de mogelijkheid om warmte te kunnen oogsten en bufferen in de belichte teelten veel uitmaakt. Lampen leveren bij gebruik een relatief grote energie-input en de latente warmte uit de lamp-energie is al gauw meer dan genoeg om de kas op temperatuur te kunnen houden. Als deze warmte kan worden gebufferd, kan deze worden benut als duurzame warmtebron voor het onbelichte deel van de nacht.

Vanwege de potentie van buffering zijn er inmiddels ook 'stekker-ontvochtigers' die warmte ook kunnen afvoeren, en daardoor bufferen. Maar eigenlijk zijn dit dan geen 'stekker-ontvochtigers' meer omdat deze machines naast stroom en waterafvoer ook een aansluiting op een koelsysteem moeten hebben.

3.1.3 Energieverbruik bij verlaagde luchtvochtigheid

Zoals getoond in voorgaande paragrafen leidt het gebruik van ontvochtigingssystemen die latente warmte terugwinnen tot een belangrijke efficiencyverbetering van het ontvochtigingsproces. Feit blijft echter dat de ontvochtigers stroom verbruiken. Voor de stekker-ontvochtiger was dit $1/1.9 = 0.52$ kWh per liter en voor de AVS-D was dit $1/3 = 0.33$ kWh per liter.

Een lagere luchtvochtigheid zet het gewas aan tot meer verdamping, dus het zal duidelijk zijn dat het stroomverbruik toeneemt naarmate er gestreefd wordt naar een lagere luchtvochtigheid. Er moeten dan immers meer liters vocht worden onttrokken en de ontvochtiger zal een groter aantal equivalente vollast draaiuren gaan maken.

Echter, het groter aantal draaiuren leidt ook tot een grotere hoeveelheid warmte die door de ontvochtiger wordt geproduceerd. Deze zou kunnen helpen met een verlaging van het resterende gasverbruik. Uiteraard zal dat alleen helpen in perioden waar er nog een resterend gasverbruik is. Kijkend naar tabel 3 is het direct duidelijk dat hier in de belichte teelt voor de AVS-D met seizoensbuffering niets meer te halen valt (het gasverbruik was daar al bijna 0). Ook voor een belichte teelt zonder seizoensbuffering zal er met een AVS-D-ontvochtiger weinig gas bespaard kunnen worden, ook omdat het resterend verbruik daar al erg laag is.

En voor de stekker-ontvochtiger in de belichte teelt was geconcludeerd dat het gasverbruik hoog bleef omdat de ontvochtiging vaak tot een warmte-overschot leidt, wat afgevoerd wordt via kieren in scherm en ramen. Een intensievere ontvochtiging leidt dan tot een hoger stroomverbruik, maar niet tot een lager gasverbruik.

Een teelt waarin het verlagen van de luchtvochtigheid naast de onvermijdelijke stijging van het stroomverbruik via de toegenomen warmte-oogst zou kunnen leiden tot een verlaging van het resterende gasverbruik zou de onbelichte teelt kunnen zijn.

Om dit uit te zoeken wordt teruggegrepen op de simulaties uit paragraaf 3.1.1, dus de berekeningen aan een onbelichte teelt met het buitenklimaat van 2024 en het hoog isolerende schermstelsel.

Het effect van het verzamelen van meer warmte met de ontvochtiger wordt bepaald door de luchtvochtigheid zodanig te verlagen dat er 10% meer vocht condenseert.

Voor de AVS-D in de onbelichte teelt zonder seizoensbuffer wordt de ontvochtiging dan 94 liter per m² per jaar in plaats van 85 liter per m² per jaar. Voor de AVS-D met seizoensbuffer wordt dezelfde verhoging van de ontvochtiging doorgevoerd (9 liter extra), omdat de 40 liter die de ontvochtiger met seizoensbuffer extra onttrekt veroorzaakt wordt door het verzamelen van warmte voor het vullen van de buffer. De totale water-onttrekking door de AVS-D met seizoensbuffer wordt bij de verlaagde luchtvochtigheid dus 138 liter/m².

De kas met stekker-ontvochtiger bij toepassing van de in het experiment gebruikte luchtvochtigheidsinstellingen leidde tot 72 liter water/m² onttrekking. Voor dat systeem wordt de luchtvochtigheid dus zover verlaagd dat er 80 liter/m² per jaar wordt ontvochtigd.

Tabel 4 toont de berekende effecten op het stroomverbruik en het resterend gasverbruik voor alle drie de situaties.

Tabel 4 Toename van het elektriciteitsverbruik en het gasverbruik wanneer de luchtvochtigheid in de kas zodanig wordt verlaagd dat er 10% meer water door de ontvochtiger wordt onttrokken.

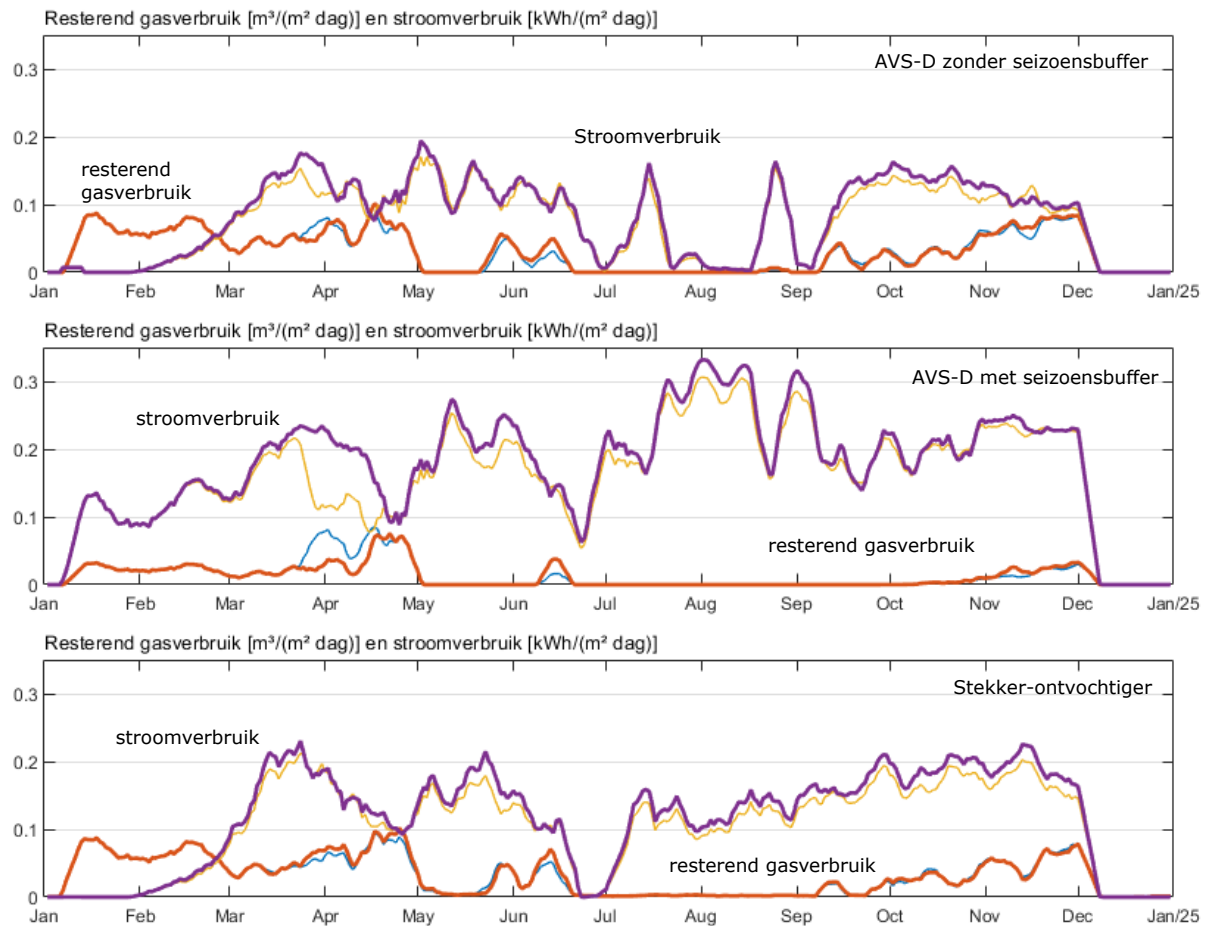
In alle berekeningen is uitgegaan van de scherminstallatie zoals die in het tweede experimentele jaar was, dus de installatie met een dubbel doek in het bovenste schermstelsel.

	Gas [m ³ /(m ² jr)]		Electra [kWh/m ²]		Extra ontv. liter/m ²
	ref	Verlaagde RV	ref	Verlaagde RV	
AVS-D zonder seizoensbuffer	11.3	11.6	27	29	9
AVS-D met seizoensbuffer	4.8	4.4	59	65	9
Stekker-ontvochtiger	11.0	11.3	38	42	8

De tabel laat zien dat het vergroten van de ontvochtiging uiteraard leidt tot een verhoging van het elektriciteitsverbruik, maar dat het resterend gasverbruik in de systemen zonder seizoensbuffer ook toeneemt. Bij het systeem met seizoensbuffer neemt het resterend gasverbruik af omdat de grotere capaciteit van de ontvochtiger die nodig is om meer vocht te kunnen onttrekken ook een vergroting van de warmte-oogst-capaciteit oplevert. Dit is echter meer een bij-effect dan een gevolg van de grotere warmte-oogst door de intensievere ontvochtiging.

De algemene regel dat het verhogen van de verdamping, in dit geval door een intensivering van de ontvochtiging, tot een toename van het energieverbruik leidt blijft gelden. Ook wanneer er gebruik gemaakt wordt van energiezuinige ontvochtigingssystemen.

Voor de volledigheid wordt in onderstaande grafiek nog getoond hoe de toename van het stroomverbruik en de effecten op het resterend gasverbruik in de onbelichte teelt er over het jaar uit zien in geval de ontvochtiging met 10% wordt verhoogd.



Figuur 29 Resterend gasverbruik en stroomverbruik van de warmtepomp/ontvochtiger in een onbelichte komkommerteelt bij een 10% hogere ontvochtiging (dikke lijnen) dan in de referentie (dunne lijnen). De drie grafieken staan voor de 3 ontvochtigingssystemen.

Voor een betere leesbaarheid is er weer gebruik gemaakt van een 7 daags voortschrijdend gemiddelde filter.

De stroomverbruiken nemen uiteraard overal vrijwel proportioneel toe (paarse lijnen liggen overal een stukje boven de dunne gele lijnen) en het resterende gasverbruik verschilt nauwelijks. Alleen voor het systeem met het seizoensopslag is er vanaf eind maart tot half april een uitruil tussen elektraverbruik en gasverbruik te zien. De grotere ontvochtigingsinstallatie die nodig is om meer te ontvochtigen maakt dat de seizoensbuffer aan het eind van de zomer meer energie bevat. Hierdoor kan er bij de opstart van de teelt langer gebruik gemaakt worden van de warmtepomp voor de verwarming.

4 Conclusies

Dit rapport over onderzoek naar energiezuinige ontvochtigingsmethoden start met een uitgebreide beschrijving van de achtergrond bij verschillende ontvochtigingssystemen en hoe deze geïmplementeerd kunnen worden.

Het blijkt dat de terugwinning van latente warmte uit de ontvochtiging een grote bijdrage kan leveren in de verduurzaming van de invulling van de warmtevraag van kassen.

De twee achtereenvolgende experimenten met ontvochtigingsapparaten in dit experiment hebben laten zien dat met beide systemen de kas deels, en vooral in de winter, gesloten kan worden gehouden. Dit beperkt het warmteverlies, maar vooral het feit dat de ontvochtigingsinstallaties de latente warmte die bij de ontvochtiging vrijkomt terugwinnen draagt bij aan de verlaging van de resterende warmtevraag.

De combinatie van de ontvochtigingsinstallaties met latente warmte-terugwinning, het intensief gebruik van meerdere schermen, de hoge luchtvochtigheid die tijdens de teelt geaccepteerd werd en de wat kortere teeltperiode (300 dagen) maakte dat in beide jaren het gasverbruik onder de $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ per jaar uit kwam. In 2023 werd een 'stekker-ontvochtiger' gebruikt. Deze gebruikte $30 \text{ kWh}/\text{m}^2$ aan elektriciteit en het resterende gasverbruik kwam op $9.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$. In het tweede jaar werd een nieuw ontwikkelde luchtbehandelingskast van Van Dijk Heating gebruikt, de AVS-D. Deze luchtbehandelingskast gebruikt een passieve lucht/lucht tussenwisselaar waardoor er minder koelvermogen nodig is. Inderdaad bleek dat deze ontvochtiger met minder elektriciteit ($26 \text{ kWh}/\text{m}^2$) meer vocht kon onttrekken ($83 \text{ liter}/\text{m}^2$ in plaats van de $71 \text{ liter}/\text{m}^2$ met de stekker-ontvochtiger werd gerealiseerd).

Het resterend gasverbruik was in het experiment met de AVS-D $6.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ en dus lager dan in het eerder jaar met de 'stekker-ontvochtiger'. Berekeningen geven echter aan dat de verlaging van het gasverbruik vooral toegeschreven moeten worden aan het betere schermstelsel ten opzichte van het jaar ervoor. Als het schermstelsel, het teeltsysteem en het buitenklimaat in het tweede jaar gelijk zou zijn geweest aan het eerste jaar zou het systeem met de AVS-D ontvochtiger ongeveer 0.3 m^3 extra aan resterend gasverbruik hebben opgeleverd.

De komkommerproductie was marktconform. In 2023 werd $92 \text{ kg}/\text{m}^2$ geplukt bij een lichtbenuttingsefficiëntie 21.6 gram per mol, en het tweede jaar $83 \text{ kg}/\text{m}^2$. De lichtbenuttingsefficiëntie was in het tweede jaar met 23 gram per mol iets hoger, maar omdat de komkommers in het tweede jaar in twee cycli werden geteeld met een vrij lange periode in de zomer zonder gewas, kwam de totale productie lager uit. De beide genoemde lichtbenuttingsefficiënties zijn bepaald vanaf het moment van eerste oogst, dus exclusief de aanloopperiode.

Om de vergelijking tussen de beide ontvochtigingssystemen op basis van zoveel mogelijk gelijke uitgangspunten te maken zijn de eindconclusies bepaald op grond van berekeningen met het simulatiemodel Kaspro, nadat dit model was uitgebreid met modules die de eigenschappen en het gedrag van de ontvochtigingssystemen conform het experiment nabootsten.

De 'stekker-ontvochtiger', een systeem op basis van 3 bouwdrogers, had een efficiëntie van $1.9 \text{ liter}/\text{kWh}$. Dat is inclusief het stroomverbruik van de circulatieventilatoren die de lucht vanonder de goot terugblazen. De AVS-D had een efficiëntie van $3 \text{ liter}/\text{kWh}$, eveneens inclusief het stroomverbruik voor de luchtcirculatie.

Met het simulatiemodel is vervolgens gerekend aan een praktijkteelt waarin wat langer wordt geteeld dan in het experiment. Uitgaande van een onbelichte teelt in twee cycli (van 10 jan - 20 juni en van 28 jun tot 5 dec) en rekening houdend met praktijk-conforme gevelverliezen zou het energieverbruik van een onbelichte komkommerteelt met de beproefde 'stekker-ontvochtiger' op 11.0 m^3 gas en 38 kWh stroom per m^2 per jaar uitkomen. Dezelfde teelt met de AVS-D als ontvochtiger zou iets meer gas verbruiken, $11.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jr})$ en wat minder stroom, $27 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ jr})$.

De AVS-D biedt echter ook de mogelijkheid om extra energie te oogsten om op te slaan in een seizoensbuffer. Daarvanuit kan een warmtepomp dan in de winter de kas met duurzame energie verwarmen, ook als er geen of een geringe hoeveelheid warmte vanuit de ontvochtiging vrijkomt. Met een installatie met de capaciteit die in het experiment is beproefd (10 m^3 luchtcirculatie per m^2 per uur) kon het resterend gasverbruik hiermee worden teruggebracht naar $4.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jr})$. Uiteraard gaat het stroomverbruik hierdoor omhoog, namelijk naar $59 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ jr})$. Hierbij is rekening gehouden met het stroomverbruik voor het onttrekken en infiltreren van water van het WKO-systeem

Het feit dat het resterend gasverbruik met de gebruikte capaciteit ook met seizoensbuffering niet helemaal naar 0 kan worden teruggebracht komt doordat er gedurende de winter nauwelijks licht is. En licht is feitelijk de basis onder de duurzame warmte-verzameling uit ontvochtiging. Licht leidt tot verdamping en de latente warmte daarin kan worden verzameld met een intern ontvochtigingssysteem.

Berekeningen aan een belichte komkommerteelt laten dan ook zien dat in dat geval een kas met een AVS-D en een seizoensbuffer (vrijwel) geen gas meer nodig heeft voor de verwarming. Praktisch alle warmte kan in dat geval worden ingevuld door de warmtepomp, maar die heeft daar dan wel $66 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ jr})$ voor nodig.

Zonder seizoensbuffer komt een belichte kas met een AVS-D als ontvochtiger op een resterend gasverbruik van $2.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jr})$ bij een stroomverbruik van de warmtepomp (incl. luchtcirculatieventilatoren) van $55 \text{ kWh}/\text{m}^2 \text{ jr}$.

Dit lage resterende gasverbruik, ook zonder seizoensbuffer, komt omdat de AVS-D wél gebruik kan maken van etmaal-buffering. Door de belichting kan er ook in de winter tijdens de licht-periode warmte worden verzameld ten behoeve van de verwarming wanneer de lampen uit zijn.

De 'stekker-ontvochtiger' kan de warmte niet bufferen. Daardoor is er in die situatie 's nachts vaak een warmte-tekort. Ook zal de kas met stekker-ontvochtiger vaker kieren moeten trekken in schermen en/of ramen om overvloedige warmte af te voeren. Immers, bij een stekker-ontvochtiger wordt alle vocht altijd direct als voelbare warmte aan de kas afgegeven, of die warmte nou nodig is of niet.

De berekeningen geven aan dat voor de belichte teelt met stekker-ontvochtiger het resterend gasverbruik op $14.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jr})$ uitkomt en het stroomverbruik voor de ontvochtiging op $47 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ jr})$.

Overigens is het stroomverbruik voor de klimatisering in alle gevallen klein ten opzichte van dat van de belichting. Bij een lamp-efficiency van $3.2 \text{ } \mu\text{mol}/\text{J}$, $220 \text{ } \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ en 18 uur belichting van oktober tot maart gaat daar $160 \text{ kWh}/\text{m}^2$ in zitten.

Het feit dat de beproefde systemen $0.52 \text{ kWh}/\text{liter}$ (de stekker-ontvochtiger) of $0.33 \text{ kWh}/\text{liter}$ (de AVS-D) aan elektriciteit gebruiken geeft aan dat ook bij energie-zuinige ontvochtigers extra ontvochtiging nog steeds tot extra stroomverbruik leidt.

De extra warmte die vrijkomt bij extra ontvochtiging compenseert in de regel niet voor de hogere energievraag die een sterker verdampend gewas oplevert. Ook bij gebruik van energiezuinige interne ontvochtigingssystemen blijft het dus van belang om te zoeken naar de hoogst mogelijke luchtvochtigheid waarbij de risico's m.b.t. de gewasgezondheid acceptabel blijven. Hierdoor wordt de gewasverdamping tot het minimum beperkt en wordt er direct op elektriciteit en verwarming bespaard.

Literatuur

- Fennis, B en J. Larrivee, 2024, Warmtepompen in de glastuinbouw, Blue terra
www.kasalsenergiebron.nl/content/docs/Handboek_Warmtepompen/Eindrapportage_warmtepompen_vo_or_de_glastuinbouw_v12.pdf.
- Helmus-Schuddebeurs, L. et.al., 2023, Tomaat fossielvrij met LED, Meer is niet altijd beter, Delphy Improvement Centre.
- De Zwart, H.F, en B. Speetjens, 2012, De Next Generation Semigesloten Kas, Wageningen UR, Rapport GTB-1292.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen University & Research
BU Glastuinbouw
Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk
Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
E glastuinbouw@wur.nl
wur.nl/glastuinbouw

Rapport XXXX



De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.
