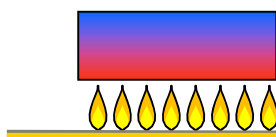
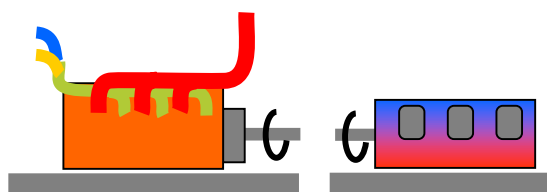
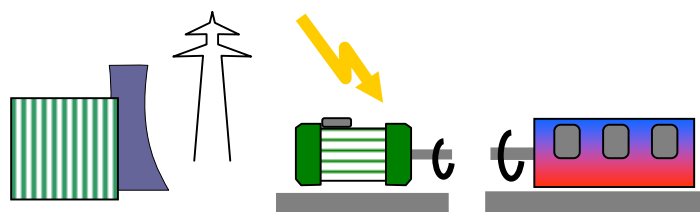


Energiezuinige vochtregulatie door middel van warmtepompen en warmteopslag

H.F. de Zwart



IMAG Nota P 2001-52

Energiezuinige vochtregulatie door middel van warmtepompen en warmteopslag

H.F. de Zwart

© 2001
Instituut voor Milieu- en Agritechniek (IMAG)
Mansholtlaan 10-12
Postbus 43, 6700 AA Wageningen
Telefoon 0317 - 476300
Telefax 0317 - 425670
www.imag.wageningen-ur.nl

Inhoud

Voorwoord	4
Samenvatting.....	5
Inleiding	8
1 Uitgangspunten en werkwijze	10
Inleiding.....	10
1.1 Bedrijfsuitrusting.....	10
1.1.1 Kasconstructie	10
1.1.2 Verwarmingssysteem en CO ₂ -dosering.....	11
1.1.3 Temperatuurregeling, ventilatie en ontvochtiging.....	11
1.2 Toegepaste teelten	12
1.2.1 Komkommer.....	12
1.2.2 Roos met assimilatiebelichting	13
1.2.3 Potplanten.....	14
1.3 Buitenklimaat.....	15
2 Energiegebruik van gangbare vochtbeheersing	17
3 Ontvochtiging door een gekoeld oppervlak.....	19
Inleiding.....	19
3.1 Ribbenbuisontvochtiging.....	20
3.2 Warmtevraag bij toepassing van ontvochtiging	22
3.3 Warmteproductie door de warmtepomp tijdens ontvochtiging versus warmtevraag	23
3.4 Korte termijn warmte-opslag	27
3.5 Lange termijn warmte-opslag.....	30
3.6 Primair energiegebruik bij ontvochtiging	32
3.7 Conclusies.....	36
4 Invloed van capaciteitsbegrenzings op de energiebesparingsresultaten	37
Inleiding.....	37
4.1 Jaarbelastingduurkrommen voor ontvochtiging	37
4.2 Energiebesparing bij verschillende ontvochtigingscapaciteit.....	39
4.3 Vereiste warmtepomp capaciteiten.....	43
4.4 Energiebesparing per eenheid geïnstalleerd vermogen	45
5 Conclusies.....	46
6 Aanbevelingen.....	48
7 Literatuur	50

Voorwoord

Het rapport “Energiezuinige vochtregulatie door middel van warmtepompen” is het eindresultaat van een studie waarin nauwgezet is gekeken naar de ins en outs van de vochtbeheersing in tuinbouwkassen. Dit project is mogelijk gemaakt door financiële ondersteuning van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, de Nederlandse Onderneming voor Energie en milieu en door het Productschap Tuinbouw.

Anders dan verwacht blijkt dat de terugwinning van latente warmte die vrijkomt bij de ontvochtiging van de kaslucht niet per definitie energie-zuinig is. Het blijkt dat in de Nederlandse omstandigheden de ontvochtiging met buitenlucht tot een lagere verwarmingsbehoefte leidt. Deze conclusie wordt in dit rapport uitgebreid onderbouwd en beargumenteerd.

Wij hopen dat dit rapport bijdraagt aan de vergroting van het inzicht rond de vochtbeheersing in kassen.

Naast het inzicht in de vochthuishouding kan dit onderzoek ook richting geven aan studies naar het perspectief van warmtepompen in de glastuinbouw.

Samenvatting

Om de luchtvochtigheid in kassen binnen veilige grenzen te houden moet regelmatig worden ontvochtigd. In de huidige tuinbouwpraktijk gebeurt dit door de ramen te openen. Op die momenten wordt kaslucht uitgewisseld met drogere buitenlucht. Omdat die lucht ook kouder is, gaat deze vorm van ontvochtiging gepaard met warmteverlies naar de omgeving. Om de luchtvochtigheid in de hand te kunnen houden beschikken kasklimaatregelaars over een luchtvochtigheidsregeling. Meestal wordt door tuinders echter een meer intuïtieve vochtregeling gebruikt, bestaande uit een minimum raamstand en/of een minimum buistemperatuur of door het instellen van een lagere ventilatietemperatuur dan de stooktemperatuur. Deze intuïtieve vochtregeling kost veel energie, maar zelfs wanneer een nauwkeurige vochtregeling wordt gebruikt, die niet meer ventileert dan nodig is, wordt een aanzienlijk deel van het energieverbruik bepaald door de vochtbeheersing. In de komkommerteelt betreft dit ongeveer 250 MJ/(m² jaar) (8 m³ aardgas). In de belichte rozenteelt vraagt de vochtbeheersing 350 MJ/(m² jaar) (11 m³ aardgas) en in de potplantenteelt betreft dit ongeveer 100 MJ/(m² jaar) (3 m³ per jaar). Wanneer gebruik wordt gemaakt van actieve ontvochtiging met warmterugwinning zouden deze verliezen naar de omgeving kunnen worden voorkomen, waardoor energiebesparing optreedt. De komkommerteelt geldt in dit rapport als voorbeeldgewas voor de intensieve groenteteelt, de (belichte) rozenteelt als voorbeeld voor een intensief geteeld bloemisterijgewas en de potplantenteelt betreft een warm geteeld siergewas.

Een actief ontvochtigingssysteem kan worden gebaseerd op vocht-onttrekking middels een hygroscopische zoutoplossing of met behulp van condensatie op een koud oppervlak. Hygroscopische systemen die onlangs zijn onderzocht bleken tot aanzienlijke warmteoverschotten op een laag temperatuurniveau te leiden. Hierdoor is de toepasbaarheid van deze systemen en het besparingspotentieel zeer beperkt. Daarom is in deze studie uitgegaan van de tweede ontvochtigingstechniek, namelijk ontvochtiging door middel van condensatie aan een koud oppervlak.

Omdat zo'n oppervlak koud is wordt ook hierbij, net als bij ontvochtiging door ventilatie, warmte aan de kaslucht onttrokken. Uit dit onderzoek blijkt dat de verwarmingsbehoefte van de kas door de actieve ontvochtiging zelfs belangrijk hoger is (8 %– 15 %) dan de warmtevraag van een kas die de luchtramen openzet om te ontvochtigen. Dit komt doordat de hoeveelheid warmte die aan de lucht wordt onttrokken per kg vochtafvoer bij het gebruik van luchtramen gemiddeld 1.5 MJ is en bij het gebruik van een koud oppervlak rond de 2.5 MJ.

Wanneer het condenserend oppervlak echter direct of indirect (door gebruik van lange termijn koude-opslag) gekoeld wordt met behulp van de koude kant van een warmtepomp gaat de 2.5 MJ/(kg ontvochtiging) niet verloren, maar kan deze worden hergebruikt. Behalve deze voelbare warmte komt via de warmtepomp ook de 2.45 MJ latente warmte per kg waterdamp beschikbaar voor de verwarming van de kas.

Doordat de aan het condenserend oppervlak onttrokken energie niet verloren gaat naar de omgeving levert het systeem ondanks de hogere verwarmingsbehoefte een energiebesparing die kan oplopen tot 16 m³ aardgas per m² per jaar. De studie geeft echter duidelijk aan dat deze energiebesparing volledig moet worden toegeschreven aan de warmtepomp en niet aan het ontvochtigingssysteem. Het ontvochtigingssysteem dient

daarbij (al dan niet na tussenkomst van een lange termijn opslagsysteem) feitelijk uitsluitend als warmtebron voor de koude kant van de warmtepomp.

Omdat in het hier bestudeerde concept het ontvochtigingssysteem de enige warmtebron voor de warmtepomp vormt geeft de ontvochtigingsbehoefte van de verschillende gewassen een bovengrens aan de hoeveelheid warmte die aan de koude kant van de warmtepomp kan worden verzameld. De ontvochtigingsbehoefte geeft daarmee ook een bovengrens aan de warmte die door de warme kant van de warmtepomp kan worden geleverd. Hierin speelt ook het type warmtepomp een belangrijke rol. Dit komt doordat het type warmtepomp via de COP in hoge mate bepaalt hoeveel warmte aan de warme kant wordt afgegeven per eenheid onttrokken warmte aan de koude kant van de warmtepomp.

Warmtepompen met een lage COP leiden in dit concept (lees: systemen waarbij de ontvochtiging de warmtebron vormt) dan tot de hoogste dekkingsgraad. Echter, een hoge dekkingsgraad leidt niet automatisch tot een hoog besparingspotentieel. Wanneer een hoge dekkingsgraad gepaard gaat met een laag besparingspercentage per eenheid geleverde warmte kan een lage dekkingsgraad met een hoog besparingspercentage gunstiger uitpakken. Zo blijkt onder de condities die in deze studie gelden dat de compressiewarmtepompen betere besparingsperspectieven leveren dan de absorptiewarmtepomp, ondanks het feit dat de laatste een veel grotere dekkingsgraad heeft. Om de relatie tussen het type warmtepomp en het besparingspotentieel te kunnen kwantificeren zijn in deze studie een drietal warmtepomptypen beoordeeld. Bij de elektrisch aangedreven warmtepomp is een COP (Coefficient Of Performance¹) van 4 aangehouden. In de primaire energiebesparingsberekeningen is rekening gehouden met het feit dat voor de productie van 1 MJ elektriciteit in het moderne Nederlandse elektriciteitsnet 2 MJ primaire energie nodig is. Het tweede type is de gasmotor aangedreven compressiewarmtepomp. Ook deze warmtepomp heeft een COP van 4. Het primaire energieverbruik van deze warmtepomp vloeit voort uit het gasverbruik van de gasmotor die met een rendement van 0.32 primaire energie omzet in asvermogen. Behalve asvermogen geeft de gasmotor ook hoogwaardige warmte. Hiervoor is een rendement van 0.55 aangehouden. Het derde type warmtepomp is de gasgestookte absorptiewarmtepomp met een COP van 1.4.

In alle systemen is er sprake van een belangrijke mismatch in de behoefte aan koude voor de ontvochtiging en de benutbaarheid van de op dat moment daarbij vrijkomende warmte in het verwarmingssysteem. Deze mismatch is groter naarmate de warmteproductie per eenheid koudeproductie groter is. De elektrisch aangedreven compressiewarmtepomp geeft daarom de minste warmte-overschotten en de absorptiewarmtepomp de meeste.

Korte termijn en/of lange termijn warmteopslag kan een oplossing bieden voor de warmte-overschotten. Bij de elektrisch aangedreven compressie warmtepomp kan een korte termijn buffer (150 m³/ha) de tijdelijke warmte-overschotten vrijwel geheel opvangen. Bij de andere bestudeerde warmtepomp typen blijft het benuttingspercentage bij kortdurende warmteopslag beperkt tot waarden in de buurt van de 70%.

Lange termijn buffering van de koude component van de warmtepomp brengt de benutbaarheid van de warmte van compressiewarmtepompen op 100%. Bovendien leidt lange termijn warmte-opslag tot een beperking van het warmtepompvermogen dat nodig is om een bepaalde energiebesparing te realiseren.

¹ De COP geeft aan hoeveel meer warmte de warmtepomp aan de warme zijde levert ten opzichte van de energie waarmee de warmtepomp wordt aangedreven. Zo betekent een COP=4 dat er 4 W warmte beschikbaar komt als de warmtepomp met 1 W wordt aangedreven

Bij het gebruik van een absorptiewarmtepomp in teelten met een hoge ontvochtigingsbehoefte (roos en komkommer) blijft er echter bij toepassing van lange termijn warmte-opslag sprake van structurele warmte-overschotten. Dit komt door de relatief geringe koudeproductie van dit type warmtepomp. De absorptiewarmtepomp zal daardoor in deze teelten maar voor een beperkt deel van de ontvochtigingsbehoefte kunnen zorgdragen.

In de studie zijn alle berekeningen eerst gemaakt voor een theoretische situatie met een onbeperkte ontvochtigingscapaciteit. Het (primaire) energiebesparingspotentieel liep hierbij uiteen van 2% (elektrisch aangedreven warmtepomp zonder buffering in de potplantenteelt) tot 37% (gasmotor aangedreven compressiewarmtepomp met een lange termijn opslag-systeem in de rozenteelt). In absolute hoeveelheden gaat het om minimaal $0.9 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ en maximaal $18 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$.

Wanneer echter een fysieke ontvochtigingsinstallatie zou moeten worden gebouwd kan deze niet op de maximale ontvochtigingsbehoefte worden gedimensioneerd. Dit zou namelijk betekenen dat een groot deel van de capaciteit slechts een zeer beperkt aantal uren wordt benut, waardoor het aantal equivalente vollast-uren klein, en de installatie erg duur wordt. Daarom zijn alle energiebesparingspotentieëlen opnieuw berekend, maar dan uitgaande van concreet begrensde ontvochtigingscapaciteiten. De capaciteiten zijn zodanig gekozen dat voor de drie verschillende teelten ongeveer 50%, 70% en 90% van de jaarlijkse ontvochtigingsbehoefte door de ontvochtigingsinstallatie kan worden ingevuld. Het blijkt dat de besparingspotentieëlen zelfs bij toepassing van de ontvochtigingscapaciteit waarbij slechts de helft van de totale ontvochtigingsbehoefte wordt gedekt (en de rest dus door ventilatie moet worden afgevoerd) niet veel kleiner zijn dan de theoretische gevallen waarin met onbegrensde capaciteiten wordt gerekend. Bij toepassing van lange termijn warmte-opslag leidt het systeem met een elektrische warmtepomp en de kleinste ontvochtigingscapaciteit in de komkommerteelt tot 9 m^3 aardgas per m^2 per jaar, in de rozenteelt tot 12 m^3 en in de potplantenteelt tot 4 m^3 aardgas per m^2 per jaar. Bij gebruik van een gasmotor aangedreven warmtepomp stijgt het besparingspotentieel naar 14 m^3 in de komkommerteelt 16 m^3 in de rozenteelt en 6 m^3 per m^2 per jaar in de potplantenteelt. Het besparingspotentieel van de absorptiewarmtepomp is in de potplantenteelt eveneens 6 m^3 per m^2 per jaar. In de komkommerteelt bespaart de absorptiewarmtepomp 9 m^3 aardgas per jaar en in de rozenteelt bespaart deze 10 m^3 aardgas per m^2 per jaar.

De resultaten in dit rapport zijn niet in kwantitatief opzicht afgezet tegen het economisch perspectief.

De bovenbeschreven resultaten voor de rozenteelt beschrijven de besparingen door een warmtepomp ten opzichte van een kas die verwarmd wordt met een ketel. Voor de rozenteelt is de toepassing van een WK-installatie echter zeer gebruikelijk. Indien wordt uitgegaan van een rozenkas met WKK in eilandbedrijf zakt het effect van de warmtepomp naar ongeveer 6 m^3 per m^2 per jaar. Aangezien het gebruik van WKK in de belichte teelten als standaard beschouwd zou kunnen worden zakt het perspectief van de WP voor de rozenteelt ruim onder het perspectief van de WP voor de komkommerteelt.

Een jaarlijkse gasbesparing van 14 m^3 per m^2 per jaar, te behalen in de intensieve groenteteelt is daarmee het getal wat als maximaal perspectief voor energiebesparing door actieve ontvochtiging in moderne energie-intensieve tuinbouw aangehouden kan worden.

Inleiding

De beheersing van de luchtvochtigheid in kassen kost energie. Het meest in het oog springend energiegebruik treedt op wanneer de luchtramen op een kier worden gezet om vocht uit de kaslucht af te voeren. Het verlagen van het vochtgehalte is belangrijk omdat een hoge luchtvochtigheid de ziektedruk in de kas en de kans op natslaan van het gewas doet toenemen. Minder in het oog springend is het feit dat er extra energiegebruik optreedt wanneer energieschermen op een kier worden getrokken en tenslotte is het een feit dat het energiebesparingspotentieel van dubbeldeks kasbedekkingsmaterialen ernstig wordt belemmerd door de extra ventilatiebehoefte die deze bedekkingsmaterialen introduceren. Deze extra ventilatiebehoefte komt voort uit de sterk verminderde condensatie tegen het kasdek die een gevolg is van de hogere oppervlaktetemperatuur van het binnenste paneel van een dubbel kasdek.

Om de vochtbeheersingsproblematiek in een juiste context te kunnen plaatsen wordt in dit rapport de omvang van het energiegebruik dat hiermee gemoeid is uitgerekend. Hierbij wordt uitgegaan van een conventionele vochtregeling waarbij de ramen worden geopend en eventueel ook het ondernet van de verwarming wat wordt bijgestookt om het vocht af te voeren. Deze berekening wordt zowel voor de huidige kas als voor de in de toekomst te verwachten hoog geïsoleerde kassen uitgevoerd.

Met de bovengenoemde passieve ontvochtiging (het openen van ramen en/of schermen) gaat energie verloren omdat warme (en 'vochtige') kaslucht wordt vervangen door koudere (en drogere) lucht. Hierbij gaat naast de voelbare warmte ook waterdamp verloren. Deze waterdamp vertegenwoordigt een hoeveelheid latente warmte die, bij condensatie, nuttig bruikbare warmte had kunnen opleveren. Om inzicht te krijgen in het verlies van voelbare warmte die bij passieve ontvochtiging door de ramen verdwijnt wordt dit voor drie verschillende gewassen uitgerekend en getoond in jaaroverzichten en jaartotalen. De gewassen die hiervoor gebruikt worden zijn de komkommer, de belichte roos en een warm geteelde potplant. Deze gewassen staan model voor respectievelijk de intensieve groenteteelt, intensieve bloemeteelt en de overige warme teelten.

Wanneer op een actieve wijze wordt ontvochtigd kan het voelbare warmteverlies (door de ramen) worden voorkomen en kan (een deel van) de latente warmte uit de kaslucht worden geoogst. Actieve ontvochtiging kan grofweg op twee verschillende wijzen worden uitgevoerd. De eerste methode bestaat uit vochtopname door een zoutoplossing. In dit geval kan, door de temperatuur van de zoutoplossing te regelen, naar keuze de kaslucht tijdens het ontvochtigen warmer of kouder worden. In een recent uitgevoerde studie onder leiding van ECN, waarin TNO en IMAG hebben geparticipeerd is het perspectief hiervan voor een rozenteelt onderzocht (Bach, 1999). In dat concept werd de kaslucht bij de ontvochtiging opgewarmd. Uit de studie bleek dat deze wijze van ontvochtiging alleen energiebesparing opleverde als belangrijke hoeveelheden (2 tot 7 m³ a.e.) aan laagwaardige warmte elders konden worden benut.

Een tweede mogelijkheid is ontvochtiging door condensatie. Hiertoe moet er een koud oppervlak worden aangelegd. Omdat dit koude oppervlak ook voelbare warmte aan de kaslucht onttrekt zal in dit geval de kaslucht tijdens het ontvochtigingsproces worden gekoeld. Ontvochtiging aan een koud oppervlak vereist daarmee een koudebron die de benodigde koude kan genereren. In deze studie wordt in deze koudebehoefte voorzien door de koude kant van een warmtepomp, al dan niet na tussenkomst van een korte termijn buffer of lange termijn opslag in een aquifer (ondergrondse energie-opslag in een watervoerende laag). De warme kant van de warmtepomp wordt gebruikt voor de verwarming van de kas.

De precieze werking van het voorgestelde concept wordt in § 3.1 uiteengezet. Naast de aspecten rond de installatie en regeling van de warmtepomp wordt in dit rapport uitgebreid ingegaan op het principe van de installatie waarmee het vocht (en de voelbare warmte) aan de kaslucht wordt onttrokken en op de effecten van de dimensionering ervan. Hierbij wordt voortgebouwd op de resultaten uit een onderzoek dat in het kader van het LNV-programma "Energiebesparing in beschermde teelten" bij IMAG is uitgevoerd. Naast de gekozen configuratie is de dimensionering van de apparaten en de onderlinge afhankelijkheid daarvan van groot belang. Hier wordt dan ook uitgebreid bij stilgestaan. Ook wordt nagegaan wat de consequentie is van het type warmtepomp dat gekozen wordt (elektrisch aangedreven, gasmotor aangedreven of thermisch aangedreven). Het rapport wordt afgesloten met een aantal aanbevelingen. Deze geven met name aan dat vanuit de in deze studie verkregen inzichten ontvochtiging beter met behulp van buitenlucht kan plaatsvinden dan door middel van actieve systemen.

1 Uitgangspunten en werkwijze

Inleiding

Actieve ontvochtigingsystemen worden in de huidige tuinbouw niet toegepast. Een studie waarin de mogelijkheden en beperkingen van zo'n systeem worden afgetast moet dus worden uitgevoerd op grond van speciaal daarvoor opgezette praktijkproeven of door middel van een simulatiestudie. Een praktijkproef op dit gebied is zeer kostbaar en vraagt veel tijd, zodat het gebruik van een simulatiemodel in deze verkennende fase de voorkeur geniet. Het IMAG beschikt over een simulatiemodel dat het kasklimaat beschrijft in afhankelijkheid van de bedrijfsuitrusting, het buitenklimaat en het gewenste binnenklimaat. Bovendien heeft dit model (KASPRO) een sterk modulair karakter zodat nieuwe onderdelen gemakkelijk kunnen worden toegevoegd.

Wanneer met dit model simulaties worden uitgevoerd moeten er voor veel instellingen keuzes worden gemaakt. In de volgende paragrafen van dit hoofdstuk passeren alle belangrijke instellingen de revue. In principe wordt daarbij aangesloten bij de huidige praktijk op een modern bedrijf. Op een aantal punten worden echter iets andere uitgangspunten gehanteerd om de resultaten van de berekeningen met en zonder actieve ontvochtiging beter vergelijkbaar te maken.

1.1 Bedrijfsuitrusting

Voor de berekeningen die in deze studie zijn uitgevoerd, staan drie zwaargestookte glastuinbouwteelten model. Deze teelten zijn een komkommerteelt die model staat voor de groentesector, een rozenteelt die model staat voor een belicht bloemisterijgewas en een warme potplantenteelt die model staat voor een onbelicht siergewas. In de kas met het komkommer- en rozengewas wordt gebruik gemaakt van een energiescherm in die met de potplanten van een isolerend dek (dubbeldek).

1.1.1 Kasconstructie

In alle berekeningen wordt uitgegaan van een venlo-kas met twee kappen van 4 meter op een tralieligger van 8 meter en een vakmaat van 4.5 meter. Het totaal aantal kappen is 34 met elk een lengte van 148.5 meter (33 vakken). Daarmee komt het totale kasoppervlak op ruim 2 ha (20196 m²) waarvan 635 m² door het middenpad wordt ingenomen. Het dek van de kas bestaat voor de komkommer- en rozenteelt uit enkelglas en voor de potplantenteelt uit dubbelglas.

De dakhelling bedraagt steeds 22.5°. De goothoogte is 4.5 m en bij de rozenteelt is het energiescherm (type LS10-plus) ter hoogte van de tralieligger aangebracht.

De transmissie voor diffuus licht bedraagt voor het dek van de enkeldekskas 78.5% en voor dat van de dubbeldekskas 66 %. De onderschepping door de onderliggende constructie, gewasdraden, verwarmingsbuizen etc. is 3.5%, voor lichtarmaturen 1% en door de aanwezigheid van het energiescherm wordt nog 3% extra weggenomen. Zodoende blijft op gewasniveau in de komkommerteelt 68% over, in de rozenteelt 67 % en voor de potplantenteelt 61.5 %. Het onderscheid tussen de lichtniveaus onder het dek en direct boven het gewas is van belang voor de berekening van enerzijds de energiebalans en anderzijds de gewasfotosynthese en gewasverdamping.

1.1.2 Verwarmingssysteem en CO₂-dosering

In de komkommer- en rozenteelt wordt de verwarming gerealiseerd met twee verwarmingsnetten. Het ondernet wordt gevormd door een buisrailnet bestaande uit tien 51 mm buizen per tralie en het bovennet bestaat uit vijf 28 mm pijpen per tralie. Het maximale verwarmingsvermogen komt hiermee op circa 250 W/m².

In de potplantenteelt, waarvoor wordt aangenomen dat er gebruik wordt gemaakt van een dubbeldeks kasdek is het tweede verwarmingsnet weggelaten.

De CO₂-dosering is in dit project niet nader uitgewerkt. In het algemeen zal de CO₂-behoefte door de toepassing van actieve ontvochtiging afnemen doordat de ramen langer dicht kunnen blijven en de CO₂-concentratie met een lagere dosering hoog gehouden kan worden. De afname is echter beperkt omdat het overgrote deel van de CO₂-dosering op warme zomerse dagen zal plaatsvinden. Juist gedurende die periode is er geen behoefte aan ontvochtiging.

1.1.3 Temperatuurregeling, ventilatie en ontvochtiging

De kasluchttemperatuur wordt geregeld op basis van een stooklijn en een ventilatielijn. Stooklijn en ventilatielijn worden bepaald door setpoints die door het jaar heen variëren. De ventilatielijn wordt daarbij steeds gedefinieerd ten opzichte van de stooklijn. De gehanteerde setpoints worden in § 3.3 vastgelegd.

Wanneer de kasluchttemperatuur onder de stooklijn zakt wordt de buistemperatuur in die mate verhoogd dat de stooktemperatuur weer wordt gerealiseerd. Bij overschrijding van de ventilatielijn wordt het raam proportioneel met de overschrijding geopend.

In tegenstelling tot de gangbare praktijk wordt er geen gebruik gemaakt van een minimumbuistemperatuur. Dit omdat de minimumbuistemperatuur regelmatig de ramen "opendrukt" waarmee een niet als zodanig te herkennen ontvochtiging plaatsvindt.

Voor de vochtregeling is een PI-regelaar² gebruikt. Dit in tegenstelling tot de praktijk, waar meestal ook voor de vochtregeling wordt volstaan met een proportionele regelaar. De keus om desondanks ten behoeve van dit project een PI-regelaar tot te passen, is gemaakt om de resultaten tussen de passief geregelde ontvochtiging beter te kunnen vergelijken met de actief geregelde ontvochtiging. Immers, allen bij gebruik van een PI-regelaar kunnen de optredende luchtvochtigheden in de berekening met en zonder actieve ontvochtiging vergelijkbaar worden gehouden.

De vochtregeling met ramen wordt zo nodig ondersteund door het verhogen van de buistemperatuur. Dit gebeurt wanneer het vochtgehalte te hoog blijft (meer dan 3% RV hoger dan het toegestane maximum) ondanks ramen die al voor meer dan 10% geopend zijn.

² Proportioneel en Integrerende regelaar. Een PI-regelaar zal, mits niet verzadigd, de gewenste waarde realiseren. Dit een tegenstelling tot een Proportionele regelaar die altijd een bepaalde afwijking ten opzichte van de gewenste waarde houdt. Deze afwijking wordt kleiner naarmate de versterkingsfactor van de regelaar groter is (oftewel de P-band kleiner is).

1.2 Toegepaste teelten

1.2.1 Komkommer

De gegevens voor de komkommerteelt zijn afkomstig uit Kwantitatieve informatie voor de Glastuinbouw (KWIN; 1996) en aangevuld op grond van persoonlijke communicatie met de betreffende gewasspecialist van het PBG te Naaldwijk

teeltduur:

De jaarrond komkommerteelt omvat drie teeltcycli. De eerste teelt loopt van 14 december tot 14 mei, de tweede teelt van 15 mei tot 31 juli en de derde van 1 augustus tot 5 november

temperatuursetpoints:

14-12 tot 03-01: dag 22 °C, nacht 21 °C
04-01 tot 31-01: dag 21 °C, nacht 20 °C
01-02 tot 14-05: dag 21 °C, nacht 18.5 °C
17-05 tot 06-06: dag 22 °C, nacht 21 °C
07-06 tot 13-06: dag 21 °C, nacht 19.5 °C
14-06 tot 31-07: dag 20.5 °C, nacht 18 °C
02-08 tot 22-08: dag 22 °C, nacht 21 °C
23-08 tot 29-08: dag 21 °C, nacht 20 °C
30-08 tot 05-11: dag 20.5 °C, nacht 18 °C

Aan de hand van dag- en nachtsetpoints wordt de stooklijn bepaald, waarbij de helling bij de overgangen tussen deze setpoints op 1 °C/uur gesteld is. De stijging naar het dagsetpoint wordt op een zodanig moment ingezet dat de dagwaarde bij zonsopkomst bereikt is. De verlaging wordt ingezet een uur voor zonsondergang. Het setpoint wordt overdag met 2 °C verhoogd over het zonstralingstraject van 100 tot 200 W/m² (buiten de kas gemeten).

minimumbuis

Er wordt geen minimumbuis temperatuur toegepast

buffer en CO₂

De effecten van ontvochtiging op de CO₂-beschikbaarheid en CO₂-dosering valt buiten het bestek van deze studie. Daarom zijn bufferafmeting en CO₂ dosering niet relevant.

ventilatie

De ventilatielijn staat van 14 december tot 16 januari 2 °C boven de stooklijn. Van 16 februari tot 7 november staat de ventilatielijn op de stooklijn. Bij het afbouwen van de stooklijn bij het invallen van de avond loopt de ventilatielijn een half uur achter op de stooklijn.

De ventilatie op vocht vindt plaats met een PI-regling. De RV wordt hiermee onder de 85% gehouden. Zonodig wordt de vochtafvoer nog extra gestimuleerd door de temperatuur van het ondernet te verhogen.

scherm

Er wordt een transparant beweegbaar scherm gebruikt dat continu gesloten is van 14 december tot 5 januari. Van 5 januari tot 31 januari is het scherm alleen geopend als de zonstraling overdag meer dan 100 W/m² bedraagt. De rest van het jaar wordt het scherm alleen 's nachts gebruikt als het kouder is dan 10 °C.

1.2.2 Roos met assimilatiebelichting

De gegevens over de rozenteelt zijn afkomstig uit Kwantitatieve informatie voor de Glastuinbouw (KWIN; 1996) en aangevuld op grond van persoonlijke communicatie met de betreffende gewasspecialist van het PBG te Aalsmeer (J. de Hoog). Ook is informatie verwerkt uit eerder IMAG onderzoek (IMAG-DLO rapport 95-4)

teeltduur:

De rozenteelt is een jaarrondteelt

temperatuursetpoints:

08-09 tot 01-03: dag 18.5 °C nacht 17.5 °C

01-03 tot 08-09: dag 19.5 °C, nacht 18.5 °C

De stooklijn waarop het kasklimaat wordt geregeld, is gebaseerd op de dag- en nachtsetpoints, waarbij de helling bij de overgangen tussen deze setpoints op 1 °C/uur gesteld is. De stijging naar het dagsetpoint wordt op een zodanig moment ingezet dat de dagwaarde bij zonsopkomst bereikt is. De verlaging wordt ingezet op zonsondergang. Het setpoint wordt overdag met 2 °C verhoogd over het zonstralings-traject van 100 tot 300 W/m² (buiten de kas gemeten).

minimumbuis

Er wordt geen minimumbuis temperatuur toegepast

ventilatie

De ventilatielijn staat 2 °C boven de stooklijn. Van 16 februari tot 7 november staat de ventilatielijn op de stooklijn. Bij het afbouwen van de stooklijn bij het invallen van de avond loopt de ventilatielijn een half uur achter op de stooklijn. De ramen worden voor iedere graad overschrijding van de ventilatielijn 10% geopend. Indien de lijzijdige luchting meer dan 60% geopend is gaan de loefzijdige ramen meelopen.

De ventilatie op vocht vindt plaats met een PI-regling. De RV wordt hiermee onder de 85% gehouden. Zonodig wordt de vochtafvoer nog extra gestimuleerd door de temperatuur van het ondernet te verhogen.

scherm

Er wordt een beweegbaar energiescherm toegepast. Het scherm wordt 's nachts gesloten indien de buitentemperatuur lager dan 10 °C is. Als de kaslucht RV boven de 84% stijgt wordt een kier van 3% getrokken. Ook wanneer ten gevolge van belichting de temperatuur onder het scherm te hoog oploopt wordt een kier in het scherm getrokken.

assimilatiebelichting

Assimilatiebelichting vindt plaats met SON-T lampen van 1 september tot 1 mei indien de globale straling buiten lager is dan 125 W/m². De belichting is per etmaal vier uur geblokkeerd (van 20:00 tot 24:00). De belichingsintensiteit is 40 W/m² elektrisch opgenomen vermogen.

buffer, CO₂ en WKK

De effecten van ontvochtiging op de CO₂-beschikbaarheid en CO₂-dosering valt buiten het bestek van deze studie. Ook de WKK wordt in dit rapport niet meegenomen. Daarom zijn bufferafmeting, CO₂ dosering en WKK niet relevant.

1.2.3 Potplanten

Omdat de term “potplanten” erg algemeen is kan hiervoor niet een uitgebreide blauwdruk worden gegeven. Daarom is gekozen een eenvoudige klimaatregeling voor een warme teelt als uitgangspunt voor de beschrijving van een potplantenteelt te gebruiken.

teeltduur:

Potplanten worden jaarrond geteeld.

temperatuursetpoints:

22 °C overdag en 20 °C 's nachts.

minimumbuis

geen

ventilatie

De ventilatielijn staat 1 °C boven de stooklijn. Bij overschrijding worden de ramen 10% per graad overschrijding geopend. Indien de lijzijdige luchting meer dan 60% geopend is (dus bij een kasluchttemperatuur van 6 °C boven de ventilatielijn), gaan de loefzijdige ramen meelopen.

De ventilatie op vocht vindt plaats met een PI-regling. De RV wordt hiermee onder de 90% gehouden. Zonodig wordt de vochtafvoer nog extra gestimuleerd door de temperatuur van het ondernet te verhogen.

buffer en CO₂

De effecten van ontvochtiging op de CO₂-beschikbaarheid en CO₂-dosering valt buiten het bestek van deze studie. Daarom zijn bufferafmeting en CO₂ dosering niet relevant.

scherm

De kas heeft geen scherm omdat wordt uitgegaan van een dubbel kasdek

1.3 Buitenklimaat

Voor het berekenen van de energievraagpatronen kan in principe gebruik gemaakt worden van elke willekeurige dataset voor het buitenklimaat. Om echter informatie over de gemiddelde prestatie van innovatieve ontwikkelingen te bestuderen is het verstandig een gemiddeld referentiejaar te gebruiken. Een dergelijk referentiejaar wordt gevormd door het SEL-jaar, een acroniem voor een set van geSElecteerde weergegevens.

Het SEL-jaar is een afgesproken nationale standaard voor weergegevens ten behoeve van energieberekeningen voor de glastuinbouw. Het bestand is opgebouwd uit twaalf maandbestanden met gemiddelde uurwaarden voor de belangrijkste weergegevens. De maandbestanden zijn geselecteerd uit weergegevens van het KNMI voor De Bilt over de periode 1971 t/m 1980. Zo is de maand januari van 1971 opgenomen als typisch Nederlands weer in de maand januari en de maand februari in het SEL-jaar is afkomstig uit de meteo-gegevens van februari 1973.

Het gebruik van het SEL-jaar heeft (boven het gebruik van gemiddelde weergegevens) het voordeel dat de dynamiek in het dagelijkse weer behouden blijft.

In figuur 1.1 is het verloop van de etmaaltemperatuur en in figuur 1.2 de dagelijkse lichtsom in het SEL-jaar gegeven. Om een goed interpreteerbare grafiek te verkrijgen zijn de 365 getallen afgevlakt met een voortschrijdend gemiddelde van 7 dagwaarden.

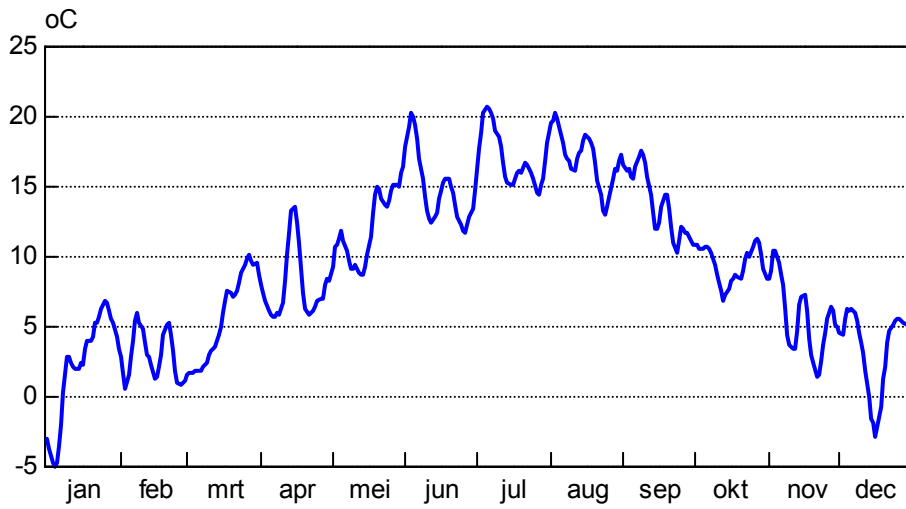
In tabel 1.1 zijn de gemiddelde temperatuur en de lichtsom van het SEL-jaar vergeleken met deze waarden voor het gemiddelde van de negen recente jaren. De tabel laat zien dat het SEL jaar gemiddeld wat kouder en wat donkerder is dan deze recente jaren.

Tabel 1.1. Gemiddelde temperatuur, stralingssom en aantal graaddagen³ in het SEL-jaar in vergelijking met het langjarig gemiddelde (1989 t/m 1997)

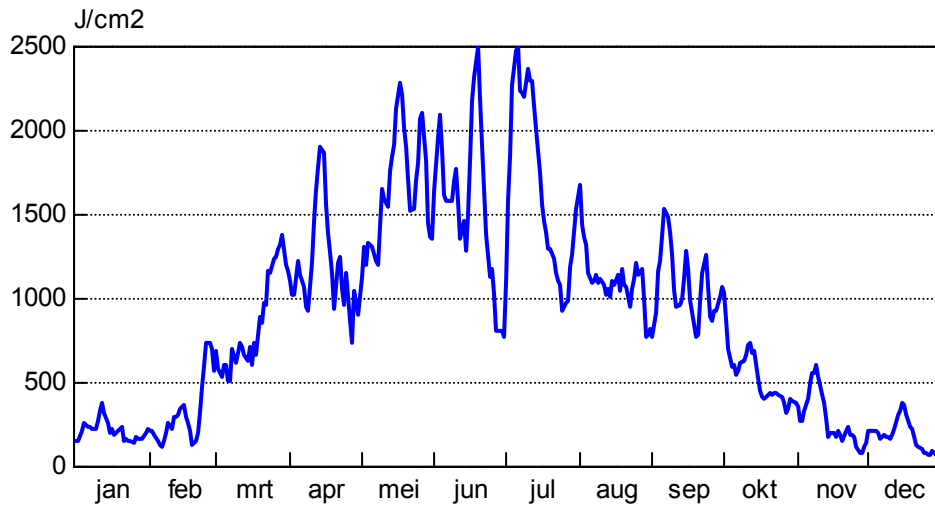
	Temperatuur [°C]	straling [MJ/m ² /jaar]	graaddagen [°C]
SEL	9.4	3250	3195
9-jarig gem.	10.2	3530	2960

De tabel laat zien dat het SEL-jaar kouder en donkerder is dan de periode '89 –'97. Blijkbaar is het langjarig gemiddelde, ten opzichte waarvan het SEL-jaar een goede representatie is wat kouder en donkerder dan gemiddeld in recentere jaren.

³ Het aantal graaddagen is de cumulatie van het aantal graden dat de gemiddelde etmaaltemperatuur onder de 18 °C ligt.



Figuur 1.1 Etmaaltempertuurverloop in het SEL-jaar.



Figuur 1.2 Dagelijkse lichtsom in het SEL-jaar.

2 Energiegebruik van gangbare vochtbeheersing

Wanneer de ramen worden geopend in verband met de overschrijding van het RV-criterium verdwijnt met het vocht ook een hoeveelheid voelbare warmte (warme kaslucht). Met een simulatiemodel zoals KASPRO kan de hoeveelheid warmte die hiermee gemoeid is worden uitgerekend. Deze berekening is gebaseerd op de bepaling van het warmteverlies door de ramen bij een kas met een standaard vochtregeling en een kas waarin het vochtoverschot op een thermoneutrale wijze wordt afgevoerd. Dit wil zeggen dat in de berekening tijdens de ontvochtiging geen bijkomende voelbare warmte- of koudestroom aan de warmtebalans wordt toegevoegd⁴.

De berekening is uitgevoerd voor de drie modelteelten die in deze studie worden gebruikt. Tabel 4.1 toont de jaarrond resultaten van deze berekening. Het blijkt dat met name in de komkommer- en rozenteelt veel energie in de ontvochtiging gaat zitten, indien de vochtafvoer via de ramen moet worden gerealiseerd. Dit komt doordat in deze teelten het scherm regelmatig op een kier moet worden gezet om de gewenste vocht-afvoer te realiseren. In de potplantenteelt is de vochtproductie lager en het vocht-setpoint hoger zodat de vochtafvoer hier tot minder voelbaar warmteverlies leidt.

Tabel 2.1. Energiegebruik in MJ/(m² jr) van de drie teelten in het geval de luchtvochtigheid op de in § 3.3 genoemde niveau's wordt geregeld door raamventilatie en in geval het vochtoverschot door een thermoneutrale ontvochtiger zou worden weggenomen (een fictieve ontvochtiger). Omdat het hier uitsluitend gaat om de berekening van de hoeveelheid verwarmingsenergie die in een kas omgaat in de vochtbeheersing wordt aan het gebruik van de thermoneutrale ontvochtiger **geen** energiegebruik toegerekend.

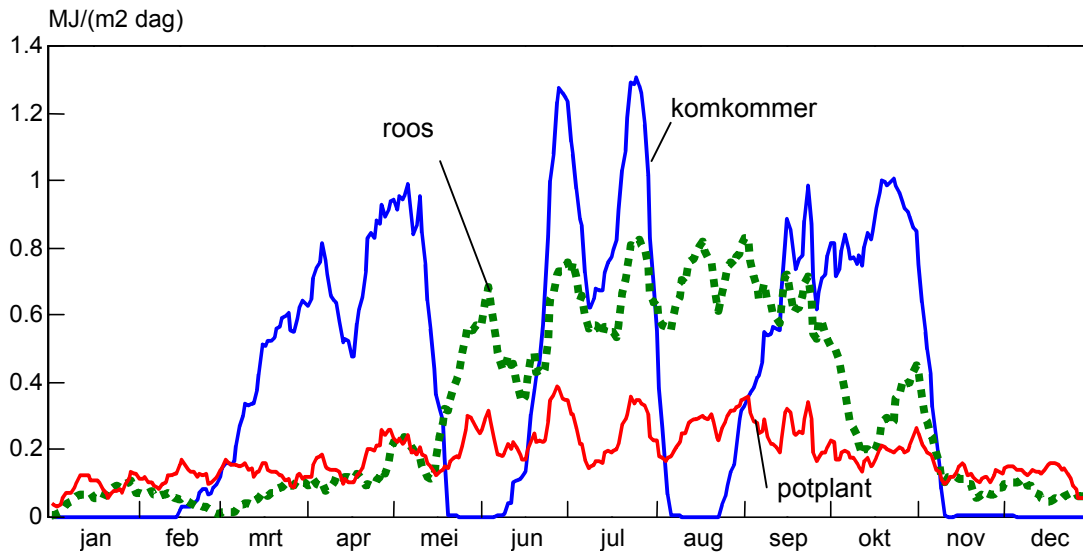
	met ramen	met fictieve ontvochtiger	verschil	procentueel
komkommer	1506	1261	245	16
roos	1359	950	363	27
potplant	1338	1246	92	7

Uit de tabel kan worden geconcludeerd dat de vochtafvoer in de komkommerteelt voor 16% van het energiegebruik verantwoordelijk is en in de rozenteelt voor zelfs 27%. In de potplantenteelt wordt slechts 7% van het energiegebruik door de vochtbeheersing bepaald.

Behalve als jaartotaal is het ook verhelderend om het daggemiddelde warmteverlies als gevolg van de vochtbeheersing in een grafiek te plaatsen. In figuur 4.1 is het voelbare warmteverlies voor alle drie de teelten als dagtotaal door het jaar getoond. In de figuur valt het op dat het warmteverlies in de komkommerteelt het grootst is, maar dat er daar ook duidelijk een aantal perioden zijn waar er geen energieverlies door vochtbeheersing optreedt. Dit zijn de perioden waarin het gewas nog klein is en er dus weinig verdamping optreedt. Op die momenten hoeft het raam dus ook niet open om vocht af te voeren. De andere teelten zijn jaarrond teelten zodat daar geen duidelijke dips in de verdamping zitten. Het verloop van het energieverlies bij de potplant is vrij vlak. Dit komt doordat het RV-setpoint hoog is zodat in de winter de condensatie, en in de zomer het vochtverlies met het

⁴ Deze bepaling is met een simulatiemodel eenvoudig uit te voeren. In een praktijkexperiment zou dit een ingewikkeld en duur luchtbehandelingssysteem vereisen waarin de lucht na droging weer op dezelfde temperatuur wordt gebracht als waarop de vochtige lucht naar de ontvochtiger werd toegevoerd.

ventileren op temperatuur een groot deel van de noodzakelijke ontvochtiging invult. Het energieverlies dat met de ontvochtiging van het rozengewas optreedt is in de winter laag omdat door de belichting de ramen al vaak moeten worden geopend om het warmteoverschot af te voeren.



Figuur 2.1 Jaarverloop van het daggemiddelde voelbaar warmteverlies door ontvochtiging met luchtramen voor de komkommer, de roos en de potplantenteelt

3 Ontvochtiging door een gekoeld oppervlak

Inleiding

In het vorige hoofdstuk zijn berekeningen gemaakt met een thermoneutrale ontvochtiger. Bij deze berekeningen is er van uitgegaan dat tijdens de ontvochtiging de kaslucht niet werd opgewarmd of afgekoeld. Deze wijze van ontvochtiging kan met een uitgebreide klimaatbehandelingsinstallatie worden gerealiseerd. De toepassing van zo'n installatie vereist echter een omvangrijk luchttransport waarvoor grote verzamel en verdeelsystemen moeten worden aangelegd en die een hoog parasitair energiegebruik met zich meebrengen vanwege het elektriciteitsverbruik van de ventilatoren. Daarom is in deze studie gekozen voor een ontvochtigingssysteem op basis van vrije convectieve overdracht van vocht uit de kaslucht op een koud oppervlak dat in de kas is aangebracht. Een voorbeeld van zo'n systeem wordt toegelicht in § 3.1.

In dit hoofdstuk worden de perspectieven van zo'n ontvochtigingssysteem doorgerekend zonder rekening te houden met begrenzingscapaciteiten en vermogens. Ook wordt er voorsnog geen rekening gehouden met het feit dat de COP van warmtepompen afneemt naarmate het temperatuurniveau waarop de warmte wordt afgegeven hoger komt te liggen (hierop wordt in de aanbevelingen nog uitvoerig ingegaan). Bovendien worden energieverliezen in de korte en lange termijn opslagsystemen die hier worden doorgerekend voorsnog buiten beschouwing gelaten. Hierdoor krijgen de resultaten in dit hoofdstuk een wat theoretisch karakter, maar wordt een goed inzicht in de problematiek verkregen. In het volgende hoofdstuk worden de effecten van capaciteitsbegrenzingscapaciteiten, die in een reële situatie altijd aanwezig zullen zijn, wél meegenomen en wordt ook aandacht gegeven aan energieverliezen.

Ontvochtiging door middel van een koud oppervlak levert naast de onttrekking van vocht ook warmte-onttrekking. Dit betekent dat tijdens de ontvochtiging de warmtevraag van de kas toe kan nemen. De warmtevraag (het vermogen dat via de verwarmingsbuizen wordt afgegeven) hoeft echter niet altijd evenveel toe te nemen als de voelbare warmte-onttrekking aan de ontvochtiger. In sommige gevallen is de warmteonttrekking namelijk een welkome kasluchtcooling. In § 3.2 wordt de toename van de warmtevraag die met de ontvochtiging met een koud oppervlak gepaard gaat uitgerekend en toegelicht.

Om het oppervlak waaraan de ontvochtiging plaatsvindt te koelen wordt gebruik gemaakt van een warmtepomp⁵. Met deze warmtepomp komt de energie die door de ontvochtigingsunit op een laag temperatuurniveau is opgenomen op een hoog niveau weer vrij. De hoeveelheid energie die op het hoge temperatuurniveau beschikbaar komt hangt af van de COP (Coefficient Of Performance) van de warmtepomp en is altijd meer dan de hoeveelheid die op het lage niveau is verzameld. In § 3.3 wordt deze hoeveelheid warmte in afhankelijkheid van de ontvochtigingsvraag en de eigenschappen van de warmtepomp afgezet tegen de warmtevraag van de kas (met inbegrip van de warmtevraag ter compensatie van de voelbare warmteopname van de ontvochtigings-unit).

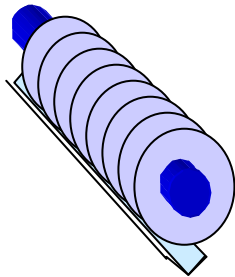
Een belangrijke vraag is of de warmte die aan de warme kant van de warmtepomp vrijkomt gebruikt kan worden voor de verwarming van de kas. Vaak zal de momentane warmteproductie groter zijn dan de momentane warmtevraag. Korte en/of lange termijn energie-opslag zullen dus noodzakelijk kunnen zijn om het verwarmingspotentieel dat ontvochtiging biedt volledig te kunnen benutten. In § 3.4 en § 3.5 wordt dit aspect uitgewerkt. Door de warmteproductie van het ontvochtigingssysteem, eventueel door tussenkomst van warmteopslag, te benutten voor de verwarming van de kas kan het primaire energiegebruik

⁵ Er zou in principe ook gebruik gemaakt kunnen worden van grondwater maar in de eerste plaats krijgen tuinbouwbedrijven vanwege het grote verbruik geen vergunning hiervoor een bron aan te leggen en in de tweede plaats is het dan niet mogelijk om de onttrokken warmte in te zetten voor de verwarming.

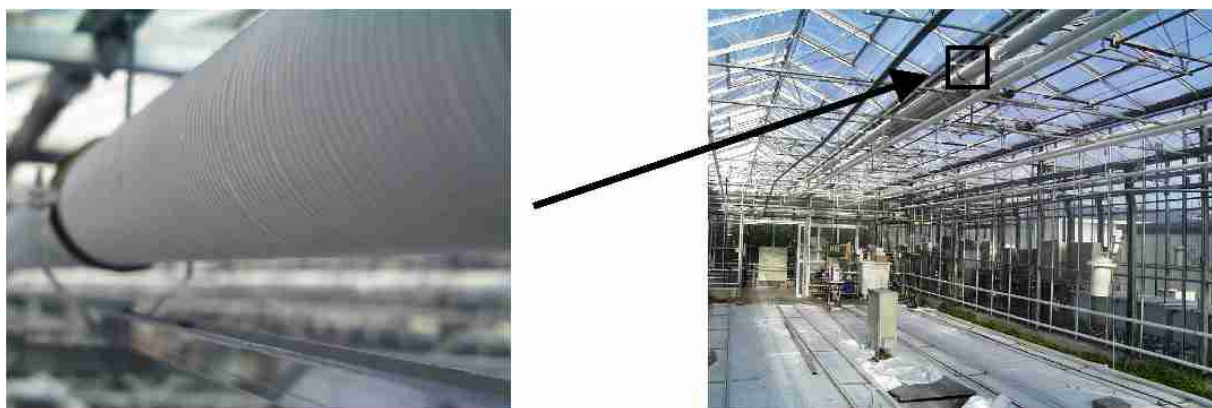
van de ketel afnemen. In § 3.6 wordt uitgerekend hoe groot deze energiebesparing is in afhankelijkheid van het type warmtepomp dat wordt gebruikt. Uiteraard wordt naast de vermindering van het primaire energiegebruik van de ketel ook rekening gehouden met de het primaire energiegebruik van de warmtepomp. In § 3.7 worden de conclusies uit de berekeningen van dit hoofdstuk getrokken.

3.1 Ribbenbuisontvochtiging

De kern van een kasontvochtigingssysteem op basis van condensatie is dat de temperatuur van een oppervlak waar de ontvochtiging plaats moet vinden kunstmatig onder de dauwpuntstemperatuur wordt gehouden. Door IMAG wordt momenteel in het LNV-programma met betrekking tot de vermindering van het energiegebruik in de beschermde teelten onderzoek gedaan aan de ontvochtigingscapaciteit van een gevinde buis vlak onder de goot waardoor koud water stroomt. Een schets van deze buis is opgenomen in figuur 3.1 en een foto van de positionering in de kas is afgebeeld in figuur 3.2



Figuur 3.1 Schets van een gevinde buis met een eronder gemonteerd condensgootje.



Figuur 3.2 Ontvochtigingsonderzoek bij het IMAG met een gevinde buis. Het systeem bestaat uit een buis (a) waarvan er links en rechts een onder de goot is gemonteerd (b)

De keus om de buis bovenin de kas en onder de goot te plaatsen is gebaseerd op CFD-berekeningen⁶ waaruit is gebleken dat er rond die plaats door de natuurlijke circulatie een

⁶ Computational Fluid Dynamics – een numerieke rekenmethode waarbij de temperatuur- en luchtsnelheidsverdeling in een ruimte wordt uitgerekend door de ruimte in een heleboel cellen op te delen die onderling lucht uitwisselen tengevolge van dichtheidsverschillen en/of luchtstromen.

relatief sterke en vochtige luchtstroom optreedt. Door hier gebruik van te maken kan de ontvochtiging zonder extra ventilatoren en het daarbij behorende elektriciteitsverbruik plaatsvinden. De onvochtigingscapaciteit van deze buizen bedraagt ongeveer 60 gram vocht per strekkende meter buis per uur.

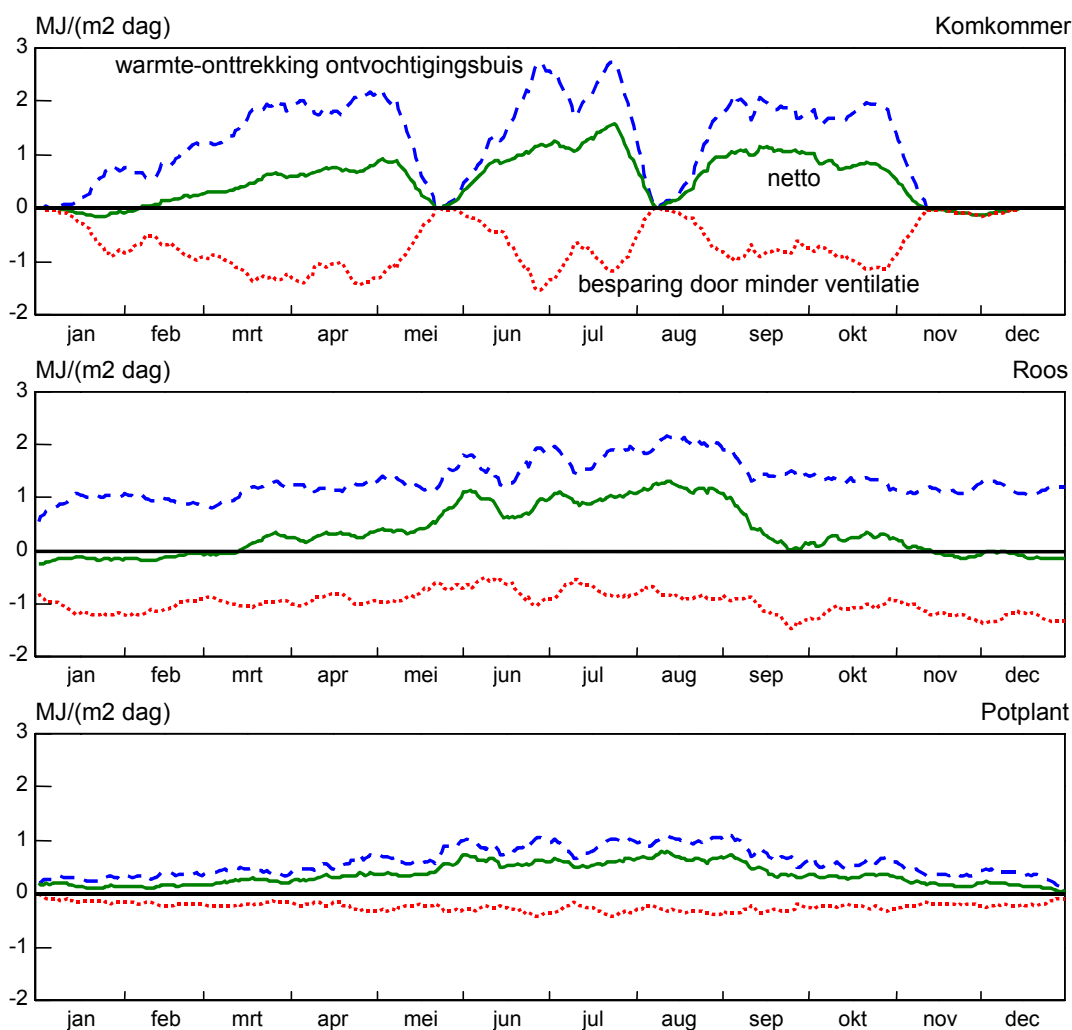
Ondanks de montage van de buis vlak onder de goot geeft deze een aanzienlijk lichtverlies ($\pm 3\%$ per buis). Ook op dit aspect wordt in de aanbevelingen nader ingegaan.

Onder de buis is een condensgootje geplaatst waarin het afdruppelende vocht wordt opgevangen. Dit water kan worden hergebruikt als gietwater.

Omdat de buis tijdens de ontvochtiging koud is, vindt er niet alleen vochtonttrekking, maar ook warmteonttrekking plaats. De CFD-berekeningen geven aan dat bij toepassing van zo'n buis in een kas-ontvochtigingssysteem de verhouding tussen latente en voelbare warmteonttrekking bij gemiddeld gebruik 1 op 1 zou kunnen zijn. Dit betekent dat de ribbenbuis bij een vochtonttrekking van 1 gram per uur tevens 0.68 W voelbare warmte aan de kaslucht onttrekt ($1 \text{ gram/uur is } 1 \cdot 10^{-3} / 3600 = 2.8 \cdot 10^{-7} \text{ kg/s}$. Dit vermenigvuldigd met $2.45 \cdot 10^6$ (de condensatiewarmte in J/kg) geeft 0.68 W latente warmte). Uitgaande van de voorlopige indicaties geven warmte- en vochtonttrekking samen dus 1.4 W warmte aan de ribbenbuis per gram per uur ontvochtiging (0.68 W voelbare warmte en even zoveel latente warmte, wat samen 1.36 W is).

3.2 Warmtevraag bij toepassing van ontvochtiging

Door de toepassing van actieve ontvochtiging hoeven de ramen niet meer open om vocht af te voeren. Dit betekent een vermindering van de warmtevraag zoals is afgebeeld in figuur 3.3. Het gebruik van een koude buis als ontvochtiger levert echter een warmtestroom van de kaslucht naar de koude buis waardoor de warmtevraag van het verwarmingssysteem weer toeneemt. In figuur 3.3 is de vermindering van de warmtevraag door verminderde ventilatie als negatieve waarden en de toename van de warmtevraag door de warmteonttrekking aan de koude buis als positieve waarde voor de drie teelten in een jaarrond grafiek weergegeven. Het netto-resultaat van deze twee effecten is eveneens in de grafieken weergegeven.



Figuur 3.3 Jaarverloop van de afname van de warmtevraag door verminderde ventilatie (de negatieve waarden), de toename van de warmtevraag door de warmtestroom naar de koude buis (de hoogste positieve waarden) en het netto resultaat van beide effecten

Figuur 3.3 laat zien dat ondanks de belangrijke afname van het warmteverlies door de ramen het netto effect van de ontvochtiging met een koude buis een toename van de warmtevraag van het verwarmingssysteem oplevert. In komkommerteelt neemt de warmtevraag met 184 MJ/(m² jaar) (6 m³) toe, bij de roos met 129 MJ/(m² jaar) (4 m³) en bij de potplantenteelt met

131 MJ/(m² jaar) (4 m³). Blijkbaar gaat er bij ontvochtiging met luchtramen relatief minder voelbare warmte per gr vochtafvoer verloren dan de hoeveelheid voelbare warmte die per gram vochtafvoer door de ontvochtigingsbuis wordt opgenomen.

Een belangrijk verschil tussen ontvochtiging met ramen en ontvochtiging met een koude buis is echter dat de warmte die bij het gebruik van ramen verloren gaat in het geval van actieve ontvochtiging door de ontvochtigingsbuis wordt opgenomen. Deze opgenomen warmte kan vervolgens in principe weer worden gebruikt voor de verwarming van de kas. Om dit tot stand te brengen moet de warmte echter wel op een hoger temperaturniveau worden gebracht, waarbij gebruik moet worden gemaakt van een warmtepomp. Dit wordt in de volgende paragraaf uitgewerkt.

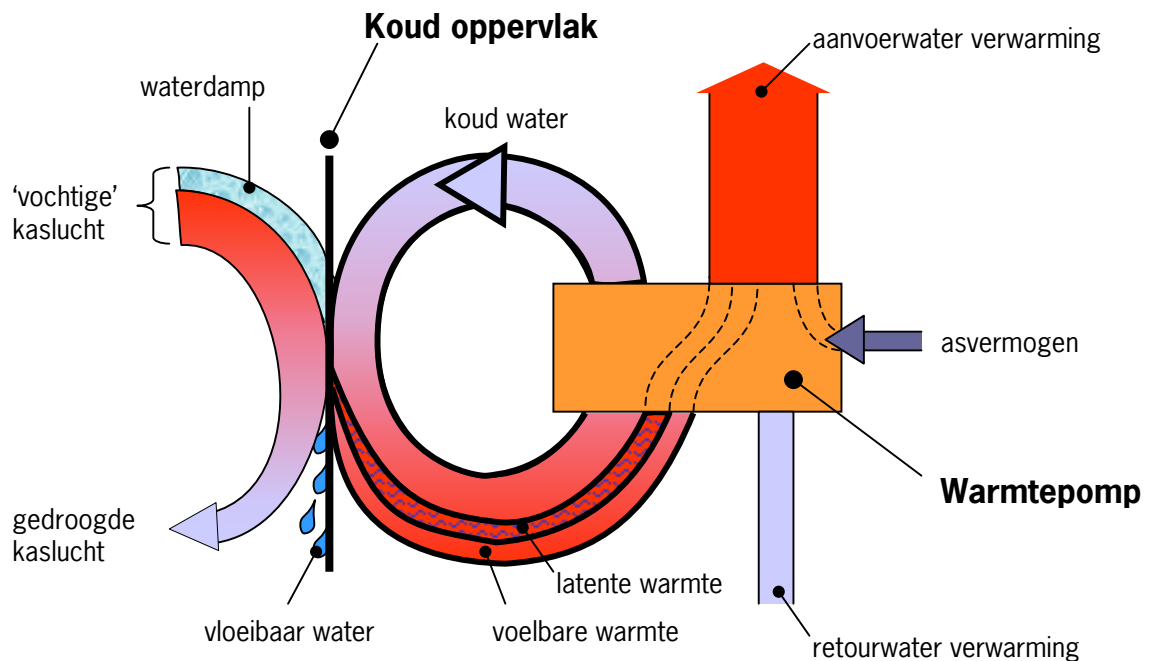
3.3 Warmteproductie door de warmtepomp tijdens ontvochtiging versus warmtevraag

Wanneer een ontvochtigingsunit koud gehouden moet worden kan hiervoor grondwater of een warmtepomp gebruikt worden. Als er grondwater wordt gebruikt en het aan de kaslucht opgewarmde water wordt afgevoerd op het oppervlaktewater wordt er geen energie bespaard. De onttrokken warmte wordt immers met het water weggegooid. De energiebesparing is zelfs negatief omdat, zoals in § 3.2 is geconstateerd, de voelbare warmte onttrekking per eenheid ontvochtiging bij een ribbenbuis gemiddeld hoger is dan bij ontvochtiging met luchtramen. Afvoer van het ribbenbuiswater naar het oppervlaktewater zou hiermee de warmtevraag van het verwarmingsnet met de in de voorgaande paragraaf genoemde 129 tot 184 MJ/(m² jaar) laten toenemen.

De warmte die door de ontvochtigingsbuis is opgenomen moet dus worden hergebruikt. Dit kan door het temperaturniveau van dit water door middel van een warmtepomp te verhogen. De warmtepomp levert hierbij tevens koude zodat dezelfde installatie in de koudebehoefte van de ontvochtigingsbuis kan voorzien.

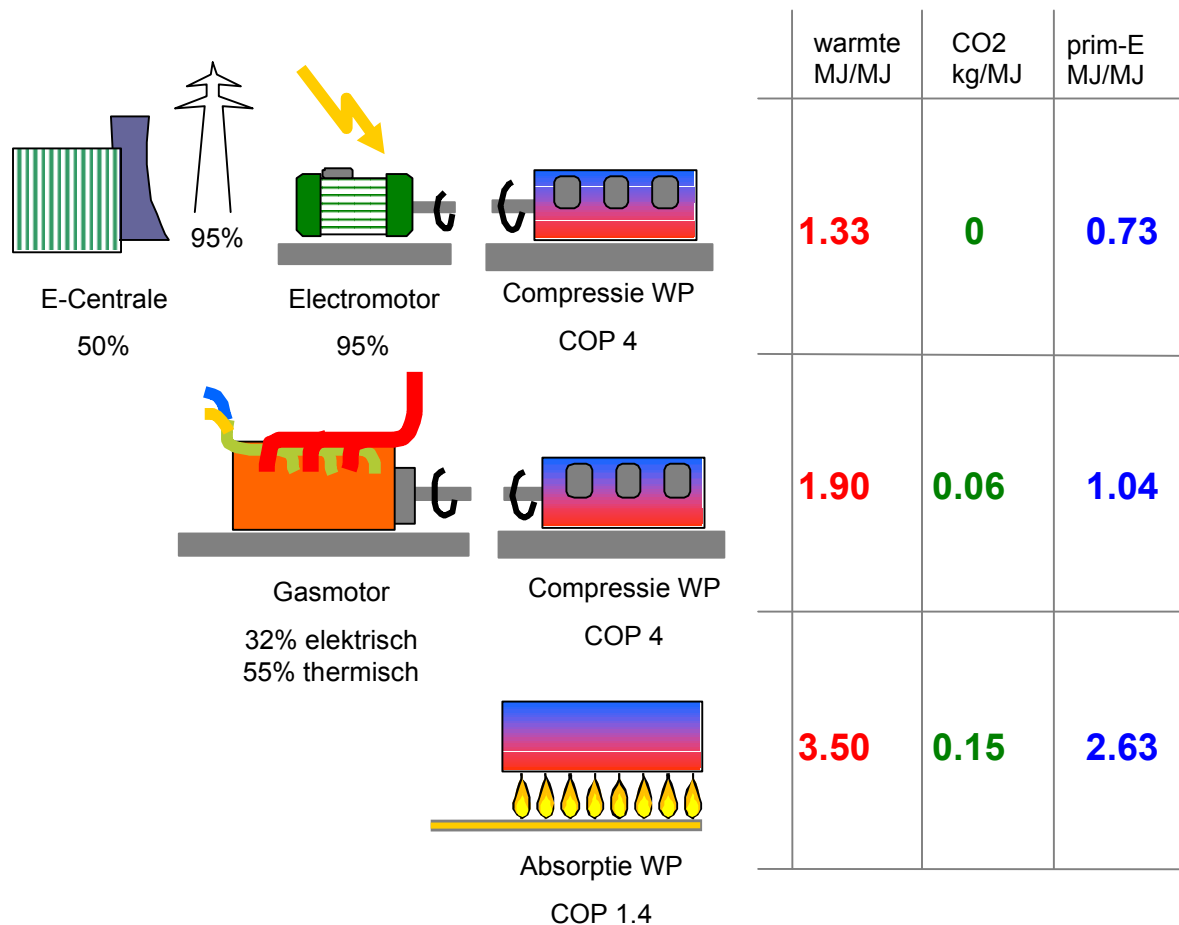
Een schematische weergave van de werking van een ontvochtiger die gebaseerd is op een warmtepomp is afgebeeld in Figuur 3.4. De figuur toont dat de kaslucht die langs het koude oppervlak stroomt wordt gedroogd en gekoeld. De afkoeling van de lucht levert voelbare warmte aan het koude water in de ontvochtigingsunit en de ontvochtiging levert latente warmte. De relatie tussen ontvochtiging en latente warmte toevoer ligt vast via de verdampingswarmte ($2.45 \cdot 10^6$ J/kg). Dit betekent dat bij een ontvochtigingsflux van 1 gram per uur een latente warmtestroom van 0.68 W optreedt. Gecombineerd met de voelbare warmteoverdracht die in § 3.2 is behandeld betekent dit dat bij een ontvochtigingsflux van 1 gram per uur een warmtestroom van 1.36 W op het koude water in de ontvochtigingsunit wordt overgedragen. Dit is in Figuur 3.4 uitgebeeld door de koud-waterstroom vanaf de ontvochtigingsunit naar de warmtepomp dikker te tekenen. (Het onderscheid dat in de figuur tussen de voelbare en de latente warmtecomponent is gemaakt is in werkelijkheid niet van elkaar te onderscheiden)

Figuur 3.4 beeldt ook uit dat door de warmtepomp de warmte die bij de ontvochtiger aan het koude water is toegevoerd, wordt overgedragen op het verwarmingssysteem. Naast deze onttrokken warmte wordt ook asvermogen aan het verwarmingswater overgedragen. De warmtetoevoer naar het verwarmingssysteem is daarmee altijd groter dan de warmteonttrekking aan het koude oppervlak. De verhouding tussen warmtetoevoer en warmteonttrekking hangt af van de COP (Coefficient Of Performance) van de warmtepomp.



Figuur 3.4 Schematische weergave van de werking van een ontvochtigingssysteem op basis van een condensatieoppervlak dat middels een warmtepomp onder de dauwpunttemperatuur wordt gebracht. In de warmtepomp wordt de voelbare en latente warmte die aan het condensatieoppervlak door het koude water is opgenomen op een hoger temperatuurniveau aan het verwarmingswater afgegeven.

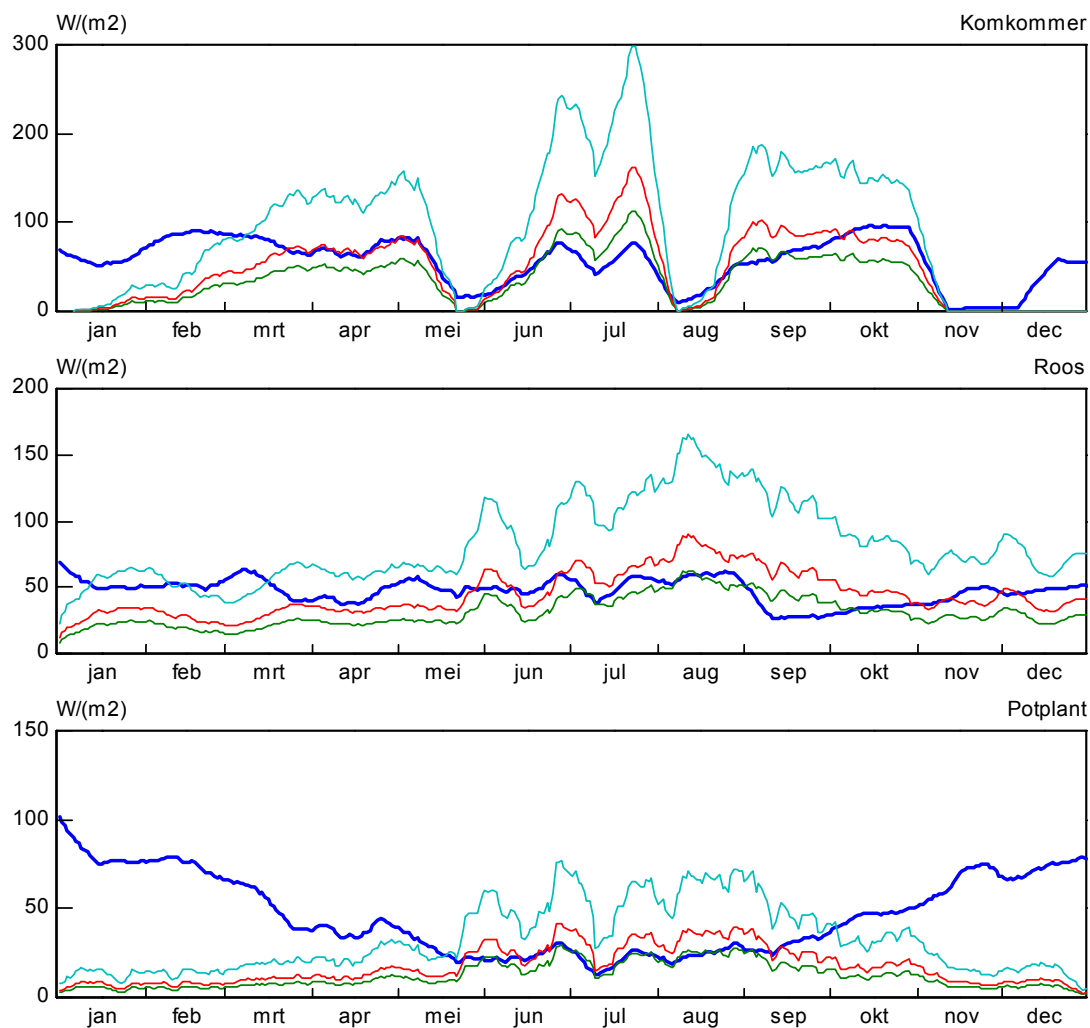
In Figuur 3.5 is de afgegeven warmte van de warmtepomp per eenheid onttrokken warmte aan de koude zijde voor verschillende warmtepomp configuraties weergegeven. De cijfers gelden wanneer wordt uitgegaan van een constante COP. In werkelijkheid zal de COP afhangen van het koude en warme temperatuurniveau. Deze afhankelijkheid wordt gezien het verkennende karakter van deze studie echter buiten beschouwing gelaten. De gekozen waarden zijn goede gemiddelden voor het werkgebied waarin de warmteonttrekking plaatsvindt (5 – 10 °C) en de warmteproductie wordt afgegeven (35 – 45 °C). Dit betekent feitelijk dat de warmtepomp zijn warmte via laag temperatuur systemen moet afgeven. Vanwege het verkennende karakter van deze studie is er in de berekeningen vanuit gegaan dat de vermogens die in huidige kassen via de gebruikelijke verwarmingssystemen worden afgegeven na vergroting van het VO van het verwarmingssysteem ook op lagere temperaturen kunnen worden geleverd. In de figuur is tevens de CO₂-productie die tijdens het gebruik van de warmtepomp per eenheid onttrokken warmte vrijkomt weergegeven. Bovendien is berekend hoeveel primaire energie direct (gasmotor- en absorptiewarmtepomp) of indirect (elektrische warmtepomp) per eenheid onttrokken warmte gebruikt is.



Figuur 3.5 Verschillende typen warmtepompen met hun overall output aan warmte [MJ], CO₂ [kg] en primaire energiebehoefte [MJ] per eenheid onttrokken warmte [MJ], uitgaande van aardgas als primaire energievorm

Vermenigvuldiging van de eerder gestelde relatie tussen ontvochtigingsflux en warmtestroom naar de ontvochtigingsunit (1.36 W/(gr/uur) (zie § 3.1)) met de in de eerste kolom genoemde warmteproducties per eenheid warmteonttrekking aan de koude zijde van de warmtepomp levert voor de elektrisch aangedreven warmtepomp een warmteproductie van 1.9 W per gr/uur ontvochtiging, voor de gasmotor warmtepomp een warmteproductie van 2.7 W per gr/uur ontvochtiging en voor de absorptiewarmtepomp een warmteproductie van 4.9 W per gr/uur ontvochtiging

Omdat met het kassysteemsimulatiemodel KASPRO van uur tot uur de ontvochtigingsbehoefte kan worden uitgerekend kan aan de hand van deze warmteproducties de uurlijkse warmteproductie ten gevolge van de ontvochtiging worden berekend. In figuur 3.6 is de daggemiddelde warmteproductie door de ontvochtiging voor de drie typen warmtepompen en voor de drie teelten afgebeeld tezamen met de daggemiddelde warmtevraag in het verwarmingssysteem weergegeven.



Figuur 3.6 Daggemiddelde warmteproductie tengevolge van de ontvochtiging met verschillende typen warmtepompen voor de drie verschillende teelten (dunne lijnen) in vergelijking met de daggemiddelde warmtevraag (dikke lijn). De hoogste dunne lijn geldt voor de absorptiewarmtepomp, de middelste voor de gasmotorwarmtepomp en de onderste voor de elektrische warmtepomp. Ten behoeve van de leesbaarheid zijn de curves enigszins gefilterd (afgevlakt)

De berekeningsresultaten kunnen ook worden gebruikt om jaartotalen uit te rekenen. Deze zijn weergegeven in Tabel 3.1

Tabel 3.1 Warmtevraag van teelten met ontvochtiging en warmteproductie door deze ontvochtiging wanneer de benodigde koude met warmtepompen wordt gegenereerd voor verschillende warmtepomptypen

	Warmtevraag [MJ/(m ² jaar)]	Warmteproductie [MJ/(m ² jaar)]		
		elektrische WP	gasmotor WP	absorptie WP
komkommer	1772	1135	1621	2986
roos	1457	1004	1434	2641
potplant	1439	401	573	1056

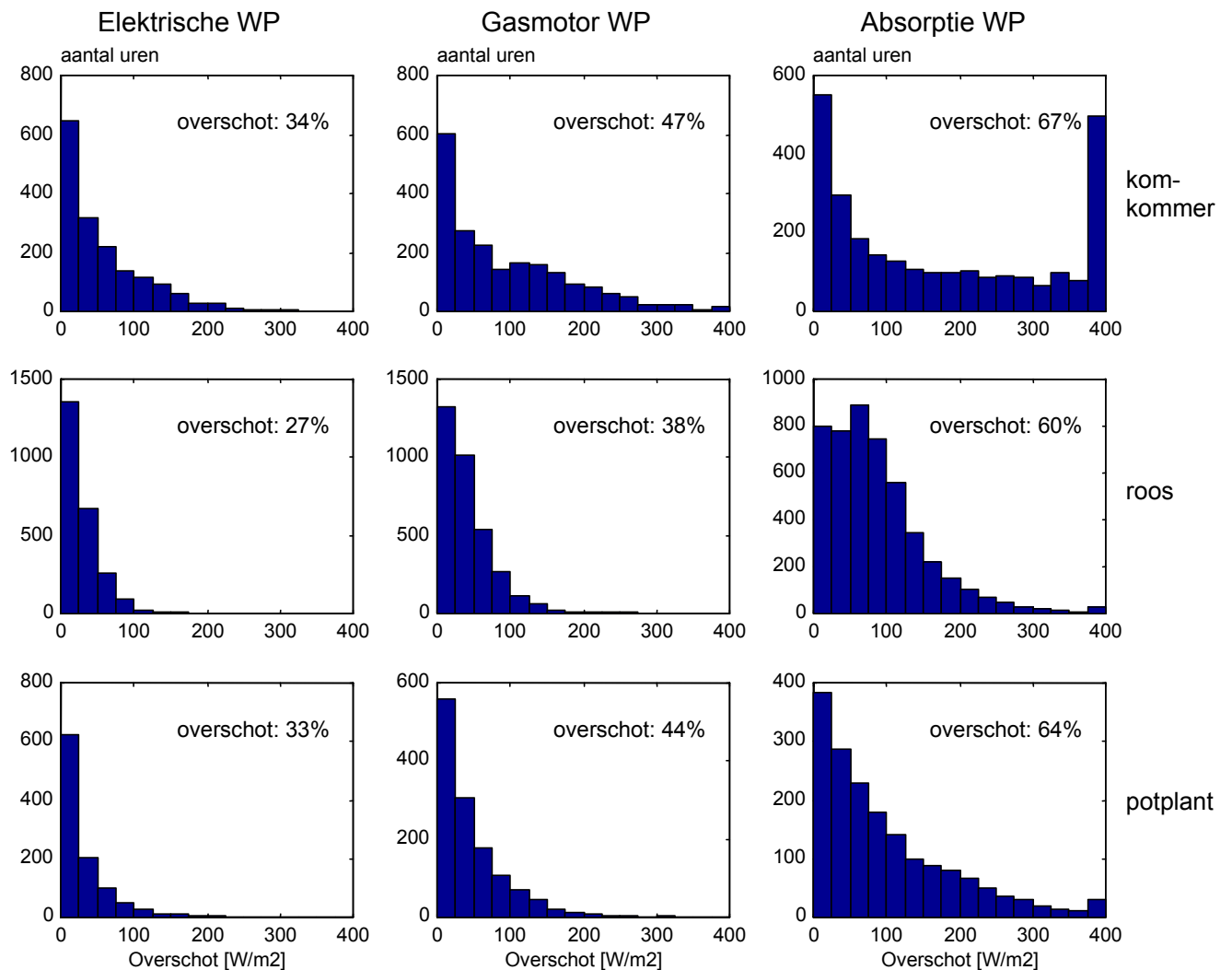
Tabel 3.1 laat zien dat in de meeste gevallen de warmteproductie van de warmtepomp niet voldoende is voor de volledige dekking van de warmtevraag van de kas. Een uitzondering hierop vormt de absorptie-warmtepomp in de komkommer- en rozenteelt, waar de warmtepomp anderhalf keer de benodigde warmte produceert. De grafieken in Figuur 3.6 laten echter zien dat tijdstip van warmteproductie en warmtevraag van elkaar kunnen verschillen. Dit betekent dat voor volledige benutting van de warmte die bij de ontvochtiging beschikbaar komt een warmte-opslag faciliteit noodzakelijk zal zijn. Hierop wordt in de volgende paragrafen verder gegaan.

Een ander punt dat in de tabel nog eens goed naar voren komt is dat de warmtevraag van de ontvochtigde kas (dus de hoeveelheid warmte die vanuit het verwarmingssysteem wordt afgegeven) hoger is dan de warmtevraag van de kas die met het openen van ramen wordt ontvochtigd (vergelijk de warmtevraag van Tabel 2.1 met die van Tabel 3.1). Dit komt omdat de verhouding tussen voelbare en latente warmte-afvoer bij ontvochtiging met ramen kleiner is dan de voelbaar/latent verhouding bij een ribbenbuis. Dat een ontvochtigingssysteem desondanks energie kan besparen komt doordat de verwarming in het kassysteem met ontvochtiging voor een groot deel met een warmtepomp wordt gerealiseerd. Omdat de warmtepomp minder primaire energie per eenheid warmte gebruikt dan een ketel is het systeem energiebesparend. Het feit dat de warmte uit de warmte die bij de ontvochtiging vrijkomt als warmtebron voor de warmtepomp kan dienen is een gunstige bijkomstigheid.

3.4 Korte termijn warmte-opslag

In de voorgaande paragraaf is de daggemiddelde warmteproductie die een warmtepomp afgeeft wanneer deze wordt gebruikt om een ontvochtigingsbuis koud te houden vergeleken met de daggemiddelde warmtevraag. Uit Figuur 3.6 kan worden geconstateerd dat bij de compressie warmtepompen de daggemiddelde warmteproductie vaak redelijk goed overeenkomt met de daggemiddelde warmtevraag van het verwarmingssysteem. Alleen de absorptiewarmtepomp levert op veel dagen (veel) meer warmte dan op die dag in het verwarmingsnet nodig is.

Dit hoeft echter geenszins te betekenen dat op kortere tijdbasis de warmteproductie ook in de pas loopt met de warmtevraag. Om een beeld te krijgen in de synchroniteit tussen de warmteproductie (door koudevraag en verband met de ontvochtiging) en warmtevraag zijn voor de drie warmtepompen en de drie gewassen histogrammen gemaakt van het warmteoverschot wanneer de uurlijkse warmtevraag van de uurlijkse warmteproductie is af te lezen.



Figuur 3.7 Histogrammen van de omvang van het warmte-overschot dat optreedt doordat de uurlijkse warmteproductie de warmtevraag kunnen verschillen

Figuur 3.7 geeft aan dat ondanks de goede synchroniteit die Figuur 3.6 op daggemiddelde basis laat zien (met name voor de compressie warmtepompen) de synchroniteit op uurbasis veel minder gunstig is. Het gecummuleerde overschot, uitgedrukt als percentage van de totale warmteproductie door de warmtepomp staat in elke grafiek in de rechter bovenhoek weergegeven. Hieruit blijkt dat bij de absorptiewarmtepomp meer dan de helft van de warmteproductie die door de ontvochtiging optreedt niet op dat moment kan worden gebruikt. De compressie warmtepompen scoren wat dat betreft veel beter, met name de elektrisch aangedreven systemen.

Teneinde de benutting van de warmte uit de warmtepomp te verbeteren kan gebruik worden gemaakt van warmte-opslag. Om het effect van korte termijn warmte-opslag te bepalen zijn berekeningen gemaakt waarbij een buffer van 75 m³/ha, een buffer van 150 m³/ha en een buffer van 300 m³/ha zijn toegepast. Er is uitgegaan van een buffer die in opgeladen toestand 55 °C is en in ontladen toestand 35 °C. Het relatief geringe temperatuur-verschil tussen gevulde en ontladen buffer maakt dat de opslagcapaciteit van de buffer klein is in vergelijking met de capaciteit van buffers die in de gangbare tuinbouw worden gebruikt. Warmteverliezen van de buffer zijn buiten beschouwing gelaten wat, gezien de lage temperaturen in de tank alleszins redelijk is.

In tabel 4.3 worden de benuttingspercentages die bij deze buffervolumina kunnen worden gerealiseerd weergegeven voor de verschillende warmtepompen en de verschillende teelten

Tabel 3.2. Percentage van de warmteproductie van de warmtepomp dat voor verwarming gebruikt kan worden in afhankelijkheid van de bufferafmeting (0, 75 en 150 en 300 m³/ha) voor de warmte-output van de warmtepomp wanneer deze wordt gebruikt voor ontvochtiging voor de drie teelten en de drie warmtepomp typen.

	elektrische WP				gasmotor WP				absorptie WP			
	0	75	150	300	0	75	150	300	0	75	150	300
komkommer	66	77	83	88	53	61	67	72	33	38	41	44
roos	73	90	91	93	62	76	79	81	40	47	50	51
potplant	67	87	91	95	56	75	80	83	36	51	57	62

Het blijkt dat met name de eerste 75 m³/ha een groot effect heeft op de benuttingsgraad van de warmtepomp warmte. Toch blijft bij de gasgestookte warmtepompen (gasmotor en absorptie) ook bij de grootste buffer een belangrijk deel van de warmte die tijdens de ontvochtiging aan de warme zijde van de warmtepomp vrijkomt onbenut.

In het bovenstaande stuk is geredeneerd vanuit het opslaan van warmte-overschotten. De asynchroniteit zou echter ook kunnen worden opgelost door de opslag van koude. De hoeveelheid koude is immers kleiner dan de hoeveelheid warmte (1 op 1.3 bij een elektrische WP, 1 op 1.9 bij een compressie WP en 1 op 3.5 bij een absorptie WP). Toch zal dit niet tot een belangrijke verkleining van het buffervolume leiden omdat het te realiseren temperatuurverschil tussen een gevulde en ontladen buffer bij een koude buffer niet veel groter dan 10°C kan worden gemaakt (een traject van 5 tot 15 °C). De opslag van koude vraagt dus al gauw twee keer zoveel buffervolume als de opslag van warmte. Dieper koelen dan de 5 °C waarvan in deze studie wordt uitgegaan geeft ook geen oplossing omdat dit een belangrijke afname van de COP geeft. Alleen bij een absorptiewarmtepomp, waar aan warme zijde 3.5 keer zoveel energie moet worden opgeslagen als aan koude zijde is het gunstiger om koude te bufferen in plaats van warmte (zie figuur 3.5). De benodigde opslag capaciteit zal in dat geval voor eenzelfde verbetering van de benuttingsgraad ongeveer 60% zijn in vergelijking met de buffering van warmte.

Om de benuttingsgraad van de warmte die bij de ontvochtiging beschikbaar komt te verhogen is verdere vergroting van de korte termijn buffers niet aan de orde. De vergroting van 150 naar 300 m³/ha levert immers nauwelijks een verbetering. Een verhoging van de benuttingsgraad van de warmte die bij de ontvochtiging vrijkomt kan daarom alleen door de toepassing van lange termijn buffering in een aquifer. Dit wordt uitgewerkt in de volgende paragraaf.

3.5 Lange termijn warmte-opslag

Een lange termijn warmteopslag-systeem bestaat uit een aquifer-doublet. Dit zijn twee putten op een onderlinge afstand van 100 tot 200 meter waarmee water dat uit de ene put uit een diepliggende watervoerende laag kan worden opgepompt kan worden opgewarmd of afgekoeld en in de andere put weer kan worden geïnfiltreerd. De gemiddelde diepe bodemtemperatuur in Nederland is ongeveer 10 °C (Knies en van de Braak, 2000). Wanneer er energie aan de bodem moet worden onttrokken of daarin moet worden opgeslagen kan dit dus het beste plaatsvinden op temperaturen die iets boven (warmte-opslag) of iets onder (koude-opslag) de 10°C liggen. Anders dan bij de kortdurende opslag-faciliteit is het bij een lange termijn buffer dus juist gunstiger om de koude die door een warmtepomp wordt geproduceerd op te slaan in plaats van de warmte die de warmtepomp afgeeft. De geringe opslag capaciteit per m³ die met een klein temperatuurverschil samenhangt wordt immers ruimschoots gecompenseerd door het grote volume dat bij een aquifer gebruikt kan worden (zo'n 75.000 m³/ha). De relatief geringe temperatuurstijging is gezien het feit dat de aquifer niet geïsoleerd is zelfs een voordeel.

Om de werking van een ontvochtigingssysteem met warmtepomp en aquifer te illustreren zijn in figuur 2.8 de vier situaties geschetst.

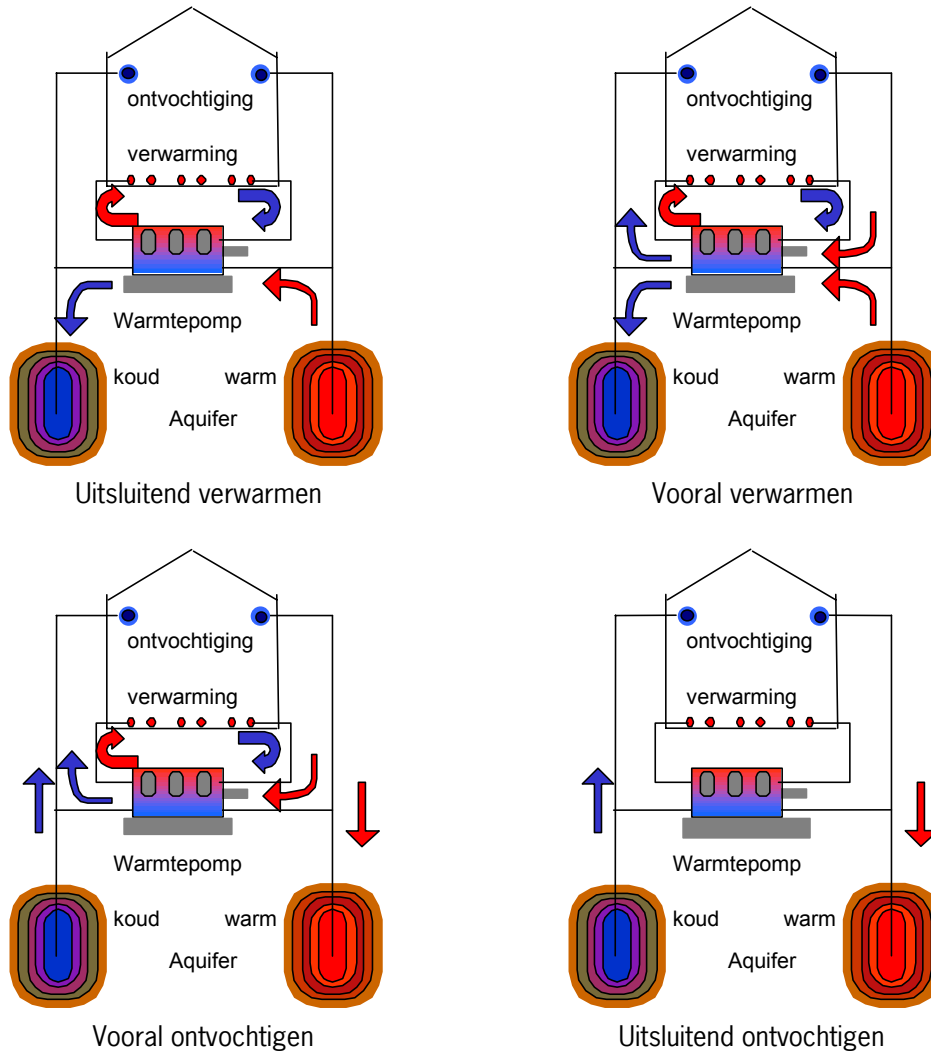
In de situaties "uitsluitend verwarmen" en "vooral verwarmen" wordt water van ongeveer 15 °C aan de warme put onttrokken en op een temperatuur-niveau van 5 °C in de koude put geïnfiltreerd. In de situatie "vooral verwarmen" wordt een deel van het koude water naar de ontvochtiger gestuurd en wordt het water dat van de ontvochtiger terugkomt vermengd met het 'warme' aquiferwater naar de verdamer (de koude kant van de warmtepomp) geleid. In beide gevallen wordt er netto warmte aan de aquifer onttrokken. De warmte die aan de condensor vrijkomt wordt voor de verwarming van de kas gebruikt.

In de situaties "vooral ontvochtigen" en "uitsluitend ontvochtigen" is de stromingsrichting in het doublet omgekeerd zodat er netto energie aan het doublet wordt toegevoegd.

Wanneer volgens dit principe in de winter koude wordt opgeslagen om tijdens perioden met ontvochtiging de warmteproductie van de warmtepomp te kunnen beperken tot de hoeveelheid warmte die per dag nodig is stijgt het benuttingspercentage van de compressiewarmtepompen naar 100%. De absorptiewarmtepomp in de potplantenteelt realiseert eveneens een benuttingspercentage van 100%. Deze conclusie vloeit voort uit het feit dat de jaarlijkse warmtehoeveelheid die als bijproduct van de ontvochtiging vrijkomt in al deze situaties belangrijk kleiner is dan de warmtevraag. Hierbij moet worden opgemerkt dat de warmteproductie vooral in de winter plaatsvindt en dat daarbij in de koude put van de aquifer een reservoir met koud water voor de zomerse ontvochtiging wordt aangelegd.

Voor de absorptiewarmtepomp komt ook bij lange termijn warmteopslag het benuttingspercentage in de komkommerteelt niet boven de 62% ($1767/2846 \cdot 100\%$) en in de rozenteelt niet boven de 57% ($1472/2573 \cdot 100\%$). Dit komt door het structurele warmteoverschot, wat wordt veroorzaakt door de geringe koude-productie per eenheid warmte die door een absorptiewarmtepomp wordt geproduceerd (zie tabel 3.1 en Figuur 3.6). Dit structurele overschot betekent dat bij gebruik van een absorptiewarmtepomp het niet verstandig is al het vocht met een ontvochtiger af te voeren. Immers, op het moment dat de warmte die daarbij aan de warme kant van de warmtepomp vrijkomt (direct of in de tijd verschoven) niet nuttig gebruikt kan worden hebben luchtramen gemiddeld een gunstigere voelbaar/latent verhouding dan een ontvochtigings-unit (zie opmerkingen bij tabel 3.1). Aangezien de asynchroniteit tussen warmte- en ontvochtigingsbehoefte over de teelten verschilt is de opslagcapaciteit die nodig is om lange termijn buffering tot stand te brengen voor de teelten verschillend. De vereiste opslagcapaciteit voor de absorptiewarmtepomp in de komkommer- en rozenteelt is veel kleiner omdat de ontvochtigingsinstallatie in deze situatie veel minder gebruikt kan worden (zie de discussie in de voorgaande alinea). Zou de koudevraag onverkort ingevuld worden met een absorptiewarmtepomp dan zou de

warmteproductie ongeveer 1.5 maal groter dan de warmtevraag zijn (zie tabel 3.1). Omdat dit een onzinnige handelwijze is zal de kas met een absorptiewarmtepomp aangedreven ontvochtigingssysteem dus noodgedwongen vaak toch met ramen moeten ventileren. De geringere inzet van het ontvochtigingssysteem betekent evenwel dat er slechts een kleine aquifer nodig is.



Figuur 3.8 Warmte en koude stromen naar en vanuit de aquifer bij vier verschillende werkingscondities van de ontvochtiging en warmtepomp.

Tabel 3.3 Vereiste opslagcapaciteit van een lange termijn koudebuffer tbv het gebruik van een warmtepomp voor ontvochtiging bij verschillende warmtepomptypen in de verschillende teelten.

	Vereiste koudeopslagcapaciteit [GJ/(ha)]		
	elektrische WP	gasmotor WP	absorptie WP
komkommer	2200	2200	700
roos	1400	1400	400
potplant	1350	1350	1350

Uitgaande van een warmtecapaciteit van grond die in de orde van $3 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \text{ K})$ ligt betekent een aquifer met een capaciteit van 2000 GJ en een thermische diameter van 70 m en een opwarming van $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (van 5 naar $15 \text{ }^\circ\text{C}$) een laagdikte van 19 meter. Aangezien de watervoerende lagen in Nederland vaak aan deze eis zullen voldoen is het goed mogelijk om een doublet (dus twee van deze bronnen) binnen een ha kasoppervlak onder te brengen.

Om na te gaan hoeveel pompenergie er gemoeid is laden en ontladen van de aquifer is uitgerekend hoeveel m^3 water voor de lang termijn buffering verplaatst moet worden. Dit gaf het volgende resultaat.

Tabel 3.4 Hoeveelheid water die uit en naar de koude put moet worden gepompt om in de lange termijn opslagbehoefte te kunnen voorzien, uitgaande van een temperatuurverschil van $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

	Verpompte watervolume [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$]		
	elektrische WP	gasmotor WP	absorptie WP
komkommer	5	5	2
roos	4	4	1
potplant	3	3	3

Uit de tabel blijkt dat de te verplaatsen volumina qua ordegrrootte veel kleiner zijn dan het volume wat in gangbare verwarmingssystemen wordt verplaatst (ongeveer $70 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$). Aangezien in standaard verwarmingssystemen ongeveer 1 kWh per m^2 per jaar gebruikt wordt kan het energieverbruik van de bronpompen als verwaarloosbaar worden beschouwd.

3.6 Primair energiegebruik bij ontvochtiging

Als laatste stap in de berekening van het energiebesparingsperspectief van warmtepompen moet het effect van de installatie op het primair energiegebruik worden uitgerekend. Om het primair energiegebruik van een kassysteem met een warmtepomp aangedreven ontvochtigingssysteem te berekenen moet eerst de dekkingsgraad van de warmtepomp in de warmtevoorziening van het kassyssteem worden uitgerekend. Dit kan voor de systemen met een korte termijn warmte-opslag worden uitgevoerd door de warmteproducties van de warmtepompen uit tabel 3.1 te vermenigvuldigen met de benuttingsgraden die in tabel 3.2 staan weergegeven en die te delen door de warmtevraag. Voor de berekening van de warmtevraag worden daarbij in principe de urengegevens gebruikt voor een kas met actieve ontvochtiging (de data die ten grondslag liggen aan tabel 3.1). Gezien de beperkte benuttingspercentages (tabel 3.2) zijn er echter in vrijwel alle doorgerekende situaties tal van uren waarop de warmtepomp in verband met het voorkomen van warmte-overschotten onvoldoende koude produceert. Op die uren wordt dan dus noodgedwongen weer met de ramen ontvochtigd. Dit betekent dat op die uren de warmtevraag gelijk wordt aan de warmtevraag van een natuurlijk geventileerde kas. Wanneer bovengenoemde mechanismen een lineair proces zouden zijn zou de warmtevraag van bijvoorbeeld de komkommer-kas met een elektrische warmtepomp zonder buffer berekend kunnen worden met:

$$d_{kg} = \frac{1135 \cdot 0.66}{1506 + (1772 - 1506) \cdot 0.66}$$

vgl. (3.1)

Waarin 1135 de warmteproductie van de warmtepomp wanneer de ontvochtiging geheel door middel van het koude oppervlak zou gebeuren en 0.66 de benutbaarheid van deze warmte is. In de teller komt dus 749 MJ/m² per jaar te staan, wat de werkelijk door de warmtepomp geproduceerde warmte is.

De warmtevraag van de kas is niet de 1506 MJ uit tabel 2.1, niet de 1772 MJ uit tabel 3.1 maar iets daar tussenin, namelijk op 0.66 van het verschil (als alle effecten lineair zouden zijn). De noemer wordt dan 1682 MJ en de dekkingsgraad 45%.

Aangezien de meeste processen in een kas echter niet-lineair zijn is de berekening van de inzet van de warmtepomp en de resulterende warmtevraag in de toegepaste algoritmen niet op basis van jaar-totalen uitgevoerd maar is het bovengenoemde sommetje voor elk uur gemaakt, waarbij voor de benuttingsgraad niet het jaargemiddelde is gebruikt maar de uurlijkse benuttingsgraad.

De aldus berekende dekkingsgraden staan weergegeven in tabel 3.5.

Tabel 3.5 Dekkingsgraad van de warmtepomp-warmte in de invulling van de warmtevraag

	elektrische WP				gasmotor WP				absorptie WP			
	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.
komkommer	44	51	54	63	52	59	64	90	62	71	76	100
roos	50	62	63	68	61	76	79	97	75	88	93	100
potplant	19	24	25	28	23	30	32	39	28	38	43	73

Uit de tabel blijkt dat voor het uitgewerkte voorbeeld het effect van de niet-lineairiteit in de berekening van de dekkingsgraad zeer beperkt is (44 in plaats van 45). Het bleek dat ook voor de andere cellen van de tabel de gelineariseerde berekening hooguit 2 procentpunten in dekkingsgraad scheelde met de resultaten van de berekening op uur-basis.

Het primaire energiegebruik van de kas met warmtepomp aangedreven ontvochtiging volgt vervolgens uit de sommatie van het primaire energieverbruik van de warmtepomp en het primaire energieverbruik van de ketel.

Ook hier wordt de berekening voorbeeldmatig aan de hand van de jaargemiddelden en –totalen gedaan.

Uitgaande van een dekkingsgraad van 44% voor de elektrische warmtepomp zonder buffer in de komkommerteelt (tabel 3.5) en een warmtevraag van 1682 MJ per m² per jaar (de noemer in vergelijking 3.1) levert de warmtepomp dus 740 MJ en de ketel 942 MJ per m² per jaar. De ketel gebruikt hiervoor 942 * 1.02 (een ketel rendement van 98% op onderwaarde) = 961 MJ primaire energie en de warmtepomp 740 * 0.53 = 392 MJ primaire energie. De factor 0.53 is het primaire energieverbruik per eenheid warmte-output en kan worden berekend door voor de elektrische warmtepomp het getal uit de derde kolom van Figuur 3.5 (het primair verbruik per eenheid koude) te delen door het getal in de eerste kolom van die figuur (de warmteproductie per eenheid koude). Dit levert voor de beide compressiewarmtepompen een factor 0.53 en voor de absorptiewarmtepomp een factor 0.75. Voor de ketel kan worden uitgegaan van een factor 1.

Het primaire energieverbruik van warmtepomp en ketel samen is 961 + 392 = 1353 MJ/m² per jaar. In vergelijking met de 1536 MJ/(m² jaar), wat volgt uit een vermenigvuldiging van de warmtevraag volgens tabel 2.1 met 1.02 (t.g.v. van het ketelrendement) resulteert de gelineariseerde berekening van de energiebesparing ten gevolge van deze case dus een besparing van 1536 – 1353 = 183 MJ/m² per jaar.

Wanneer teller en noemer in vergelijking 3.1 echter niet met jaartotalen en –gemiddelden, maar met uurlijkse data en uurlijkse benuttingsgraden berekend worden veranderen deze getallen enigszins zodat de berekende besparing ook wat anders uitpakt.

De bovenomschreven berekening, maar dan op basis van uurlijkse gegevens leidde tot de onderstaande energiebesparingstabellen.

Tabel 3.6 Besparing op primaire energieverbruik in MJ/(m² jaar) door ontvochtiging door middel van een door een warmtepomp koud gehouden condensatie-oppervlak waar met een voelbaar:latent verhouding van 1:1 warmte en vocht aan de kaslucht wordt onttrokken. De onvochtigingscapaciteit is verondersteld niet te zijn begrensd en opslagverliezen in de kortdurende en lange termijn opslagsystemen zijn buiten beschouwing gelaten. In de korte termijn buffers (van 75 en 150 m³/ha) wordt warm water opgeslagen in een temperatuurtraject van 35 tot 55 °C. In het aquifer doublet wordt koud water opgeslagen in een traject tussen 5 °C (koude put) en 15 °C (warmte put). De COP van de warmtepomp is constant verondersteld.

	elektrische WP				gasmotor WP				absorptie WP			
	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.
komkommer	155	195	209	254	256	306	330	487	180	219	232	337
roos	242	328	334	365	334	440	457	572	225	284	306	342
potplant	28	56	61	72	72	108	117	155	57	81	91	165

Tabel 3.7 Primaire energiebesparing uit tabel 3.6 omgerekend naar m³ aardgas met een verbrandingswaarde van 31 MJ/m³

	elektrische WP				gasmotor WP				absorptie WP			
	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.
komkommer	5.0	6.3	6.8	8.2	8.3	9.9	10.6	15.7	5.8	7.1	7.5	10.9
roos	7.8	10.6	10.8	11.8	10.8	14.2	14.7	18.4	7.3	9.2	9.9	11.0
potplant	0.9	1.8	2.0	2.3	2.3	3.5	3.8	5.0	1.8	2.6	2.9	5.3

Tabel 3.8 Primaire energiebesparing uit tabel 3.6 uitgedrukt in % van het standaard verbruik (tabel 2.1 x 1.02)

	elektrische WP				gasmotor WP				absorptie WP			
	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.
komkommer	10	13	14	17	17	20	21	32	12	14	15	22
roos	17	24	24	26	24	32	33	41	16	20	22	25
potplant	2	4	4	5	5	8	9	11	4	6	7	12

Tabel 3.6 laat direct zien dat de gelineariseerde benadering tot een overschatting van het energiebesparingspotentieel leidt. Op basis van de uurgegevens is de besparing immers geen 183 maar slechts 155 MJ/(m² jaar).

Een algemene opmerking die bij de bovengetoonde tabellen moet worden gemaakt dat in al deze berekeningen geen rekening wordt gehouden met het feit dat het temperatuurniveau van de warmtepomp warmer is dan dat van ketelwarmte zodat het gevraagde vermogen in gebruikelijke verwarmingssystemen niet kan worden afgegeven, althans niet bij de aangenomen COP. Deze verwaarlozing zal echter geen groot effect hebben op de resultaten voor de compressiewarmtepompen. Voor de elektrisch aangedreven warmtepomp is het effect gering door het feit dat de dekkingsgraad laag is en de ketel op momenten met een hoge warmtevraag vrijwel altijd toch al bijgeschakeld moet worden. Voor de gasmotor aangedreven warmtepomp is het effect gering omdat ongeveer 40% van de warmtepomp-warmte als motorkoelwater (van 90 °C) vrijkomt.

Voor de absorptie-warmtepomp zal het effect echter wel groot zijn omdat deze veel uren maakt en dus vaak warmte op een hoog temperatuurniveau moet geven. Wanneer dit in verband met de eigenschappen van de warmtepomp niet mogelijk is zal deze op die momenten moeten worden uitgeschakeld waardoor het warmtepomp-aandeel in de verwarming zal verminderen.

De tabellen laten zien dat de ontvochtiging in de belichte rozenteelt de hoogste energiebesparing oplevert, zelfs met relatief kleine buffercapaciteiten. Het grote perspectief van de warmtepomp in de rozenteelt kan worden verklaard door de hoge dekkingsgraad die in de rozenteelt optreedt. Een tweede effect is wellicht dat de voelbare warmteonttrekking aan het koude oppervlak in een hogere benuttingsgraad van de elektrisch toegevoerde lampwarmte resulteert. Deze warmteafgifte van de assimilatiebelichting geeft immers in de situatie zonder ontvochtiging vaak warmte-overschotten die niet nuttig kunnen worden gebruikt.

3.7 Conclusies

De toepassing van een ontvochtigingssysteem op basis van een koud oppervlak geeft een verhoging van de warmtevraag in het verwarmingsnet. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat een dergelijk ontvochtigingssysteem behalve vocht ook voelbare warmte aan de kaslucht onttrekt. De verhouding tussen de warmte- en vochtonttrekking aan het koude oppervlak is minder gunstig dan de verhouding tussen warmte- en vochtonttrekking wanneer er wordt geventileerd met luchtramen.

Desalniettemin levert ontvochtiging met een koud oppervlak energiebesparing wanneer het oppervlak koud gehouden wordt door middel van een warmtepomp. De besparing komt dan voort uit het feit dat een warmtepomp primaire energie met een rendement (veel) groter dan 1 in warmte kan omzetten. Wanneer in een kas actieve ontvochtiging wordt gebruikt kan de voelbare en latente warmte die daarbij aan de kaslucht wordt onttrokken prima als warmtebron voor de warmtepomp dienen. Het ontvochtigingssysteem levert dus de warmte waarmee de warmtepomp energiebesparing kan genereren.

De gerealiseerde besparingen bij een ontvochtigingssysteem met een onbegrensde capaciteit variëren van 28 MJ/(m² jaar) (<1 m³ aardgas) (elektrische warmtepomp zonder buffer in de potplantenteelt) tot 572 MJ/(m² jaar) (18 m³ aardgas) (gasmotor warmtepomp met aquifer in de rozenteelt met belichting).

De synchroniteit tussen warmtevraag en de warmte die tijdens de ontvochtiging vrijkomt is echter beperkt. Dit probleem wordt sterker naarmate de verhouding tussen warmte-output van de warmtepomp per eenheid aan de kaslucht onttrokken warmte (voelbaar en latent door middel van het ontvochtigingsoppervlak) groter wordt. Hierdoor is het synchronisatieprobleem bij de gasmotorwarmtepomp groter dan dat bij de elektrisch aangedreven warmtepomp. De absorptiewarmtepomp heeft een dermate hoge warmte-output dat zelfs bij een lange termijn opslagfaciliteit structurele warmte-overschotten optreden.

De redelijke synchroniteit tussen warmtevraag en warmteproductie van een elektrisch aangedreven warmtepomp maakt dat de toepassing van een korte termijn warmte-opslag toereikend is om vrijwel alle warmte die door de ontvochtiging beschikbaar komt voor de kasverwarming te kunnen benutten.

Bij de gasmotorwarmtepomp en de absorptiewarmtepomp levert korte termijn warmte opslag weinig soelaas en moet lange termijn opslag een substantiële verbetering van de benuttingsgraad opleveren. Waar bij korte termijn buffers de opslag van warm water het meest geëigend is ligt bij lange termijn energie-opslag vanwege het temperatuurniveau de opslag van de koude component van de warmtepomp het meest voor de hand.

De uiteindelijke berekeningsresultaten laten zien dat de ontvochtiging in de belichte rozenteelt de hoogste energiebesparing oplevert. Dit komt vooral door het feit dat dekkingsgraad van de warmtepomp in de rozenteelt het hoogst is. Deze hoge energiebesparing wordt bovendien al bij relatief kleine bufferafmetingen gerealiseerd.

Een belangrijke kanttekening is echter wel dat, gezien de hoge dekkingsgraad van de warmtepomp het belichtende rozenbedrijf geen vruchtbaar gebruik kan maken van een WKK-installatie. Het rozenbedrijf zal dus op het moment dat deze een warmtepomp plaatst geen WKK meer kunnen gebruiken. Na verrekening van het energieverbruiks-nadeel door het feit dat elektriciteitscentrales met een lager overall rendement elektriciteit produceren dan bedrijven met een WKK-installatie nemen de absolute besparingspercentages in de rozenteelt met ongeveer 360 MJ/(m² jaar) (12 m³ aardgas) af. Hiermee zijn de feitelijke perspectieven in de komkommerteelt het grootst. Het maximaal te behalen energiebesparingspercentage is dan 487 MJ/(m² jaar) (16 m³ aardgas), wat wordt gerealiseerd met een gasmotor aangedreven compressiewarmtepomp met koude-opslag in een aquifer met een diameter van 70 m en een dikte van 20 m.

4 Invloed van capaciteitsbegrenzungen op de energiebesparingsresultaten

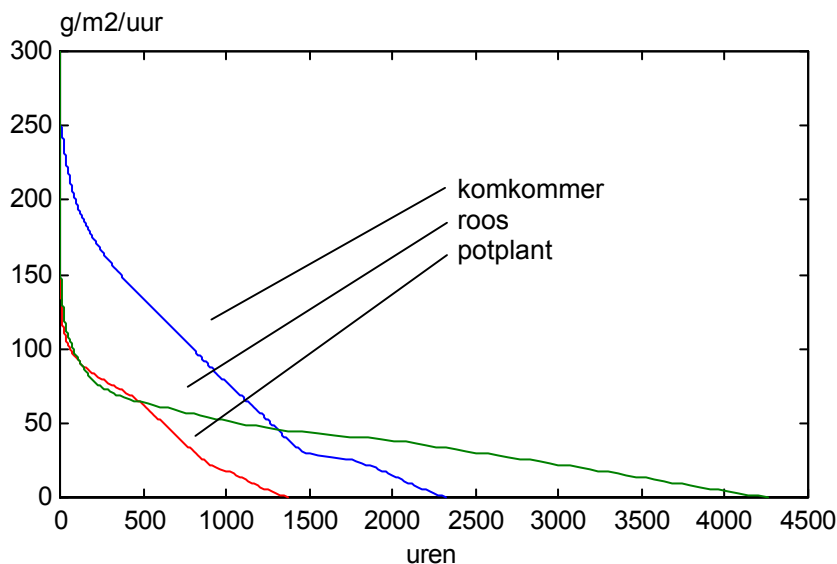
Inleiding

De berekeningen die in het vorige hoofdstuk zijn gemaakt zijn gebaseerd op een ontvochtigingsinstallatie en warmtepomp met een onbeperkte capaciteit. De primaire energiebesparingscijfers liepen daarbij uiteen van 2 tot 39%. Vanuit bedrijfseconomisch oogpunt moet echter worden verwacht dat het niet verstandig is een ontvochtigingsinstallatie op de maximale ontvochtigingscapaciteit te installeren, maar om een wat kleinere capaciteit te kiezen en additioneel te luchten. In dit hoofdstuk worden de effecten van kleinere ontvochtigingscapaciteiten op de energiebesparing en de toe te passen WP vermogens geïnventariseerd (§ 6.2).

Als basis voor de te gebruiken ontvochtigingscapaciteiten wordt een analyse van de jaarbelastingduurkrommen voor de ontvochtigingsvraag gebruikt (§ 4.1).

4.1 Jaarbelastingduurkrommen voor ontvochtiging

Met het kassysteemsimulatiemodel KASPRO kan een frequentietabel voor de momentane ontvochtigingsflux worden gemaakt. Deze tabellen kunnen worden omgezet in jaarbelastingduurkrommen. In figuur 6.1 zijn de resultaten hiervan voor de 3 voorbeeldgewassen afgebeeld.



Figuur 4.1 Jaarbelastingduurkromme voor de ontvochtigingsflux waarmee de RV van de kaslucht voor de komkommer, de roos en de potplant onder het gestelde maximum kan worden gehouden

Op grond van de informatie waarop Figuur 4.1 is gebaseerd kan een keus worden gemaakt voor een drietal typische ontvochtigingscapaciteiten waarop de energiebesparingsberekeningen van § 4.2 kunnen worden gebaseerd. Om de effecten van

verschillende capaciteiten over een goede range vast te stellen worden deze ontvochtigingscapaciteiten zodanig ingesteld dat respectievelijk 50, 70 en 90% van het oppervlak onder de jaarbelastingduurkromme kan worden ingevuld. Dit betekent dat met de laagste capaciteit de helft van de ontvochtigingsbehoefte met de ontvochtiger kan worden ingevuld, met de middelste capaciteit 70% en met de hoogste capaciteit bijna de gehele ontvochtigingsbehoefte door middel van actieve ontvochtiging wordt uitgevoerd. In tabel 4.1 is aangegeven welke ontvochtigingscapaciteiten daarvoor nodig zijn.

Tabel 4.1. Maximale ontvochtigingscapaciteit per gewas in g/(m² uur) waarbij 50, 70 en 90% van de jaarlijks ontvochtigingsbehoefte met de ontvochtiger kan worden ingevuld

	50%	70%	90%
komkommer	53	86	137
roos	22	34	54
potplant	30	47	71

Het eerste dat opvalt is het grote verschil in de benodigde capaciteit tussen de gewassen. Met name het feit dat de roos, met een totale ontvochtigingsbehoefte van 160 kg/(m² jaar) met een kleinere ontvochtigingscapaciteit toekan dan de potplantenteelt, waar op jaarbasis niet meer dan 64 kg moet worden ontvochtigd. Dit verschil ontstaat omdat het aantal tijdstippen waarop in de potplantenteelt de luchtvochtigheid te hoog wordt zeer beperkt is (nog geen 1500 uur), maar dat op die momenten de vereiste capaciteit minstens even groot is als in de rozenteelt.

In de jaarbelastingduurkromme komt dit tot uiting in het feit dat het extra oppervlak onder de curve van de roos vooral tot stand komt door een aanzienlijke verbreding langs de x-as. De relatief flauwe helling van de jaarbelastingduurkromme maakt dat een geringe stijging van de capaciteit een grote vergroting van het oppervlak geeft.

De vorm van de jaarbelastingduurkromme van de ontvochtigingsbehoefte van de komkommer is evenals die van de potplant ongeveer driehoekig. De totale ontvochtigingsbehoefte in de komkommerteelt (het oppervlak onder de jaarbelastingduurkromme) is echter aanzienlijk groter, namelijk 180 kg/(m² jaar). Omdat echter de lengte van de zijkant van een vierkant (of driehoekig) oppervlak slechts met de wortel van de oppervlaktetoename oploopt vraagt de factor 2.5 die in de totale ontvochtigingsbehoefte zit slechts een toename van een factor van ongeveer 1.6 in de ontvochtigingscapaciteit. Vermenigvuldiging van de onderste regel in tabel 4.1 met deze factor levert inderdaad vrijwel de getallen die als vereiste capaciteiten voor de komkommerteelt zijn berekend.

De beperking van de ontvochtigingscapaciteit tot de genoemde waarden in de tabel leidt tot een evenzovele vermindering van de warmteproductie uit de warmtepomp. De energiebesparingspotentiëlen van de meeste opties zullen hierdoor afnemen. Een uitzondering hierop vormt het besparingspotentieel van de absorptiewarmtepomp in de komkommer en rozenteelt. Een vermindering van de ontvochtigingsbehoefte zal in deze situaties tot een geringere koudevraag leiden waardoor de warmteoverschotten die in het vorige hoofdstuk geconstateerd werden zullen verminderen of verdwijnen.

In § 4.2 worden deze effecten gekwantificeerd analoog aan de berekeningen die in § 3.3 t/m 3.6 met een onbegrensde capaciteit werden gemaakt.

4.2 Energiebesparing bij verschillende ontvochtigingscapaciteit

In paragraaf 3.6 is een rekenmethode ontwikkeld waarmee de energiebesparing door de toepassing van ontvochtiging met warmtepompen en korte en lange termijn warmteopslag kan worden bepaald. Deze berekening is gebaseerd op allerlei tussenresultaten in benuttingsgraad, dekkingsgraad en warmtebehoefte. Omdat de berekening die hier wordt gemaakt op precies dezelfde wijze verloopt, wordt direct de eindtabel met de behaalde energiebesparingen (in absolute getallen en procentueel) gepresenteerd.

Tabel 4.2 Primaire energiebesparing in MJ/m² per jaar door ontvochtiging door middel van een door een warmtepomp koud gehouden condensatie-oppervlak waar met een voelbaar:latent verhouding van 1:1 warmte en vocht aan de kaslucht wordt onttrokken. Tabel (a) geldt voor de komkommerteelt, tabel (b) voor de rozenteelt en tabel (c) voor de potplantenteelt.

In alle tabellen worden drie ontvochtigingscapaciteiten aangehouden. De laagste ontvochtigingscapaciteit dekt 50% van de ontvochtigingsbehoefte, de middelste capaciteit dekt 70% en de hoogste capaciteit dekt 90% van de ontvochtigingsbehoefte. Op momenten dat de ontvochtigingscapaciteit tekort schiet worden de luchtinsramen geopend.

Opslagverliezen in de kortdurende en lange termijn opslagsystemen zijn buiten beschouwing gelaten. In de korte termijn buffers (van 75 en 150 m³/ha) wordt warm water opgeslagen in een temperatuurtraject van 35 tot 55 °C. In het aquifer doublet wordt koud water opgeslagen in een traject tussen 5 °C (koude put) en 15 °C (warmte put).

komkommer (a)	elektrische WP				gasmotor WP				absorptie WP			
	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.
max 53 g/u	174	246	269	287	236	311	352	427	166	216	240	383
max 86 g/u	161	220	253	305	239	301	337	499	170	214	231	361
max 137 g/u	163	210	236	310	257	312	341	548	181	223	239	352

roos (b)	elektrische WP				gasmotor WP				absorptie WP			
	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.
max 22 g/u	222	345	348	354	279	433	445	472	209	315	334	398
max 34 g/u	242	343	349	365	312	434	450	523	220	293	315	362
max 54 g/u	246	331	338	371	328	433	448	561	225	286	308	349

potplant (c)	elektrische WP				gasmotor WP				absorptie WP			
	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.
max 30 g/u	44	103	110	114	64	130	143	165	50	96	109	171
max 47 g/u	35	87	97	107	66	122	135	176	54	90	102	184
max 71 g/u	30	74	82	98	70	117	129	180	57	88	98	190

Tabel 4.3 Primaire energiebesparing uit tabel 4.2 als m³ aardgas met een verbrandingswaarde van 31 MJ/m³

komkommer (a)	elektrische WP				gasmotor WP				absorptie WP			
	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.
max 53 g/u	5.6	7.9	8.7	9.2	7.6	10.0	11.4	13.8	5.4	7.0	7.7	12.4
max 86 g/u	5.2	7.1	8.2	9.8	7.7	9.7	10.9	16.1	5.5	6.9	7.4	11.6
max 137 g/u	5.3	6.8	7.6	10.0	8.3	10.1	11.0	17.7	5.8	7.2	7.7	11.4

roos (b)	elektrische WP				gasmotor WP				absorptie WP			
	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.
max 22 g/u	7.1	11.1	11.2	11.4	9.0	14.0	14.4	15.2	6.8	10.2	10.8	12.8
max 34 g/u	7.8	11.1	11.3	11.8	10.1	14.0	14.5	16.9	7.1	9.4	10.2	11.7
max 54 g/u	7.9	10.7	10.9	12.0	10.6	14.0	14.5	18.1	7.3	9.2	9.9	11.3

potplant (c)	elektrische WP				gasmotor WP				absorptie WP			
	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.
max 30 g/u	1.4	3.3	3.5	3.7	2.1	4.2	4.6	5.3	1.6	3.1	3.5	5.9
max 47 g/u	1.1	2.8	3.1	3.5	2.1	3.9	4.4	5.7	1.7	2.9	3.3	5.9
max 71 g/u	1.0	2.4	2.6	3.2	2.2	3.8	4.2	5.8	1.8	2.8	3.2	6.1

De getallen in tabel 4.2 laten zien dat het heel moeilijk is algemene tendensen voor het effect van de warmtepomp aangedreven ontvochtigingsinstallaties op de te behalen energiebesparingsresultaten aan te geven. In sommige gevallen stijgt de energiebesparing bij toename van de ontvochtigingscapaciteit terwijl dat in andere situaties niet opgaat. Dit wordt veroorzaakt doordat de beperking van de ontvochtigingscapaciteit enerzijds de warmteproductie van de warmtepomp vermindert, maar dat daardoor anderzijds de ontvochtiging vaker via de ramen moet plaatsvinden. Al eerder is geconstateerd dat ontvochtiging via de ramen een kleinere warmtevraag oplevert dan ontvochtiging middels een koud oppervlak. Voor de verschillende teelten en warmtepomptypen resulteert de balans tussen deze twee effecten in een optimale ontvochtigingscapaciteit, die ook nog eens belangrijk afhangt van de opslagcapaciteit. Voor de situaties met korte termijn-buffers levert een beperking van de ontvochtigingscapaciteit meestal een verbetering van het besparingspotentieel. Situaties zonder buffer hebben juist baat bij een grote ontvochtigingscapaciteit en situaties met een aquifer laten ook die trend zien (met uitzondering van de potplantenteelt).

Tabel 4.4 Primaire energiebesparing uit tabel 4.2 uitgedrukt in % van het standaard verbruik (tabel 2.1 x 1.02)

komkommer (a)	elektrische WP				gasmotor WP				absorptie WP			
	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.
max 53 g/u	11	16	18	19	15	20	23	28	11	14	16	25
max 86 g/u	10	14	16	20	16	20	22	32	11	14	15	23
max 137 g/u	11	14	15	20	17	20	22	36	12	15	16	23

roos (b)	elektrische WP				gasmotor WP				absorptie WP			
	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.
max 22 g/u	16	25	25	26	20	31	32	34	15	23	24	29
max 34 g/u	17	25	25	26	23	31	32	38	16	21	23	26
max 54 g/u	18	24	24	27	24	31	32	40	16	21	22	25

potplant (c)	elektrische WP				gasmotor WP				absorptie WP			
	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.	0	75	150	aquif.
max 30 g/u	3	8	8	8	5	10	10	12	4	7	8	13
max 47 g/u	3	6	7	8	5	9	10	13	4	7	7	13
max 71 g/u	2	5	6	7	5	9	9	13	4	6	7	14

De belangrijkste generale conclusie is dat de besparingen bij de gasmotor warmtepomp in alle gevallen het grootst zijn. Een tweede conclusie is dat de hoogste besparingen steeds worden gerealiseerd bij toepassing van een aquifer en een hoge ontvochtigingscapaciteit. De maximale besparing komt dan uit op 548 MJ/(m² jaar) (17.7 m³) in de komkommerteelt en 561 MJ/(m² jaar) (18.1 m³) in de rozenteelt.

In een aantal gevallen geeft het gebruik van een grote buffer echter vrijwel gelijke besparingsperspectieven. Dit geldt vooral bij een systeem met een elektrische warmtepomp, maar ook voor de absorptiewarmtepomp in de rozenteelt.

Een derde algemene conclusie is dat het perspectief van de warmtepomp aangedreven ontvochtiging in de potplantenteelt relatief gering is. Dit komt door het geringe vocht-aanbod, en dus de geringe hoeveelheid warmte die als warmtebron voor de warmtepomp optreedt. Opvallend is dat om deze geringe besparingen te kunnen realiseren relatief grote ontvochtigingscapaciteiten vereist zijn.

Opvallend is overigens ook dat alleen bij de potplant de absorptiewarmtepomp de hoogste besparing realiseert. Dit komt omdat in de andere teelten de absorptiewarmtepomp structurele warmte-overschotten oplevert, waardoor in die teelten het aantal draaiuren van de absorptiewarmtepomp kleiner is dan het aantal draaiuren van de andere typen. In de komkommer en rozenteelt realiseert de gasmotor aangedreven warmtepomp de beste besparingsgetallen.

Het feit dat het effect van een vergroting van de ontvochtigingscapaciteit in de systemen zonder lange termijn buffering beperkt is komt doordat naarmate de ontvochtiging toeneemt de warmteproductie ook toeneemt en dus de benutbaarheid van de warmte afneemt. Dit werkt ten nadele van het besparingspotentieel. De benutbaarheid wordt bij de toepassing van een aquifer echter niet aangetast, althans niet bij de compressiewarmtepompen.

Hierdoor loopt in die gevallen de energiebesparing wél op naarmate de ontvochtigingscapaciteit toeneemt.

Ook op deze plaats moet weer worden opgemerkt dat de toepassing van een warmtepomp in de belichte rozenteelt concurrerend is met het gebruik van een WKK. De effectieve energiebesparing komt daarmee ongeveer $360 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ lager uit. De absolute energiebesparing in de rozenteelt wordt daarmee vergelijkbaar met de energiebesparing in de potplantenteelt.

4.3 Vereiste warmtepomp capaciteiten

Met de in § 4.1 genoemde ontvochtigingscapaciteiten zal het duidelijk zijn dat de vereiste koelcapaciteit waarmee de besparingspercentages van tabel 4.2 zijn gerealiseerd sterk uiteenlopen. Om hiervan een indicatie te geven is uitgerekend wat het aandrijfvermogen en de thermische output van een warmtepomp is die een zodanige koudeproductie oplevert dat 70% van de totale ontvochtigingsbehoefte van de drie gewassen kan worden gerealiseerd (dus de capaciteiten die in de middelste kolom van tabel 4.1 staan). Dit is uitgerekend voor alle drie de typen warmtepompen.

Bij de elektrische warmtepomp is het elektrisch asvermogen een duidelijke grootheid. Bij de gasmotor warmtepomp is het asvermogen gelijk aan het vermogen waarmee de gasmotor kracht levert. Bij de absorptiewarmtepomp is de term aandrijfvermogen gebruikt. Dit is het thermisch vermogen dat aan de warmtepomp moet worden toegevoerd.

Tabel 4.5. Aandrijf en thermisch vermogen van drie verschillende warmtepompen bij een zodanige koudeproductie dat de ontvochtigingscapaciteit waarbij 70% van de ontvochtigingsbehoefte kan worden gedekt wordt gerealiseerd.

	[W/m ²]	Elektrische WP		Gasmotor WP		Absorptie WP	
		asverm.	th. verm.	asverm.	th. verm.	aandr. verm.	th. verm.
komkommer (ontv cap. 86 g/u)	39	156	56	222	293	410	
roos (ontv cap. 34 g/u)	15	62	22	88	116	162	
potplant (ontv cap. 47 g/u)	21	85	30	122	160	224	

Uitgangspunt bij de getallen in de tabel is dat de koudebehoefte van de ontvochtigingsinstallatie instantaan kan worden geproduceerd. Dit zal echter een groot aantal deellast-uren met zich meebrengen. Daarom is, uitgaande van de berekende uurlijkse ontvochtigingscapaciteit uitgerekend hoe groot het koelvermogen zou moeten zijn om de etmaalgemiddelde koudebehoefte binnen het etmaal te kunnen produceren, in plaats van de uurlijkse koude behoefte binnen het uur. Hiervoor is in geval er geen aquifer wordt gebruikt een korte termijn koudebuffer nodig. De resultaten hiervan staan vermeld in tabel 4.6. Behalve van de beschikbaarheid van etmaalbuffering is in de getallen die in de tabel staan genoemd ook rekening gehouden met het feit dat de ontvochtiging in situaties waarbij deze tot niet-bufferbare warmte-overschotten leidt de ontvochtiging beter met behulp van de luchttingsramen kan plaatsvinden. Immers, in de toelichting op tabel 4.2 is geconstateerd dat ontvochtiging door middel van een warmtepomp alleen energiebesparing oplevert wanneer de geogste warmte nuttig kan worden gebruikt. De vermindering van de inzet van de warmtepomp die dit tot gevolg heeft leidt eveneens tot een vermindering van het vereiste geïnstalleerd vermogen. De gegevens in tabel 4.4 laten zien dat het effect van de etmaal koude-buffering en de vermindering van de warmtepomp ontvochtiging bij warmte-overschotten tot forse verlaging van het vereiste warmtepomp vermogen leidt.

Tabel 4.6. Aandrijf en thermisch vermogen van drie verschillende warmtepomptypen. uitgaande van etmaalbuffering van de geproduceerde koude, in geval de warmte kan worden gebufferd in een 75 m³/ha tank (dus behorend bij de 2^e, 6^e en 10^e data-kolom in tabel 4.2) en uitgaande van een ontvochtigingscapaciteit waarmee 70% van de ontvochtigingsbehoefte kan worden gedekt (dus de 2^e data-rij in de tabellen van tabel 4.2)

	[W/m ²]	Elektrische WP		Gasmotor WP		Absorptie WP	
		asverm.	th. verm.	asverm.	th. verm.	aandver m.	th. verm.
komkommer (ontv cap.86 g/u)	27	109	27	156	149	208	
roos (ontv cap. 34 g/u)	15	58	15	83	94	132	
potplant (ontv cap. 47 g/u)	12	49	12	71	82	115	

In de situatie waar een aquifer wordt gebruikt ligt de situatie geheel anders. In dat geval zijn koude productie en koude vraag immers geheel ontkoppeld. Het ligt dan voor de hand de koude productie vooral te laten sturen door de warmtevraag en niet door de koudevraag. Er zijn immers meer uren met warmte- dan met koudevraag. Hierdoor kan het vereiste warmtevermogen nog verder omlaag zonder in te boeten op de koudeproductie. Om de warmteproductie zo constant mogelijk te maken is uitgegaan van etmaalbuffering voor de warmte van de warmtepomp. De warmteproductie komt niet voor lange termijn opslag in aanmerking omdat ondergrondse opslag door het relatief hoge temperatuurniveau met veel verliezen gepaard. De gestelde randvoorwaarden betekenen dus dat de warmtepomp zodanig gedimensioneerd moet zijn dat de jaarlijks koudebehoefte in de etmalen met warmtevraag geproduceerd kan worden.

Tabel 4.7. Aandrijf en thermisch vermogen van drie verschillende warmtepomptypen uitgaande van etmaalbuffering van de geproduceerde warmte en lange termijn buffering van de koude in een aquifer (dus behorend bij de 4^e, 10^e en 12^e data-kolom in tabel 4.2) en uitgaande van een ontvochtigingscapaciteit waarmee 70% van de ontvochtigingsbehoefte kan worden gedekt (dus de 2^e data-rij in de tabellen van tabel 5.2)

	[W/m ²]	Elektrische WP		Gasmotor WP		Absorptie WP	
		asverm.	th. verm.	asverm.	th. verm.	aandver m.	th. verm.
komkommer (ontv cap.53 g/u)	9	36	10	58	74	103	
roos (ontv cap. 86 g/u)	6	24	7	38	67	94	
potplant (ontv cap. 47 g/u)	2	10	3	15	23	33	

Een belangrijke conclusie uit de combinatie van de tabellen 4.6 en 4.7 is dat de toepassing van een aquifer een belangrijke afname van het vereiste warmtepomp vermogen met zich meebrengt. Dit komt omdat het aantal draaiuren van de installatie fors kan toenemen. Dit laatste zal gunstig zijn voor de bedrijfseconomische aspecten.

4.4 Energiebesparing per eenheid geïnstalleerd vermogen

In paragraaf 4.2 zijn de energiebesparingsperspectieven van warmtepomp aangedreven ontvochtigingsinstallaties berekend en in paragraaf 4.3 de daarvoor benodigde warmtepomp vermogens. De beste perspectieven voor de warmtepomp-techniek zijn die situaties waarbij de besparing per eenheid geïnstalleerd vermogen het hoogst is. Deze informatie kan nu eenvoudig worden berekend door de informatie uit tabel 4.2 te delen door de in tabel 4.6 en 4.7 genoemde warmtepomp vermogens. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 4.8

Tabel 4.8. Energiebesparing per eenheid vermogen bij de drie verschillende warmtepompen die worden gebruikt voor de ontvochtiging met een zodanige ontvochtigingscapaciteit dat 70% van de jaarlijkse ontvochtigingsbehoefte kan worden gedekt.

In tabel (a) wordt uitgegaan met een warmte-opslag buffer van 75 m³/ha en een etmaal koude-buffering

In tabel (b) is uitgegaan van een etmaalbuffer voor de warmteproductie en wordt de koudeproductie met behulp van een aquifer over het jaar uitgespreid.

(a)	[MJ/W]	Elektrische WP		Gasmotor WP		Absorptie WP	
		asverm.	th. verm.	asverm.	th. verm.	aandriver m.	th. verm.
komkommer (ontv cap.86 g/u)	8.1	2.0	11.0	1.9	1.4	1.0	
roos (ontv cap. 34 g/u)	23.6	5.9	29.8	5.2	3.1	2.2	
potplant (ontv cap. 47 g/u)	7.0	1.8	9.9	1.7	1.1	0.8	

(b)	[MJ/W]	Elektrische WP		Gasmotor WP		Absorptie WP	
		asverm.	th. verm.	asverm.	th. verm.	aandriver m.	th. verm.
komkommer (ontv cap.86 g/u)	33.9	8.5	49.2	8.6	4.9	3.5	
roos (ontv cap. 34 g/u)	60.4	15.1	79.3	13.9	5.4	3.8	
potplant (ontv cap. 47 g/u)	43.6	10.9	67.7	11.9	7.9	5.6	

De belangrijkste conclusie die uit de tabellen kan worden getrokken is dat zoals uit alle eerdere conclusies kan worden verwacht de energiebesparing per eenheid geïnstalleerd WP-vermogen in de rozenteelt het grootst is. Ook hier is de opmerking over het feit dat bij gebruik van de warmtepomp geen WKK meer kan worden ingezet van toepassing. Opvallend is echter dat daar waar de totale energiebesparing in de potplanteelt ver achter blijft bij het potentieel in de komkommer- en rozenteelt de energiebesparing per eenheid warmtepomp vermogen tussen de verschillende teelten niet veel verschilt. De efficiëntie van de hardware is dus voor de verschillende teelten vergelijkbaar, vooral wanneer van een aquifer gebruik wordt gemaakt. Ook hier komt het effect van de betere benutting van de warmtepomp bij de beschikbaarheid van een aquifer tot uitdrukking, namelijk in de belangrijk hogere energiebesparing per eenheid geïnstalleerd vermogen.

5 Conclusies

Op grond van modelberekeningen kan worden geconcludeerd dat met de afvoer van vocht via de ramen in de Nederlandse situatie in de komkommerteelt gemiddeld $250 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ (8 m^3 aardgas) gemoeid is. In de rozenteelt is dit $363 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ (11 m^3 aardgas) en in de potplantenteelt $92 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ (3 m^3 aardgas). Dit komt doordat bij het openen van de ramen niet alleen vocht, maar ook warmte wordt uitgewisseld.

Wanneer nu de vochtafvoer niet via de ramen wordt voorkomen door de ontvochtiging te realiseren door condensatie van het vocht op een kunstmatig gekoeld oppervlak in de kas blijkt echter dat de warmtevraag van het verwarmingssysteem niet af-, maar toeneemt. Dit komt omdat de hoeveelheid voelbare warmte die per eenheid ontvochtiging aan een koud ontvochtigingsoppervlak wordt afgestaan meestal groter is dan de hoeveelheid warmte die per eenheid ontvochtiging met buitenlucht aan de buitenlucht wordt afgestaan.

Wanneer echter de warmte die aan het kunstmatig koud gehouden oppervlak wordt onttrokken door middel van een warmtepomp weer ter beschikking komt voor de verwarming kan in een kas met zo'n ontvochtigingssysteem echter toch energiebesparing worden gerealiseerd.

Zolang de warmte die aan het koude oppervlak dat voor ontvochtiging wordt gebruikt de enige warmtebron voor de warmtepomp is legt de ontvochtigingsbehoefte een duidelijke bovengrens aan het energiebesparingspotentieel. Bij de potplantenteelt, een gewas dat in deze studie model staat voor gewassen met een lage ontvochtigingsbehoefte is het besparingspotentieel dan ook beperkt tot 5 m^3 aardgas per m^2 per jaar. Bij gewassen met een relatief hoge ontvochtigingsbehoefte (roos en komkommer) is het besparingspotentieel echter aanzienlijk (18 en 16 m^3 per m^2 per jaar).

De berekeningen voor de rozenteelt zijn gebaseerd op de aanname dat de elektriciteit voor de belichting vanuit het net wordt ingekocht. Bij dat uitgangspunt is het besparingspotentieel van een warmtepomp aangedreven ontvochtigingsinstallatie in de rozenteelt het grootst. Bij gebruik van een ontvochtigingscapaciteit van 54 gram per uur (waarmee 90% van de jaarlijkse ontvochtigingsbehoefte kan worden gerealiseerd) en een gasmotor aangedreven compressiewarmtepomp kan een maximale besparing van ruim $561 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ (18.1 m^3 aardgas) worden gehaald. De koude wordt daarbij indien nodig opgeslagen in een aquifer doublet. De maximale energiebesparing in de komkommerteelt zijn slechts iets lager ($548 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ (17.7 m^3 aardgas)). Hierbij wordt gebruik gemaakt van een gasmotor aangedreven warmtepomp en wordt een lange termijn opslag-systeem gebruikt. Om dit besparingsniveau in de komkommerteelt te realiseren moet er echter wel een zeer veel grotere ontvochtigingscapaciteit worden geïnstalleerd (137 gram per uur). Hiervoor zouden 8 ribbenbuizen per kap moeten worden geplaatst, wat een zeer hoge lichtonderschepping met zich mee zou brengen. Uitgaande van een beperkte ontvochtigingscapaciteit van 53 gram per m^2 per uur (drie ribbenbuizen per kap) kan in de komkommerteelt echter nog steeds bij 14 m^3 aardgas worden bespaard. Dit kan worden gerealiseerd met een gasmotor aangedreven compressiewarmtepomp met een asvermogen van ongeveer $10 \text{ W}/\text{m}^2$.

In de potplantenteelt is het maximale besparingsniveau $190 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ (6 m^3 aardgas). In de potplantenteelt wordt dit maximum gerealiseerd met een absorptiewarmtepomp. Ook hier moet echter wel gebruik worden gemaakt van een lange termijn opslagsysteem.

Resumerend is het besparingsperspectief van een warmtepomp aangedreven ontvochtigingssysteem in de rozenteelt dus het grootst en wordt daar volstaan met de lichtste warmtepomp en de kleinste ontvochtigings capaciteit. In de discussies bij de

resultaten is echter opgemerkt dat in de belichte rozenteelt de toepassing van WKK een belangrijke concurrerende maatregel is. Na weging van het effect van het feit dat een belichte rozenkas met een warmtepomp geen WK-installatie kan toepassen zakt het perspectief voor de warmtepomp aangedreven ontvochtigingssysteem in de belichte rozenteelt naar de tweede plaats.

Het is opvallend dat het besparingspotentieel niet sterk afhangt van de ontvochtigingscapaciteit. In alle gewassen wordt al bij een capaciteit waarmee slechts de helft van de ontvochtigingsbehoefte wordt gedekt tenminste 80% van het maximale besparingsperspectief gerealiseerd. Dit is verklaard uit het feit dat met het toenemen van de ontvochtigingscapaciteit niet alleen de dekkingsgraad van de warmtepomp toeneemt, maar ook de warmtevraag.

Bij gebruik van een elektrisch aangedreven warmtepomp daalt het besparingsperspectief in de komkommerteelt naar waarden rond de 300 MJ/(m² jaar) (9 m³ aardgas). Hierbij is rekening gehouden met het feit dat voor de productie van een 1 elektriciteit in een centrale een 2 eenheden primaire energie moeten worden ingezet. Bij gebruik van een absorptiewarmtepomp zijn de besparingen in de meeste gevallen iets groter dan de waarden die gerealiseerd worden met de elektrisch aangedreven warmtepomp.

Wanneer geen lange termijn opslagsysteem kan worden gebruikt, maar allen bovengrondse buffers van 150 m³/ha zakt het besparingspotentieel in de komkommerteelt naar 352 MJ/(m² jaar) (11 m³ aardgas) bij de gasmotor warmtepomp, 269 MJ/(m² jaar) (9 m³ aardgas) voor de elektrisch aangedreven warmtepomp en 240 MJ/(m² per jaar) (8 m³ aardgas) voor de absorptiewarmtepomp. Daarmee kan worden geconcludeerd dat het gebruik van een aquifer ongeveer 3 m³ extra energiebesparing oplevert. Een belangrijk bijkomend effect is dat door het gebruik van een aquifer het warmtepomp vermogen waarbij een bepaald besparingsniveau kan worden gerealiseerd een factor 3 tot 4 kleiner kan zijn dan wanneer er geen lange termijn opslagcapaciteit wordt gebruikt.

Wanneer er helemaal geen buffer-mogelijkheid is (dus geen korte en geen lange termijn buffering) zijn de besparingspotentiëlen grofweg de helft van de maximale besparing die in overigens gelijke omstandigheden kunnen worden gerealiseerd.

De geringe perspectieven in de potplantenteelt (de helft van die in de komkommerteelt) worden veroorzaakt door het feit dat de ontvochtigingsbehoefte in de potplantenteelt klein is.

Wanneer de gerealiseerde energiebesparingsniveaus worden gedeeld door het daarvoor benodigde warmtepomp vermogen blijken de verschillen tussen de teelten sterk te verminderen. Met name in de situaties waarin een aquifer wordt gebruikt bespaart een elektrisch aangedreven compressiewarmtepomp op jaarbasis rond de 45 MJ/W_{asvermogen}, een gasmotor warmtepomp op jaarbasis ongeveer 60 MJ/W_{asvermogen}, en de absorptiewarmtepomp rond de 6 MJ/W_{aandrijf vermogen} per jaar. Zonder aquifer verschilt de efficiëntie van de hardware sterk. Zo levert de elektrisch aangedreven warmtepomp in de rozenteelt een besparing van 24 MJ/W_{asvermogen} terwijl hetzelfde type installatie in de potplantenteelt niet meer dan 7 MJ/W_{asvermogen} realiseert. Ook bij de andere typen warmtepompen is de efficiëntie van de hardware (in termen van resultaat per eenheid vermogen) zonder aquifer al gauw 3 keer zo laag als die van een systeem met aquifer en zijn de verschillen de efficiënties tussen de gewassen bijna een factor 4. Het gebruik van een aquifer geeft dus niet alleen het hoogste besparingspotentieel, maar ook de laagste warmtepomp capaciteit.

6 Aanbevelingen

Uit de theorievorming die bij de uitwerking van dit project is geformuleerd en na interpretatie van de resultaten moet worden vastgesteld dat de energiebesparing die met het onderzochte systeem wordt gerealiseerd op het conto van de warmtepomp moet worden geschreven en niet op het conto van het ontvochtigingssysteem. Het bleek zelfs dat de warmtebehoefte van de kas toeneemt wanneer de luchtvochtigheid niet met ramen maar met actieve ontvochtiging wordt gerealiseerd. Dit kan kwalitatief worden afgeleid uit figuur 3.4 en kwantitatief uit een vergelijking van de warmtevraag in tabel 2.1 met de warmtevraag in tabel 3.1.

Vanuit de fysica is dit ook te beredeneren omdat energetisch gezien condensatie aan een koud oppervlak gezien kan worden als uitwisseling van kaslucht met lucht met 100% RV rond het koude oppervlak. Omdat het oppervlak koud is, is de vochtinhoud van deze lucht, hoewel verzadigd, lager dan die de warmere kascondities, waardoor er ontvochtiging optreedt. Wanneer er echter met buitenlucht wordt ontvochtigd is deze gemiddeld veel droger. De relatieve vochtigheid van buitenlucht is immers vrijwel nooit hoger dan 90%. Hierdoor hoeft er bij gebruik van buitenlucht minder lucht uitgewisseld te worden dan wanneer er wordt 'uitgewisseld' met lucht rond een koud oppervlak. Ontvochtigen met buitenlucht zal dus meestal minder lucht-uitwisseling geven en dus (zolang de lucht niet al te koud is) minder voelbaar warmteverlies opleveren.

Het onderzoek heeft dus tot de conclusie geleid dat de warmtevraag, en dus ook het primaire energieverbruik lager zou zijn geweest als de warmtepomp aan een andere energie-bron dan de ontvochtigingsinstallatie zijn warmte zou hebben betrokken. Dit zou bijvoorbeeld met een soortgelijke ribbenbuis kunnen worden gerealiseerd, maar dan in perioden met een warmte-overschot, bijvoorbeeld op warme zomerse dagen. In dit geval wordt de synchroniteit van warmtevraag en warmteproductie echter nog aanzienlijk slechter dan bij gebruik van een ontvochtiger als warmtebron zodat het gebruik van een aquifer onmisbaar wordt.

Berekeningen aan een dergelijk systeem zijn voorzien in het lopende project "de kas als zonne-energieoogster". Op grond van de inzichten die in het project "energiezuinige vochtregulatie" zijn verkregen mag dus worden verwacht dat de perspectieven voor een warmtepomp aangedreven verwarmingssysteem, wat niet tijdens ontvochtigingsbehoefte, maar juist op warme dagen een energievoorraad aanlegt een nog hoger besparingspotentieel zal hebben. Indien zo'n zonne-energieoogster voldoende warmte in de aquifer opslaat zal de ontvochtiging bij voorkeur via de ramen plaats moeten vinden.

Uitgaande van de beschikbaarheid van CO₂ met een bepaalde capaciteit hebben ontvochtigingssystemen in niet gesloten kassen geen noemenswaardige invloed op de productie. Dit komt omdat ontvochtiging alleen 's nachts en op sombere dagen nodig is. Zodra het lichtniveau stijgt en hogere CO₂-niveau's rendement kunnen gaan opleveren gaan de ramen al gauw open op het temperatuur-criterium. Wanneer er echter in de situatie waarmee warmtepomp concepten worden vergeleken CO₂ wordt gedoseerd met rookgassen zal de vermindering van de beschikbaarheid door de toepassing van warmtepompen in de beoordeling moeten worden meegenomen. De vermindering van de beschikbaarheid van CO₂ is het sterkst bij de elektrisch aangedreven warmtepomp en het geringst bij de absorptiewarmtepomp.

Een belangrijk punt dat in deze studie niet is meegenomen maar wel aandacht verdient is het temperatuurniveau waarop warmte moet worden afgegeven. Naarmate deze temperatuur

stijgt zal de COP van warmtepompen afnemen (zie bijvoorbeeld Boot, 1998). Dit probleem wordt groter naarmate de dekkingsgraad van de warmtepomp groter wordt omdat er dan steeds meer momenten komen waarop de warmtepomp veel vermogen moet leveren. De gasmotor aangedreven warmtepomp biedt op zulke momenten grote voordelen omdat ongeveer 40% van de vrijkomende warmte op een hoge temperatuur beschikbaar is (95 °C). Naast het feit dat deze warmte bij hoge vermogens goed gebruikt kan worden is deze warmte ook nog eens goed bufferbaar op momenten dat de vermogensvraag beperkt is. In vervolg analyses moet de relatie tussen temperatuur-niveau en COP dan ook goed worden meegenomen.

7 Literatuur

Bach, P.W, R. de Boer, J.P van der Stoel, O.M. de Vegt en H.F. de Zwart, 1999, Kasontvochtiging met een open sorptiesysteem, ECN-CX—99-066

Knies P. en N.J. van de Braak, 2000, Energieopslag in aquifers, IMAG-nota 2000-02

Boot, H, J Nies, M.J.E. Verschoor en J.B. de Wit, 1998, Handboek industriële warmtepompen, Kluwer bedrijfsinformatie Deventer.

Huijs, J.P.G en H.F. de Zwart, 1995, Energie-effecten bij inzet WKK in eiland- en parallelbedrijf in kassen, IMAG-DLO, rapport 95-4