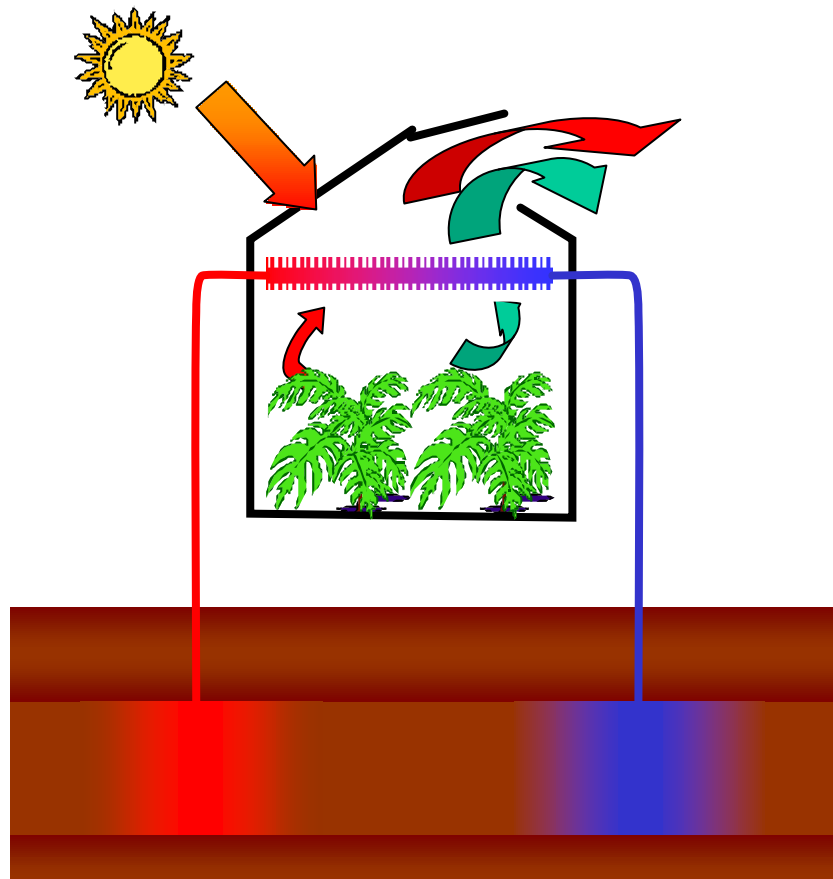


De kas als zonne-energie oogster



H.F. de Zwart
G.L.A.M. Swinkels

IMAG Nota P 2002-04

Onderzoek in het kader van het
Convenant Glastuinbouw en
Milieu



Gefinancierd door:



De kas als zonne-energie oogster

H.F. de Zwart
G.L.A.M. Swinkels

© 2002

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

Interne mededeling IMAG. Niets uit deze nota mag elders worden vermeld, of worden vermenigvuldigd op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van IMAG.

Bronvermelding zonder weergave van de feitelijke inhoud is evenwel toegestaan, op voorwaarde van de volledige vermelding van: auteursnaam, jaartal, titel, instituut en notanummer en de toevoeging: 'niet gepubliceerd'.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, in any form of by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording of otherwise, without the prior written permission of IMAG.

Voorwoord

Het rapport “De kas als zonne-energie oogster” geeft een overzicht van het energiebesparingspotentieel van het gebruik van zomerse warmte-overschotten voor de voeding van een warmtepomp in de winter. In tegenstelling tot een aantal andere onderzoeksprojecten rond dit thema is in dit project de warmte-onttrekking geheel gebaseerd op natuurlijke convectie langs koude oppervlakken in de kas. Dit betekent dat de warmte-onttrekking nauwelijks hulpenergie vraagt.

Bij de bestudeerde warmteonttrekkende systemen is rekening gehouden met de gebruikelijke kas-inrichting. Dit maakt dat de toepasbare systemen per onderzochte teelt verschillen. Ook de consequenties van het feit dat elk gewas andere eisen aan het kasklimaat stelt is in dit onderzoek meegenomen teneinde voor de breedte van de huidige glastuinbouwsector relevante kwantitatieve gegevens op te leveren over de over de problematiek rond kaskoeling en lange termijn warmte-opslag en -benutting.

Het rapport biedt ook goed overzicht over de operationele bedrijfsvoering van met name compressie-warmtepompen (deellast-gedrag en de relatie tussen COP en temperatuurniveau). De informatie hierover is ingebracht door TNO-MEP.

De informatie wordt gecombineerd met gemakkelijk toegankelijke gegevens over de bedrijfseconomische consequenties van het gebruik van de bestudeerde systemen.

Het onderzoek is mogelijk gemaakt met middelen van het ministerie van Economische zaken (via Novem) en het Productschap Tuinbouw in het kader van onderzoeksprojecten gericht op het bereiken van de doelstellingen van het convenant Glastuinbouw en Milieu. Het ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij heeft eveneens aan het project bijgedragen middels inzet van middelen van uit het sponsorprogramma “Energiebesparing in de beschermde teelten”.

Inhoud

Voorwoord.....	1
Inhoud.....	2
Samenvatting.....	3
Inleiding.....	6
1 Warmteoverschotten in verschillende kas-gewassen	8
1.1 Inleiding.....	8
1.2 Warmteoverschotpatronen	8
2 Energiebesparing en verwarming met een warmtepomp.....	12
2.1 Inleiding.....	12
2.2 De COP van warmtepompen.....	12
2.3 Aquiferbelasting bij verschillende warmtepompen	18
3 Warmteonttrekkingscapaciteit van collectornetten.....	26
3.1 Inleiding.....	26
3.2 Collectornetten.....	26
3.3 Warmte-oogst in relatie tot stoptijd.....	29
3.4 Onttrekkingscapaciteit in relatie tot retourtemperatuur.....	31
3.5 Onttrekkingscapaciteiten van verschillende verwarmingsnetten	32
4 Energiebesparing van verschillende warmtepomp-collectornet combinaties.....	33
4.1 Inleiding.....	33
4.2 Besparingspotentieel in de tomatenteelt.....	33
4.3 Besparingspotentieel in de onbelichte rozenteelt.....	35
4.4 Besparingspotentieel in de warme potplantenteelt.	36
4.5 Besparingspotentieel in de radijzenteelt.	37
4.6 Besparingspotentieel in de fresiateelt.....	38
4.7 Besparingspotentieel in de koude potplanten.	39
5 Bedrijfseconomische aspecten	40
5.1 Berekeningswijze.....	40
5.2 Uitgangspunten	41
5.3 Resultaten.....	46
5.4 Conclusies	53
6 Conclusies	54
7 Aanbevelingen.....	57
8 Literatuur.....	58
Bijlage I – Compressie warmtepomp karakteristieken (bijdrage TNO-MEP).....	59
Bijlage II – Kentallen waarop de bedrijfseconomische kostenberekening is gebaseerd.....	63

Samenvatting

Het feit dat een kasdek veel licht doorlaat en warmteverlies tegenhoudt zorgt ervoor dat de kas op warme, lichtrijke dagen erg warm wordt. In de huidige kassen wordt deze warmte afgevoerd door de ramen te openen. Als (een deel van) dit warmte-overschot via een koelsysteem aan de kas zou kunnen worden onttrokken zou met de aldus ge oogste warmte een ondergronds lange termijn warmte-opslagsysteem kunnen worden verwarmd. Dit opslagreservoir zou dan in de winter kunnen worden aangesproken als laagwaardige warmtebron voor een warmtepomp. Op deze manier fungeert de kas in de zomer als zonne-energie oogster en kan de kas in de winter gebruik maken van duurzame energie.

In dit rapport wordt aangetoond dat het zomerse warmte-overschot in Nederlandse kassen in principe ruimschoots voldoende is om zo'n lange termijn opslagsysteem te regenereren. De crux van de problematiek zit dan ook in de manier waarop het warmte-overschot aan de kaslucht wordt onttrokken. Invangen van het zonlicht, zoals bij de bekende zonnecollectoren, is geen optie omdat het zonlicht nodig is voor de plantengroei. Daarom zal de warmte via convectie aan de kaslucht moeten worden onttrokken en derhalve op temperaturen onder de kasluchttemperatuur beschikbaar komen.

Het gebruik van de warmtepomp biedt de mogelijkheid om de kas op een energie-zuinige wijze te verwarmen. Rekening houdend met de fysische eigenschappen van warmtepompen, zoals de relatie tussen verwarmings-temperatuur en COP¹ en het deellast-gedrag², is dit besparingspotentieel voor een 6-tal typische tuinbouwgewassen berekend voor het geval er geen beperking in de beschikbaarheid van warmte in het lange termijn opslagreservoir zou zijn. Voor de energie-intensieve gewassen (tomaat, onbelichte roos en warme potplant) varieert dit potentieel tussen de 4 m³/(m² jaar) (absorptie warmtepomp) en 22 m³/(m² jaar) (compressiewarmtepomp). Bij de energie-extensieve gewassen varieert het besparingspotentieel van 3 m³/(m² jaar) (absorptie warmtepomp in de radijzenteelt) tot 13 m³/(m² jaar) (compressiewarmtepomp in de koude potplanten of fresiateelt). Bij al deze berekeningen is uitgegaan van een energiezuinig binnenklimaat (geen vaste minimumbuis en zorgvuldige vochtregeling, gebruik van een energiescherm in de tomatenteelt).

Als naast de fysische beperkingen van de warmtepomp ook de hoeveelheid warmte die in de zomer aan de kaslucht kan worden onttrokken in de beschouwing wordt meegenomen, dan ontstaat er een sterke relatie tussen de hoeveelheid verzamelde warmte en het energiebesparingspotentieel. Op de langere duur kan er immers niet meer warmte aan de ondergrond worden onttrokken dan er via opwarming in de zomer weer aan wordt toegevoegd.

Zoals eerder gezegd is het warmte-overschot in de zomer ruimschoots voldoende om in deze opwarming te voorzien. De daartoe benodigde warmteonttrekking aan de kaslucht kan technisch gezien goed plaatsvinden via geforceerde convectie (in luchtbehandelingskasten en met behulp van ventilatoren) . Hiermee ontstaat echter een belangrijke elektriciteitsverbruikspost.

Om nu te voorkomen dat het energiebesparingspotentieel van de warmtepomp gedeeltelijk wordt tenietgedaan via het elektriciteitsgebruik van ventilatoren is in dit project berekend in welke mate voor de warmte-onttrekking gebruik gemaakt kan van natuurlijke convectie.

¹ Coefficient Of Performance, een getal dat aangeeft hoeveel verwarmingsvermogen aan de uitgang van de warmtepomp wordt geleverd per eenheid aandrijfvermogen.

² Het effect van het gebruik van de warmtepomp bij lagere dan de maximale capaciteit op de rendementsgetallen.

Een belangrijk aandachtspunt bij het gebruik van koelsystemen is de temperatuur waarop het water aan de uitgang van deze systemen beschikbaar moet komen¹. Een hoge temperatuur geeft namelijk wel een grote opwarming van het water dat uit de koude kant van het aquifer doublet wordt gepompt, maar beperkt tevens de warmte-onttrekking. De analyses op dit punt laten zien dat bij verhoging van de temperatuur aan de uitgang van een collectornet van bijvoorbeeld 15 naar 18 °C de warmteonttrekking met bijna 20% afneemt. Op kwalitatieve gronden is gekozen voor een zodanige regeling van de warmte-collectie systemen dat de uitgang tenminste 17 °C is en een aquifer dus tot zo'n 15 °C kan worden opgewarmd (rekening houdend met 2 °C temperatuurverlies over de warmtewisselaar).

De gemakkelijkste manier om actief warmte aan de kas te onttrekken is het dubbel gebruik van de reeds bestaande verwarmingsnetten. Als deze buis-systemen, die in warme perioden niet gebruikt worden voor de verwarming benut worden voor koeling, kan zonder grote investeringen warmte aan de kas onttrokken worden.

Het blijkt dat bij een zodanig gebruik van de gangbare systemen voldoende warmte aan de kaslucht onttrekt om, bij gebruik van een gasmotor aangedreven compressie warmtepomp 5 (tomaat, roos) tot ruim 8 m³/(m² jr) (fresia) te kunnen besparen. Het hoge potentieel bij de fresia ligt in het feit dat hier in de gangbare teelt reeds een grond-koelingsstelsel beschikbaar is, wat na enkele aanpassingen het grootste deel van de regeneratie van de aquifer voor zijn rekening kan nemen. Wanneer gebruik wordt gemaakt van een absorptiewarmtepomp zijn de besparingen ongeveer 10% minder. Bij gebruik van een elektrisch aangedreven warmtepomp zijn de besparingen ongeveer 40% minder (uitgaande van een energieconversierendement in elektriciteitscentrales van 0.5).

De voornaamste reden voor het verschil tussen de drie warmtepomp typen is het feit dat een gasmotor aangedreven compressie warmtepomp per eenheid energiebesparing een kleiner beslag legt op aquifer warmte dan de absorptie warmtepomp en een aanzienlijk kleiner beslag legt op aquifer warmte dan de elektrisch aangedreven warmtepomp. Voor de laatste warmtepomp moet dus veel meer warmte in de zomer aan de aquifer worden toegevoerd voor dezelfde hoeveelheid energiebesparing. Dit komt tot uiting in de in dit rapport geformuleerde vuistregels voor de primaire energiebesparing die een warmtepomp oplevert per GJ warmte die aan een aquifer wordt onttrokken. Voor de elektrische warmtepomp is de primaire energie besparing 20 (intensieve teelten) tot 26 (extensieve teelten) m³ a.e. per GJ die aan een aquifer wordt onttrokken. Voor de gasmotor warmtepomp zijn deze getallen respectievelijk 32 en 36 m³ a.e. per GJ en voor de absorptiewarmtepomp 29 en 31 m³ a.e. per GJ.

In gevallen dat het besparingspotentieel wordt beperkt door de beschikbaarheid van warmte in de aquifer kan een vergroting van de warmte-oogstcapaciteit het potentieel vergroten. Immers, als er in de zomer meer warmte in de aquifer wordt ondergebracht kan er in de winter meer worden bespaard. Deze vergroting wordt in deze studie gerealiseerd middels het vergroten van de buisdiameter en het verdubbelen van het aantal buizen. De toename van het besparingspotentieel bedraagt door de bank genomen 1 tot 3.5 m³/(m² jr). Een uitzondering hierop vormt de radijzenteelt, waar de warmtevraag dermate gering is dat een toename van de warmte-oogst capaciteit ten opzichte van het potentieel van het bestaande verwarmingsnet nauwelijks nog voordeel biedt.

In de energie intensieve teelten kan de energiebesparing oplopen naar waarden rond de 10 m³/(m² jr) door naast een dubbel gebruik van de bestaande verwarmingsnetten extra collector-netten in de kas te plaatsen. Bij een tomatenteelt met hangende goten kan hierbij gedacht worden aan een buis onder de

¹ Dit is voor systemen op basis van natuurlijke convectie niet anders dan voor systemen op basis van gedwongen convectie

teeltgoot. Bij de rozen-, fresia-, radijzen- en potplantenteelt zal zo'n extra collectornet boven het gewas moeten worden gehangen (in de hier gebruikte berekeningen 5 buizen onder een 8 meter tralie).

In de fresia- en koude potplantenteelt brengt de aanleg van een extra collectornet de energiebesparing die met de gasmotor aangedreven compressie warmtepomp kan worden gerealiseerd op repectievelijk 13 en 10 m³/(m² jr).

Ook na toepassing van extra collectornetten onder de hangende teeltgoten of boven in de kas blijft de warmteonttrekkingscapaciteit van de kas te laag om de aquifer in de zomer zodanig op te warmen dat de warmtepomp het maximale besparingspotentieel kan behalen. Teneinde de warmteonttrekkingscapaciteit van de kas in de zomer verder te vergroten is onderzocht in hoeverre een koelsysteem dat in het kader van het onderzoek rond de kas van de toekomst is ontwikkeld hiervoor gebruikt zou kunnen worden. Dit systeem is een watervoerende tralieligger waarvan de onderste buis is uitgerust met koelvinnen. De studie laat zien dat dit systeem, tezamen met het bestaande verwarmingssysteem (met een vergrote buisdiameter) het energiebesparingspotentieel van de gasmotor aangedreven compressie warmtepomp voor de energie-intensieve teelten op 13 tot 16 m³/(m² jr) kan brengen.

De bedrijfseconomische evaluatie laat evenwel zien dat de hoge besparingspotenties onder de gestelde aannamen niet op een bedrijfseconomisch effectieve wijze kunnen worden gerealiseerd. De enige uitzondering wordt gevormd door de fresiateelt, waarin bij gebruik van een warmtepomp in de winter een voorraad koud water kan worden geproduceerd waarmee in de zomer in de behoefte van grondkoeling kan worden voorzien. Bij gebruik van een gasmotor aangedreven warmtepomp levert dit een energiebesparing van ruim 6 m³/(m² jr) en, onder de gestelde aannamen, een bedrijfseconomisch voordeel van € 0.26 per m²/jaar.

De bedrijfseconomische analyse geeft aan de perspectieven voor de gasmotor aangedreven compressie warmtepomp het minst ongunstig zijn en dat er over de hele linie veranderingen in de kosten en/of opbrengsten moeten plaatsvinden om warmtepompen ook in teelten zonder grondkoeling succesvol te kunnen exploiteren.

In de aanbevelingen wordt geopperd dat een bedrijfseconomisch verantwoorde implementatie van warmtepompen wellicht ook mogelijk is wanneer de koelcapaciteit op een goedkope wijze zodanig vergroot zou kunnen worden dat ook in de teelten zonder grondkoeling economisch voordeel te behalen is uit de in de winter door de warmtepomp geproduceerde koude. Dit voordeel moet dan voortkomen uit de vermindering van de CO₂-behoefte en/of een toename van de productie.

Inleiding

Een kasdek van een moderne tuinbouwkas heeft een hoge transmissie voor zonlicht. Hierdoor kan zonne-energie in de vorm van kortgolvlige straling de kas binnentreden. In de kas wordt dit zonlicht voor het grootste deel geabsorbeerd en daarmee omgezet in warmte. De absorptie vindt plaats door bladeren en andere gewasdelen en vloer en constructie. De absorptie door bladeren vormt hierbij de hoofdmoot. Omdat de intra-cellulaire holten van de bladeren vochtig zijn en in contact staan met de kaslucht resulteert de licht-absorptie door het gewas in een toename van de verdamping. Als vuistregel wordt vaak gehanteerd dat een gewas dat voldoende van water wordt voorzien 2/3 van het geabsorbeerde zonlicht omzet in latente warmte (waterdamp). De rest van het onderschepte licht wordt via (langgolvlige) straling en convectie afgegeven aan de omgeving.

In een groot deel van het jaar is de warmte die op deze wijze vanuit zonne-energie beschikbaar komt veel meer dan de hoeveelheid warmte die op die momenten nodig is om de kas op de gewenste temperatuur te houden. Het gevolg hiervan is dat de kas de ramen opent.

Op andere momenten ('s nachts en in de winter) heeft een tuinbouwkas een zekere warmtevraag. Door een goede isolatie van het kasdek of de toepassing van schermen kan deze warmtevraag belangrijk worden beperkt. De warmtevraag, uitgedrukt als verwarmingsbehoefte van een kasverwarmingsnet, blijft echter zelfs bij een zeer hoge isolatiewaarde nog altijd minstens rond de 500 MJ/(m² jaar), omdat de gewasverdamping warmte aan de kaslucht onttrekt en er bij de afvoer van het geproduceerde vocht ook voelbare warmte aan de kaslucht wordt onttrokken (althans, met de op dit moment bekende en beproefde methodieken).

In hoofdstuk 1 wordt voor een zestal gewassen in beeld gebracht hoe groot de warmte-overschotten en tekorten zijn en in welke periode deze optreden. De zes gewassen (tomaat, paprika, radijs, roos, chrysanthe en fnesia) zijn representatief voor de intensieve en extensieve groententeelt, snijbloemeteelt en potplantenteelt. De kas- en teelteigenschappen van deze gewassen zijn onlangs beschreven in het rapport "Standaard teelten", (Swinkels e.a., 2000).

Wanneer de warmtevoorziening van de verschillende teelten door een warmtepomp wordt ingevuld kan de verwarmingsbehoefte met een kleiner primair energieverbruik worden gedekt dan met een conventionele verwarmingsketel. Een warmtepomp gebruikt echter naast primaire energie ook een andere bron waaruit energie kan worden onttrokken, een zogenaamde laagwaardige warmtebron. De verhouding tussen de hoeveelheid warmte die door de warmtepomp wordt afgegeven en de hoeveelheid energie waarmee de warmtepomp wordt aangedreven wordt aangeduid met de COP (zie pag. 3). Naarmate de COP stijgt wordt er steeds meer warmte afgegeven ten opzichte van de aandrijfhoeveelheid. Het verschil tussen aandrijf- en afgegeven energie wordt onttrokken aan de laagwaardige warmtebron. In hoofdstuk 2 wordt uiteengezet op welke wijze de COP afhangt van het type warmtepomp en de wijze waarop deze voor de verwarming wordt gebruikt. Er wordt ingegaan op de betekenis daarvan op het besparingspotentieel van de warmtepomp. Ook wordt uitvoerig ingegaan op de implicaties van verschillende COP's en warmtepomp capaciteiten op de onttrekking van warmte aan de laagwaardige warmtebron.

De laagwaardige warmtebron wordt in dit project gevormd door een aquifer-doublet, bestaande uit een warme en een koude put. Bij gebruik van de warmtepomp in de winter wordt het water uit de relatief warme put opgepompt en na te zijn uitgekoeld in de koudere put teruggeperst. De warme put zal hierdoor gestaag kleiner worden. Relatief warm water (17 °C) wordt vervangen door kouder omgevingswater (10 °C). Tegelijkertijd groeit de koude put. Omgevingswater van 10 °C wordt weggeduwd en vervangen door koud water van 5 °C.

Teneinde de thermische balans te herstellen moet op een gegeven moment het water uit de koude put worden opgepompt en, na te zijn opgewarmd, weer in de warme put teruggeperst. Wanneer de opwarming met de warmte-overschotten uit de kas plaatsvindt wordt op deze manier zonne-energie gebruikt voor de regeneratie van de aquifer gebruikt. De kas, uitgerust met een warmte-onttrekkend oppervlak, fungeert op dat moment dus expliciet als zonneoogster.

Om warmte aan het warmte-onttrekkend oppervlak te kunnen verzamelen moet de temperatuur van dit oppervlak lager zijn dan de kasluchttemperatuur. Naarmate dit temperatuursverschil toeneemt wordt de warmte-overdracht per oppervlakte-eenheid groter, zodat de afmeting van de hardware die voor de energie-vergaring wordt gebruikt kleiner kan worden. Bovendien is de effectieve warmte-overdracht relatief groot wanneer de oppervlaktetemperatuur onder de dauwpunttemperatuur van de kaslucht ligt. Er vindt dan immers ook condensatie aan het oppervlak plaats waardoor niet alleen voelbare, maar ook latente warmte-overdracht plaatsvindt. In hoofdstuk 3 worden verschillende typen koelende elementen getoond en wordt de warmteonttrekkingscapaciteit van deze systemen bestudeerd.

In hoofdstuk 4 worden warmtepomp en zonne-energie oogster aan elkaar gekoppeld en worden per teelt de relevante combinaties geselecteerd. Voor deze combinaties worden de energiebesparingsprestaties berekend en beoordeeld.

In hoofdstuk 5 worden bedrijfseconomische berekeningen aan de verschillende systemen uitgevoerd. Er wordt uitgebreid ingegaan op de gebruikte uitgangspunten en rekenmethodiek. Ook zal worden ingegaan op de actualiteit rond de invoering van het CDS in de tuinbouwgasprijs.

In hoofdstuk 6 en 7 worden de conclusies van het onderzoek gepresenteerd en worden aanbevelingen op grond van de in dit project opgedane kennis gegeven.

1 Warmteoverschotten in verschillende kasgewassen

1.1 Inleiding

Als de kasluchttemperatuur in een gangbare kas zodanig oploopt dat deze het ventilatiesetpoint overschrijdt worden de ramen opengestuurd om de overtollige warmte af te voeren. Dit gebeurt in de regel met een proportionele regeling. Zo'n regelaar stuurt de ramen verder open naarmate de temperatuur meer boven de ventilatielijn uitkomt. Daarmee is de ventilatielijn dus geen maximum temperatuur maar meer een grens waarboven door de regelaar ingegrepen wordt. Naast voelbare warmte wordt er door het openen van de ramen ook vocht (latente warmte) afgevoerd. In de zomer is de luchtuitwisseling tussen kas- en buitenlucht door de ramen zodanig dat de luchtvochtigheid in de kas ruimschoots onder de maximaal aanvaardbare luchtvochtigheid blijft. 's Nachts en in de vroege ochtend, maar in het najaar ook overdag gaan de ramen echter vaak open om juist het vocht af te voeren. In die gevallen is (een deel van) de warmte-afvoer in feite ongewenst en is er dus, ondanks het feit dat dan de ramen openstaan, geen sprake van een warmteoverschot. In dit hoofdstuk worden voor de 6 karakteristieke bedrijven overzichten gegenereerd van de afgevoerde warmte-overschotten, dus de warmte-afvoer op tijdstippen dat de ramen niet open hoeven ten behoeve van de kaslucht ontvochtiging.

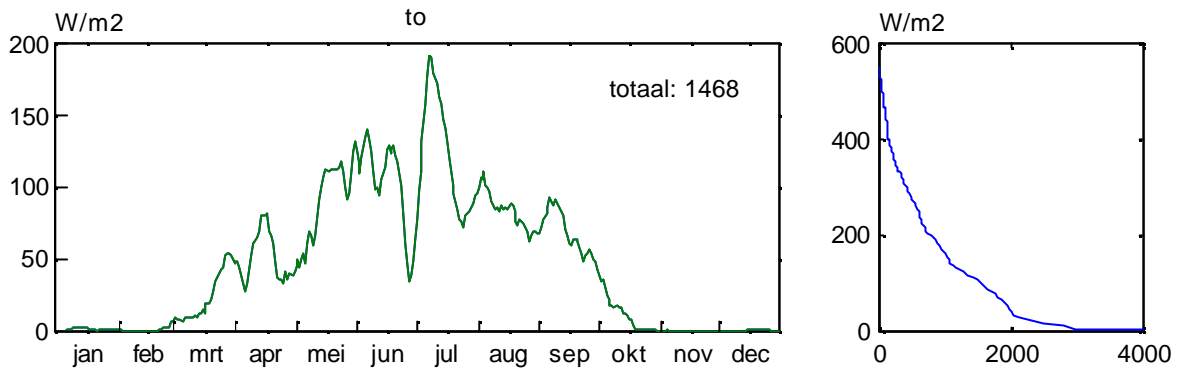
In het volgende hoofdstuk zal deze overtollige warmte worden afgezet tegen de hoeveelheid warmte die een warmtepomp in de winter bij de verschillende gewassen aan de aquifer onttrekt.

1.2 Warmteoverschotpatronen

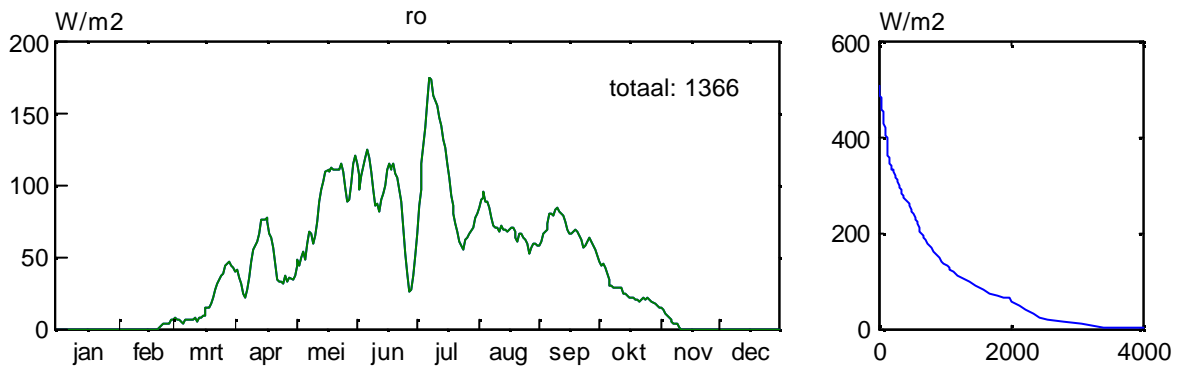
In een dynamisch kasklimaatmodel, zoals KASPRO, kan eenvoudig worden bepaald hoe groot de warmte-uitwisseling door de ramen is. Deze warmte-uitwisseling is immers een van de termen in de warmtebalans.

Hetzelfde geldt voor de vochtuitwisseling door de ramen. De vocht-uitwisseling vertegenwoordigt een grote hoeveelheid energie in de vorm van latente warmte en wordt daarom ook als warmte-overschot gerekend. Wanneer dit vocht namelijk zou condenseren komt de latente warmte weer beschikbaar. In figuur 1.1 t/m 1.6 zijn grafieken gemaakt van het dagelijks gemiddelde van het voelbare warmte-overschot en het latente warmte-overschot ($2.45 \cdot 10^6$ maal de vocht-afvoer). In deze figuren is tevens de jaarbelastingduurkromme van beide grootheden afgebeeld.

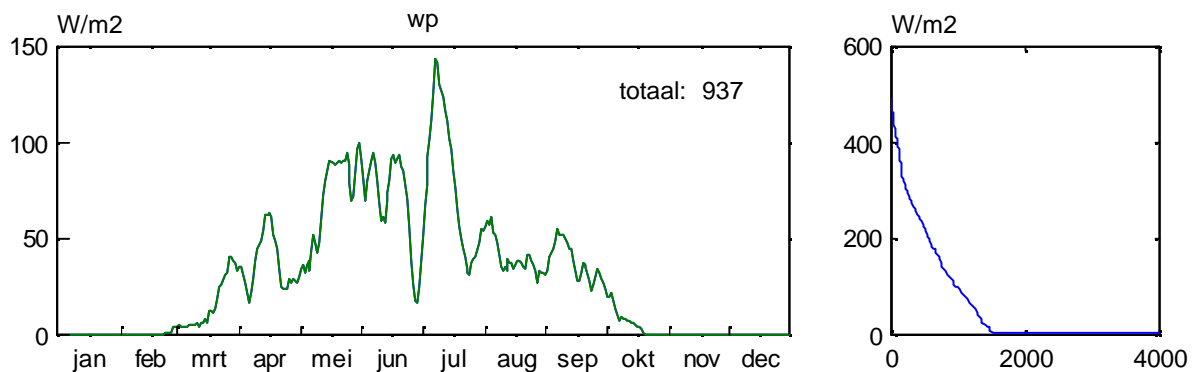
Als uitgangspunt voor het te hanteren kasklimaat zijn de kasklimaatinstellingen gebruikt die in het rapport Standaard teelten (Swinkels *et al.*, 2000) zijn vastgelegd.



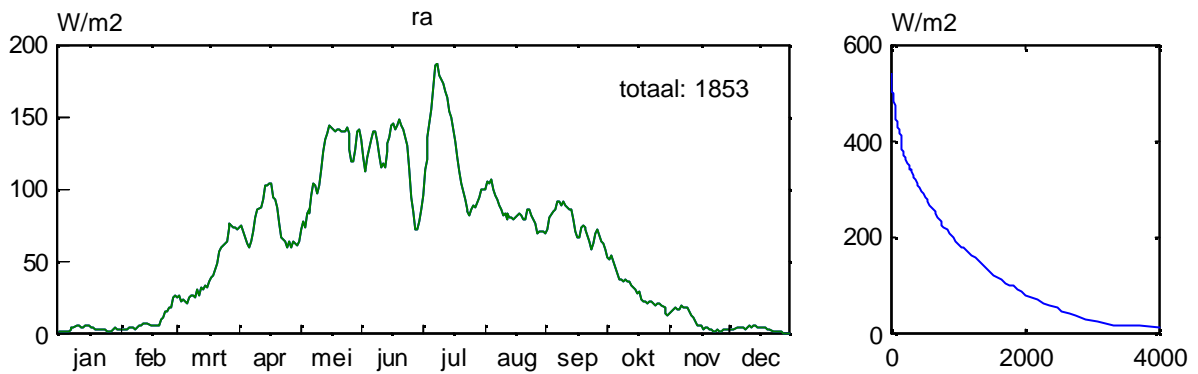
Figuur 1-1 Warmte-overschot van een tomatengewas in een moderne standaardkas als daggemiddelde waarden en als jaarbelastingduurkromme



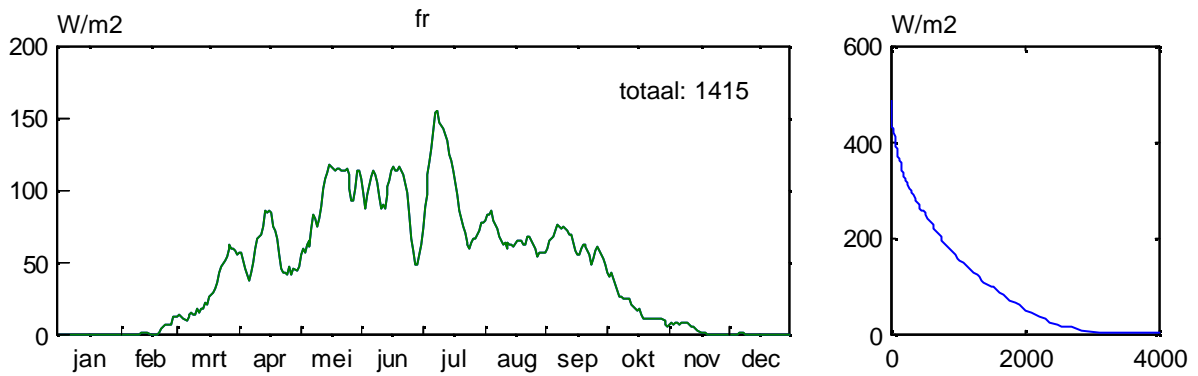
Figuur 1-2 Warmte-overschot van een onbelicht rozengewas in een moderne standaardkas als daggemiddelde waarden en als jaarbelastingduurkromme.



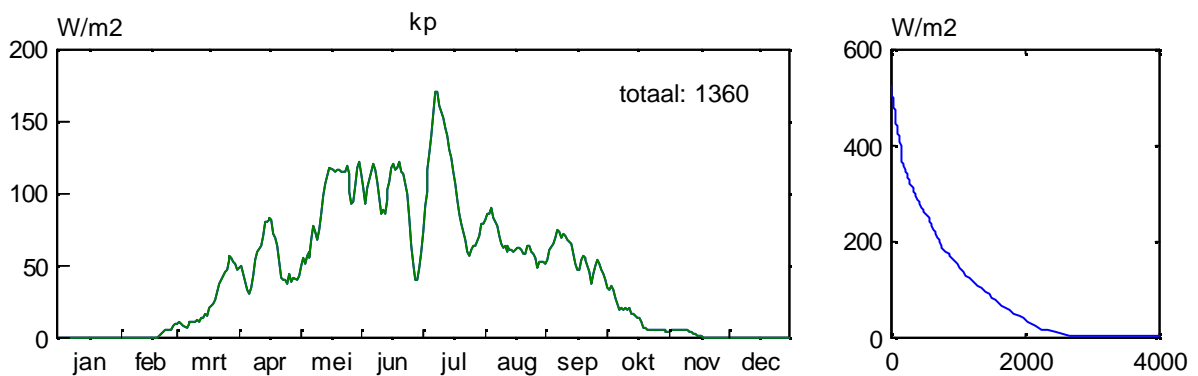
Figuur 1-3 Warmte-overschot van een warme potplantenteelt in een moderne standaardkas als daggemiddelde waarden en als jaarbelastingduurkromme.



Figuur 1-4 Warmte-overschot van een radizenteelt in een moderne standaardkas als daggemiddelde waarden en als jaarbelastingduurkromme.



Figuur 1-5 Warmte-overschot van een fresiateelt in een moderne standaardkas als daggemiddelde waarden en als jaarbelastingduurkromme.



Figuur 1-6 Warmte-overschot van een koude potplantenteelt in een moderne standaardkas als daggemiddelde waarden en als jaarbelastingduurkromme.

De figuren laten zien dat kassen een hoeveelheid zonne-energie afvoeren die overeenkomt met 30 (warme potplant) tot 60 m³ aardgas per m² per jaar¹ (radijs). Voor de duidelijkheid zij vermeld dat het hier gaat om de warmte-afvoer op momenten dat de ramen niet voor vocht-afvoer open staan. De totale warmte-afvoer door de ramen, dus de afvoer tijdens ontvochtiging en via lekventilatie is nog groter.

Uiteraard is het warmteoverschot zeer ongelijk verdeeld over het jaar, maar het is duidelijk dat het globale patroon voor de zes gewassen nauwelijks verschilt.

¹ Uitgaande van de onderste verbrandingswaarde van aardgas, zijnde 31 MJ/m³ (afgerond)

2 Energiebesparing en verwarming met een warmtepomp

2.1 Inleiding

Het verwarmen van een kas met een warmtepomp levert energiebesparing omdat de warmteproductie van een warmtepomp slechts ten dele afkomstig is van de primaire energie die aan de installatie wordt toegevoegd. Het andere deel is afkomstig uit een laagwaardige warmtebron. Indien de warmte die aan de laagwaardige bron wordt onttrokken niet met fossiele energie is gegenereerd dan kan het gebruik van de warmtepomp dus fossiele energie besparen.

De verhouding tussen de warmte die aan de uitgang van de warmtepomp wordt verkregen en de primaire energie die aan de ingang wordt toegevoerd heet de COP (Coefficient of Performance). In § 2.2 wordt nader ingegaan op de COP en wordt aangegeven hoe deze afhangt van verschillende factoren.

In § 2.3 wordt voor de 6 in dit gebruikte gewassen nagegaan hoeveel laagwaardige warmte door de drie verschillende typen warmtepompen aan de aquifer wordt onttrokken als functie van het geïnstalleerd warmtepomp vermogen.

In § 2.4 wordt tenslotte uitgerekend welke energiebesparing bij deze warmtepomp capaciteiten wordt gerealiseerd.

2.2 De COP van warmtepompen

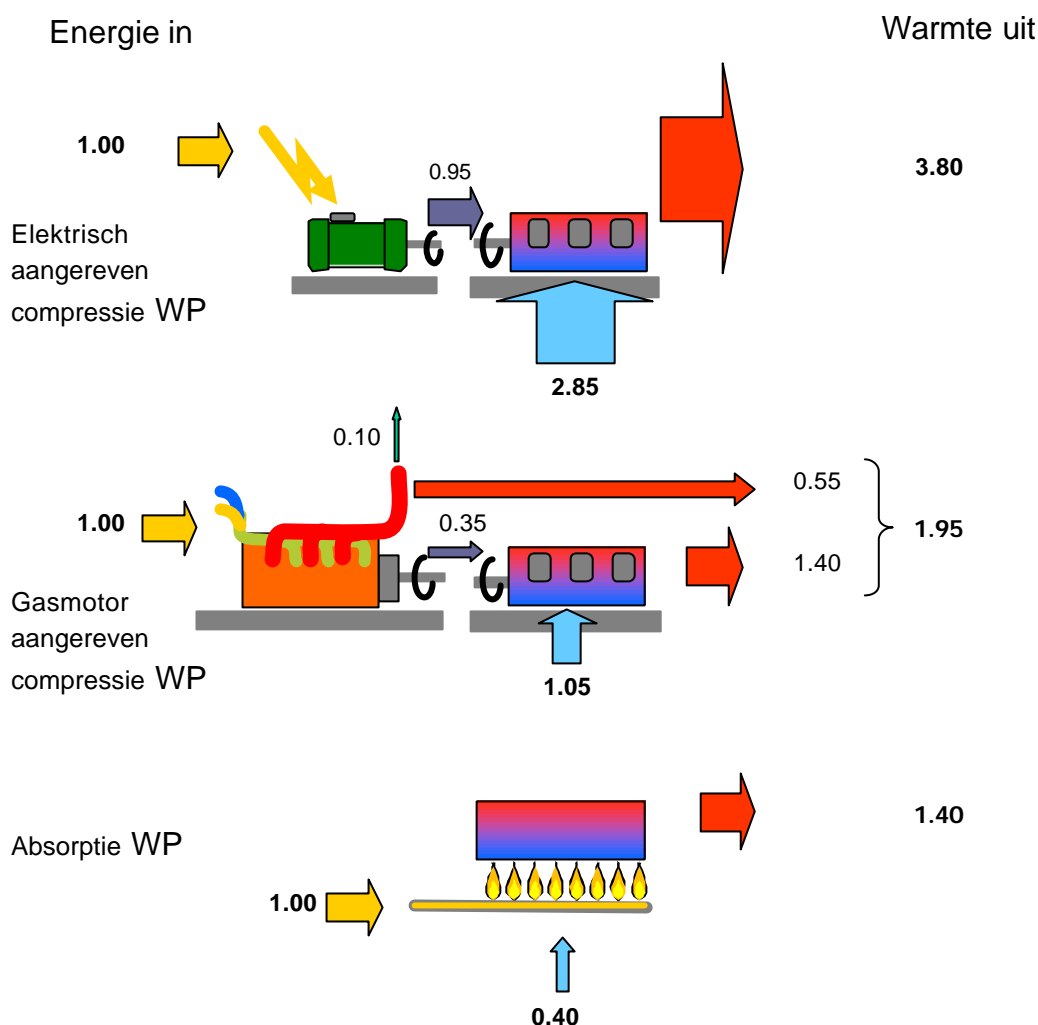
De COP van een warmtepomp wordt in hoge mate bepaald door het type warmtepomp. Veel gebruikte getallen voor warmtepompen die voor tuinbouwverwarming zouden kunnen worden ingezet zijn een COP van 4 voor compressiewarmtepompen en een COP rond de 1.4 voor absorptiewarmtepompen. Aangezien de verhouding van de warmte die aan de warme kant van een warmtepomp beschikbaar komt en de warmte die aan de laagwaardige bron wordt onttrokken wordt weergegeven door de formule $(COP-1)/COP$ volgt hieruit dat bij een compressiewarmtepomp 75% van de afgegeven warmte aan de aquifer wordt onttrokken en bij een absorptiewarmtepomp slechts 28%.

Bij de compressie-warmtepompen moet ook nog een onderscheid gemaakt worden tussen een elektrisch aangedreven en een gasmotor aangedreven variant. Dit wordt duidelijk gemaakt aan de hand van figuur 2.1. Deze figuur laat zien dat bij de elektrisch aangedreven warmtepomp verreweg de grootste hoeveelheid warmte die in de kas wordt afgegeven (2.85 van de 3.8) uit de laagwaardige warmtebron afkomstig is (de eerder genoemde 75%). Bij de gasmotor aangedreven installatie is deze verhouding onverminderd van toepassing op het deel van de warmte die door de warmtepomp wordt geleverd, maar komt behalve deze warmte ook warmte vanuit het motorkoelwater en de rookgassen van de gasmotor waarmee de warmtepomp wordt aangedreven beschikbaar. Omdat deze warmte niet los gezien kan worden van de warmte die uit de warmtepomp komt kan worden gezegd dat de gasmotor aangedreven warmtepomp per eenheid geleverde warmte slechts 53% uit de laagwaardige warmtebron onttrekt.

Bij het hoge aandeel laagwaardige warmte die een elektrisch aangedreven warmtepomp in de warmte-output levert moet echter nog worden opgemerkt dat in geval de elektriciteit elders met fossiele energie wordt opgewekt, de hoge efficiëntie van de warmtepomp weer in belangrijke mate wordt teniet gedaan door omzettingsverliezen bij de elektriciteitsproductie. Uitgaande van een elektrisch

rendement van 0.5 (wat voor de nabije toekomst mogelijk wordt geacht) zijn er voor de productie van 1 eenheid elektriciteit 2 eenheden primaire energie nodig. De warmteproductie van 3.8 in de rechterkolom van figuur 2.1 vraagt dus feitelijk 2 eenheden primaire energie. Daarmee komt de warmteproductie per eenheid primair energieverbruik (de PER, Primary Energy Ratio, wat gezien kan worden als een effectieve COP) voor de elektrisch aangedreven warmtepomp op 1.9, wat iets lager is dan voor de gasmotor aangedreven compressiewarmtepomp.

Bij een absorptiewarmtepomp komt minder dan een derde van de afgegeven warmte uit de laagwaardige warmtebron.

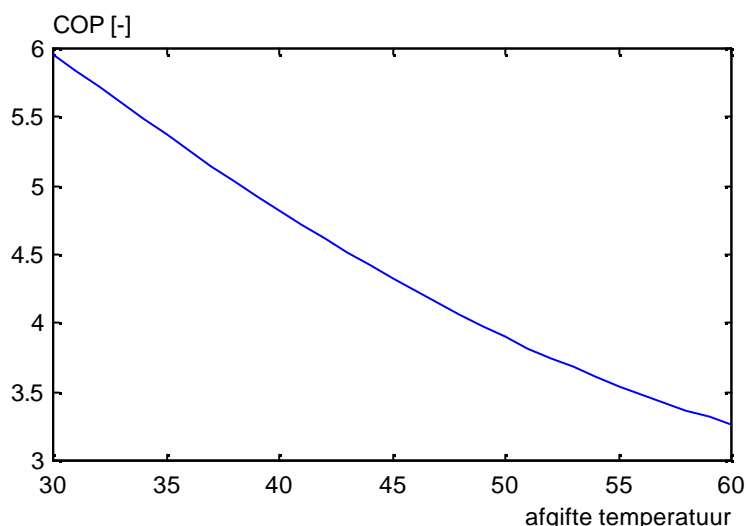


Figuur 2-1 Schematische weergave van conversie van primaire (aandrijf) energie naar warmte bij de drie typen warmtepompen.

Waar in figuur 2-1 vanwege het illustratief karakter gebruik is gemaakt van een vaste COP zal in de tuinbouwpraktijk de COP variëren met de warmtevraag van de kas. Dit komt omdat de COP afhangt van de temperatuur waarop de warmtepomp zijn warmte afgeeft.

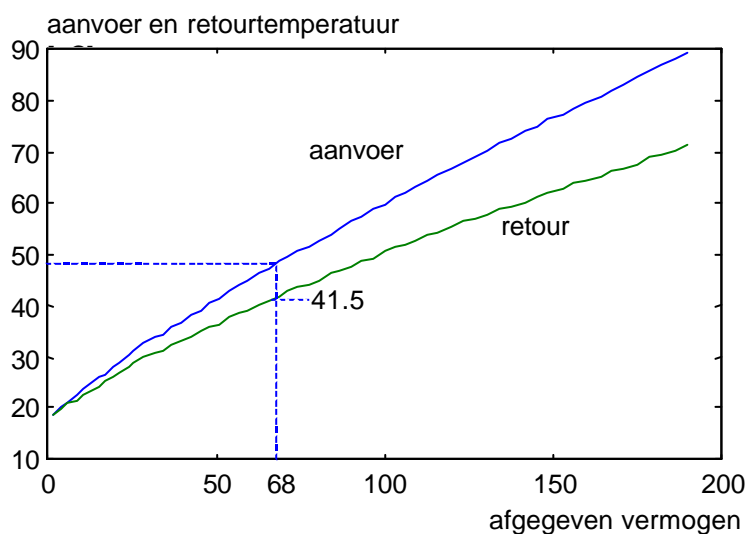
In het kader van dit project heeft TNO-MEP aan de hand van een uitgebreid model van een 6-cilinder compressie-warmtepomp, een relatie gelegd tussen deze afgifte temperatuur en de COP. De door TNO opgestelde notitie is als bijlage I aan dit rapport toegevoegd.

In de berekeningen van TNO is uitgegaan van een installatie die het water dat aan de koude zijde van de machine wordt uitgeoeld naar een temperatuur van 7 á 8 °C kan worden teruggekoeld. Het TNO-model resulteerde in een relatie tussen COP en afgiftetemperatuur zoals in figuur 2-2 is weergegeven. In deze figuur is er rekening mee gehouden dat de watertemperatuur aan de uitgang van de condensor ongeveer 3 °C lager zal zijn dan de temperatuur van de condensor. De condensor is immers een warmtewisselaar waarin, zodra er enig vermogen aan wordt onttrokken altijd een zeker temperatuurverlies optreedt.



Figuur 2-2 Relatie tussen COP en temperatuur waarop de warmte wordt afgegeven op het verwarmingsnet.

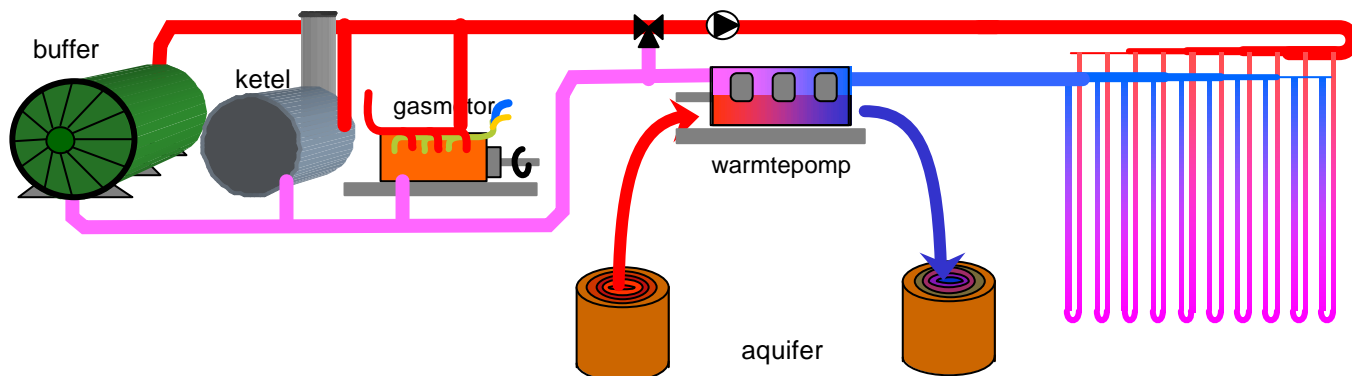
Nu is in een tuinbouwkas de retour-temperatuur van het verwarmingsnet in belangrijke mate een functie van het afgegeven vermogen. Dit wordt geïllustreerd in figuur 2-3 waar, uitgaande van de gebruikelijke 51 mm buizen en het gebruikelijke circulatiedebiet van 90 m³/(ha uur) is weergegeven hoe de aanvoer en retourtemperatuur afhangt van het afgegeven vermogen van het verwarmingsnet.



Figuur 2-3 Aanvoer- en retourtemperatuur van een 51 mm buisverwarmingsnet in een typische tuinbouw kas-setting als functie van het afgegeven vermogen.

Bij het opstellen figuur 2-3 is uitgegaan van een kaslucht temperatuur van 18 °C.

Om op een verwarmingsnet een warmtepomp aan te sluiten kan gedacht worden aan de in figuur 2-4 geschetste situatie.



Figuur 2-4 Inpassing van een warmtepomp op het verwarmingssysteem van een tuinbouwkas

Door de warmtepomp op bovengetoonde wijze in te passen, waarbij de machine is aangesloten op de retour van het hoofdverwarmingsnet, wordt er voor gezorgd dat de warmtepomp vermogen afgeeft op het koudste water dat in de kas voor verwarmingsdoeleinden wordt gebruikt¹.

In figuur 2-3 is middels een stippellijn aangegeven wat het afgegeven vermogen van het verwarmingsnet is als de aanvoertemperatuur 48 °C is, namelijk 68 W/m². Met de constatering van figuur 2-2 dat een compressiewarmtepomp bij een afgifte temperatuur van 48 °C functioneert met een COP=4 kan worden geconcludeerd dat een warmtepomp met een asvermogen van $68/4 = 17$ W/m² tot een gevraagde aanvoertemperatuur van 48 °C de warmtevraag voor 100% kan dekken. De warmtepomp warmt het uit de kas terugkomende water in dat geval 6.5 °C op van 41.5 °C (zie figuur 2-3) op naar de gevraagde 48 °C.

Wat gebeurt er nu wanneer het verwarmingssysteem meer vermogen moet afgeven en de kasklimaatregelaar het aanvoertemperatuur-setpoint op bijvoorbeeld 60 °C zet?

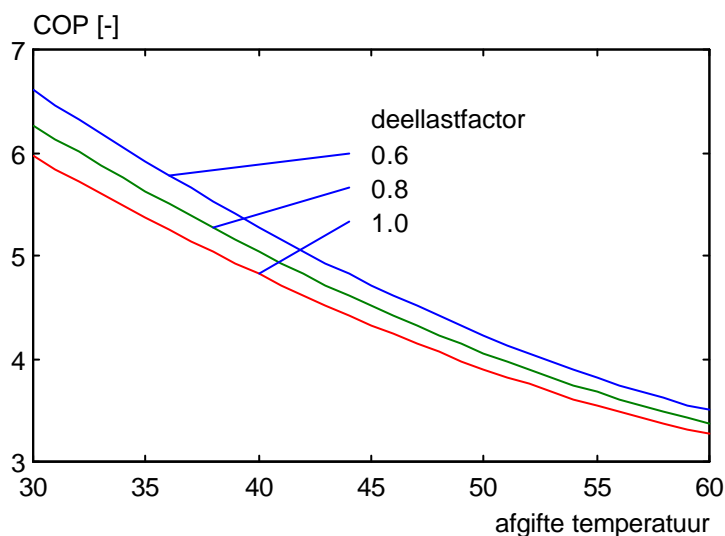
Het zal duidelijk zijn dat de warmtepomp met een asvermogen van 17 W/m² het bij een aanvoertemperatuur van 60 °C behorende vermogen van ongeveer 100 W/m² niet kan leveren. De warmtepomp kan in dit geval zelfs niet de eerder geleverd 68 W/m² leveren omdat bij een aanvoertemperatuur van 60 °C een retourtemperatuur van 50.3 °C hoort. Gaan we dan uit van dezelfde opwarming die de warmtepomp leverde bij de retourtemperatuur van 41.5 °C dan zou de warmtepomp het water op $50.3 + 6.5 = 56.8$ °C kunnen brengen. Figuur 2-2 laat echter zien dat bij een uitgaande temperatuur van 56.8 °C de COP geen 4 meer is, maar gedaald is naar 3.4. Hieruit volgt dat de warmtepomp geen $17 \cdot 4 = 68$ W/m², maar slechts $17 \cdot 3.4 = 57.8$ W/m² kan leveren. Dit betekent weer dat het retourwater niet met 6.5 °C wordt opgewarmd maar met $6.5/68 \cdot 57.8 = 5.5$ °C.

De bovenbeschreven exercitie duidt op het begin van een iteratief proces waarin de temperatuurverhoging die de warmtepomp levert in overeenstemming wordt gebracht met vermogen dat de

¹ Er zijn natuurlijk ook andere netten, bijvoorbeeld een condensornet, wat op het eerste gezicht een kouder net lijkt te zijn. Omdat deze netten echter een geringe warmte-afgifte capaciteit hebben wordt dit net al gauw heter dan het hoofdverwarmingsnet op het moment dat hier een serieuze hoeveelheid warmte op wordt afgezet.

warmtepomp bij een bepaalde uitgaande temperatuur kan leveren. Dit vermogen neemt vanwege de dalende COP af met het stijgen van de retourtemperatuur.

Behalve situaties waarin de warmtepomp minder dan het gevraagde vermogen kan leveren zullen er ook situaties zijn waarin de warmtepomp meer dan het gevraagde vermogen kan leveren. In die gevallen zal de warmtepomp moeten worden teruggeregeld. Omdat de fysische overdrachtsprocessen die in de warmtepomp plaatsvinden in het algemeen met hogere efficiënties zullen verlopen naarmate de belasting afneemt zal bij lagere belasting de COP niet alleen toenemen door een afnemende afgifte temperatuur, maar ook nog eens extra toenemen door een afnemende belasting. Dit is weergegeven in figuur 2-5.



Figuur 2-5 Relatie tussen COP en temperatuur waarop de warmte wordt afgegeven op het verwarmingsnet bij verschillende deellast-factoren van een compressie warmtepomp.

De onderste lijn in figuur 2-5 komt overeen met de lijn in figuur 2-2. Opvallend is dat het effect van de deellastfactor¹ op de COP toeneemt naarmate de afgifte temperatuur lager wordt. De trend die figuur 2-5 te zien geeft zet zich voort als de deellastfactor verder afneemt. Bij een deellastfactor van 0.1 (dus wanneer de warmtepomp slechts 10% van het maximale asvermogen opneemt is de COP bij een afgifte temperatuur van 30 °C opgelopen naar 9. Bij een afgifte temperatuur van 60 °C zou de COP in de buurt van 4 uitkomen. Deze laatste situatie (dus een deellastfactor 0.1 en een afgifte temperatuur van 60 °C) zal zich in de praktijk echter nooit voordoen omdat in een kas-situatie bij hoge temperaturen ook een groot vermogen hoort en dus de deellast factor op die momenten hoog zal zijn.

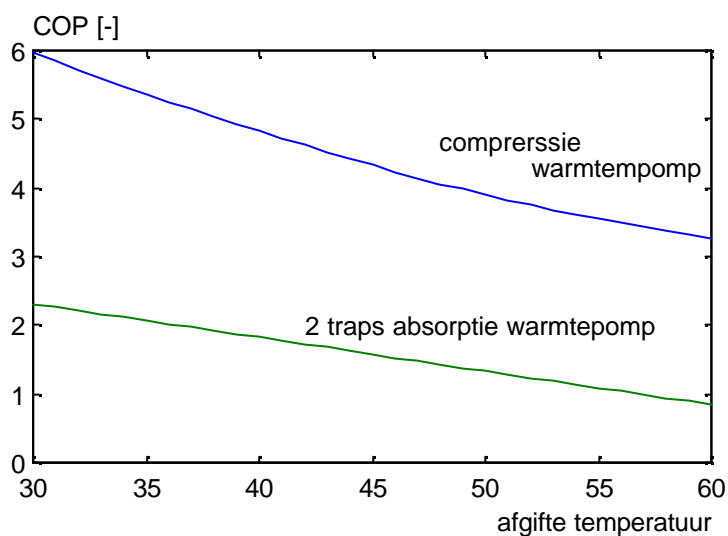
De consequentie van het effect van de deellastfactor op de COP is dat in de iteratieve procedure die bij vermogensvragen die kleiner dan het maximale vermogen van de warmtepomp, dus wanneer in het bovenbeschreven voorbeeld de temperatuur in het verwarmingsnet bijvoorbeeld naar 40 °C wordt gebracht, de iteratieve procedure naast het effect van de afgifte-temperatuur op de COP ook het effect van de deellast-factor mee moet nemen. Verder verloopt de iteratie volgens hetzelfde stramien.

In de simulatieberekeningen wordt één van de bovenbeschreven iteraties (afhankelijk van de vraag of de vermogensvraag groter of kleiner is dan het vermogen dat de warmtepomp kan leveren) van minuut tot minuut doorlopen teneinde steeds met een realistische COP te werken. Voor de duidelijkheid zij nog vermeld dat de bovenbeschreven iteratieprocessen alleen hoeven te worden doorlopen omdat er

¹ De deellastfactor is de mate waarin de warmtepomp moet worden teruggeregeld ten opzichte van zijn maximale vermogen om in het actuele (kleinere) vermogen te voorzien.

gebruik wordt gemaakt van een simulatiemodel. In een praktische regeling zal het beschreven gedrag een intrinsiek gevolg zijn van de fysische processen in de warmtepomp en kan de besturing gestalte krijgen van een volgorde-besturing (eerst het verwarmingsvermogen met de warmtepomp regelen en bij ontoereikend vermogen warm water bijmengen met de mengklep).

Voor de COP van de absorptiewarmtepomp wordt gebruik gemaakt van de in het project “Warmtepomp in combinatie met vloerverwarming “ gehanteerde karakteristiek van een 2 traps machine. Deze karakteristiek is opgesteld door Gastec en heeft geen deellast afhankelijkheid. De karakteristiek voor deze warmtepomp wordt afgebeeld in figuur 2-6. Ter vergelijking is ook de curve voor de compressie warmtepomp bij een deellastfactor 1 in de grafiek geplaatst.



Figuur 2-6 Relatie tussen COP en temperatuur waarop de warmte wordt afgegeven op het verwarmingsnet bij een 2 traps absorptie warmtepomp en een compressie warmtepomp in vollast-bedrijf..

Figuur 2-6 laat zien dat de in figuur 2-1 gebruikte waarden van 4 en 1.4 goede gemiddelden zijn voor de COP van een compressie en absorptie-warmtepomp.

Het is goed om op te merken dat boven een afgifte temperatuur van 55 °C de gebruikte karakteristiek onder de COP=1 uitkomt. Dit geeft aan dat de relatie vanaf deze temperaturen niet meer geldig is. Het geeft echter ook aan dat de energieconversie-winst (alles boven de COP=1) bij absorptiewarmtepompen al bij nog niet eens zulke hoge afgifte-temperaturen verdwenen is. Voor absorptiewarmtepompen is het gebruik van verwarmingssystemen waarin met een lage temperatuur kan worden gewerkt van nog groter belang dan bij systemen met een compressie warmtepomp.

2.3 Aquiferbelasting bij verschillende warmtepompen

Wanneer een warmtepomp gebruikt wordt om in (een deel van) de kasverwarming te voorzien wordt in de winter water vanuit de warme put opgepompt, uitgeoeld en vervolgens in de koude put teruggeperst.

Met de gegevens die in figuur 2-1 zijn weergegeven is al duidelijk dat de hoeveelheid warmte die onttrokken zal worden sterk afhangt van het type warmtepomp. Wanneer, om de gedachten te bepalen, uitgegaan wordt van een 100% dekking van de warmtevraag door een warmtepomp en voor de COP's de vaste waarden die in figuur 2-1 zijn genoemd worden gebruikt kan voor de zes gewassen de onderstaande tabel met aquifer-belastingen worden opgesteld.

Als warmtevraag zijn de in het rapport standaardteelten genoemde gegevens gebruikt. Dit zijn warmtevraag patronen voor een klimaatregeling die zuiniger omgaat met energie dan in de heden ten dage gebruikelijke klimaatregeling. Zo wordt er gebruik gemaakt van temperatuur-integratie en een energiescherm in de tomatenteelt.

Tabel 2-1 Warmte-onttrekking in MJ/(m² jr) vanuit een aquifer voor 6 teelten indien de kas geheel zouden worden verwarmd met behulp van een warmtepomp voor drie verschillende typen warmtepompen en bij (vaste) COP's zoals weergegeven in figuur 2-1.

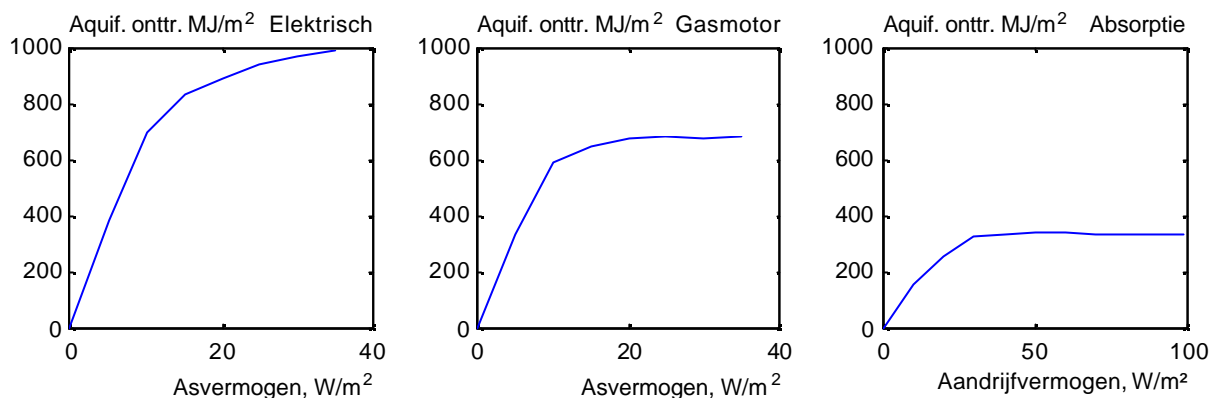
Gewas	Warmtevraag van het gewas	Warmtevraag vanuit de aquifer bij 100% dekking van een		
		Elektrische WP	Gasmotor WP	Absorptie WP
Tomaat	1365	1025	735	390
Roos (zonder belicht.)	925	695	500	265
Warme potplant	1335	1000	720	380
Radijs	240	180	130	70
Fresia	740	555	395	210
Koude potplant	585	435	315	165

De tabel laat dezelfde verhoudingen tussen warmte-onttrekking vanuit de laagwaardige warmtebron en de afgegeven warmte zien die ook in figuur 2-1 getoond is.

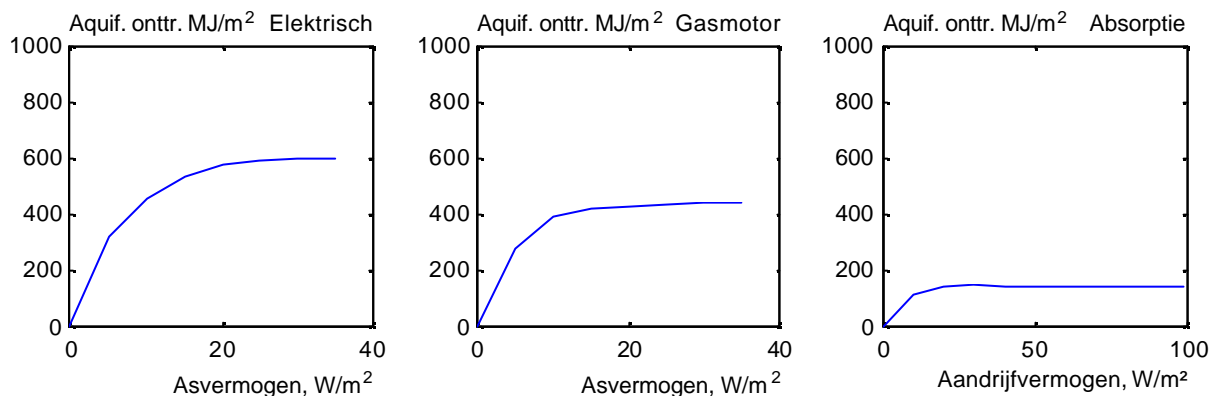
Bij vergelijking van de gegevens in tabel 2.1 met de warmte-overschotten die in figuur 1.1 t/m 1.6 zijn getoond kan worden geconcludeerd dat voor alle gewassen het zomerse warmte-overschot in principe altijd genoeg is om de aquifer te regenereren.

In praktische situaties, waarin met name bij hogere buistemperaturen de COP van de compressiewarmtepompen gaat afnemen (en dus de aquiferbelasting per eenheid geleverde warmte afneemt), en waarbij de warmtepompen niet op een 100% dekkinggraad zullen zijn uitgelegd zal de aquiferbelasting afnemen en het warmteoverschot dus in nog ruimere mate voldoende zijn.

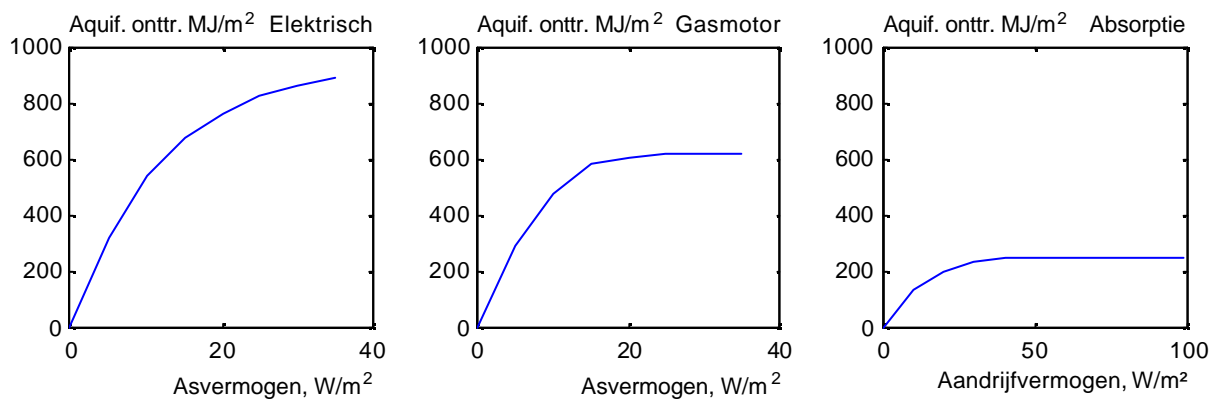
Om het effect van deze beide factoren op de aquiferbelasting te bepalen is in de figuren 2-6 t/m 2-11 voor alle 6 de gewassen en voor alle drie de warmtepompen getoond hoe groot de aquiferbelasting is in afhankelijkheid van het warmtepomp vermogen. In tegenstelling tot de getallen in tabel 2.1 is bij de berekening van de informatie in deze figuren niet uitgegaan van een vaste COP, maar van variabele COP, zoals berekend volgens § 2.2



Figuur 2-7 Aquiferbelasting bij toepassing van een warmtepomp in de tomatenteelt als functie van het aandrijfvermogen van de warmtepomp voor verschillende warmtepomp types

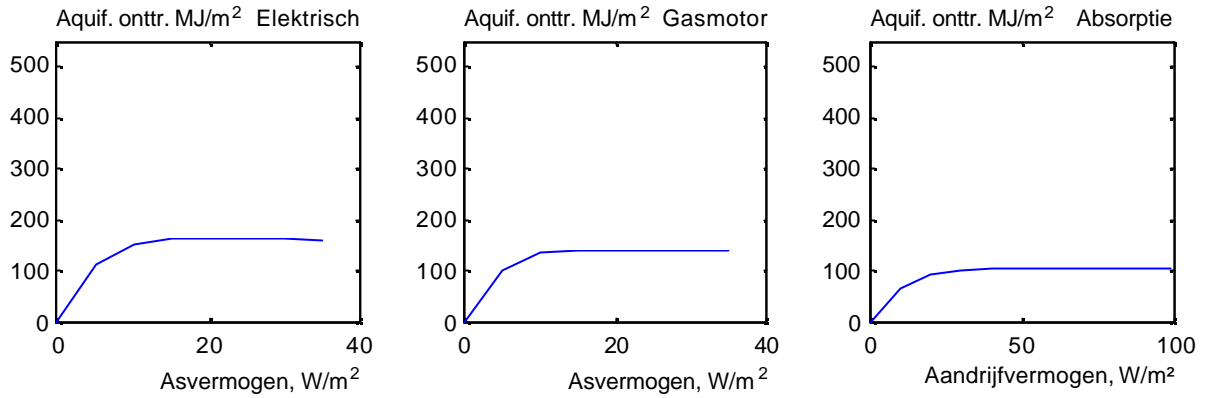


Figuur 2-8 Aquiferbelasting bij toepassing van een warmtepomp in de rozenteelt als functie van het aandrijfvermogen van de warmtepomp voor verschillende warmtepomp types

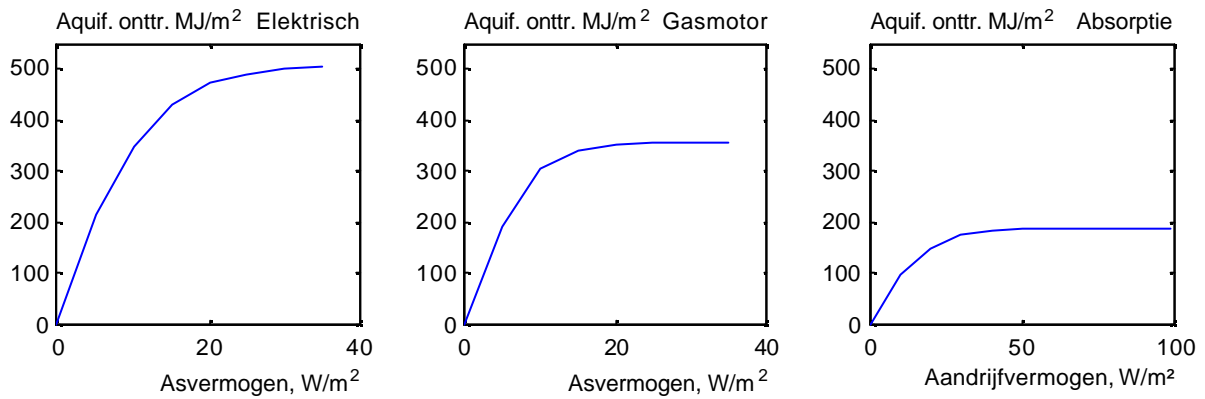


Figuur 2-9 Aquiferbelasting bij toepassing van een warmtepomp in de warme potplantenteelt als functie van het aandrijfvermogen van de warmtepomp voor verschillende warmtepomp types

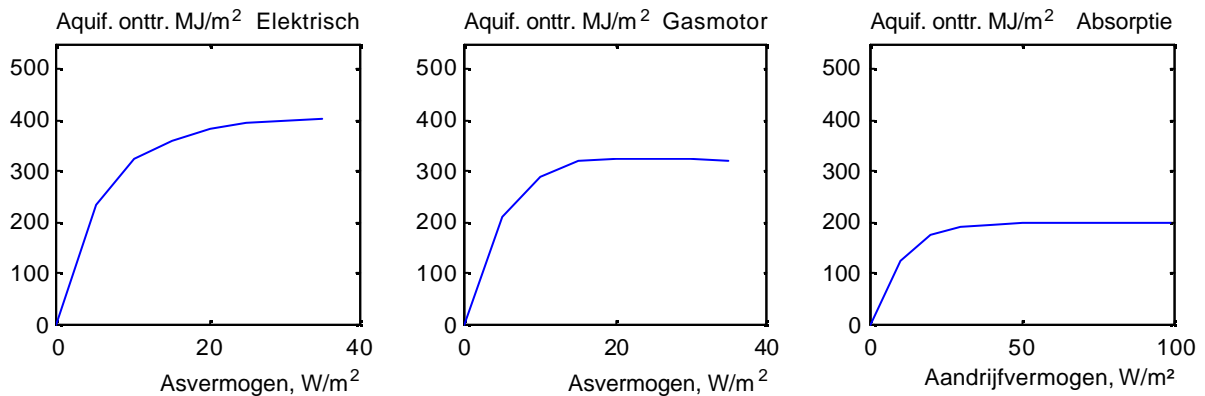
Voor de tweede serie grafieken, geldend voor de energie-extensieve gewassen is de schaalverdeling op de y-as gehalveerd ten opzichte van de vorige serie grafieken.



Figuur 2-10 Aquiferbelasting bij toepassing van een warmtepomp in de radijzenteelt als functie van het aandrijfvermogen van de warmtepomp voor verschillende warmtepomp types



Figuur 2-11 Aquiferbelasting bij toepassing van een warmtepomp in de fresiateelt als functie van het aandrijfvermogen van de warmtepomp voor verschillende warmtepomp types



Figuur 2-12 Aquiferbelasting bij toepassing van een warmtepomp in de koude potplanten als functie van het aandrijfvermogen van de warmtepomp voor verschillende warmtepomp types

Vrijwel alle curven in de getoonde figuren vertonen een maximum. Dit komt omdat enerzijds de dekkingsgraad van warmtepompen in de kasverwarming niet evenredig toeneemt met het geïnstalleerd vermogen en anderzijds omdat een hoger afgeleverd vermogen samengaat met een hogere gemiddelde temperatuur, en dus met een lagere COP. Een lagere COP leidt ertoe dat de warmte-afgifte van een warmtepomp relatief sterk wordt ingevuld door de primaire energie-input en minder vanuit de aquifer. Een toename van de hoeveelheid primaire energie waarmee de warmtomp wordt aangedreven leidt dan tot een minder dan evenredige toename van de aquiferbelasting.

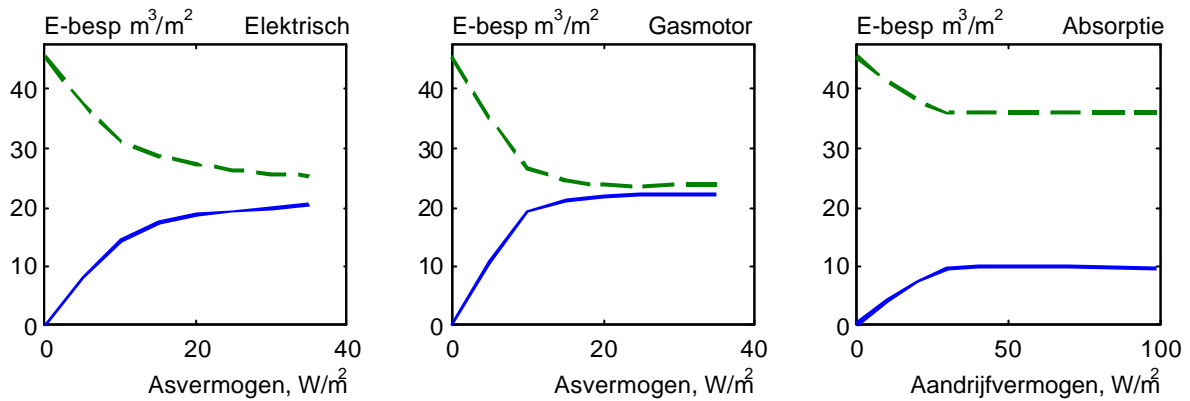
In alle grafieken is de aquiferbelasting bij de elektrisch aangedreven compressie-warmtepompen het hoogst. Dit kan gemakkelijk worden begrepen uit de getallen in figuur 2.1, waar wordt getoond dat een elektrische warmtepomp relatief veel warmte uit de laagwaardige bron betreft per eenheid afgegeven warmte.

De gasmotor warmtepomp komt overal op de tweede plaats. Opvallend is het feit dat de toename van de aquifer belasting bij een gasmotor aangedreven warmtepomp sneller afvlakt dan bij de elektrisch aangedreven machine het geval is. Dit komt omdat de gasmotor aangedreven warmtepomp een belangrijk deel van de warmte op hoge temperatuur afgeeft (het motorkoelwater). Deze warmte-afgifte is niet afhankelijk van de retourtemperatuur, wat de COP dus minder gevoelig maakt voor de retourtemperatuur.

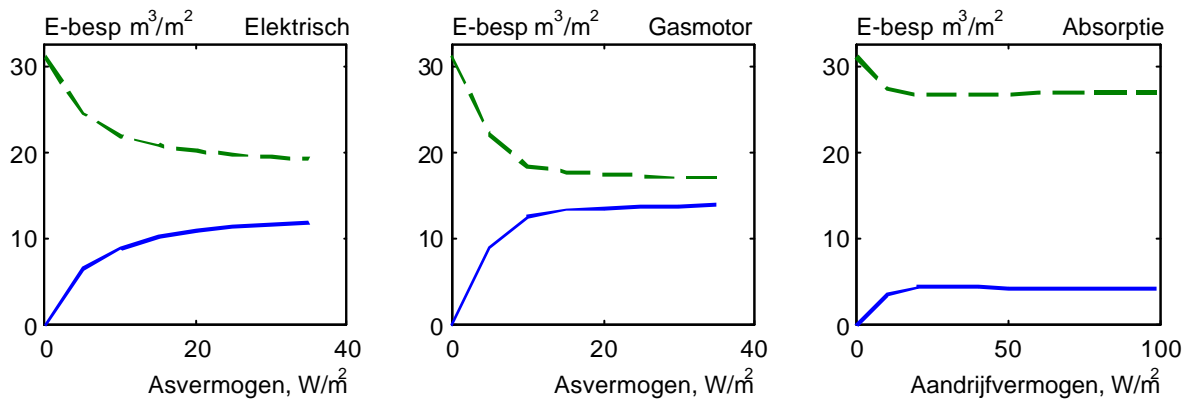
Naast de aquiferbelasting kan voor alle situaties waarvoor de performance van een warmtepomp berekend is ook het primaire energieverbruik worden uitgerekend. Dit kan vervolgens worden vergeleken met het primaire energieverbruik voor het geval de tuinbouwbedrijven hun warmtebehoefte uitsluitend middels een verwarmingsketel zouden invullen. De afname van het primair energieverbruik en de daaruit berekende besparing is weergegeven in figuur 2-12 t/m 2-17.

Voor de elektrisch aangedreven warmtepompen is er hierbij vanuit gegaan dat voor de productie van 1 eenheid elektriciteit 2 eenheden primaire energie nodig zijn. Dit betekent dus dat er met een (optimistisch gesteld) centrale rendement van 50% is gerekend.

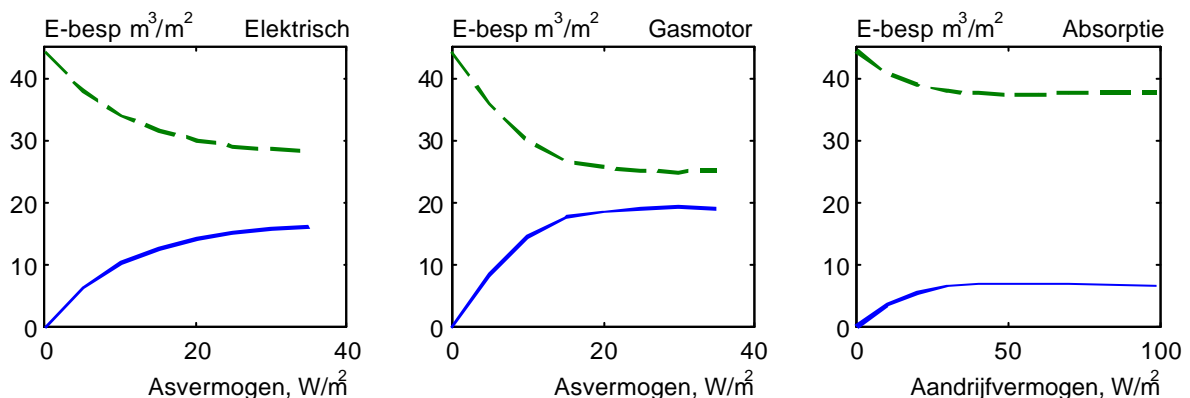
In de meeste grafieken zal opvallen dat het referentieverbruik (het verbruik bij een WP-vermogen 0) lager is dan in de huidige tuinbouw gehanteerd wordt. Dit heeft te maken met de zuinige kasklimaatinstellingen die in de berekeningen zijn gehanteerd. Zo wordt in alle intensieve teelten gebruik gemaakt van energieschermen, wordt er overal gebruik gemaakt van temperatuur-integratie met een bandbreedte van 2 °C (dus een toegestane afwijking 2 °C boven en 2 °C onder het setpoint) en wordt zeer terughoudend omgegaan met minimum buis.



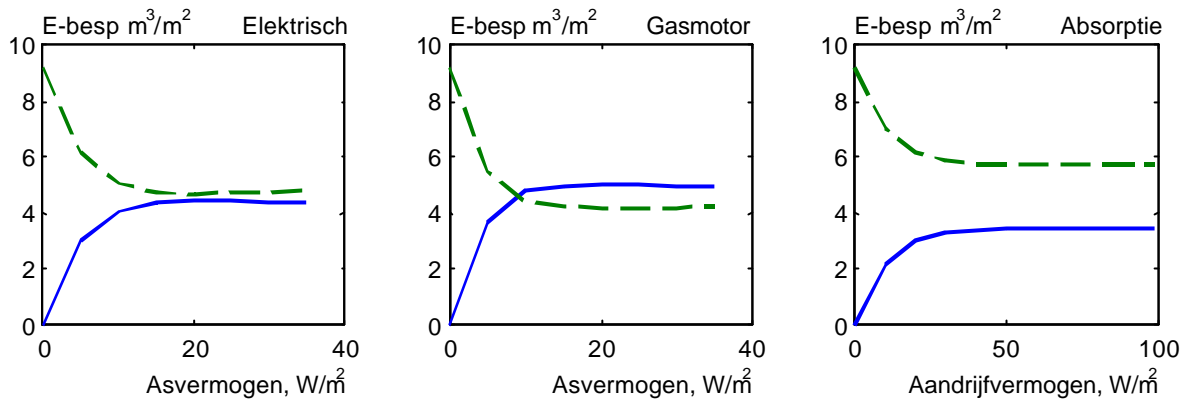
Figuur 2-13 Primair energieverbruik (gestreept) en -besparing (getrokken) bij toepassing van een warmtepomp in de tomatenteelt als functie van het as- of aandrijfvermogen van de warmtepomp voor verschillende warmtepomp types



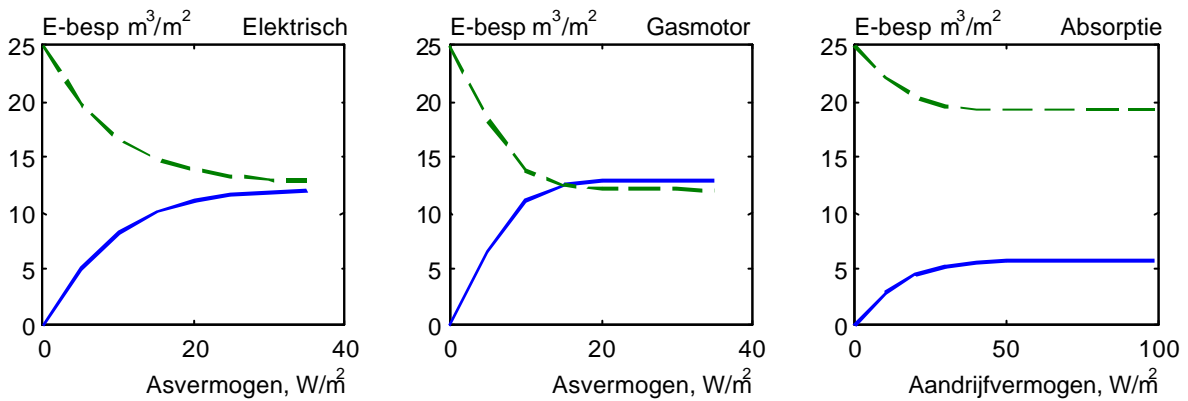
Figuur 2-14 Primair energieverbruik (gestreept) en -besparing (getrokken) bij toepassing van een warmtepomp in de rozenteelt als functie van het as- of aandrijfvermogen van de warmtepomp voor verschillende warmtepomp types



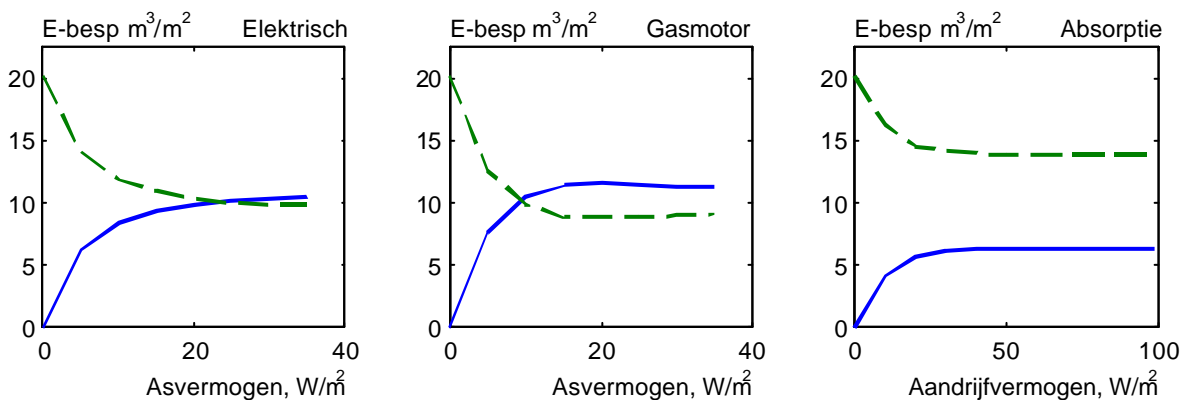
Figuur 2-15 Primair energieverbruik (gestreept) en -besparing (getrokken) bij toepassing van een warmtepomp in de warme potplantenteelt als functie van het as- of aandrijfvermogen van de warmtepomp voor verschillende warmtepomp types



Figuur 2-16 Primair energieverbruik (gestreept) en -besparing (getrokken) bij toepassing van een warmtepomp in de radizenteelt als functie van het as- of aandrijfvermogen van de warmtepomp voor verschillende warmtepomp types



Figuur 2-17 Primair energieverbruik (gestreept) en -besparing (getrokken) bij toepassing van een warmtepomp in de fresaiteelt als functie van het as- of aandrijfvermogen van de warmtepomp voor verschillende warmtepomp types



Figuur 2-18 Primair energieverbruik (gestreept) en -besparing (getrokken) bij toepassing van een warmtepomp in de koude potplantenteelt als functie van het as- of aandrijfvermogen van de warmtepomp voor verschillende warmtepomp types

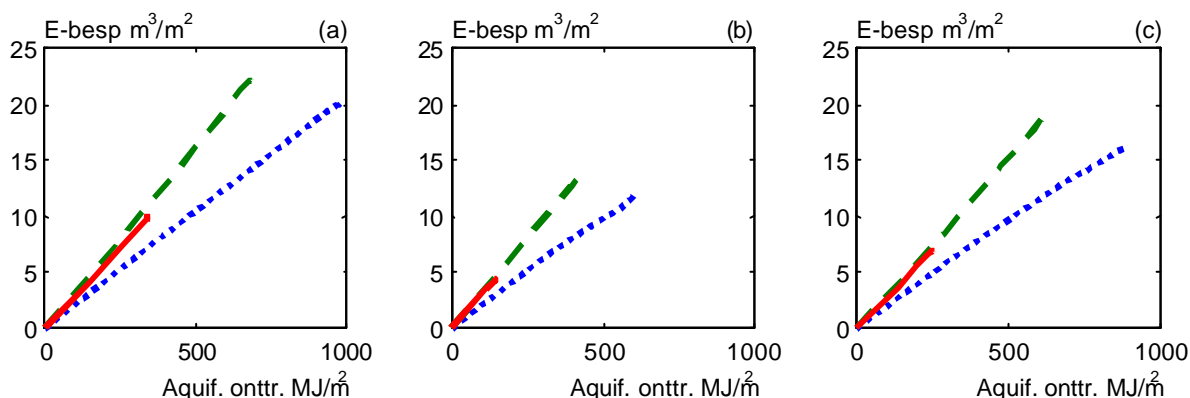
De figuren laten zien dat de beide compressiewarmtepompen tot ongeveer gelijke energiebesparingsniveau's komen. Dit mag ook verwacht worden op grond van de discussie rond de Primary Energy Ratio aan de hand van de figuur 2-1. De energiebesparing met de absorptiewarmtepomp is ruim twee keer zo klein, wat eveneens niet verbazend is in het licht van discussie rond figuur 2-1. Immers, bij die voorbeelden werd bij de compressiewarmtepompen 2 eenheden warmte per eenheid primaire energie gevormd en bij de absorptiewarmtepomp[slechts 1.40 .

Het is eveneens opvallend dat de gasmotor aangedreven warmtepomp in de regel al bij kleinere asvermogens op het maximale besparingsniveau komt. Dit komt omdat bij een bepaald asvermogen naast de warmtepomp ook de gasmotor warmte levert. De absorptiewarmtepomp heeft vanwege zijn relatief kleine COP grote aandrijfvermogens nodig.

De maxima die de figuren 2-12 t/m 2-17 ontstaan komen ofwel voort uit de beperkte warmtevraag van de kas, ofwel vanwege de afname van de efficiëntie van de warmtepomp naarmate de meerdere warmteafzet op hoger temperatuurniveau plaats moet vinden.

Dit kan ook worden begrepen uit de jaarbelastingduurkromme, waarbij de vergroting van de dekkingsgraad alleen plaats kan vinden door meer in de piek van de jaarbelastingduurkromme te schuiven. In die piek ligt de warmte-afzet op hoge temperatuur en dus bij lagere COP. Lagere COP's leiden per definitie tot een lagere energiebesparing.

Tegen de achtergrond van de vraagstelling in dit onderzoek is het interessant te bestuderen hoe de relatie ligt tussen warmte-verzameling in de aquifer en het energiebesparingspotentieel. Immers, in een evenwichtssituatie (geen netto energie toevoer of onttrekking uit de aquifer) beperkt de verzameling van zomerse warmte-overschotten het potentieel van de warmtepomp in de winter. Deze relatie kan worden gelegd door de asvermogens uit de vorige twee series grafieken te elimineren. Het resultaat van deze eliminatie is in figuur 2-18 weergegeven voor de drie energie-intensieve gewassen en in figuur 2-19 voor de energie-extensieve gewassen.



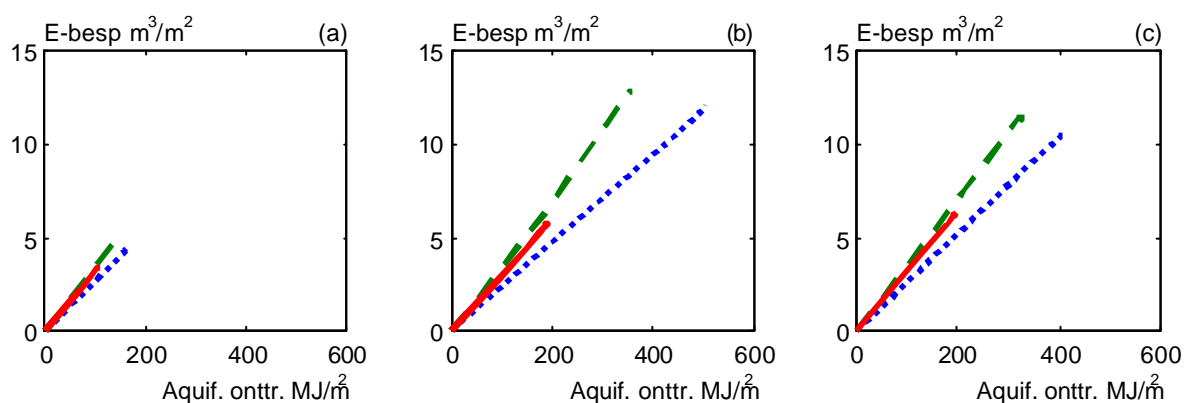
Figuur 2-19 Primaire energiebesparing van warmtepompen in verhouding tot de hoeveelheid warmte die aan de aquifer wordt onttrokken voor de tomatenteelt (a), de onbelichte rozenteelt (b) en de warme potplantenteelt (c). De gestippelde lijn geldt voor de elektrisch aangedreven compressiewarmtepomp, de gestreepte lijn voor de gasmotor aangedreven compressie warmtepomp en de getrokken lijn voor de absorptie warmtepomp.

De grafieken laten duidelijk zien dat de gasmotor aangedreven compressiewarmtepomp en de absorptiewarmtepomp meer energie besparen per eenheid warmte die aan de aquifer wordt

onttrokken dan de elektrisch aangedreven warmtepomp. Dit betekent dat in die situaties waar de hoeveelheid warmte die in de aquifer beschikbaar is de beperkende factor vormt, de elektrisch aangedreven warmtepomp in het nadeel is.

Als vuistregel zou voor de relatie tussen aquifer belasting en energiebesparing kunnen worden gebruikt dat elke GJ die via een elektrisch aangedreven warmtepomp uit een seizoens-opslag systeem voor kasverwarming wordt gebruikt 20 m^3 a.e. aan primaire energie bespaart. Een gasmotor aangedreven compressiewarmtepomp bespaart bijna 32 m^3 a.e per GJ die aan een aquifer wordt onttrokken en een absorptie warmtepomp ongeveer 29 m^3 a.e per GJ.

De grafieken voor de energie-extensieve (figuur 2-19) zijn vergelijkbaar met de grafieken in figuur 2-18. Een belangrijk verschil is dat de maxima lager liggen (omdat de totale warmtevraag kleiner is). Daarnaast blijkt, bij de berekening van de beste fit door de lijnen, dat de relatie tussen aquifer onttrekking en energiebesparing bij de extensieve teelten gemiddeld wat gunstiger ligt. De elektrisch aangedreven compressiewarmtepomp bespaart in de extensieve teelten 26 m^3 a.e. per GJ, de gasmotor warmtepomp 36 m^3 a.e per GJ en de absorptiewarmtepomp 31 m^3 a.e per GJ die aan een aquifer wordt onttrokken. Dit komt doordat bij de koudere teelten de warmtepomp bij een gemiddelde gunstiger COP kan werken.



Figuur 2-20 Primaire energiebesparing van warmtepompen in verhouding tot de hoeveelheid warmte die aan de aquifer wordt onttrokken voor de radizenteelt (a), de fresiateelt (b) en de koude potplantenteelt (c).

De gestippelde lijn geldt voor de elektrisch aangedreven compressiewarmtepomp, de gestreepte lijn voor de gasmotor aangedreven compressie warmtepomp en de getrokken lijn voor de absorptie warmtepomp.

3 Warmteonttrekkingscapaciteit van collectornetten

3.1 Inleiding

Een kas waarvan de temperatuur boven het ventilatietemperatuur-setpoint uitkomt heeft te maken met een warmte-overschot. Op dat moment kan er warmte aan de kaslucht worden onttrokken. De hoeveelheid warmte die dan kan worden onttrokken hangt af van de warmte-overdrachts capaciteit van het koel-element (het VO) en het temperatuurverschil tussen buis en kaslucht. Bovendien hangt de jaarlijkse hoeveelheid warmte die zo'n koel-element kan verzamelen af van het aantal uren waarop de installatie in werking is.

In dit hoofdstuk worden eerst een aantal mogelijke koel-elementen besproken (§ 3.2). Het gaat in alle situaties om buis-systemen die een collector-net vormen. Dit omdat er vooralsnog wordt uitgegaan van de mogelijkheid om op grond van natuurlijke convectie warmte vanuit de kas te verzamelen, zodat het energiebesparingspotentieel niet nadelig wordt beïnvloed door het parasitair energieverbruik van luchtcirculatieventilatoren.

Vervolgens wordt in § 3.3 en 3.4 ingegaan op het gebruik en de aansturing van deze collectornetten. Hierbij wordt stilgestaan bij het risico van een toename van het gevraagde verwarmingsvermogen wanneer collector netten te lang koud worden gehouden. Ook wordt ingegaan op de regeling van het temperatuurniveau waarmee het water terug wordt gepompt in de warme put van de aquifer.

In § 0 worden de resultaten die met de verschillende netten in de verschillende teelten kunnen worden gerealiseerd weergegeven.

3.2 Collectornetten

In de welbekende zonnecollector voor huishoudelijk gebruik wordt zonlicht omgezet in warmte op een zwart oppervlak. Op dit oppervlak is een buizen netwerk aangebracht en om de lucht rondom deze buizen en dit oppervlak zo warm mogelijk te houden wordt de zonnecollector afgedekt met een glazen of kunststof plaat. De eigenschappen van de zonnecollector kunnen geheel worden ge-optimaliseerd voor de verzameling van warmte.

In een kas kan geen sprake zijn van de optimalisatie van een warmte-verzamelingssysteem naar een maximale warmte-oogst capaciteit. Een kas dient immers in de eerste plaats als een ruimte waarin gewassen moeten worden gekweekt. In de bedrijfseconomische context weegt de waarde van het gewas ook nog eens 5 maal zwaarder dan de waarde van energie. Aanpassingen van de kas-lay out en het aanleggen van extra verwarmingsnetten moeten dan ook minstens 5 maal meer energie besparen in verhouding tot de opbrengsderving (b.v. door lichtverlies) die ze veroorzaken.

De belangrijkste consequentie van het feit dat de gewasproductie het belangrijkste onderdeel van de optimalisatie van de kasinrichting vormt is dat het warmte-oogst systeem zo min mogelijk zonlicht mag onderscheppen. Dit betekent dat de warmte via convectieve warmte-overdracht verzameld moet worden en er dus met temperaturen gewerkt moet worden die lager liggen dan de kasluchttemperatuur.

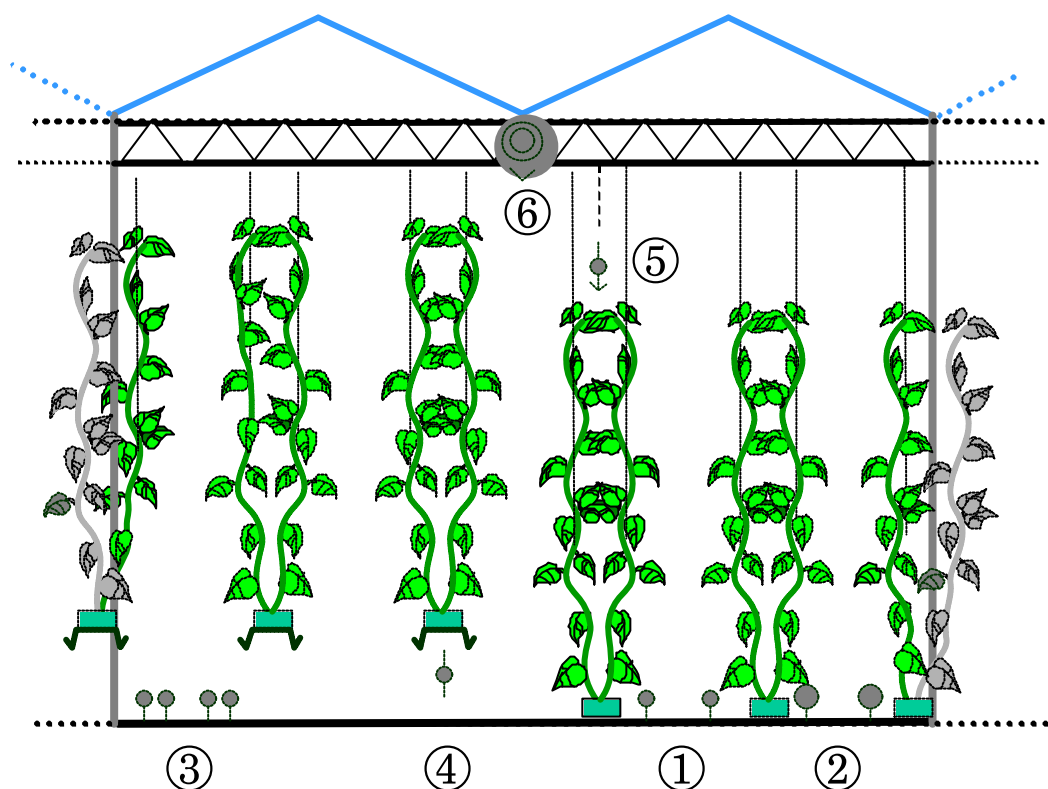
In de tweede plaats legt de wens dat het energie-verzamelingssysteem geen licht onderschept grote beperkingen aan het oppervlak dat bovenin de kas kan worden aangebracht. Onderin de kas is de ruimte minder beperkend, maar is de effectiviteit van de koeling wat minder (omdat koude lucht onderin de kas zal blijven hangen).

In dit project zijn een 5-tal mogelijke collectornetten in ogenschouw genomen. Een aantal van deze mogelijkheden zijn onlangs op semi-praktijkschaal onderzocht in het project “Koeling en Ontvochtiging in de Floriadekas” (Campen, 2001).

In dit onderzoek is geconstateerd dat gemeten warmte-onttrekkingscapaciteiten van verschillende collectornetten goed overeenkomen met de potenties die van deze netten op grond van berekeningen kunnen worden gemaakt. Daarom zijn de perspectieven van collector-netten die niet in bovengenoemd project zijn toegepast berekend aan de hand van extrapolaties op basis van fysische parameters die wel praktisch onderzocht zijn. In onderstaande tabel zijn de verschillende collectornetten opgesomd met een aantal bijzonderheden.

Tabel 3-1 Collectornetten waarvan het perspectief in deze studie is onderzocht. De nummering verwijst naar de schets in figuur 3-1.

Omschrijving	Nr in fig. 3-1	bijzonderheid
51 mm ondernet	1	gecombineerd gebruik van meest gangbaar verwarmingssysteem
70 mm ondernet	2	gecombineerd gebruik van op WP toegesneden verwarmingssyst.
Dubbel 51 mm ondernet	3	gecombineerd gebruik van op WP toegesneden verwarmingssyst.
speciaal collectornet	4	alleen in combinatie met hangende goten
speciaal collectornet	5	speciaal toepasbaar in chrysantenteelt, 3% lichtonderschepping
51 mm bovennet	-	gecombineerd gebruik, vooral toepasbaar in chrysantenteelt
Ribbenbuis	6	geïntegreerd met goot-constructie, 3% lichtonderschepping



Figuur 3-1 Positie van een 6-tal collectornetten in een tuinbouwkas. De linker drie gewasrijen laten de situatie met hangende teeltgoten zien. De rechter drie gewasrijen tonen de lay-out van een standaard kasinrichting voor hoog opgaande gewassen.

Verklaring van de nummering

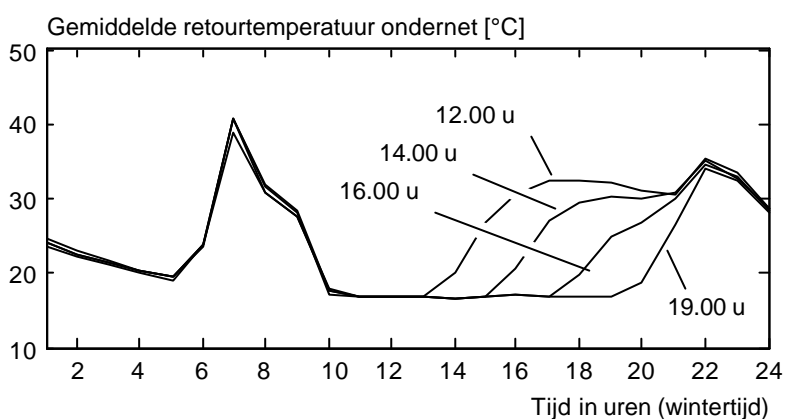
1. Tweeledig gebruik van het standaard 51-mm buisrailnet
2. Tweeledig gebruik van een verruimd buisrailnet (70-mm)
3. Tweeledig gebruik van een dubbel uitgevoerd 51 mm buisrail-net
4. Speciaal collectornet van langsgevinde buis onder hangende teeltgoten
5. Speciaal collectornet van langsgevinde buis (met condensgoot) boven het gewas
6. Speciaal collectornet van dwarsgevinde buis onder de goot

Voor de uitvoeringsvormen 2, 4 en 6 zijn recentelijk in een experiment op semi-praktijkschaal warmte-onttrekkingscapaciteiten bepaald (zie "Koeling en Ontvochtiging in de Floriadekas", Campen, 2001). Op grond van de resultaten uit deze experimenten zijn effectieve warmte-overdrachtscoëfficiënten voor deze typen collectornetten bepaald waarmee via het simulatiemodel KASPRO extrapolaties konden worden gemaakt naar gelijksoortige collectornetten, maar dan met andere diameters en andere oppervlakken per m² kas.

3.3 Warmte-oogst in relatie tot stoptijd

De onttrekking van warmte vanuit de kas middels een collectornet vindt plaats door het verpompen van koud water door het collectornet. Dit betekent dat, wanneer er gestopt wordt met het doorvoeren van koud water de buis via warmte-onttrekking aan de kaslucht langzaam opwarmt tot deze uiteindelijk de temperatuur bereikt die de buis gehad zou hebben wanneer er geen warmte met die buis aan de kaslucht zou zijn onttrokken. Het zal duidelijk zijn dat wanneer het collectornet te lang gebruikt wordt, bijvoorbeeld tot een uur voor zonsondergang) de terugwarming van het collectornet niet meer met zonne-energie, maar mogelijk zelfs (direct of indirect) met verwarmingsenergie plaatsvindt. Dit kan worden voorkomen door op tijd te stoppen met warmte-onttrekken.

In figuur 3-2 wordt het verloop van de ondernettemperatuur getoond op de warmste dag van het SEL-jaar. Het ondernet wordt in dit voorbeeld gecombineerd gebruikt voor verwarming en warmte-onttrekking (dus situatie 1 in tabel 3-1 en figuur 3-1).



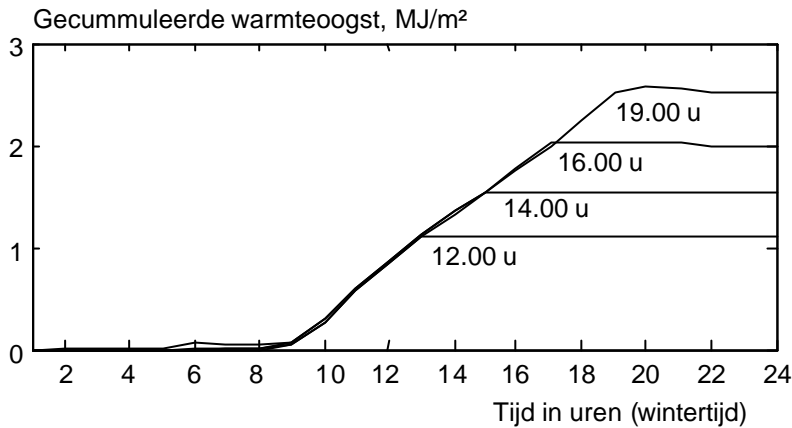
Figuur 3-2 Verloop van de gemiddelde retourtemperatuur van het ondernet (waarmee warmte wordt gewonnen) in de tijd bij verschillende stoptijden

De figuur laat zien dat in de vroege ochtend (van 's morgens 5 tot 7 (wintertijd, dus van 4 tot 6 zomertijd)) het verwarmingsnet wordt opgestookt tot 40 °C t.b.v. het droogstoken. Vanaf 10:00 wordt het net koud gemaakt, en wel met een zodanig debiet dat de retourtemperatuur op 17 °C uitkomt. Vervolgens toont de figuur het verloop van de retourtemperatuur wanneer om 12:00, om 14:00, om 16:00 en om 19:00 wordt gestopt met warmte-oogsten. Uit het feit dat de eerste drie curven om 21:00 plotseling een stijgende lijn te zien geven moet worden geconcludeerd dat op dat moment kennelijk enig verwarmingsvermogen gewenst was (waarschijnlijk in verband met de vochtbeheersing). De laatste curve had om 21:00 een lagere temperatuur dan de andere drie en is om 22:00 op dezelfde temperatuur uitgekomen. Hieruit kan worden geconcludeerd dat er extra verwarmingsvermogen toegevoerd is om het collectornet die avond weer als verwarmingsnet te kunnen gebruiken. Met andere woorden, een deel van de aan het eind van de dag ge-oogste warmte is weer tenietgedaan doordat de buis middels verwarming op temperatuur moest worden gebracht.

Dit effect is ook zichtbaar in figuur 3-3, waar de gecummuleerde warmte-oogst over die dag is weergegeven. de bovenste lijn (behorende bij instelling waarbij het collectornet pas om 19:00 weer werd dichtgedraaid) laat tussen 21:00 en 22:00 een afname van de gecummuleerde warmte-oogst zien.

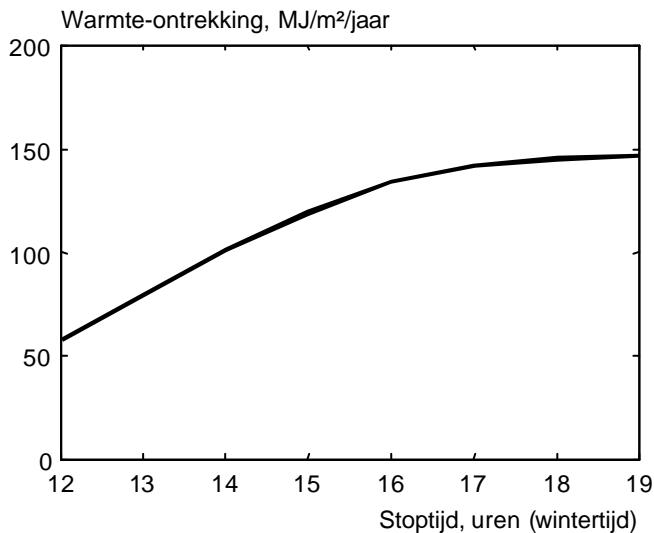
In de situatie dat een verwarmingsnet met een compressie warmtepomp wordt verwarmd zal met name het eerste opwarm-traject van een nog koude buis met een hoge COP kunnen worden

gerealiseerd (6 of hoger). Het feit dat de buis na te zijn gebruikt als collectornet een grotere initiële opwarming nodig heeft alvorens te kunnen gaan verwarmen is daarmee energetisch geen groot probleem omdat verwarming bij zo'n hoge COP relatief weinig primaire energie kost. Zoals ook in figuur 3-3 te zien is weegt de kleine extra onttrekking aan de aquifer niet op tegen de belangrijke extra-warmte-oogst tussen 16:00 en 19:00 uur



Figuur 3-3 Netto cumulatieve warmte-oogst tijdens één dag van een standaard 51-mm ondernet bij vier verschillende stoptijden.

In figuur 3-4 is de jaarlijkse warmte-verzameling die middels het koelen van een standaard 51 mm buisrailnet kan worden gerealiseerd als functie van de stoptijd weergegeven.



Figuur 3-4 De jaarlijkse warmte-onttrekking van een 51 mm ondernet dat gecombineerd wordt gebruikt voor verwarming en warmte-onttrekking in een standaard tomatenteelt in relatie tot de stoptijd

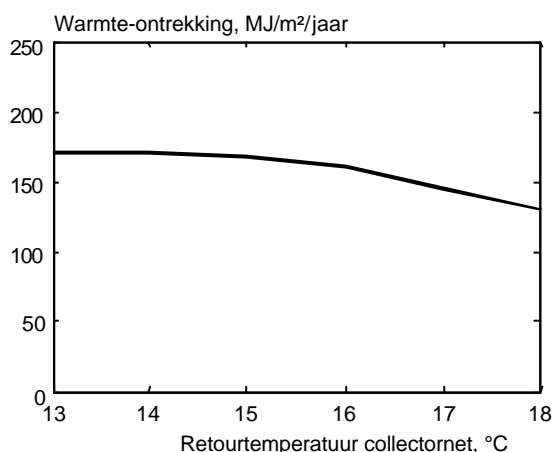
Het blijkt dat het oprekken van de stoptijd vanaf het midden van de dag tot een grote toename van de te realiseren warmte-onttrekking oplevert, maar dat stoptijden later dan 17:00 (wintertijd) nauwelijks nog extra warmte-onttrekking opleveren. Dit lijkt in tegenspraak met de informatie uit figuur 3-3, maar

hierbij moet in het oog worden gehouden dat figuur 3-3 één dag in de zomer beschrijft en figuur 3-4 betrekking heeft op het overall resultaat van alle dagen in het jaar.

3.4 Onttrekkingscapaciteit in relatie tot retourtemperatuur

De warmteonttrekkingscapaciteit van een collectorsysteem is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen het koude oppervlak en de kaslucht. Bij een groot temperatuurverschil kan meer warmte aan de kaslucht onttrokken worden dan bij een klein temperatuurverschil.

In figuur 3-5 wordt getoond hoe groot deze invloed van de temperatuur van het collectornet is. Als relevante grootheid wordt de temperatuur aan het eind van het collectornet genomen. Deze temperatuur moet immers als het resultaat dat met het collectorsysteem wordt gerealiseerd worden opgevat (de temperatuur waarnaar het water uit de koude put is opgewarmd).



Figuur 3-5 De jaarlijkse warmteonttrekking van een 51 mm ondernet dat gecombineerd wordt gebruikt voor verwarming en warmte-onttrekking in een standaard tomatenteelt als functie van het setpoint waarop de retourtemperatuur van het collectornet tijdens warmte-oogsten wordt geregeld.

Het feit dat een verlaging van het retourtemperatuur-setpoint naar waarden onder de 15 nog nauwelijks tot een groter warmte-onttrekking leidt komt voort uit een combinatie van het feit dat de beschikbare minimale aanvoertemperatuur 5 °C bedraagt en het pomp-debiet beperkt is. Een retourtemperatuur-setpoint van 13 °C wordt in de beschikbare installatie eenvoudigweg meestal niet gerealiseerd, zodat het niet uitmaakt of de regeling tracht 14, 13, of nog lagere temperaturen als setpoint meekrijgt. Alleen als er aanvoerwater van bijvoorbeeld 1 °C beschikbaar zou zijn, of wanneer het pompdebiet groter dan gebruikelijk zou kunnen worden rondgepompt zouden de lagere retourtemperaturen gerealiseerd kunnen worden en zou de warmte-onttrekking toenemen.

De afname van de oogst met de stijging van het retourtemperatuur-setpoint is duidelijk zichtbaar.

De figuur laat een vrijwel lineaire afname zien.

Ondanks het ogenschijnlijke voordeel om een laag retourtemperatuur-setpoint te kiezen wordt in alle verdere berekeningen uitgegaan van 17 °C als setpoint. De belangrijkste reden hiervoor is dat bij een lage retourwatertemperatuur veel water in het aquifer-systeem moet worden verpompt. Een groot waterdebiet maakt dat er veel pomp-energie nodig is (zowel bij het onttrekken van warmte als bij het

regenereren van de aquifer) en dat er dan putten met een grote capaciteit moeten worden aangelegd. 17 °C zou een redelijk compromis kunnen zijn tussen aan de ene kant een grote warmte-oogst en aan de andere kant een beperkt waterdebiet.

Rekening houdend met 2 °C temperatuur-verlies over de warmtewisselaar kan de aquifer dan worden geregenereerd op een temperatuur van 15 °C.

3.5 Onttrekkingscapaciteiten van verschillende verwarmingsnetten

Met de in de voorgaande paragraaf genoemde argumentaties voor het kiezen van een late stoptijd (19:00) en de instelling van het retourwatertemperatuur-setpoint op 17 °C kan voor de 7 verschillende collectorsystemen met een simulatiemodel worden uitgerekend welke warmte-oogst met deze netten gerealiseerd kan worden.

De resultaten van deze berekeningen worden in tabel 3-2 getoond

Tabel 3-2 Jaarlijkse warmte-onttrekkingscapaciteit van 7 collectornetten indien de uitgaande temperatuur op 17 °C wordt geregeld en de warmte-oogstperiode is gemaximaliseerd. Als binnenklimaat is het klimaat dat zich in een tomatenteelt voordoet gebruikt.

Omschrijving	nr in fig. 3-1	Jaarlijkse warmte-oogst [MJ/m ² jr]
51 mm ondernet (10 buizen 8 m tralie)	1	144
70 mm ondernet (10 buizen in 8 m tralie)	2	188
Dubbel 51 mm ondernet (20 buizen in 8 m tralie)	3	243
Speciaal collectornet (onder, 5 buizen in 8 m tralie)	4	90
Speciaal collectornet (boven, 5 buizen in 8 m tralie)	5	110
51 mm bovennet (5 buizen in 8 m tralie)	-	80
Ribbenbuis (1 buis per 4 meter kap)	6	178

De prestatie van de verschillende collectorsystemen is afhankelijk van lokatie van het systeem in de kas, wat bepaalt of er ook direct zonlicht wordt onderschept, en van het VO (verwarmend oppervlak) dat met het systeem kan worden gerealiseerd. Dit VO is afhankelijk van het VO per meter buis en het aantal meters dat er van zo'n buis in de kas kan worden aangebracht.

Qua warmte-oogst capaciteit biedt het dubbel uitgevoerd standaard 51 mm ondernet het meeste perspectief. Dit systeem heeft een VO van 0.4 m² buisoppervlak per m² kasoppervlak en verzamelt bijna 8 m³ aardgas-equivalenten per m² op jaarbasis.

4 Energiebesparing van verschillende warmtepomp-collectornet combinaties

4.1 Inleiding

Een kas die met een warmtepomp wordt verwarmd moet in de zomer evenveel warmte aan de aquifer toevoegen als dat er in de winter aan de aquifer wordt onttrokken.

Dit betekent dat de dekkinggraad die een warmtepomp in de kas-verwarming kan verzorgen beperkt wordt door de warmte-onttrekking die met een collector-systeem in de zomer kan worden gerealiseerd.

In de figuren 2-6 t/m 2-11 is getoond op welke wijze de onttrekking van warmte uit de aquifer samenhangt met de warmtepomp capaciteit en in figuur 2-12 t/m 2-17 is getoond welke energiebesparing bij deze warmtepomp vermogens kan worden gerealiseerd.

In figuur 2-18 en 2-19 zijn deze relaties gecombineerd tot een relatie die aangeeft welke energiebesparing kan worden gerealiseerd bij de verschillende typen warmtepompen, wanneer een bepaalde hoeveelheid warmte uit de aquifer kan worden gehaald.

In dit hoofdstuk wordt, gebruik makend van de grafieken in figuur 2-18 en 2-19, en van de berekende hoeveelheid warmte die met verschillende collectornetten verzameld kan worden voor elk van de zes gewassen het energiebesparingspotentieel van de toepassing van deze collectornetten bepaald.

De uitleg bij de resultaten in de tomatenteelt is het meest uitgebreid omdat veel van de mechanismen die de uitkomsten voor de tomatenteelt bepalen ook in de andere teelten geldig zijn.

4.2 Besparingspotentieel in de tomatenteelt.

In de tomatenteelt wordt intensief gebruik gemaakt van een buisrail-systeem (5 buizen in een 4 meter kap). Het bovennet is meestal een tussen het gewas hangend groei-net en lijkt derhalve niet geschikt voor de verzameling van warmte. Voor speciale bovennetten is in een tomatenkas nauwelijks ruimte. Indien gebruik zou worden gemaakt van hangende goten (waarvan op praktijkbedrijven in de tomatenteelt sprake is) zou behalve het reguliere ondernet ook een warmte-onttrekkende buis vlak onder de teelt-goten kunnen worden aangebracht (2.5 buis per 4 meter kap). Een speciaal koelsysteem geïntegreerd met de goot-constructie (1 buis per 4 meter kap) lijkt een derde mogelijkheid en zou als additioneel systeem kunnen worden aangebracht.

In tabel 4-1 zijn de resultaten weergegeven van de hoeveelheid warmte die bij toepassing van 5 verschillende collectorsystemen. Bij vergelijking van de gegevens van tabel 4-1 met die van tabel 3-2 valt op dat de warmte-oogst van gecombineerde netten niet helemaal gelijk is aan de som van de warmte-oogst van de twee afzonderlijke netten. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat het binnenklimaat in een kas verandert (een beetje kouder is) wanneer er warmte-onttrekking plaatsvindt. Wanneer de in de eerste kolom genoemde warmte-oogst cijfers worden gebruikt in figuur 2-18(a), waar voor de tomaat de energiebesparing als functie van de onttrekking van warmte aan de aquifer is uitgezet (voor de drie typen warmtepompen), dan kan voor elk type warmtepomp het besparingspotentieel bij die warmte-oogst worden bepaald. Dit resultaat is in de daarop volgende 3 kolommen weergegeven.

Tabel 4-1 Warmte-oogst en daarmee samenhangende energiebesparing bij het gebruik van 5 verschillende collectie-systemen in de tomatenteelt.

	W. oogst MJ/(m ² jr)	Primaire energiebesparing [m ³ a.e./m ² jr]		
		EWP	GMWP	AWP
1. 51 mm ondernet (standaard)	154	3.2 (7 %)	4.9 (11 %)	4.3 (10 %)
2. 70 mm ondernet (verdikt)	188	4.0 (9 %)	5.9 (13 %)	5.3 (12 %)
3. dubbel 51 mm ondernet (verdubbeld)	243	5.1 (12 %)	7.7 (17 %)	7.0 (16 %)
4. 2+speciaal collectornet (onder teeltgoot)	299	6.3 (14%)	9.4 (21 %)	8.7 (20 %)
5. 2+koelende traliegoot	409	8.6 (20%)	13.1 (30 %)	9.9 (22 %)

De tabel laat zien dat wanneer de warmte-oogst capaciteit beperkt blijft tot zo'n 250 MJ/(m² jr) de GMWP en AWP vergelijkbare besparingsniveaus halen. Dit is voor de hand liggend omdat deze machines een vrijwel gelijke relatie tussen warmte-onttrekking uit de aquifer en energiebesparing hebben (zie figuur 2-18). Een grotere beschikbaarheid van warmte in de aquifer kan echter door de AWP niet benut worden omdat deze door zijn beperkte COP al gauw tegen zijn maximale onttrekkingsniveau aanloopt. Vandaar dat de AWP de laatste stap van de GMWP (van 21 naar 30% besparing) maar zeer ten dele kan meemaken. Dit betekent dat een AWP een aquifer waar in de zomer 409 MJ in is opgeslagen dus ook niet volledig zal kunnen terugkoelen naar 5 °C. Omgekeerd betekent dit dat collectie-systeem 5 bij gebruik van een AWP dus ook geen 409 MJ per m² per jaar zal kunnen onttrekken. De kolom met warmte-oogst gegevens moet derhalve als maximale warmte-oogst voor de verschillende systemen worden opgevat.

De elektrisch aangedreven warmtepomp heeft in situaties waarin de beschikbaarheid van warmte in de aquifer een beperkende factor vormt een groot nadeel. Deze haalt immers ongeveer 75% van de afgegeven warmte uit de laagwaardige bron (figuur 2-1). Alle besparingsniveau's voor de EWP zijn bij de tomatenteelt dan ook lager dan bij de beide gas-aangedreven machines die een veel kleiner deel van de afgegeven warmte uit de aquifer betrekken.

4.3 Besparingspotentieel in de onbelichte rozenteelt.

In de rozenteelt wordt veel gebruik gemaakt van een ondernet (5 buizen in een 4.00 meter kap), maar met een kleinere buisdiameter (23 mm). Ten behoeve van de warmte-oogst zou het ondernet verdikt kunnen worden naar 51 mm buizen.

Het standaard bovennet is 51 mm dik en bestaat uit 2½ buis in een 4 meter kap. Ook dit verwarmingsnet zou dus voor de verzameling van warmte kunnen worden gebruikt.

Naast het gebruik van de bestaande buizen is het in de onbelicht rozenteelt mogelijk om een speciaal collectornet boven het gewas te hangen (type 5 in figuur 3-1).

Tenslotte kan in de rozenkas een speciaal koelsysteem geïntegreerd met de goot-constructie worden aangebracht. Dit laatste systeem zal altijd als een additioneel koelend systeem worden aangebracht.

In de onderstaande tabel staan de energiebesparingspotentiëlen die met de verschillende systemen bij gebruik van de drie verschillende typen warmtepompen kunnen worden gerealiseerd.

Tabel 4-2 Warmte-oogst en daarmee samenhangende energiebesparing bij het gebruik van 5 verschillende collectie-systemen in de onbelichte rozenteelt

	W. oogst MJ/(m ² jr)	Primaire energiebesparing [m ³ a.e./(m ² jr)]		
		EWP	GMWP	AWP
1. 23 mm ondernet (standaard)	102	2.1 (7 %)	3.3 (11 %)	3.2 (11 %)
2. 51 mm ondernet (verdikt)	236	4.9 (16 %)	7.6 (25 %)	4.3 (15 %)
3. 51 mm bovennet (standaard)	150	3.1 (10 %)	4.8 (16 %)	4.3 (15 %)
4. 3 + speciaal bovennet	352	7.2 (24%)	11.3 (38 %)	4.3 (15 %)
5. 2 + koelende traliegoot	576	11.0 (37%)	13.3 (45 %)	4.3 (15 %)

Uit tabel 4-2 blijkt dat in de rozenteelt door middel van het dubbel gebruik van het standaard bovennet in combinatie met een GMWP al bijna 5 m³ a.e. per m² per jaar kan worden bespaard (16%).

Opvallend in tabel 4-2 is dat de absorptiewarmtepomp al erg snel aan zijn maximale perspectief zit. Dit komt doordat in de rozenteelt het primaire net wordt gevormd door het bovennet. Dit net heeft een VO van slechts 0.1 m² per m² kas en geeft derhalve het verwarmingsvermogen af bij hoge temperaturen. De absorptiewarmtepomp wordt hierdoor veel meer gehinderd dan de compressiewarmtepomp (zie figuur 2-6), waarmee het beperkte perspectief voor de absorptiewarmtepomp verklaard kan worden.

Ook hier geldt weer dat bij gebruik van een AWP het verzamelen van meer dan 150 MJ per m² per jaar geen zin heeft (en in verband met de beperkte beschikbaarheid van koud water ook niet zal lukken).

In absolute zin is het besparingpotentieel in de onbelichte rozenteelt vergelijkbaar met dat van de tomatenteelt.

4.4 Besparingspotentieel in de warme potplantenteelt.

In de potplantenteelt wordt veelal gebruik gemaakt van de teelt op betonvloeren of de teelt op roltafels of roltabletten. In alle drie de systemen worden vloer en tabletten gebruikt als verwarmingssysteem. Dit oppervlak is echter weinig geschikt voor koeling. Dit omdat de koude op een aaneengesloten koelend oppervlak de neiging heeft daar te blijven liggen.

Daarom zal in een potplantenteelt alleen gebruik gemaakt kunnen worden van het bovennet (2.5 51 mm buizen in een kap van 4 meter), een additioneel collector-net (bijvoorbeeld nog eens 2.5 buizen per 4 meter kap) en van een speciaal in koelsysteem onder de goot-constructie.

Tabel 4-3 Warmte-oogst en daarmee samenhangende energiebesparing bij het gebruik van drie verschillende collectie-systemen in de warme potplantenteelt

	W. oogst MJ/(m ² jr)	Primaire energiebesparing [m ³ a.e./(m ² jr)]		
		EWP	GMWP	AWP
1. 51 mm bovennet (standaard)	174	3.5 (8 %)	5.2 (12 %)	4.9 (11 %)
2. 1+speciaal collectornet (boven gewas)	397	7.8 (18 %)	11.9 (28 %)	6.9 (16 %)
3. 1+koelende traliegoot	529	10.2 (24%)	16.2 (38 %)	6.9 (16 %)

De resultaten in tabel 4-3 laten zien dat de warme potplantenteelt veel warmte aan de kaslucht kan worden onttrokken (door de hoge temperatuur). Dit biedt dus de mogelijkheid tot een grote energiebesparing, vooral bij gebruik van een GMWP.

Net als bij de onbelichte rozenteelt blijkt dat in de warme potplantenteelt de AWP al snel op het maximale besparingsniveau uitkomt. Ook hier wordt dat niveau sterk beïnvloed door het geringe VO waarmee in de hier gebruikte berekeningen de potplantenkas verwarmd wordt (een bovennet bestaande uit twee 51 mm buizen per kap)

In een ander rapport ("Warmtepomp in combinatie met vloerverwarming", Kempkes, 2002) wordt nader op het perspectief van de verwarmde betonvloer ingegaan.

4.5 Besparingspotentieel in de radijzenteelt.

In de radijzenteelt is geen plaats voor collectornetten op de grond. De warmteverzameling is daarom beperkt tot het gebruik van het reguliere bovennet, een aanvulling daarop middels een speciaal collectornet en een aanvulling middels een met de goot gecombineerde koel-buis.

Tabel 4-4 Warmte-oogst en daarmee samenhangende energiebesparing bij het gebruik van drie verschillende collectornetten in de radijzenteelt

	W. oogst MJ/(m ² jr)	Primaire energiebesparing [m ³ a.e./(m ² jr)]		
		EWP	GMWP	AWP
1. 51 mm bovennet (standaard)	134	3.6 (46 %)	4.7 (60 %)	3.4 (43 %)
2. 1+speciaal collectornet (boven gewas)	311	4.4 (56 %)	4.9 (63 %)	3.4 (43 %)
3. 1+koelende traliegoot	390	4.4 (56%)	4.9 (63 %)	3.4 (43 %)

De tabel laat zien dat het in de radijzenteelt weinig zin heeft om veel warmte op te slaan. Dit teelt vraagt immers maar weinig energie zodat bij een beschikbaarheid van zo'n 200 MJ in een aquifer het maximale besparingspotentieel van de warmtepomp gerealiseerd kan worden.

Ook bij de radijzenteelt geeft de gasmotor warmtepomp het grootste besparingsperspectief. De verschillen tussen de drie machines zijn hier echter gering.

4.6 Besparingspotentieel in de fresiateelt.

De fresiateelt verkeert in de bijzondere omstandigheid dat het voor de ontwikkeling van de fresia van belang is de wortels te koelen. Tussen half mei en half september wordt de grond op 20 cm diepte op 16 °C gehouden. In een standaard fresiateelt moet daartoe in het zomer half jaar ongeveer 200 MJ/(m² jaar) aan de bodem worden onttrokken. Hierdoor kan ook zonder collector-net al een warmtepomp worden ingezet. Het perspectief van de warmtepomp wordt echter groter wanneer er ook additioneel warmte wordt onttrokken.

In de fresiateelt kan daartoe gebruik worden gemaakt van de drie typen buisrail-systemen, zij het met een gehalveerd aantal buizen en van een regulier en van een speciaal toegesneden bovennet. Tenslotte zou in de fresiateelt gebruik gemaakt kunnen worden van een met de goot geïntegreerd koel-systeem.

Tabel 4-5 Warmte-oogst en daarmee samenhangende energiebesparing bij het gebruik van zes verschillende collectie-systemen in de fresiateelt

	W. oogst MJ/(m ² jr)	Primaire energiebesparing [m ³ a.e./m ² jr]		
		EWP	GMWP	AWP
1. Grondkoeling (standaard)	181	4.3 (18%)	6.3 (26 %)	5.5 (23 %)
2.1+51 mm ondern. (2.5 p.kap) (standaard)	232	5.5 (23 %)	8.2 (35 %)	5.6 (24 %)
3.1+70 mm ondernet (2.5 p.kap) (verdikt)	260	6.2 (26 %)	9.3 (39 %)	5.6 (24 %)
4.1+51 mm ondern. (5 per kap) (verdubb.)	280	6.7 (28 %)	10.1 (42 %)	5.6 (24 %)
5. 3+speciaal collectornet	398	9.4 (40 %)	12.8 (54 %)	5.6 (24 %)
6. 3+koelende traliegoot	479	11.3 (48%)	12.8 (54 %)	5.6 (24 %)

Tabel 4-5 laat zien dat het feit dat in de fresiateelt gebruik wordt gemaakt van grondkoeling er zondermeer jaarlijks zo'n 180 MJ per m² beschikbaar is. Alleen al het gebruik van deze warmte zou een energiebesparing van rond 6 m³ a.e. per m² per jaar mogelijk maken (iets meer bij een GMWP en iets minder bij een AWP). Bij uitbreiding van het koelend oppervlak kan de energiebesparing oplopen tot bijna 13 m³ a.e./m² jr). Hierbij moet dan wel gebruik worden gemaakt van een GMWP want het besparingspotentieel van de AWP is al bij een aquiferbelasting van ongeveer 200 MJ verzadigd. Het potentieel van de GMWP is in de fresiateelt overigens bij een aquiferbelasting van 400 MJ al verzadigd, zodat in de fresiateelt de toepassing van het meest gecompliceerde collectiesysteem geen zin heeft.

Vanwege de ruime beschikbaarheid van warmte in de fresiateelt, zeker in vergelijking met de warmtevraag kan ook de EWP dicht bij het maximale besparingsniveau van ongeveer 13 m³ per m² per jaar komen.

4.7 Besparingspotentieel in de koude potplanten.

De systemen die in een kas voor koude potplanten kunnen worden toegepast zijn overeenkomstig met de systemen die in een kas met warmte potplanten kunnen worden toegepast.

Tabel 4-6 Warmte-oogst en daarmee samenhangende energiebesparing bij het gebruik van drie verschillende collectie-systemen in de koude potplantenteelt

	W. oogst MJ/(m ² jr)	Primaire energiebesparing [m ³ a.e./m ² jr]		
		EWP	GMWP	AWP
1. 51 mm bovennet (standaard)	104	2.7 (15 %)	3.7 (20 %)	3.4 (18 %)
2. 1+speciaal collectornet (boven gewas)	289	7.6 (40 %)	10.4 (55 %)	6.3 (34 %)
3. 1+koelende traliegoot	375	9.7 (52%)	11.4 (61 %)	6.3 (34 %)

Bij de koude potplanten heeft de warmtepomp eveneens een groot potentieel (absolute besparingen boven de 10 m³ per m² per jaar die, afgezet tegen het verbruik van rond de 20 m³/m² per jaar in relatieve zin tot boven de 60% uitkomen).

Om dit potentieel te kunnen benutten moet er echter wel extra VO worden aangebracht. Dit extra VO kan echter uit een eenvoudig extra collectornet bestaan.

Opvallend in de tabel is dat vergelijkbare collectiesystemen in de koude potplantenteelt slechts ongeveer 60% van de hoeveelheid warmte onttrekken als in de warmte potplantenteelt. Dit komt doordat de warmte-onttrekking afhankelijk is van het verschil tussen buis- en kaslucht-temperatuur. Dit verschil is in de warme potplantenteelt veel groter dan in de koude.

5 Bedrijfseconomische aspecten

Ten behoeve van de inschatting van de implementatiekans van warmtepompen in de praktijk is het belangrijk om een inzicht te hebben in de belangrijkste bedrijfseconomische parameters. In dit hoofdstuk wordt voor alle combinaties waarvoor in het vorige hoofdstuk de energiebesparing is uitgerekend het effect op de vaste en variabele kosten uitgerekend ten opzichte van de standaard situatie.

Allereerst wordt in dit hoofdstuk de berekeningsmethodiek toegelicht (§ 5.1). Vervolgens worden de uitgangspunten en aannamen die rond de investeringskosten gelden weergegeven (§ 5.2).

Tenslotte wordt het besproken rekenschema toegepast op de cases die in het vorige hoofdstuk zijn berekend.

5.1 Berekeningswijze

De jaarkosten rond de energievoorziening op een tuinbouwbedrijf worden bepaald door vaste lasten die voortvloeien uit de investering en variabele kosten die bij gebruik van de installatie optreden. De vaste lasten vloeien voort uit rente- en afschrijvings- en onderhoudskosten van de toegepaste installaties. De voor dit project relevante kostenposten zijn.

- Een aquifer-doublet, waarvan de kosten afhankelijk zijn van het vermogen dat het doublet moet kunnen leveren
- Een warmtepomp installatie (Elektrische, gasmotor of absorptie warmtepomp)
- Kosten voor collectornetten

Een kostenpost die zowel een variabel als een vaste lasten karakter heeft is het diensten-deel in de gasprijs volgens het CDS-systeem. De belangrijkste invloedsfactor op deze kosten wordt bepaald door de gecontracteerde aansluitcapaciteit en heeft daarmee een vaste lasten karakter. Het diensten-deel heeft echter ook een kwantum-korting effect, waardoor de variabele component van het gasverbruik achteraf de in rekening gebrachte kosten voor het diensten-deel beïnvloedt. Het gevolg van deze eigenschap is dat er per case een berekening moet worden gemaakt om een gasprijs te kunnen bepalen. In deze berekening moet zowel de vereiste contractcapaciteit als de jaar-afname worden betrokken. Daarnaast speelt de stookolieprijs een rol en de afstand van het tuinbouwbedrijf tot het dichtst bijzijnde entry-point.

Om de indruk te vermijden dat de gasprijs als onafhankelijk van het verbruik kan worden beschouwd wordt in de tabellen een totaalprijs voor het jaarlijkse gasverbruik gepresenteerd.

De variabele kosten worden gevormd door de kosten voor de inkoop van

- zuivere CO₂ (om te voorkomen dat het gebruik van de ketel voor CO₂ de dekkingsgraad van de warmtepomp decimeert)
- Elektriciteit (voor het verpompen van water van en naar de aquifer en bij gebruik van een elektrische warmtepomp).

Daarnaast is er bij een aantal systemen sprake van extra lichtonderschepping. De kosten hiervan kunnen worden verdisconteerd in de vorm van gedeerde inkomsten.

De vergelijking van de som van deze kostenposten in de standaard situatie met de som van deze posten in de geselecteerde warmtepomp-collectornet combinaties geeft een indicatie voor het bedrijfseconomisch effect van de toepassing van deze systemen.

5.2 Uitgangspunten

Vrijwel alle onderdelen van de in dit rapport gebruikte kas-inrichtingen zijn niet gestandaardiseerd beschikbaar. Voor deze componenten zal dus een schatting van de investeringen gemaakt moeten worden. In deze paragraaf worden deze schattingen gepresenteerd en beargumenteerd.

Aquifer doublet.

De kosten van een aquifer worden bepaald door boor- en installatiekosten. De boorkosten worden vooral bepaald door de lokale bodemgesteldheid en (in mindere mate) door de vereiste pompcapaciteit. De installatiekosten worden vooral bepaald door het (koel of verwarming) vermogen dat aan de aquifer wordt onttrokken.

Recent onderzoek geeft aan dat doubletten die voor de tuinbouw gebruikt zouden kunnen worden investeringskosten met zich meebrengen die tussen de € 220,- en € 450,- per kW liggen (Klopstra, 2001). Deze range wordt ondersteund door de bevindingen van dhr van Mourik die vanuit Novem bv. projecten rond warmte en koude opslag bestudeert (pers. comm.).

Het te installeren vermogen verschilt per case. Een klein collectornet en een klein warmtepomp vermogen vraagt immers een kleinere aquifer capaciteit dan een groot collector-systeem en warmtepomp vermogen. Daarom wordt per case aangegeven welke van de twee het grootste vermogen vraagt (regeneratie in de zomer of warmteonttrekking in de winter) en wordt vervolgens voor dit vermogen de jaarkosten van de aquifer berekend met

$$K_{\text{aquifer}} = \max(P_{\text{regeneratie}}, P_{\text{warmteonttrekking}}) * 0.335 * 8\% \quad [\text{€ per m}^2 \text{ per jaar}]$$

waarin $P_{\text{regeneratie}}$ het maximale vermogen is waarmee de aquifer in de zomer wordt geregenereerd (in W/m^2) en $P_{\text{warmteonttrekking}}$ het vermogen waarmee de warmtepomp in de winter warmte aan de aquifer onttrekt (W/m^2). Bij de bepaling van deze maximale vermogens is er vanuit gegaan dat bij het voor de aquifer in rekening gebrachte bedrag een korte termijn buffermogelijkheid is opgenomen waardoor het regeneratie en/of onttrekkingsvermogen over een etmaal kunnen worden uitgesmeerd.

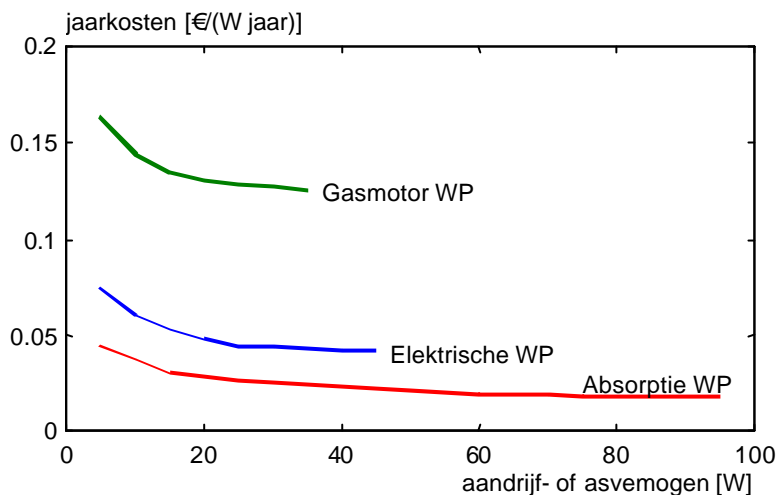
0,335 Zijn de investeringskosten in (€/W) (gemiddelde van 220 en 450 € per kW). 8% Zijn de jaarlasten (rente (gemiddeld 3%), onderhoud (2% van de investering) en afschrijving (3%, wat overeenkomt met een afschrijvingsperiode van 35 jaar)) van de investering. Dit naar analogie van Raaphorst *et.al.* (2001).

De gebruikte investeringskosten zijn overigens belangrijk hoger dan de kosten die in het rapport van Raaphorst worden gehanteerd. Dit is gedaan naar aanleiding van de informatie van Geuzendam, van Mourik en offertes van IF-technology. De impact van de kosten voor de aquifer is echter in alle tabellen die verderop gepresenteerd worden gemakkelijk te analyseren.

Warmtepomp installatie

In deze studie worden drie typen warmtepompen gebruikt.

Voor elektrische warmtepompen noemt Boot (1998) voor een aantal vermogensklassen de investeringskosten voor de warmtepomp en de installatie. Hieruit blijken duidelijke schaalvoordelen zodat voor de kosten van de warmtepomp de in figuur 5-1 getoonde relaties worden gebruikt.



Figuur 5-1 Jaarkosten van warmtepompen als functie van het as- of aandrijfvermogen. De schaalfecten zijn gebaseerd op de plaatsing van warmtepompen op een bedrijf van 2 ha zodat bij plaatsing van een machine van 10 W/m^2 de schaal-effecten van een machine met een aandrijfvermogen van 200 kW worden gebruikt.

De grafiek laat curven zien die voor de verschillende machines op heel verschillende niveaus liggen. Hierbij moet echter wel worden bedacht dat qua energiebesparing een gasmotor aangedreven warmtepomp van 5 W/m^2 ongeveer evenveel presteert als een elektrisch aangedreven warmtepomp van 10 W/m^2 . Een absorptiewarmtepomp die hetzelfde realiseert komt qua aandrijfvermogen uit op ongeveer 40 W/m^2 . Afgezet tegen een gemiddeld thermisch vermogen zouden de curven dicht bij elkaar liggen.

Collectornetten

In dit rapport spelen een 6-tal collectorsystemen een rol. Bij al deze collectorsystemen is sprake van investeringen in het collectornet zelf en investeringen die nodig zijn in de installatie waarmee de onttrokken warmte in de aquifer moet worden geleid. Omdat het in alle gevallen gesloten systemen zijn kan de warmteuitwisseling via hetzelfde leidingwerk verlopen als waarlangs de warmtepomp in de winter warmte aan de aquifer onttrekt. Een aantal extra kleppen is dan het enige dat bovenop de kosten voor de collectornetten komt om deze in de installatie te kunnen laten functioneren. Een investeringsbedrag van € 5000,- kan hiervoor als goede schatting dienen. Dit bedrag is vrijwel schaal-onafhankelijk en komt bij een bedrijf van 2 ha neer op € 0.25 per m^2 .

Naast deze collectornet onafhankelijke kosten zijn er nog kosten die per collectornet zullen verschillen. Deze staan hieronder aangegeven.

- Dubbel gebruik van standaard ondernet

$$K_{\text{standaardOndernet}} = 0.25 * 12\%$$

[€/per m^2 per jaar]

(het getal 0.25 staat voor de benodigde extra kleppen etc. en 12% zijn de jaarkosten voor de investeringen)

- Verdikt ondernet: Hierbij worden de kosten in rekening gebracht voor de vergroting van het standaard ondernet (van 51 naar 70 of van 23 naar 51). Om dit te realiseren nemen bij installatie alleen de materiaalkosten toe en nauwelijks de arbeid. Een buisverwarmingsnet kost ongeveer € 3 per m² (Raaphorst *et al.*(2001)). Een grotere buis zal naar verwachting 1 € per m² per jaar extra kosten. Dit leidt tot de volgende kostenpost.

$$K_{\text{VerdiktOndernet}} = (0.25 + 1) * 12\% \quad [\text{€ per m}^2 \text{ per jaar}]$$

(€ 1 voor de benodigde extra kleppen en € 1 voor de verdikking van de buis)

- Verdubbeld ondernet. Een verdubbeld ondernet is eenvoudigweg 2 maal zo duur als het standaard ondernet.

$$K_{\text{VerdubbeldOndernet}} = (0.25 + 3) * 12\% \quad [\text{€ per m}^2 \text{ per jaar}]$$

- Apart collectornet. Het in deze studie voorgestelde aparte collectornet heeft half zoveel meters buis als het ondernet, maar is een wat duurdere buis. Een bedrag van € 2 per m² lijkt derhalve een redelijk bedrag. De investeringskosten zullen onafhankelijk zijn van het feit of het net onder hangende goten is gemonteerd of bovenin de kas.

In formulevorm:

$$K_{\text{apartCollectornet}} = (0.25 + 2) * 12\% \quad [\text{€ per m}^2 \text{ per jaar}]$$

- Speciale ribbenbuis, geïntegreerd met de goot-constructie. Dit systeem lijkt een kostbare constructie. Niet alleen vanwege het materiaal (een ribbenbuis kost rond de € 40 per strekkende meter, dus € 10 bij een kapmaat van 4 meter), maar ook vanwege de ingewikkelde montage (waterdicht verbinden van de goot/buis combinatie, duur verf-werk). Het koelende element komt wordt echter voorgesteld te worden toegepast in de plaats van de bestaande goot- en tralieconstructie. AL met al lijkt het redelijk om alleen de kosten voor de ribbenbuis in rekening te brengen. Dit resulteert in:

$$K_{\text{koelende traliegoot}} = (0.25 + 10) * 12\% \quad [\text{€ per m}^2 \text{ per jaar}]$$

Bij combinaties van systemen moeten de kosten van de extra kleppen en aansturing uiteraard slechts één keer in rekening worden gebracht.

Gaskosten volgens CDS

Voor de berekening van de gaskosten wordt gebruik gemaakt van de tot nu toe bekende rekenregels (onder andere opgenomen in de rekenmethodiek van het LEI). Deze rekenregels leveren een gasprijs in afhankelijkheid van de afstand van de aansluiting tot het dichtstbijzijnde entrypoint, de aansluitcapaciteit, de prijs van zware stookolie en het jaarlijkse gasverbruik.

Als afstand tot het dichtstbijzijnde entrypoint wordt in alle berekeningen 100 km gebruikt. Als prijs voor zware stookolie wordt € 160 per ton aangenomen (prijspijs 4^e kwartaal 2001). De aansluitcapaciteit en het gasverbruik verschillen per case en worden derhalve per case ingevuld. Er wordt rekening gehouden met de beschikbaarheid van peak-shaving programmatuur in de kasklimaatcomputers. Dit betekent dat bij iedere berekening het maximale daggemiddelde gasverbruik als aansluitwaarde wordt gebruikt.

Indien een gasmotor aangedreven warmtepomp of een absorptiewarmtepomp wordt gebruikt wordt het gasverbruik van deze apparaten opgeteld bij het gasverbruik van de ketel. Aan de meter wordt er dus geen onderscheid gemaakt in de bestemming van het gas.

Variabele kosten

Naarmate de energiebesparing door de inzet van een warmtepomp toeneemt zal de beschikbaarheid van rookgas CO₂ afnemen. Dit geldt met name bij de inzet van de compressiewarmtepompen en in mindere mate voor de inzet van de absorptiewarmtepomp.

De kosten voor zuivere CO₂ worden berekend door het tekort aan CO₂ te vermenigvuldigen met € 0.1 per kg. Het tekort wordt berekend uit het verschil tussen de voor CO₂-dosering beschikbare rookgas CO₂ in de referentiesituatie en de beschikbare CO₂ in elk van de cases met een warmtepomp.

De kostenpost voor zuivere CO₂ verschilt derhalve van gewas tot gewas en binnen de gewassen van case tot case. De kosten worden beschreven met:

$$K_{CO_2} = 0.1 * kg_{CO_2} \quad [\text{€ per m}^2 \text{ per jaar}]$$

waarin kg_{CO₂} het berekende CO₂ tekort is.

Het belangrijkste extra elektriciteitsverbruik bij de toepassing van warmte-onttrekkende systemen ontstaat wanneer er gebruik wordt gemaakt van een elektrisch aangedreven warmtepomp. Uitgaande van een elektriciteitsprijs van € 0.07 per kWh (Raaphorst *et al.*, 2001) zullen de elektriciteitskosten dan worden berekend met.

$$K_{\text{ElekEWP}} = 0.07 * E_{\text{WPas}} \quad [\text{€ per m}^2 \text{ per jaar}]$$

waarin E_{WPas} het jaarlijks opgenomen elektriciteitsverbruik door de as van de warmtepomp in kWh voorstelt.

Naast deze grote elektriciteitsverbruiker zijn er nog andere extra verbruiken. Uitgaande van een collectornet waarvan de pomp zo'n 3000 uur per jaar aan staat en een pompvermogen van 2 kW/ha gebruikt elk extra collectornet ongeveer 0.6 kWh elektriciteit per m² per jaar. In formulevorm:

$$K_{\text{ElekCollectornet}} = 0.07 * 0.6 * N_{\text{collectornet}} \quad [\text{€ per m}^2 \text{ per jaar}]$$

waarin N_{collectornet} het aantal netten is (0 bij het dubbel gebruik van standaard netten).

Tenslotte vraagt het verpompen van water tussen de twee putten ook elektrisch vermogen. Raaphorst *et al.* (2001) noemt een getal van 0.05 kWh per kWh warmte die aan de aquifer wordt toegevoegd of onttrokken. Omdat in alle berekeningen ervan wordt uitgegaan dat de aquifer in de zomer evenveel wordt opgeladen als dat er in de winter aan wordt onttrokken, is er uiteindelijk per kWh warmte die aan de aquifer wordt onttrokken 0.1 kWh elektriciteit nodig. In formulevorm kunnen de kosten hiervan worden uitgedrukt in

$$K_{\text{ElekAquifer}} = 0.07 * 0.028 * E_{\text{aquifer}} \quad [\text{€ per m}^2 \text{ per jaar}]$$

waarin E_{aquifer} de jaarlijkse warmte-onttrekking aan de aquifer is (in MJ/(m² jaar)). De term 0.36 is het resultaat van de omrekening van 0.1 kWh/kWh naar = 0.028 kWh/MJ

De derde categorie met variabele kosten wordt gevormd door gederfde inkomsten die optreden bij installaties die de lichttransmissie van de kas verminderen. Om een indicatie voor deze kosten mee te nemen wordt voor alle gewassen gebruik gemaakt van de vuistregel dat 1% lichtverlies ook 1% productieverlies oplevert. Omdat minder productie echter ook minder kosten geeft (oogst-, sorteer- en veilingkosten) wordt in analogie met Raaphorst *et al.* (2001) een procent lichtverlies echter voor slechts 0.72% als inkomstenverlies gerekend. De kosten door verminderde lichttransmissie zijn dus:

$$K_{\text{Productieverlies}} = 0.72 * \% \text{Lichtverlies} * \text{Productiewaarde} \quad [\text{€ per m}^2 \text{ per jaar}]$$

Het lichtverlies is voor sommige collectornetten 0 en de productiewaarde verschilt per gewas.

Als productiewaarde zijn de volgende waarden voor de verschillende gewassen gehanteerd:

Tabel 5-1 Richtbedrag voor de waarde van de gebruikte gewassen.

Gewas	waarde [€/m ² jr]
tomaat	45
roos(onbelicht)	34
warme potplant	45 (geschat)
radijs	22
fresia (onbelicht)	18
koude potplant	40 (geschat)

bron: KWIN (1999)

Productiestijging door het verminderde ventilatieverlies (en dus hogere CO₂-concentratie) wordt in dit rapport niet meegenomen. Dit omdat alle berekeningen onder vrij lage CO₂-concentraties zijn gedaan (de referentie situatie is zuinig met energie en biedt dus, met name in de zomer, weinig rookgas-CO₂) en het verminderde ventilatieverlies alleen tot zijn recht komt bij een gemiddelde hoge CO₂-concentratie. Het uitnutten van de verminderde ventilatie in termen van CO₂ dosering en productiestijging vereist een grondige afweging van de extra kosten voor CO₂ en extra opbrengsten. Deze afweging valt buiten het bestek van dit rapport.

5.3 Resultaten

Met de bovenbeschreven berekeningswijzen kunnen de perspectieven van de verschillende combinaties van warmtepomp en collector-net met elkaar worden vergeleken. Dit zal voor alle zes gewassen en alle warmtepomp combinaties worden gedaan. Ook hier is de uitleg bij de bespreking van de resultaten voor de tomatenteelt het meest uitgebreid. Bij de andere gewassen zal alleen worden uitgeweid rond afwijkende zaken.

5.3.1 Tomatenteelt

De simulaties hebben voor alle berekende case informatie opgeleverd over het vermogen waarmee de aquifer is geladen en ontladen, de te gebruiken warmtepomp vermogens, het effect daarvan op gas- en electra-verbruik en de hoeveelheid zuivere CO₂ die moet worden ingekocht om bij gebruik van een warmtepomp over dezelfde hoeveelheid CO₂ te kunnen beschikken als in de referentiesituatie. Deze onderliggende informatie is weergegeven in bijlage II (tabel II-1).

Wanneer deze informatie wordt gebruikt in de formules die in § 6.2 zijn gepresenteerd volgt de onderstaande tabel.

Tabel 5-2 Kosten-effect van de toepassing van drie verschillende warmtepompen die zijn afgestemd op de warmte-onttrekkingscapaciteit van de verschillende collectornetten in de tomatenteelt. Alle bedragen zijn uitgedrukt in € per m² per jaar. De laatste kolom geeft de kosten per bespaarde m³ aardgas equivalenten primaire energie.

case	vaste kosten			variabel				totaal	effect	€/m ³ a.e.
	aquif.	wp	collect	gas	CO2	Elek	prod			
Referentie				7.83		0.47		8.30		
E W P	1. 51 mm ondernet	0.78	0.21	0.03	6.99	0.34	1.62	9.96	1.67	0.51
	2. 70 mm ondernet	0.95	0.23	0.15	6.81	0.42	1.87	10.43	2.13	0.54
	3. dubb. 51 ondern.	1.35	0.27	0.39	6.50	0.54	2.29	11.33	3.03	0.59
	4. 2+spec. collect.	1.49	0.31	0.27	6.20	0.66	2.74	11.69	3.39	0.54
	5. 2+koelende tralie	2.02	0.39	1.23	5.60	0.94	3.58	0.97	14.73	6.44
G M W P	1. 51 mm ondernet	0.78	0.43	0.03	7.17	0.26	0.76	9.43	1.13	0.23
	2. 70 mm ondernet	0.95	0.51	0.15	7.03	0.32	0.82	9.78	1.48	0.25
	3. dubb. 51 ondern.	1.35	0.63	0.39	6.79	0.41	0.92	10.49	2.19	0.29
	4. 2+spec. collect.	1.49	0.74	0.27	6.56	0.50	1.07	10.63	2.33	0.25
	5. 2+koelende tralie	2.02	1.01	1.23	6.07	0.74	1.26	0.97	13.30	5.00
A W P	1. 51 mm ondernet	0.78	0.37	0.03	7.31	0.22	0.75	9.46	1.16	0.27
	2. 70 mm ondernet	0.95	0.43	0.15	7.19	0.27	0.82	9.81	1.51	0.28
	3. dubb. 51 ondern.	1.35	0.52	0.39	6.99	0.36	0.92	10.53	2.23	0.32
	4. 2+spec. collect.	1.49	0.66	0.27	6.79	0.46	1.08	10.75	2.46	0.28
	5. 2+koelende tralie	2.02	0.90	1.23	6.65	0.53	1.16	0.97	13.47	5.17

Tabel 6-2 laat zien dat geen van alle opties onder de gestelde bedrijfseconomische parameters kosten-effectief is. De beide gas-aangedreven installaties leiden steeds tot iets lagere extra kosten dan de installaties die gebaseerd zijn op een elektrisch aangedreven warmtepomp. Gevoegd bij de

constatering uit het vorige hoofdstuk dat de besparingspotentie van de GMWP in alle gevallen per collector-systeem het hoogst is, mag worden verwacht dat de extra kosten per eenheid bespaarde primaire energie bij de gasmotor aangedreven warmtepomp steeds het laagst zijn. Dit blijkt ook het geval bij bestudering van de laatste kolom van de tabel.

Het vierde collector-systeem heeft bij de laagst mogelijke extra kosten (25 eurocent) per bespaarde m³ een hoog besparingsniveau. (9.4 m³ per m² per jaar, zie tabel 4-1).

De toename van de kosten die met de energievoorziening in relatie kunnen worden gebracht wordt voor het grootste deel veroorzaakt door de investeringen die nodig zijn voor de aquifer. De kosten voor CO₂-voorziening zijn eveneens relatief hoog.

Bij gebruik van een elektrisch aangedreven warmtepomp vormen de kosten voor de te betrekken elektriciteit (uiteraard) eveneens een belangrijke component van de kosten. De extra elektra-kosten worden maar zeer ten dele gecompenseerd door afname van de gaskosten. Afgemeten naar de energie-inhoud is elektriciteit dan ook belangrijk duurder dan gas.

Het elektriciteitsverbruik voor het verpompen van water van en naar de aquifer is een niet onaanzienlijke component (af te leiden uit de toename van de elektriciteitskosten bij de GMWP).

Opvallend is dat bij toepassing van de koelende tralie overal bijna een verdubbeling van de extra kosten optreedt. Dit terwijl de toename van het energiebesparingspotentieel met ongeveer 25% toeneemt ten opzichte van de constructietechnisch minder ingrijpende warmtecollectie systemen. Een tweede opvallend punt is dat de afname van de gaskosten niet in dezelfde mate afneemt als de afname van het gasverbruik. Dit kan worden geïllustreerd aan de hand van de tabelregel waar het maximale energiebesparingsperspectief optreedt (collectie-optie 5 bij gebruik van een GMWP). De energiebesparing (=gasverbruikvermindering) bij dat systeem 30% (zie tabel 4-1 of tabel II-1), terwijl de gaskosten met slechts 23% afnemen. Dit wordt veroorzaakt door de berekening van de gas-kosten volgens de momenteel bekende CDS tarieven. Dit tarief-systeem leidt ertoe dat er een soort kwantum-korting effect optreedt wanneer er bij een bepaalde aansluitcapaciteit veel gas wordt afgenomen. Uit bijlage II kan worden afgelezen dat de aansluit-capaciteit bij toenemende warmtepomp vermogens veel minder afneemt dan de afgenomen m³ gas. De toepassing van de warmtepomp geeft dus bij toepassing van het CDS-tarief een kwantum-nadeel.

Het feit dat de benodigde capaciteit minder wordt beïnvloedt dan de jaarlijkse afname kan worden begrepen uit het feit dat met de dalende COP bij toenemende warmtevraag een warmtepomp bij toenemende warmtevraag steeds meer op een ketel gaat lijken (COP ≈ 1). Het voordeel van de warmtepomp doet zich dus net niet op momenten met een hoge warmtevraag gelden, waardoor de benodigde aansluitcapaciteit nauwelijks wordt beïnvloedt.

5.3.2 Onbelichte rozenteelt.

Toepassing van de in tabel II-2 weergegeven voor de rozenteelt berekende relevante gegevens in de in § 5.2 gegeven bedrijfseconomische relaties levert de gegevens van tabel 5-3.

Tabel 5-3 Kosten-effect van de toepassing van drie verschillende warmtepompen die zijn afgestemd op de warmte-onttrekkingscapaciteit van de verschillende collectornetten in de onbelichte rozenteelt. Alle bedragen zijn uitgedrukt in € per m² per jaar. De laatste kolom geeft de kosten per bespaarde m³ aardgas equivalenten primaire energie.

case	vaste kosten			variabel				totaal	effect	€/m ³ a.e.	
	aquif.	wp	collect	gas	CO2	Elek	prod				
Referentie				5.72		0.38		6.09			
E W P	1. st. 23 mm ondernet	0.39	0.18	0.03	5.14	0.36	1.18	7.28	1.19	0.56	
	2. verd. ond.n. (51mm)	1.01	0.30	0.15	4.39	0.83	2.24	8.92	2.83	0.58	
	3. st. bovonn. (51 mm)	0.63	0.23	0.03	4.87	0.53	1.56	7.86	1.77	0.57	
	4. 3 + spec. collect.	1.39	0.42	0.27	3.71	1.21	3.24	0.73	10.97	4.88	0.68
	5. 2 + koelende tralie	2.39	0.97	1.23	2.05	1.83	5.39	0.73	14.59	8.50	0.77
G M W P	1. st. 23 mm ondernet	0.39	0.37	0.03	5.28	0.28	0.55	6.90	0.81	0.25	
	2. verd. ond.n. (51mm)	1.01	0.71	0.15	4.71	0.65	0.77	8.01	1.91	0.25	
	3. st. bovonn. (51 mm)	0.63	0.50	0.03	5.08	0.42	0.63	7.28	1.19	0.25	
	4. 3 + spec. collect.	1.39	1.21	0.27	4.19	0.88	1.01	0.73	9.68	3.58	0.32
	5. 2 + koelende tralie	2.39	2.01	1.23	3.92	0.98	1.12	0.73	12.39	6.29	0.47
A W P	1. st. 23 mm ondernet	0.39	0.34	0.03	5.34	0.32	0.56	6.98	0.89	0.28	
	2. verd. ond.n. (51mm)	1.01	0.55	0.15	5.20	0.42	0.63	7.97	1.88	0.43	
	3. st. bovonn. (51 mm)	0.63	0.55	0.03	5.20	0.42	0.63	7.47	1.38	0.32	
	4. 3 + spec. collect.	1.39	0.55	0.27	5.20	0.42	0.68	0.73	9.24	3.15	0.73
	5. 2 + koelende tralie	2.39	0.55	1.23	5.20	0.42	0.68	0.73	11.21	5.11	1.18

Tabel 5-3 toont hetzelfde beeld als tabel 5-2. In geen van de gevallen wordt de energiebesparing beloond met een verbetering van de bedrijfseconomische resultaten. De verdeling van de kosten over de verschillende posten is vergelijkbaar en ook hier leidt de GMWP tot de kleinste toename van de kosten.

De laagste kosten per m³ bespaarde primaire energie liggen overal iets hoger dan bij de tomatenteelt.

5.3.3 Warme potplantenteelt.

Toepassing van de in tabel II-3 weergegeven voor de warme potplantenteelt berekende relevante gegevens in de in § 5.2 gegeven bedrijfseconomische relaties levert de gegevens van tabel 5-4.

Tabel 5-4 Kosten-effect van de toepassing van drie verschillende warmtepompen die zijn afgestemd op de warmte-onttrekkingscapaciteit van de verschillende collectornetten in de warme potplantenteelt. Alle bedragen zijn uitgedrukt in € per m² per jaar. De laatste kolom geeft de kosten per bespaarde m³ aardgas equivalenten primaire energie.

case	vaste kosten			variabel				totaal	effect	€/m ³ a.e.
	aquif.	wp	collect	gas	CO2	Elek	prod			
Referentie				8.02		0.43		8.45		
E 1. st. 51 mm bovennet	0.66	0.25	0.03	7.07	0.19	1.73		9.93	1.48	0.42
W 2. 1 + spec. collect.	1.44	0.45	0.27	5.84	0.39	3.48	0.97	12.83	4.38	0.56
P 3. 1 + koelende tralie	1.99	0.59	1.23	5.04	0.46	4.60	0.97	14.88	6.43	0.63
G 1. st. 51 mm bovennet	0.66	0.55	0.03	7.30	0.17	0.77		9.48	1.03	0.20
M 2. 1 + spec. collect.	1.44	1.18	0.27	6.36	0.32	1.21	0.97	11.75	3.30	0.28
W 3. 1 + koelende tralie	1.99	1.75	1.23	5.73	0.38	1.44	0.97	13.50	5.05	0.31
P 3. 1 + koelende tralie	1.99	1.75	1.23	5.73	0.38	1.44	0.97	13.50	5.05	0.31
A 1. st. 51 mm bovennet	0.66	0.46	0.03	7.39	0.23	0.79		9.56	1.11	0.23
W 2. 1 + spec. collect.	1.44	0.90	0.27	7.14	0.25	0.97	0.97	11.95	3.50	0.51
P 3. 1 + koelende tralie	1.99	0.90	1.23	7.14	0.25	0.97	0.97	13.46	5.01	0.72

Tabel 5-4 laat zien dat in de warme potplantenteelt de extra kosten per bespaarde m³ aardgas equivalenten aan primaire energie lager zijn dan in de tomatenteelt. (20 eurocent). In dit geval wordt er overigens in absolute zin nog niet zo'n grote besparing gerealiseerd (5.2 m³, zie tabel 4-3). Verder is het beeld vergelijkbaar met de vorige tabellen.

5.3.4 Radijzenteelt.

Toepassing van de in tabel II-4 weergegeven voor de radoijzenteelt berekende relevante gegevens in de in § 5.2 gegeven bedrijfseconomische relaties levert de gegevens van tabel 5-5.

Tabel 5-5 Kosten-effect van de toepassing van drie verschillende warmtepompen die zijn afgestemd op de warmte-onttrekkingscapaciteit van de verschillende collectornetten in de radijzenteelt. Alle bedragen zijn uitgedrukt in € per m² per jaar. De laatste kolom geeft de kosten per bespaarde m³ aardgas equivalenten primaire energie.

case	vaste kosten			variabel				totaal	effect	€/m ³ a.e.
	aquif.	wp	collect	gas	CO2	Elek	prod			
Referentie				2.63		0.40		3.03		
E 1. st. 51 mm bovennet	0.77	0.50	0.03	1.52	0.03	1.16		4.01	0.98	0.27
W 2. 1 + spec. collect.	1.36	0.79	0.27	1.08	0.06	1.36	0.48	5.38	2.35	0.53
P 3. 1 + koelende tralie	1.62	0.79	1.23	1.08	0.06	1.36	0.48	6.61	3.58	0.81
G 1. st. 51 mm bovennet	0.80	1.37	0.03	1.57	0.02	0.63		4.41	1.38	0.30
M 2. 1 + spec. collect.	1.36	2.01	0.27	1.55	0.04	0.67	0.48	6.38	3.35	0.68
W 3. 1 + koelende tralie	1.62	2.01	1.23	1.55	0.04	0.67	0.48	7.61	4.57	0.93
P 3. 1 + koelende tralie	1.62	2.01	1.23	1.55	0.04	0.67	0.48	7.61	4.57	0.93
A 1. st. 51 mm bovennet	0.62	0.90	0.03	1.92	0.01	0.63		4.11	1.07	0.32
W 2. 1 + spec. collect.	1.36	0.90	0.27	1.92	0.01	0.67	0.48	5.60	2.57	0.76
P 3. 1 + koelende tralie	1.62	0.90	1.23	1.92	0.01	0.67	0.48	6.83	3.79	1.12

Tabel 5-5 laat zien dat de extra kosten die gemaakt moeten worden om energie te besparen met een warmtepomp in de radijzenteelt hoog zijn in vergelijking met de andere teelten. Dit komt omdat de benodigde investeringen in, met name de aquifer, niet veel lager zijn dan in andere situaties, terwijl de energiebesparing (en met name de energiekostenbesparing) in absolute zin slechts gering is.

De laagste kosten per m³ bespaarde primaire energie liggen op € 0.27 per m³ bespaarde energie, waarmee bijna 3.6 m³ aardgas per m² kan worden bespaard

5.3.5 Fresiateelt.

Toepassing van de in tabel II-5 weergegeven voor de fresiateelt berekende relevante gegevens in de in § 5.2 gegeven bedrijfseconomische relaties levert de gegevens van tabel 5-6.

Tabel 5-6 Kosten-effect van de toepassing van drie verschillende warmtepompen die zijn afgestemd op de warmte-onttrekkingscapaciteit van de verschillende collectornetten in de fresiateelt. Alle bedragen zijn uitgedrukt in € per m² per jaar. De laatste kolom geeft de kosten per bespaarde m³ aardgas equivalenten primaire energie.

case	vaste kosten			variabel				totaal	effect	€/m ³ a.e.	
	aquif.	wp	collect	gas	CO ₂	Elek	prod				
Referentie		0.52		5.39		1.19		7.10			
E W P	1. Grondkoeling	0.54	0.33		4.30	0.33	1.63	7.12	0.02		
	2. 1+st. 51 mm ondernet	0.79	0.40	0.03	3.97	0.40	2.00	7.60	0.50	0.09	
	3. 1+ 70 mm ondernet	0.93	0.45	0.15	3.78	0.41	2.22	7.95	0.84	0.14	
	4. 1 + dubbel 51 mm ond.	1.00	0.48	0.39	3.64	0.42	2.38	8.32	1.22	0.18	
	5. 3 + spec. collect.	1.50	0.70	0.27	2.78	0.49	3.37	0.39	9.50	2.40	0.25
	6. 3 + koelende tralie	1.76	1.02	1.23	1.97	0.56	4.00	0.39	10.94	3.83	0.34
G M W P	1. Grondkoeling	0.54	0.78		4.49	0.34	0.71	6.84	-0.26	-0.04	
	2. 1+st. 51 mm ondernet	0.79	1.05	0.03	4.20	0.36	0.80	7.22	0.12	0.01	
	3. 1+ 70 mm ondernet	0.93	1.19	0.15	4.03	0.37	0.84	7.52	0.41	0.04	
	4. 1 + dubbel 51 mm ond.	1.00	1.30	0.39	3.91	0.37	0.88	7.85	0.75	0.07	
	5. 3 + spec. collect.	1.50	2.60	0.27	3.27	0.41	1.04	0.39	9.48	2.38	0.19
	6. 3 + koelende tralie	1.76	2.60	1.23	3.27	0.41	1.04	0.39	10.70	3.60	0.28
A W P	1. Grondkoeling	0.54	0.84		4.68	0.34	0.72	7.13	0.02		
	2. 1+st. 51 mm ondernet	0.79	0.90	0.03	4.66	0.34	0.73	7.46	0.36	0.06	
	3. 1+ 70 mm ondernet	0.93	0.90	0.15	4.66	0.34	0.73	7.72	0.62	0.11	
	4. 1 + dubbel 51 mm ond.	1.00	0.90	0.39	4.66	0.34	0.73	8.03	0.93	0.17	
	5. 3 + spec. collect.	1.50	0.90	0.27	4.66	0.34	0.77	0.39	8.84	1.74	0.31
	6. 3 + koelende tralie	1.76	0.90	1.23	4.66	0.34	0.77	0.39	10.06	2.96	0.53

Het eerste dat in tabel 5-6 opvalt is dat er één situatie is waarin er een bedrijfseconomisch voordeel ontstaat ten gevolge van het gebruik van de warmtepomp. Dat is in de situatie waarin met behulp van een GMWP de in de zomer via grondkoeling verzamelde warmte wordt gebruikt als warmtebron voor de winter. De winst van 26 eurocent per m² per jaar komt voor een belangrijk deel voort uit het feit dat bij gebruik van een warmtepomp installatie het in de referentiesituatie genoemde bedrag van € 0.52 onder het kolom 'wp' vervalt. In de referentiesituatie zijn dit de jaarkosten die volgens 'Kwantitatieve informatie' (2000) moeten worden gehanteerd voor de koelmachine ten behoeve van de grondkoeling. Bij gebruik van een warmtepomp is er vanuit de aquifer een grote hoeveelheid koud water beschikbaar en vervallen deze kosten.

Hetzelfde geldt voor de elektriciteitskosten die in de referentiesituatie hoog zijn. De 12 kWh die in de referentie nodig zijn voor de koelmachine kunnen in de situaties waarin een warmtepomp wordt gebruikt uitgespaard worden (of liever gezegd, worden verdisconteerd via de elektriciteitskosten die aan het warmtepomp-gebruik worden toegeschreven).

Het gebruik van een gasmotor aangedreven warmtepomp in deze optie levert een energiebesparing van ruim 6 m³ aardgas per m² per jaar

Bij gebruik van de andere typen warmtepompen kan de warmte die via de grondkoeling wordt verzameld eveneens op bedrijfseconomisch (vrijwel) verantwoorde wijze voor energiebesparing worden benut.

5.3.6 Koude potplantenteelt.

Toepassing van de in tabel II-6 weergegeven voor de warme potplantenteelt berekende relevante gegevens in de in § 5.2 gegeven bedrijfseconomische relaties levert de gegevens van tabel 5-7.

Tabel 5-7 Kosten-effect van de toepassing van drie verschillende warmtepompen die zijn afgestemd op de warmte-onttrekkingscapaciteit van de verschillende collectornetten in de koude potplantenteelt. Alle bedragen zijn uitgedrukt in € per m² per jaar. De laatste kolom geeft de kosten per bespaarde m³ aardgas equivalenten primaire energie.

case	vaste kosten			variabel				totaal	effect	€/m ³ a.e.
	aquif.	wp	collect	gas	CO2	Elek	prod			
Referentie				4.47		0.45		4.91		
E 1. st. 51 mm bovennet	0.41	0.22	0.03	3.81		1.08		5.56	0.65	0.24
W 2. 1 + spec. collect.	1.04	0.52	0.27	2.55	0.02	2.28	0.86	7.54	2.62	0.35
P 3. 1 + koelende tralie	1.37	0.91	1.23	1.83	0.03	2.86	0.86	9.09	4.18	0.43
G 1. st. 51 mm bovennet	0.41	0.46	0.03	3.90		0.64		5.44	0.52	0.14
M 2. 1 + spec. collect.	1.04	1.42	0.27	2.84	0.01	0.99	0.86	7.44	2.52	0.24
W 3. 1 + koelende tralie	1.37	2.01	1.23	2.64	0.02	1.03	0.86	9.17	4.26	0.37
A 1. st. 51 mm bovennet	0.41	0.33	0.03	3.98		0.65		5.41	0.49	0.15
W 2. 1 + spec. collect.	1.04	0.90	0.27	3.46		0.88	0.86	7.42	2.51	0.40
P 3. 1 + koelende tralie	1.37	0.90	1.23	3.46		0.88	0.86	8.71	3.80	0.60

Tabel 5-7 laat zien dat in de koude potplantenteelt de extra kosten per bespaarde m³ aardgas equivalenten aan primaire energie lager kunnen zijn dan in de warme potplantenteelt. Het laagste niveau is 14 eurocent, waarbij dus bij extra kosten van €0.52 bijna 4 m³ aardgas kan worden bespaard.

Het blijft echter een onverminderd negatief effect op het bedrijfsresultaat.

5.4 Conclusies

Voor vrijwel alle doorgerekende situaties levert het gebruik van de warmtepomp onder de gestelde aannamen een verslechtering van het bedrijfseconomisch resultaat. De enige uitzondering is het perspectief van de toepassing van de installatie in de fresiateelt. In deze teelt heeft namelijk de in de winter geproduceerde koude een belangrijke waarde omdat hiermee in de zomerse koudebehoefte voor de grondkoeling kan worden voorzien.

Het perspectief is overal het minst ongunstig voor de gasmotor aangedreven warmtepomp. Bij vergelijking tussen de absorptie warmtepomp en de elektrisch aangedreven warmtepomp blijkt dat bij kleinere vermogens de AWP minder slecht uit de bus komt dan de EWP. Bij hogere aquiferbelastingen zijn de kosten per eenheid bespaarde primaire energie bij de AWP echter hoger dan voor de elektrische warmtepomp.

Het niveau van de toename van de kosten is voor 5 van de 6 teelten zodanig dat er grote wijzigingen in de randvoorwaarden en uitgangspunten moeten plaatsvinden alvorens de voorgestelde technieken wel toepasbaar kunnen worden. Hierbij kan gedacht worden aan hogere energiekosten en lagere kosten voor warmte-onttrekkende installaties. In absolute termen zijn de investeringskosten bij de GMWP-systemen het hoogst. Dit komt met name door de kosten van de warmtepomp. Bij de andere twee warmtepomp systemen zijn de kosten voor de aquifer het hoogst. Het is des te opvallender dat juist deze dure systemen overal het minst ongunstige perspectief opleveren. Dit kan worden begrepen uit het feit dat de goedkopere warmtepompen leiden tot ofwel hoge elektriciteitskosten (EWP) of tot beduidend geringere gaskosten besparingen (AWP). Hier geldt dus dat de hogere investeringen die bij een GMWP spelen leiden tot meer dan evenredig lagere variabele kosten.

De kosten in verband met de verminderde beschikbaarheid van CO₂ zijn eveneens substantieel en zijn voor de compressie warmtepompen niet veel anders dan voor de AWP. Hieruit blijkt weer eens te meer dat de beschikbaarheid van CO₂ een belangrijke parameter voor het perspectief voor warmtepompen in de tuinbouw is.

De toepassing van het CDS-tarief op de gaskosten werkt ongunstig, maar niet in een heel sterke mate. Als vuistregel zou kunnen gelden dat de gaskosten ongeveer 10% minder afnemen dan het gasverbruik, maar er zijn een aantal situaties waarin het verschil groter bleek te zijn.

Het is ook nog goed om op te merken dat er in geen van de berekende cases rekening is gehouden met een eventuele toename van de productie als gevolg van een verminderd ventilatieverlies. Dit is gedaan omdat de hier gebruikte installaties geringe koelvermogens hebben (minder dan 75 W/m²) en er dus geen grote bijdrage verwacht mag worden. In andere ontwerpen, waar gesproken kan worden over heuse koelsystemen (zoals in de gesloten kas, de waterbak gekoelde kas of een kas met dakbevoeiing, welke alle drie momenteel bestudeerd worden) zal er beslist een productie-effect optreden, zodat in die studies de extra inkomsten daaruit zeker in de analyse moeten worden meegenomen.

Indirect geeft het bovenbeschreven aan dat op het moment dat aan de beschikbaarheid van koude een waarde kan worden toegekend de situatie aanzienlijk verandert. Dit bleek ook al uit het perspectief bij de fresiateelt.

6 Conclusies

De zomerse warmte-overschotten zijn in de gemiddelde Nederlandse kassen ruim voldoende om een aquifer die in de winter als warmtebron voor de verwarming van een kas met een warmtepomp wordt gebruikt te regenereren. Voor de zes onderzochte gewassen, die een doorsnee vormen van de Nederlandse tuinbouw (met uitzondering van de belichte teelten), ligt het jaarlijkse warmte-overschot (als som van voelbare en latente warmte) tussen de 900 (warme potplant) en 1800 MJ/(m² jaar) (radijs).

De warmtebehoefte van een warmtepomp ligt in alle situaties ruim onder de berekende warmte-overschotten. Dit is zeker het geval wanneer de warmtepomp geen 100% dekkingsgraad realiseert en wanneer rekening wordt gehouden met het feit dat bij het stijgend verwarmingsvermogen dat nodig is om die hoge dekkingsgraad te realiseren de COP afneemt.

Voor de drie verschillende warmtepomp-typen die in dit rapport bestudeerd zijn blijkt dat de gasmotor aangedreven compressie-warmtepomp (GMWP) en de absorptiewarmtepomp (AWP) hogere energiebesparings-resultaten per eenheid warmte die in de seizoensopslag is opgeslagen opleveren dan de elektrisch aangedreven compressie warmtepomp¹ (EWP). Als vuistregel zou hiervoor kunnen worden gebruikt dat bij de energie intensieve teelten elke GJ die via een elektrisch aangedreven warmtepomp uit een seizoens-opslag systeem voor kasverwarming wordt gebruikt 20 m³ a.e. aan primaire energie bespaart. Een gasmotor aangedreven compressiewarmtepomp bespaart bijna 32 m³ a.e per GJ die aan een aquifer wordt onttrokken en een absorptie warmtepomp ongeveer 29 m³ a.e per GJ.

Bij de extensieve teelten, waar door de wat lagere kasluchttemperaturen wat hogere COP's kunnen worden behaald kan als vuistregel worden gebruikt dat de elektrische warmtepomp 26 m³ a.e per GJ die aan een aquifer wordt onttrokken bespaart, een gasmotor aangedreven compressie warmtepomp 36 m³ a.e. per GJ en de absorptiewarmtepomp 31 m³ a.e per GJ bespaart.

Rekening houdend met de totale warmtevraag en een afnemende COP bij toenemende dekkingsgraad ligt, uitgaande van de momenteel gebruikelijke verwarmingssysteem, voor de tomatenteelt het besparingsmaximum voor de compressiewarmtepompen op ongeveer 20 m³/(m² jr). De roos, waar een kleiner VO in het primaire net beschikbaar is komt uit op een besparingsmaximum van 12 tot 14 m³/(m² jr). De warme potplanteelt kent een besparingsmaximum van 18 tot 20 m³/(m² jr).

De radijs, waar zonder warmtepomp bij gebruik van een energiezuinige klimaatregeling nog geen 8 m³/(m² jr) wordt verbruikt heeft een energiebesparingsmaximum van ruim 5 m³/(m² jr). In de fresia en koude potplantenteelt ligt het besparingsmaximum rond de 14 m³/(m² jr).

In alle situaties worden de hoogste besparingen gerealiseerd met een gasmotor aangedreven compressiewarmtepomp. De absorptiewarmtepomp levert besparingsmaxima van 4 (radijs) tot 10 (tomaat) m³/(m² jr) en presteert in de regel ongeveer de helft in vergelijking met de gasmotor aangedreven compressiewarmtepomp.

Het besparingspotentieel wordt behalve door het maximum ook beperkt door de beschikbaarheid van warmte in de aquifer. Als er van wordt uitgegaan dat er uit een aquifer (op de lang duur) niet meer warmte mag worden onttrokken dan er in de zomer weer in wordt opgeslagen, dan kan de hoeveelheid warmte die in de zomer is opgeslagen eveneens een bovengrens aan de te behalen besparing opleveren.

¹ Uitgaande van het gebruik van elektriciteit met een gemiddeld centrale-rendement van 0.5

In dit rapport is voor de regeneratie van de aquifer gebruik gemaakt van warmte die via natuurlijke convectie aan de kaslucht kan worden onttrokken. Hierbij is met name gekeken naar het perspectief van het dubbel gebruik van reeds bestaand verwarmend oppervlak. Dit dubbel gebruik betekent dat warmte met reeds bestaande verwarmingssystemen aan de kas kan worden onttrokken door op warme dagen koud water in deze systemen te laten circuleren. Het blijkt dat in geval uitsluitend gebruik wordt gemaakt van reeds aanwezig Verwarmend Oppervlak (dat in dit verband dus tevens als Koelend Oppervlak wordt gebruikt) de warmte-onttrekking dermate gering is dat de besparingsperspectieven op 3 tot 5 m³/(m² jr) blijven steken. Een uitzondering hierop wordt gevormd door de toepassing van de gasmotor warmtepomp in de fresiateelt, waarbij met gebruik van de standaard aanwezige infrastructuur ruim 8 m³/(m² jr) kan worden bespaard.

Om het besparingspotentieel te vergroten zijn er ook een aantal systemen met additionele warmte-onttrekkende oppervlakken doorgerekend. In al die situaties kreeg de kas dus een zonne-energie collector karakter. Deze extra installaties deden de besparingsperspectieven toenemen tot waarden van 14 m³/(m² jr) in de warme potplanten en tomatenteelt en zelfs 16 m³/(m² jr) in de fresiateelt. Deze hoge besparingsresultaten worden gerealiseerd met de gasmotor aangedreven compressiewarmtepomp. De elektrische warmtepomp, die een aanmerkelijk groter beslag legt op warmte uit een aquifer, scoort bijna overal beduidend minder. De enige uitzondering wordt gevormd door de radijzenteelt, die zo weinig warmte nodig heeft dat het maximum voor het besparingsniveau niet wordt bepaald door de beschikbaarheid van warmte in de aquifer, maar door de beperkte warmtevraag.

De absorptiewarmtepomp levert vooral lagere maximale besparingen. In situaties met een beperkte beschikbaarheid van warmte in de aquifer is het besparingspotentieel van de absorptiewarmtepomp vergelijkbaar met dat van de gasmotor aangedreven compressie warmtepomp.

Een belangrijk aandachtspunt bij het gebruik van koude oppervlakken als zonne-energie collector is de temperatuur waarop het water aan de uitgang van deze systemen gebracht kan worden. Simulaties laten zien dat op dit punt een compromis moet worden gesloten tussen het realiseren van een groot temperatuur-verschil tussen koude en warme kant van de aquifer en het realiseren van een grote warmte-oogst. De effecten van het verhogen van de uitgaande temperatuur van collectornetten is kwantitatief weergegeven. Zo blijkt de warmte-oogst met ongeveer 25% af te nemen wanneer de uitgaande temperatuur van het hierbij bestudeerde systeem steeg van 14 naar 18 °C (dus ongeveer 8%-punt per graad). De weging van warmte-oogst en temperatuurverschil in de besturing van het warmte-onttrekkingssysteem heeft in dit rapport evenwel alleen in kwalitatieve zin plaatsgevonden. Een algemene constatering is dat collector-systemen in kassen, anders dan de systemen die voor zonneboilers worden gebruikt, altijd watertemperaturen afgeven die lager dan de kasluchttemperatuur is.

De bedrijfseconomische evaluatie laat zien dat vrijwel alle systemen onder de huidige randvoorwaarden en onder de gehanteerde uitgangspunten niet kosten-effectief kunnen worden ingezet.

De enige uitzondering hierop wordt gevormd door de fresiateelt. Het feit dat in deze teelt een goed perspectief ligt komt doordat in de fresiateelt gebruik wordt gemaakt van grondkoeling. Hierdoor krijgt de in de winter geproduceerde koude een bedrijfseconomische waarde. In de fresiateelt vervult een warmtepomp-systeem de plaats van een koelmachine, waardoor belangrijke kosten (€ 1.34 per m² per jaar) kunnen worden uitgespaard. In de fresiateelt zou dus zonder meer 6 m³ aardgas per m² per jaar kunnen worden bespaard, waarbij het bedrijfsresultaat jaarlijks € 0.26 per zou verbeteren.

De onevenredig hoge kosten die met het gebruik van de warmtepomp samenhangen komen voor het grootste deel voort uit de kosten voor de aquifer en de warmtepomp (met name bij gebruik van een gasmotor warmtepomp). Andere kosten, zoals extra kosten voor CO₂ en elektriciteit, spelen echter ook een grote rol. Opvallend is dat bij gebruik van de Gasmotor aangedreven warmtepomp de hoogste investeringsbedragen optreden, maar dat desalniettemin de totale kostenstijging door de inzet van deze machine in de meeste gevallen het laagst is. De hogere investeringen worden blijkbaar meer dan evenredig gecompenseerd door lagere variabelen kosten.

De systemen die niet kosten-effectief bleken leverden meerkosten op die in het gunstigste geval tussen de 20 en 40 eurocent per bespaarde m³ aardgas bedroegen.

In alle systemen waarin gebruik werd gemaakt van een met de goot-constructie geïntegreerde koelende ribbenbuis bedroegen de jaarlijkse meerkosten rond de € 3,- en leidde deze installatie overal tot belangrijke verslechtering van het perspectief. Mede gezien het feit dat dit systeem ongeschikt is voor toepassing in bestaande kassen is het perspectief voor deze koelende tralieligger zeer ongunstig.

7 Aanbevelingen

Het hier beschreven onderzoek laat zien dat het onttrekken van warmte aan de kaslucht een minstens even groot aandachtspunt vormt in de toepassing van warmtepompen in de glastuinbouw als de inpassing van de warmtepomp in het verwarmingssysteem.

Het gebruik van de standaard aanwezige oppervlakken leiden tot dusdanig kleine warmte-onttrekkende vermogens dat de installaties niet kosteneffectief kunnen worden geplaatst.

De toepassing van de warmtepomp lijkt dan ook alleen perspectief te hebben als er een duidelijke waarde aan de in de winter geproduceerde koude kan worden toegekend.

Indien deze koude middels goedkope koelsystemen in de zomer voordeel kan opleveren in de zin van substantiële koeling, waardoor CO₂ kosten kunnen worden vermeden (door verminderde ventilatie) en wellicht productieniveau's kunnen toenemen (door hogere CO₂-concentraties) komt het totale systeem in een andere context te liggen en kunne de hoge kosten wellicht voldoende worden gecompenseerd.

Het perspectief van het warmtepomp systeem in de fresiateelt, en daarmee wellicht ook in andere teelten met grondkoeling is zonder meer positief. Zorgvuldig uitgekende projecten op grond van de inzet van een gasmotor aangedreven compressiewarmtepomp verdienen daarom beslist nadere aandacht en kunnen worden gericht op demonstratieprojecten.

8 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

Klopstra, A, en C. Geuzendam, 2001, De boer op met energieopslag in de bodem, IVAM Environmental Research, Amsterdam, doc. nr. 0113 (O)

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

KWIN, 1999; Kwantitatieve informatie voor de glastuinbouw 1999-200; PBG; Naaldwijk

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

Campen, J.B, H.F. de Zwart en N.J. van de Braak, 2001, Koeling en Ontvochtiging in de floriadekas, IMAG Rapport 2001-102

Swinkels, G.L.A.M. J.P.G. Huijs en H.F. de Zwart, 2000, Standaard teelten, IMAG-nota 2000-85

Bijlage I – Compressie warmtepomp karakteristieken (bijdrage TNO-MEP)

Aan de hand van leveranciergegevens zijn karakteristieken van een concrete compressor opgesteld. De karakteristieken zijn dimensieloos gemaakt, zodat ze gebruikt kunnen worden voor verschillende capaciteiten.

Er is uitgegaan van een 6-cilinder zuigercompressor. Gegevens m.b.t. de koelcapaciteit, het mechanisch vermogen en de condensorwarmte zijn bepaald voor verschillende toerentallen en condensatietemperaturen. De verdampingstemperatuur is op een constante waarde van 5 °C gehouden, zodat het medium uit de aquifer het afkoeltraject 15-->8 °C kan doorlopen in de verdamper.

Als koudemiddel is R134a aangehouden. De oververhitting van het zuiggas bedraagt 5 K, en onderkoeling van het condensaat uit de condensor is niet aangenomen.

De relaties zijn uitgedrukt in verhouding tot de overeenkomstige waarden in een referentiepunt. Dit referentiepunt is gekozen bij een condensatietemperatuur van 35 °C en het nominale toerental. In het referentiepunt bedraagt de COP 5,715. De waarde van de COP in andere punten kunnen bepaald worden aan de hand van ondergenoemde relaties.

De gegevens zijn met curve-fitting programmatuur verwerkt. Als algemeen bruikbare relatie is de volgende functie gevonden:

$$z = \frac{a + bx + cy}{1 + dx + ex^2 + fx^3 + gy}$$

Hierin is variabele x steeds de condensatietemperatuur T_c (°C), en variabele y de verhouding tussen het toerental en het toerental in het referentiepunt, n/n_0 . De relaties gelden voor $35 \leq T_c \leq 55$ °C, en $0,55 \leq n/n_0 \leq 1$ (-), maar laten extrapolatie wel toe.

De relaties zijn bepaald voor de volgende variabelen z: de verhouding tussen de condensorwarmte en de condensorwarmte in het referentiepunt (Q_c/Q_{c0}), en analoog voor het mechanisch vermogen (P/P_0). Bij elke conditie is dan de capaciteit bekend, en kan de COP worden berekend uit:

$$COP = COP_0 * \frac{Q_c / Q_{c0}}{P / P_0}$$

De waarden van de coëfficiënten a-g zijn als volgt:

Voor Q_c/Q_{c0} :

a=	-0,153654606
b=	0,002527088
c=	2,200354026
d=	0,024491242
e=	-0,000274922
f=	4,02616E-06
g=	0,443543263

Voor P/P_0 :

a=	-0,083647728
b=	0,001396069
c=	0,857864249
d=	0,003981123
e=	-0,000371551
f=	3,53114E-06
g=	-0,011189528

De maximale afwijking t.o.v. de leveranciergegevens bedraagt voor de functie Q_c/Q_{c0} 0,1%, en voor P/P_0 0,2%.

Een tweetal voorbeelden

1. Stel dat in het referentiepunt een condensorcapaciteit van 1000 kW zou gelden. Hoe zou de warmtepomp presteren bij $T_c=48$ °C en 90% van het nominale toerental?

Volgens de gevonden functies zou bij $x=48$ en $y=0,9$ Q_c/Q_{c0} gelijk aan 0,816206 zijn, en P/P_0 aan 1,055844. De COP zou dan $5,715 \cdot 0,816206 / 1,055844 = 4,418$ worden.

In het referentiepunt zou P_0 gelijk zijn aan $Q_{c0}/COP_0 = 1000/5,715 = 175$ kW. In de nieuwe situatie is P gelijk aan $1,055844 \cdot P_0 = 184,7$ kW, en Q_c gelijk aan $0,816206 \cdot Q_{c0} = 816,2$ kW.

2. Stel dat de warmtepomp 1000 kW moet leveren bij $T_c=55$ °C en het nominale toerental. Wat presteert de warmtepomp bij $T_c=45$ °C en 80% van het nominale toerental?

Bij $x=55$ en $y=1$ wordt $Q_c/Q_{c0} = 0,831448$, en $P/P_0 = 1,267645$. De COP bedraagt dan $5,715 \cdot 0,831448 / 1,267645 = 3,748$.

Met $Q_c = 1000$ is dus $Q_{c0} = 1202,7$ kW, en met $COP_0 = 5,715$ wordt $P_0 = 1202,7 / 5,715 = 210,4$ kW.

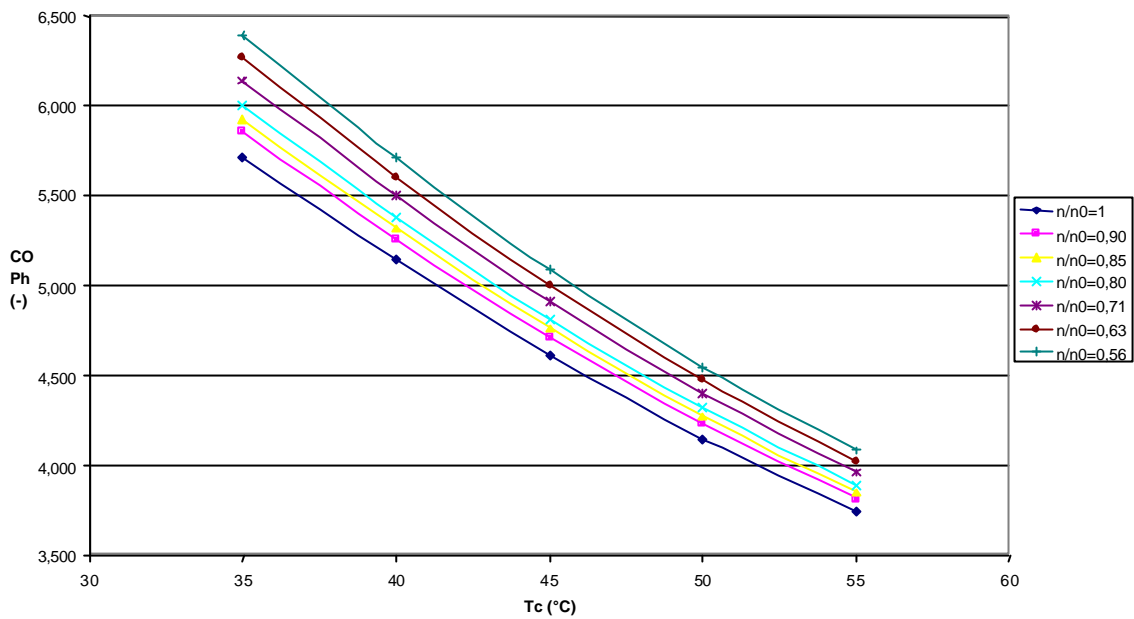
Bij $x=45$ en $y=0,8$ wordt $Q_c/Q_{c0} = 0,758829$, en $P/P_0 = 0,899786$. De COP bedraagt dan $5,715 \cdot 0,758829 / 0,899786 = 4,820$. De condensor levert 912,6 kW, en dat kost aan aandrijfvermogen 189,4 kW.

Grafische weergave

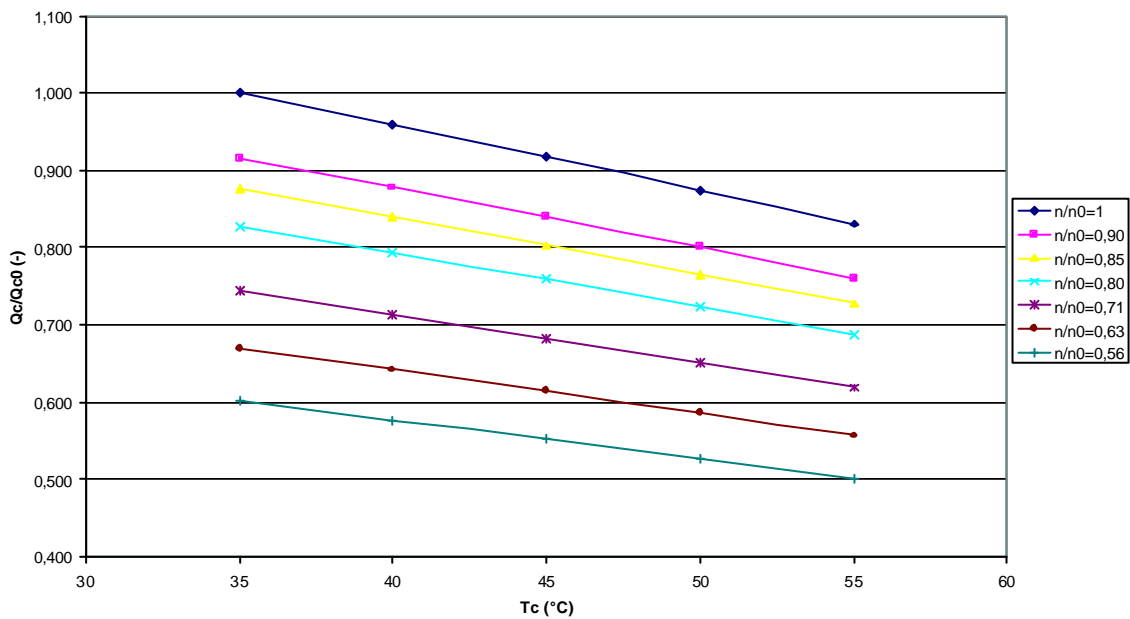
In de volgende figuur is het verband gegeven tussen de COP van de warmtepomp, de condensatietemperatuur T_c en het toerental n/n_0 . Er is dus geen eenduidig verband tussen COP en T_c ; één en dezelfde COP kan bereikt worden bij verschillende waarden van T_c door het toerental te variëren. Evenzo kan bij een gegeven T_c de COP variëren door het toerental anders in te stellen.

De figuur zegt niets over de capaciteiten van de condensor en de compressor waarbij een bepaalde combinatie van COP, T_c en n/n_0 optreedt. Dit laat de andere figuur zien, die de relatie aangeeft tussen de condensorwarmte, de condensatietemperatuur en het toerental.

COPh als functie van Tc



Qc/Qc0 als functie van Tc



Implementatie in rekenmodel van IMAG

De relaties zijn opgesteld vanuit de optiek dat de condensatietemperatuur en het toerental bekend zijn. Er mag verondersteld worden dat aan de verdamperkant de temperaturen constant zijn, zowel van het koudemiddel als van het medium in de aquifer. Een constante temperatuur van dat medium aan de uittrede van de verdamper houdt in dat het debiet geregeld moet worden.

Aan de condensorkant ligt de zaak gecompliceerder. Het debiet van het CV-water is constant. De temperatuur waarmee het water de condensor binnengaat, is de retourtemperatuur, die vastligt middels de stooklijn van de kas. Zodra men T_c (en n/n_0) kiest, is Q_c bekend uit bovengenoemde functie. De enige onbekende temperatuur is dan nog de temperatuur waarmee het water de condensor uittreedt. Deze temperatuur wordt echter bepaald door de dimensies van de condensor; er is een zeker VO geïnstalleerd, waarmee men het maar in alle situaties moet doen. In feite komt het er op neer, dat bij een zekere keuze van T_c de onbekende watertemperatuur op twee verschillende manieren kan worden berekend: één uit de energiebalans van de condensor, en één uit de warmte-overdrachtsrelaties van de condensor. Indien men op twee verschillende waarden uitkomt, is T_c kennelijk onjuist gekozen, en dient men de procedure te herhalen voor een andere waarde van T_c en/of n/n_0 , net zolang tot de beide berekeningen op dezelfde temperatuur uitkomen.

Bijlage II – Kentallen waarop de bedrijfseconomische kostenberekening is gebaseerd

In hoofdstuk 5 is een berekeningssystematiek voor de bepaling van de bedrijfseconomische effecten van de inzet van warmtepompen en collectornetten uiteengezet. Al de beschreven relaties zijn afhankelijk van simulatiedata zoals het gasverbruik, de maximale gas-afname, de capaciteit van de aquifer etc.

In deze bijlage worden alle onderliggende gegevens getoond. Elke regel uit de verschillende tabellen heeft als input gegolden voor de corresponderende regel in de tabellen van hoofdstuk 5.

Paquif is het thermisch vermogen van de aquifer en dus het resultaat van het in § 5.2 genoemde $\max(P_{\text{regeneratie}}, P_{\text{warmteonttrekking}})$, waarbij voor zowel het regeneratie- als het onttrekkingsvermogen het etmaal gemiddelde vermogen is gebruikt.

Eaquif is de hoeveelheid warmte die via de aquifer wordt gebufferd (de uiteindelijke warmtestroom is dus twee maal zo groot, namelijk de som van de warmtestroom in en uit).

Tabel II-1 Uitgangspunten voor de relevante grootheden in de bedrijfseconomische berekeningen voor de tomatenteelt. De productwaarde is € 45,- per m²/jaar.

	Paquif W/m ²	Eaquif MJ/(m ² jr)	WP W/m ²	gasverb m ³ /(m ² jr)	aansluitcap m ³ /(ha uur)	CO2 kg/(m ² jr)	elktr. kWh(m ² jr)	
Referentie	0	0	0.0	44.1	176	0.0	7	
E W P	1. 51 mm ondernet	29	154	2.0	38.1	168	3.4	23
	2. 70 mm ondernet	36	188	2.4	36.7	167	4.2	27
	3. dubb. 51 ondern.	50	243	3.2	34.6	164	5.4	33
	4. 2+spec. collect.	56	299	3.9	32.4	161	6.6	39
	5. 2+koelende tralie	75	409	5.4	28.0	155	9.4	51
G M W P	1. 51 mm ondernet	29	154	2.3	39.3	171	2.6	11
	2. 70 mm ondernet	36	188	2.8	38.3	169	3.2	12
	3. dubb. 51 ondern.	50	243	3.6	36.5	168	4.1	13
	4. 2+spec. collect.	56	299	4.4	34.8	166	5.0	15
	5. 2+koelende tralie	75	409	6.4	31.2	161	7.4	18
A W P	1. 51 mm ondernet	29	154	10.1	39.9	175	2.2	11
	2. 70 mm ondernet	36	188	13.3	38.9	175	2.7	12
	3. dubb. 51 ondern.	50	243	18.5	37.2	175	3.6	13
	4. 2+spec. collect.	56	299	25.5	35.6	175	4.6	15
	5. 2+koelende tralie	75	341	40.0	34.3	176	5.3	17

Tabel II-2 Uitgangspunten voor de relevante grootheden in de bedrijfseconomische berekeningen voor de onbelichte rozenteelt. De productwaarde is € 34,- per m²/jaar.

	Paquif W/m ²	Eaquip MJ/(m ² jr)	WP W/m ²	gasverb m ³ /(m ² jr)	aansluitcap m ³ /(ha uur)	CO2 kg/(m ² jr)	elctr. kWh(m ² jr)
Referentie	0	0	0.0	29.9	148	0.0	5
E	15	102	1.6	25.8	143	3.6	17
W	38	236	3.7	20.3	136	8.3	32
P	24	150	2.3	23.8	140	5.3	22
	52	352	6.1	15.6	128	12.1	46
	89	576	20.4	6.1	91	18.3	77
G	15	102	1.8	26.7	145	2.8	8
M	38	236	4.2	22.5	140	6.5	11
W	24	150	2.7	25.2	143	4.2	9
P	52	352	8.2	18.9	133	8.8	14
	89	416	15.0	17.0	131	9.8	16
A	15	102	8.8	26.8	148	3.2	8
W	38	143	20.0	25.6	148	4.2	9
P	24	143	20.0	25.6	148	4.2	9
	52	143	20.0	25.6	148	4.2	10
	89	143	20.0	25.6	148	4.2	10

Tabel II-3 Uitgangspunten voor de relevante grootheden in de bedrijfseconomische berekeningen voor de warme potplanten teelt. De productwaarde is € 45,- per m²/jaar.

	Paquif W/m ²	Eaquip MJ/(m ² jr)	WP W/m ²	gasverb m ³ /(m ² jr)	aansluitcap m ³ /(ha uur)	CO2 kg/(m ² jr)	elctr. kWh(m ² jr)
Referentie	0	0	0.0	43.0	198	0.0	6
E	25	176	2.7	36.4	188	1.9	25
W	54	397	6.6	27.9	173	3.9	50
P	74	529	9.7	22.6	162	4.6	66
G	25	176	3.1	37.9	191	1.7	11
M	54	397	7.9	31.3	181	3.2	17
W	74	529	12.6	27.1	172	3.8	21
P	25	176	16.2	38.1	195	2.3	11
A	54	249	40.0	36.1	196	2.5	14
W	74	249	40.0	36.1	196	2.5	14
P							

Tabel II-4 Uitgangspunten voor de relevante grootheden in de bedrijfseconomische berekeningen voor de radijzen teelt. De productwaarde is € 22,- per m²/jaar.

	Paquif W/m ²	Eaquif MJ/(m ² jr)	WP W/m ²	gasverb m ³ /(m ² jr)	aansluitcap m ³ /(ha uur)	CO2 kg/(m ² jr)	elktr. kWh(m ² jr)
Referentie	0	0	0.0	7.8	117	0.0	6
E 1. st. 51 mm bovennet	29	134	7.6	2.6	84	0.3	17
W 2. 1 + spec. collect.	51	163	15.0	1.4	63	0.6	19
P 3. 1 + koelende tralie	61	163	15.0	1.4	63	0.6	19
G 1. st. 51 mm bovennet	30	134	9.4	3.3	81	0.2	9
M 2. 1 + spec. collect.	51	142	15.0	3.1	82	0.4	10
W 3. 1 + koelende tralie	61	142	15.0	3.1	82	0.4	10
P 1. st. 51 mm bovennet	23	106	40.0	4.4	97	0.1	9
A 2. 1 + spec. collect.	51	106	40.0	4.4	97	0.1	10
W 3. 1 + koelende tralie	61	106	40.0	4.4	97	0.1	10

Tabel II-5 Uitgangspunten voor de relevante grootheden in de bedrijfseconomische berekeningen voor de fresiateelt. De productwaarde is € 18,- per m²/jaar.

	Paquif W/m ²	Eaquif MJ/(m ² jr)	WP W/m ²	gasverb m ³ /(m ² jr)	aansluitcap m ³ /(ha uur)	CO2 kg/(m ² jr)	elktr. kWh(m ² jr)
Referentie	0	0	0.0	23.8	176	0.0	17
1. Grondkoeling	20	181	4.2	16.4	162	3.3	23
E 2. 1+st. 51 mm ondernet	30	232	5.6	14.3	157	4.0	29
W 3. 1+ 70 mm ondernet	35	260	6.7	13.1	153	4.1	32
P 4. 1 + dubbel 51 mm ond.	37	280	7.4	12.2	151	4.2	34
5. 3 + spec. collect.	56	398	12.9	7.1	134	4.9	48
6. 3 + koelende tralie	66	479	22.1	3.6	106	5.6	57
1. Grondkoeling	20	181	4.7	17.5	165	3.4	10
G 2. 1+st. 51 mm ondernet	30	232	6.8	15.6	161	3.6	11
M 3. 1+ 70 mm ondernet	35	260	8.0	14.6	158	3.7	12
W 4. 1 + dubbel 51 mm ond.	37	280	8.9	13.8	157	3.7	13
P 5. 3 + spec. collect.	56	352	20.0	11.2	134	4.1	15
6. 3 + koelende tralie	66	352	20.0	11.2	134	4.1	15
1. Grondkoeling	20	181	36.0	18.2	173	3.4	10
A 2. 1+st. 51 mm ondernet	30	185	40.0	18.1	173	3.4	10
W 3. 1+ 70 mm ondernet	35	185	40.0	18.1	173	3.4	10
P 4. 1 + dubbel 51 mm ond.	37	185	40.0	18.1	173	3.4	10
5. 3 + spec. collect.	56	185	40.0	18.1	173	3.4	11
6. 3 + koelende tralie	66	185	40.0	18.1	173	3.4	11

Tabel II-6 Uitgangspunten voor de relevante grootheden in de bedrijfseconomische berekeningen voor de koude potplanten teelt. De productwaarde is € 40,- per m²/jaar.

	Paquif W/m ²	Eaquip MJ/(m ² jr)	WP W/m ²	gasverb m ³ /(m ² jr)	aansluitcap m ³ /(ha uur)	CO2 kg/(m ² jr)	elktr. kWh(m ² jr)
Referentie	0	0	0.0	18.8	154	0.0	6
E 1. st. 51 mm bovennet	15	104	2.2	14.6	142	0.0	15
W 2. 1 + spec. collect.	39	289	8.1	7.2	117	0.2	33
P 3. 1 + koelende tralie	51	375	18.3	3.6	97	0.3	41
G 1. st. 51 mm bovennet	15	104	2.4	15.2	145	0.0	9
M 2. 1 + spec. collect.	39	289	9.8	8.7	125	0.1	14
W 3. 1 + koelende tralie	51	319	15.0	7.7	119	0.2	15
A 1. st. 51 mm bovennet	15	104	8.2	15.5	148	0.0	9
W 2. 1 + spec. collect.	39	197	40.0	12.5	136	0.0	13
P 3. 1 + koelende tralie	51	197	40.0	12.5	136	0.0	13