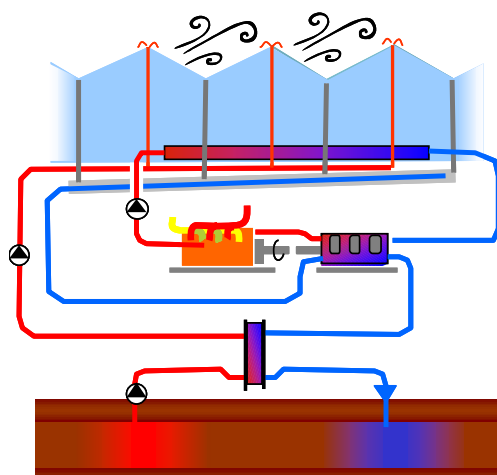
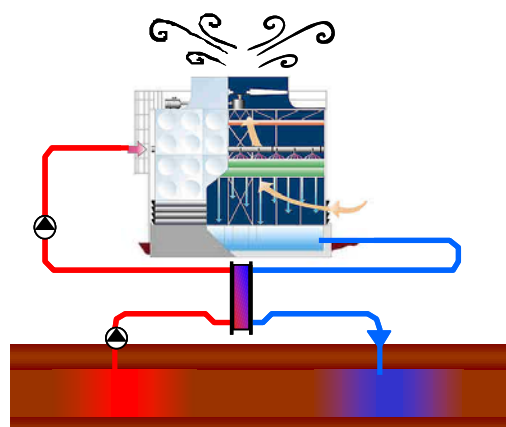


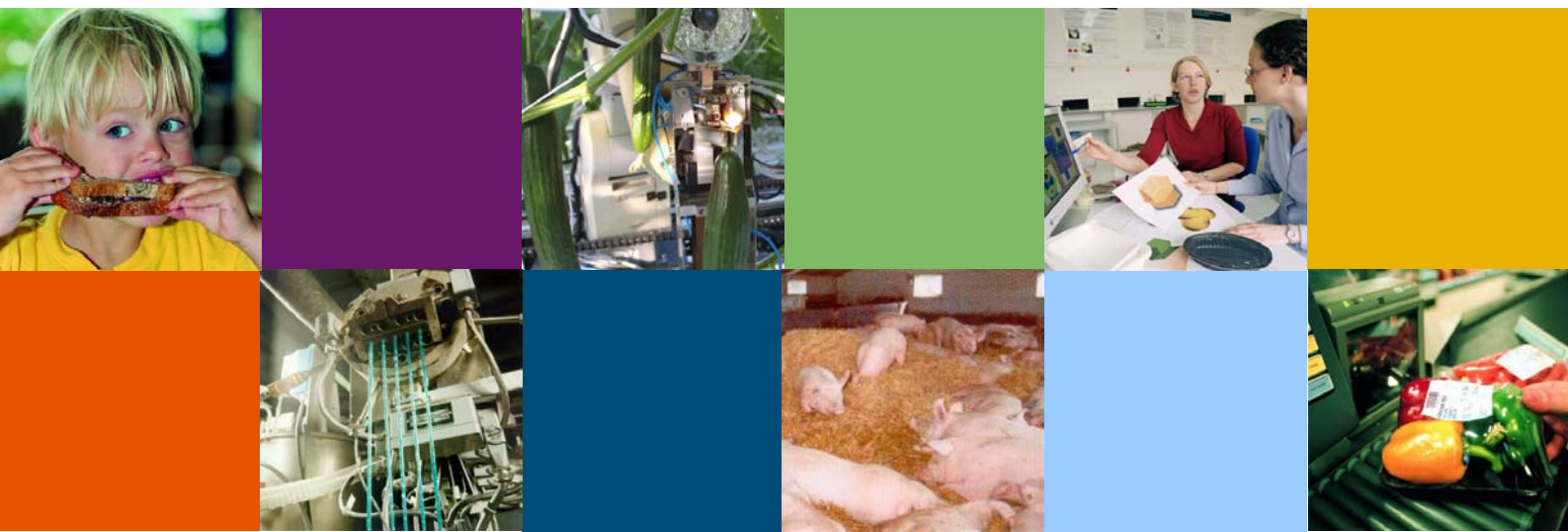
# Energiezuinige koudeproductie systemen voor (semi) gesloten kassen



H.F. de Zwart  
V. Mohammadkhani  
J.J. Breuer

Report 392

Onderzoek in het kader van het Convenant Glastuinbouw en Milieu  
In opdracht van:

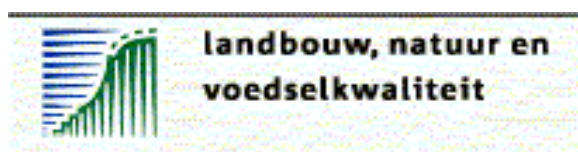


## Colofon

Dit onderzoek is Gefinancierd door



en



|                     |  |                             |
|---------------------|--|-----------------------------|
| Title               | Energiezuinige koudeproductie systemen voor (semi) gesloten kassen |                             |
| Author(s)           | H.F. de Zwart; V. Mohammadkhani, J.J. Breuer                       |                             |
| A&F number          | 392  |                             |
| ISBN-number         | ISBN 90-6754-900-2   |                             |
| Date of publication | maart 2004   |                             |
| Confidentiality     | non  |                             |
| Project code.       | PT-projectnr. 11678  | A&F-projectnr. 630.54302.01 |

Agrotechnology & Food Innovations B.V.  
P.O. Box 17  
NL-6700 AA Wageningen  
Tel: +31 (0)317 475 024  
E-mail: [info.agrotechnologyandfood@wur.nl](mailto:info.agrotechnologyandfood@wur.nl)  
Internet: [www.agrotechnologyandfood.wur.nl](http://www.agrotechnologyandfood.wur.nl)

© Agrotechnology & Food Innovations B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, hetzij mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.

*All right reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or*



The quality management system of Agrotechnology & Food Innovations B.V. is certified by SGS International Certification Services EESV according to ISO 9001:2000.





## Samenvatting

In de tuinbouw komt steeds meer vraag naar koeling. Voorheen werd er vooral gekoeld in de Freesia- en Alstroemeria-teelt. Dit zijn teelten waarbij grondkoeling wordt toegepast, die leiden tot een koudebehoefte van 200 tot 300 MJ per m<sup>2</sup> per jaar. De beschikking over koude is een voorwaarde voor de jaarrond productie van Freesia en Alstroemeria. Bij Freesia daalt de omzet zonder de grondkoeling met ongeveer € 11 per jaar, waardoor de waarde van deze koude voor de Freesiateelt in de orde van € 0,04 per MJ ligt.

De laatste jaren is ook de kaslucht-koeling in opmars. Hierbij moet concreet worden gedacht aan Phalenopsis. Ook in de aardbeienteelt is er veel belangstelling voor nachtelijk koeling van de kaslucht. De grootste koudebehoefte ontstaat echter wanneer gestreefd wordt naar een geheel gesloten kas, zoals momenteel wordt beproefd en ontwikkeld bij Themato. In deze situaties is de koudebehoefte ongeveer 2000 MJ/(m<sup>2</sup> jaar).

Gegeven het feit dat deze koude het mogelijk maakt de kas dicht te houden, en daarmee ongeveer 20% productiestijging gerealiseerd kan worden is de waarde van deze koude ongeveer € 0,004 per MJ, ofwel bijna een halve eurocent per MJ.

De meest bekende wijze van koudeproductie is de methode die in teelten met grondkoeling wordt toegepast, namelijk de elektrisch aangedreven koelmachine, gekoppeld aan een systeem waarmee de warmte die bij de koeling vrijkomt wordt vernietigd. Deze uitvoeringsvorm is robuust en veelgebruikt, maar verbruikt een grote hoeveelheid elektriciteit (0.074 kWh/MJ koude, wat neerkomt op 15 tot 22 kWh per m<sup>2</sup> kas met grondkoeling per jaar).

Dit energieverbruik kan fors worden beperkt door gebruik te maken van seizoensbuffering in een ondergronds energieopslagsysteem. In dat geval kan de koude namelijk in de winter met een koeltoren met behulp van buitenlucht worden gemaakt en hoeft er geen koelmachine te worden gebruikt.

De tussenkomst van het opslagsysteem zorgt evenwel voor een duidelijk energieverbruik voor het verpompen van water over het opslagsysteem. Deze verbruikspost wordt groter naarmate het temperatuurverschil tussen warme en koude kant van het ondergronds energieopslagsysteem kleiner is. Situaties waarbij de koude wordt gebruikt voor grondkoeling zijn daarbij in het nadeel ten opzichte van situaties waarin de koude wordt gebruikt om de kaslucht op een acceptabele temperatuur te houden.

Desalniettemin doet het gebruik van een koeltoren het elektriciteitsverbruik voor de koeling dalen met 65% in grondkoeling situaties tot 80% bij kasluchtkoeling met systemen die vergelijkbaar zijn met de gesloten kas. Indien het benodigde ondergrondse energieopslagsysteem kan worden aangelegd voor minder dan € 875,- per m<sup>3</sup>/uur blijken de investeringen voor deze energiebesparingsmaatregel in de freesiateelt uit te komen op een terugverdientijd van 11 jaar. De bestudering van productspecificaties van koeltorens laat zien dat apparaten van alleszins hanteerbare omvang tot zeer grote koudeproductiecapaciteiten leiden.

Nog hogere besparingsprestaties kunnen worden behaald middels de benutting van passieve koudeproductiesystemen. Anders dan bij de koeltoren, hoeven hier geen grote hoeveelheden buitenlucht doorheen geblazen te worden. Binnen deze categorie is gekeken naar de benutting van het regenwaterbassin, het gebruik van een Road Energy System en het gebruik van gangbare deksproeiers (maar dan niet voor koeling in de zomer, maar voor koudeproductie in winterse nachten).

Het blijkt dat van deze passieve systemen alleen het gebruik van deksproeiers qua capaciteit een rol kan spelen. De andere twee hebben een zodanig kleine koudeproductiecapaciteit dat ze slechts 10 tot 20% van de koudebehoefte van grondkoelings-situaties kunnen invullen.

Het gebruik van deksproeiers in de winter betekent dat het water dat afgekoeld moet worden op momenten dat het kasdek koud is over het dek wordt gesproeid. Dit is meestal 's nachts en/of bij een gesloten energiescherm. Het loopt vervolgens via de goten en de hemelwater-afvoer terug naar het bassin, waar het via een warmtewisselaar de koude kan overdragen op het ondergrondse energie-opslagsysteem.

Een bijkomend voordeel van dit systeem is dat kasdek door de besproeiing met relatief warm water minder koud wordt. Daardoor neemt de verwarmingsbehoefte af, en dus ook het gasverbruik. Het simulatiemodel dat in dit rapport wordt gebruikt (KASPRO) berekent bij het zodanig gebruik van deksproeiers voor een tomatenteelt een gasbesparing van  $0.5 \text{ m}^3$  per  $\text{m}^2$  per jaar en voor de freesiateelt  $1.1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ .

In de freesiateelt kan het dekbesproeiingssysteem voldoende koude genereren om in de zomer voldoende grondkoeling te realiseren. Ook qua investeringen biedt dit systeem perspectieven. Wanneer ook hier wordt uitgegaan van € 70.000 per ha voor het ondergronds energieopslagsysteem (hetzelfde als de eerder genoemde € 875,- per  $\text{m}^3/\text{uur}$ ) leidt in de freesiateelt de overstap van de gangbare koelmachine naar het energiezuinige dekbevoeiingssysteem tot een terugverdientijd van 6 jaar. De energiebesparing bedraagt in dit geval  $5 \text{ m}^3$  aardgas equivalenten.

Er is evenwel nog geen praktijkervaring naar dit systeem gedaan, zodat aanbevolen wordt hier nader onderzoek naar te doen.

De energetisch meest perspectiefvolle optie is het gebruik van de gasmotor aangedreven warmtepomp als systeem waarmee in de winter, met gebruik van de vrijkomende warmte, een koudevoorraad voor de zomer gemaakt kan worden. Er komt in dat geval meer warmte vrij dan er aan primaire energie wordt ingestoken (een typische eigenschap van een warmtepomp).

Onder de gehanteerde economische uitgangspunten, waarbij met name de kosten voor het ondergronds energieopslagsysteem een belangrijke rol speelt, kunnen koudeproductiesystemen op basis van warmtepompen voor de freesiateelt in  $6\frac{1}{2}$  jaar worden terugverdiend.

Het energetisch best presterende systeem is gebaseerd op een gasmotor aangedreven warmtepomp. In de praktijk zal dit een combinatie zijn van een elektrisch aangedreven warmtepomp en een WK-installatie. De jaarlijkse energiebesparing die hiermee wordt gerealiseerd belooft in de freesiateelt  $12 \text{ m}^3$  aardgas equivalenten per jaar.

Wanneer de elektriciteit uit het openbare net wordt betrokken is de terugverdientijd een half jaar korter en daalt de energiebesparing naar  $8 \text{ m}^3$  aardgas equivalenten.

### **Conclusie voor grondkoelingsbedrijven**

Voor teelten met grondkoeling kan geconcludeerd worden dat in geval een ondergronds energieopslagsysteem tegen de in dit rapport genoemde kosten aangelegd kan worden (dus € 70.000,- voor een systeem met een capaciteit van  $80 \text{ m}^3/\text{uur}$ ) zowel het gebruik van warmtepompen als het gebruik van deksproeiers bedrijfseconomisch renderen en een respectabele energiebesparing opleveren ten opzichte van het gebruik van een koelmachine in de zomer. Vanuit energiebesparingsoogpunt verdienen de warmtepomp-systemen dan een grote voorkeur.

### **Conclusie voor (semi) gesloten kassen**

Voor (semi) gesloten kassen is het gebruik van de gasmotor aangedreven warmtepomp de feitelijke referentie. Er wordt hierbij dus reeds op een zo energie zuinig mogelijke wijze koude geproduceerd.

De koudeproductie die daarbij vrijkomt is evenwel gelimiteerd. Hierdoor is een gesloten kas altijd slechts in beperkte mate gesloten. Hetzij door een beperkt deel van de kas te sluiten (zoals bij Themato), ofwel door de gehele kas in beperkte mate te sluiten.

De koude die voor een grotere mate van sluiting nodig is zal dus altijd op een minder energiezuinige wijze geproduceerd moeten worden.

De conclusies die in dit rapport kunnen worden getrokken over de koudeproductieperspectieven van het winterse gebruik van deksproeiers geven echter zicht op een mogelijkheid de mate van sluiting duidelijk te laten toenemen zonder een groot extra energieverbruik.

Berekeningen laten zien dat de extra koudeproductie middels de deksproeiers de fractie gesloten kas met ruim 10 %-punten kan laten toenemen met slechts een gering extra elektriciteitsverbruik voor de koudeproductie (2.8 kWh). Het warmere kasdek geeft ook nog eens een wat lager gasverbruik voor de verwarming van de kas.

Een complete inschatting van het bedrijfseconomisch en energetisch effect van deze vergroting van de beschikbaarheid van koude kan evenwel niet gepresenteerd worden omdat er onvoldoende gegevens beschikbaar zijn van de kosten voor de benutting van deze koude.

# Inhoud

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Colofon</b>  | <b>2</b>  |
| <b>Samenvatting</b>                                   | <b>1</b>  |
| <b>1 Inleiding</b>                                    | <b>5</b>  |
| <b>2 Koudebehoefte in de tuinbouw</b>                 | <b>7</b>  |
| 2.1 Koudebehoefte bij wortelkoeling                   | 7         |
| 2.2 Koudebehoefte bij kasluchtkoeling                 | 8         |
| <b>3 Koudeproductiesystemen</b>                       | <b>10</b> |
| 3.1 Koudeproductie met koelmachines                   | 10        |
| 3.2 Koudeproductie met behulp van koeltorens          | 13        |
| 3.3 Passieve koudeproductie                           | 19        |
| 3.4 Koudeproductie met behulp van warmtepompen        | 26        |
| 3.5 Koudeproductiesystemen op een rij                 | 30        |
| <b>4 Uitwerking voor een praktijksituatie</b>         | <b>32</b> |
| 4.1 Koudeproductie-alternatieven voor de freesiateelt | 32        |
| 4.2 Additionele koudeproductie voor gesloten kassen   | 35        |
| <b>5 Conclusies en aanbevelingen</b>                  | <b>38</b> |
| 5.1 Conclusies  | 38        |
| 5.2 Aanbevelingen                                     | 39        |
| <b>6 Literatuur</b>                                   | <b>40</b> |
| <b>BIJLAGE I. Ondergrondse energieopslagsystemen</b>  | <b>41</b> |



# 1 Inleiding

De koeling van kassen is momenteel een veelbesproken onderwerp. In het verleden ging het hierbij uitsluitend om koeling van de wortelzone, wat bij een aantal siergewassen (freesia, alstroemeria) tot een kwalitatief beter product leidt. Bovendien geeft wortelkoeling de tuinder een stuurmechanisme in handen.

Sinds 2002 staat echter ook de koeling van de kaslucht volop in de belangstelling. Het perspectief, dat bij voldoende koelcapaciteit de kas gesloten zou kunnen blijven, biedt zicht op een forse productieverhoging doordat de CO<sub>2</sub>-concentratie in de kas hoog gehouden kan worden. Ook de ziektedruk door een aantal plaag-insecten kan aanmerkelijk worden verlaagd indien de kas gesloten blijft. Tenslotte wordt van de betere beheersbaarheid van de luchtvochtigheid verwacht dat de aantasting door schimmels kleiner zal zijn.

Een kas waar grondkoeling wordt toegepast heeft een koudebehoefte in de orde van 200 tot 300 MJ/(m<sup>2</sup> jaar). In de praktijk wordt deze koude geproduceerd met behulp van een elektrisch aangedreven koelmachine, die hiervoor respectievelijk 14 tot 22 kWh elektriciteit per m<sup>2</sup> verbruikt. Omgerekend naar primaire energie is dit 3.8 tot 5.9 m<sup>3</sup> aardgas equivalenten. Tegelijk met dit energieverbruik wordt de aan de kas onttrokken warmte tijdens het koelen aan de buitenlucht afgestaan. Er vindt hierbij dus een duidelijke vernietiging van duurzame en fossiele energie plaats.

Een intensief geteeld groentegewas in een volledig gesloten kas heeft een koudebehoefte van ongeveer 2000 MJ per m<sup>2</sup> per jaar. Indien ook deze koude in de zomer met een koelmachine zou moeten worden geproduceerd zou dit leiden tot een extra primair energieverbruik van rond de 39 m<sup>3</sup> aardgas equivalenten. Dit is nog afgezien van het primaire energieverbruik dat moet worden toegerekend aan de ventilatoren die de luchtcirculatie in de kas moeten realiseren.

In het gesloten kas concept wordt daarom niet gewerkt met een koelmachine die gedurende de zomer koud water maakt en de afvalwarmte vernietigt, maar met een ondergronds energie opslag systeem dat in de winter met koude wordt geladen. Deze koude is daarbij ook nog eens een 'afvalproduct' van de energiezuinige warmteproductie met behulp van een warmtepomp. Deze energiezuinige koudeproductie die voor de gesloten kas is ontwikkeld kan ook worden toegepast in de teelten met grondkoeling. Er kunnen dan energiebesparingen worden gerealiseerd van 4 tot 6 m<sup>3</sup> aardgas equivalenten.

De koudeproductie volgens het energiezuinige gesloten kas concept is echter begrensd tot een zeker maximum van 400 tot 800 MJ/m<sup>2</sup> per jaar. Dit maximum is deels het gevolg van een bedrijfseconomisch optimum, maar vloeit voor het grootste deel voort uit de warmtevraag van het gewas. In veel situaties, met name bij de gesloten kas, zal er daarom behoefte zijn aan additionele koudeproductie. In dit rapport worden een viertal alternatieve mogelijkheden voor energiezuinige koudeproductie belicht. Ze hebben met het gesloten kas concept gemeen dat er gebruik gemaakt wordt van een ondergronds energie opslag systeem, maar verschillen in het feit dat de koude wordt gecreëerd met behulp van buitenlucht.

Ter introductie op de koudebehoefte in de tuinbouw wordt in hoofdstuk 2 beschreven op welke wijze er op dit moment gekoeld wordt. In hoofdstuk 3 wordt vervolgens ingegaan op de mogelijkheden om die koudebehoefte op een energiezuinige wijze gestalte te geven. Het gebruik van de warmtepomp, die de zomerse warmteoverschotten ten nutte aanwendt, staat daarbij natuurlijk bovenaan. Andere opties zijn de toepassing van koeltorens, het gebruik van het regenwaterbassin het gebruik van een 'road energy system' (het koelend vermogen van een verwarmd wegdek) en het gebruik van deksproeiers. In hoofdstuk 4 wordt tenslotte een concreet voorbeeld voor een freesiaatcultuur uitgewerkt en wordt kort op de mogelijkheden van additionele koudeproductie voor een gesloten tomatencultuur ingegaan. Tevens wordt in dat hoofdstuk ingegaan op de economie van de verschillende systemen

## 2 Koudebehoefte in de tuinbouw

Ondanks het gematigde Nederlandse klimaat lopen de temperaturen in kassen in de zomer regelmatig op tot nadelig hoge temperaturen. De ramen in de kas staan in die gevallen maximaal open en, indien aanwezig, zijn schaduwschermen dichtgetrokken. Voor de meeste gewassen zijn de nadelen van deze hoge temperaturen echter niet zodanig dat grote investeringen in koelsystemen gerechtvaardigd kunnen worden.

Bij sommige gewassen renderen investeringen om het wortelmilieu te koelen echter wel.

Gewassen zoals Freesia en Alstroemeria worden namelijk ernstig in hun ontwikkeling gestoord wanneer de worteltemperatuur te hoog oploopt. In § 2.1 wordt ingegaan op de koudebehoefte bij grondkoeling.

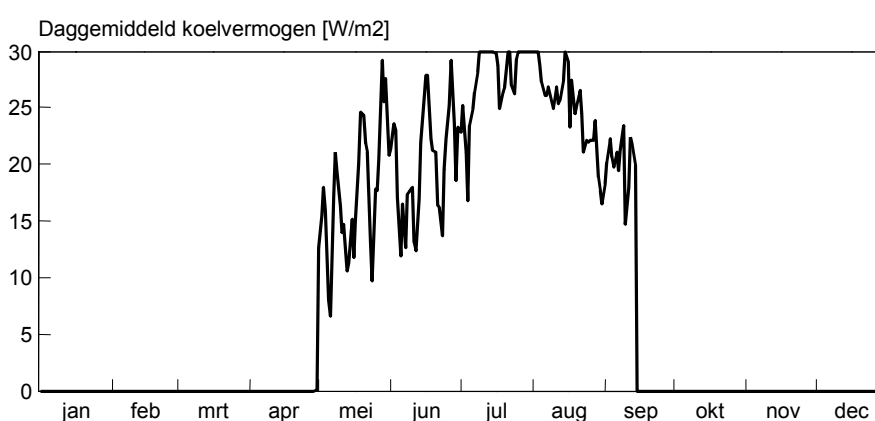
De laatste 2 jaar tekent zich echter ook een behoefte aan kasluchtkoeling af. Dit komt enerzijds omdat de waarde van koeling van de kaslucht hoger wordt ingeschat (een productietoename van 20% wordt mogelijk geacht) en anderzijds omdat er veel effort wordt gestoken in de verlaging van de kosten van koeling. Daarom wordt in § 2.2 een beeld geschetst van het koudebehoeftepatroon van groententeelt in een gesloten kas.

### 2.1 Koudebehoefte bij wortelkoeling

Freesia en Alstroemeria worden in de grond geteeld. Teeltermeningen hebben uitgewezen dat generatieve groei van deze gewassen (bloemvorming) kan worden gestimuleerd door de wortels koud te houden. Ook de vorm van het gewas wordt attractiever (minder gestrekt) wanneer de grond wordt gekoeld.

Om dit te realiseren wordt de grond in de teeltbedden gekoeld door slangen in te graven waar water van gemiddeld zo'n 12.5 °C wordt doorgevoerd (ingaaand 10 °C, uitgaand 15 °C). Door dit met een debiet van 5 liter per m<sup>2</sup> per uur te doen (50 m<sup>3</sup>/(ha uur)) wordt een koelcapaciteit van ruim 30 W/m<sup>2</sup> gerealiseerd.

In onderstaande figuur is het verloop van het benodigde koelvermogen voor een Freesiateelt getekend.



Figuur 2-1 Daggemiddeld koelvermogen voor grondkoeling in een Freesiateelt in een gemiddeld Nederlands jaar.

De figuur laat zien dat er in de zomer perioden zijn waarin het koelsysteem dag en nacht in werking is om de gestelde bodemtemperatuur van 15 °C te realiseren (het daggemiddeld vermogen loopt soms namelijk op tot het gestelde maximaal vermogen van 30 W/m<sup>2</sup>). De totale hoeveelheid warmte die aan de wortelzone wordt onttrokken is 260 MJ per m<sup>2</sup> per jaar en het koelsysteem is ongeveer 2500 uur in werking.

Doordat de grond gekoeld kan worden is een kwalitatief goede continu teelt van bijvoorbeeld Freesia en Alstormeria mogelijk. Uit Kwantitatieve Infromatie voor de glastuinbouw kan worden afgeleid dat bij Freesia de (gekoelde) jaarrond-teelt zo'n € 11,- meer opbrengt dan de ongekoelde teelt. De waarde van de koude is daarmee ruim € 0,04 per MJ.

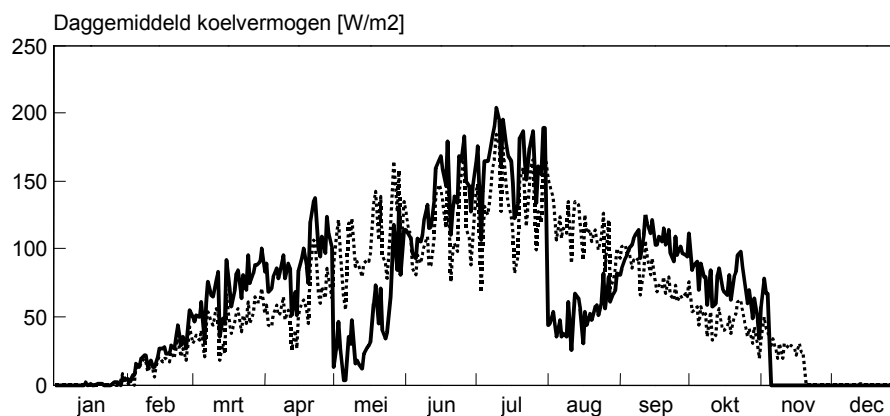
## 2.2 Koudebehoefte bij kasluchtkoeling

In de groenteteelten wordt voor een goede productiekwaliteit in de zomer gestreefd naar gemiddelde etmaaltemperaturen van 20 tot 23 °C. De tomatenteelt zit daarbij aan de onderkant van deze range en de komkommerteelt aan de bovenkant.

In traditionele kassen wordt getracht deze temperaturen te realiseren door in warme perioden veel te ventileren. De grote ventilatie debieten die hiervan het gevolg zijn maken dat de eveneens gewenste hoge CO<sub>2</sub>-concentratie maar in zeer beperkte mate gerealiseerd kan worden. Bij de paprika- en de komkommerteelt speelt dit probleem in iets kleinere mate omdat de nagestreefde etmaaltemperaturen in die teelten wat hoger liggen.

Naast de koelbehoefte speelt in een gesloten kas ook een ontvochtigingsbehoefte. In de systemen waarvan op dit moment sprake is vindt deze ontvochtiging plaats door condensatie aan een koud oppervlak. Daarmee creëert de ontvochtiging ook een koudebehoefte.

In onderstaande figuur is aangegeven wat de dagelijkse koelbehoefte is van een moderne venlokas bij de teelt van tomaten en de teelt van komkommer. Voor de duidelijkheid zij hierbij nog eens herhaald dat de getoonde vraag naar koelvermogen een combinatie is van de behoefte aan koeling en de behoefte aan ontvochtiging bij een volledig gesloten kas.



Figuur 2-2 Daggemiddeld koelvermogen voor een volledig gesloten enkeldeks kas voor tomaat (gestippelde lijn) en komkommer (getrokken lijn).

De grafiek laat zien dat de koudebehoefte van een gesloten kas weinig beïnvloed wordt door het gewas. Op jaarbasis is de koudebehoefte bij de tomaat 2020 MJ/(m<sup>2</sup> jr), en bij de komkommer 2050 MJ/(m<sup>2</sup> jr). Het feit dat de komkommerteelt meer koude vraagt terwijl de gewenste etmaaltemperatuur wat hoger ligt komt doordat de ontvochtigingsbehoefte in de komkommerteelt groter is.

Qua productie levert het sluiten van de kas grote voordelen op. KASPRO berekent een productietoename van 18% en in de praktijk worden nog grotere productie-effecten verwacht. Deze verwachtingen zijn gebaseerd op resultaten uit het experiment "Telen in een gesloten tuinbouwkas; praktijkexperiment" (Schoonderbeek, 2003).

De koudevraag kan nog iets verminderd worden door 's nachts, wanneer de kas geen voordeel heeft van een hoge CO<sub>2</sub>-concentratie, met ramen te ontvochtigen (en soms een beetje te koelen). De koudebehoefte zakt hierdoor evenwel relatief gering (100 MJ/(m<sup>2</sup> jr) bij tomaat en 200 MJ/(m<sup>2</sup> jr) bij de komkommer).

De waarde van de koude in de groenteteelt is ongeveer € 0,004 aangezien verwacht wordt dat de sluiting van de kas tot een productiestijging van zo'n 20% zal leiden. 20% op een productiewaarde van ongeveer € 40,- per m<sup>2</sup> is € 8,- en 8/2000 is 0.004.

### 3 Koudeproductiesystemen

In het voorgaande hoofdstuk is met behulp van twee uitersten de range van koudebehoefte geschetst die in de tuinbouw spelen.

In dit hoofdstuk worden verschillende systemen waarmee deze koude gegenereerd kan worden op een rijtje gezet. Van elk van deze systemen worden een aantal belangrijke eigenschappen en typische gebruikskkenmerken genoemd.

Het eerste systeem (§ 3.1) is de op veel plaatsen gebruikte koelmachine. Voor teelten met grondkoeling wordt dit als referentie-situatie gebruikt, hoewel er ook tuinders zijn die met een bron koelen en het water vervolgens op het oppervlaktewater lozen.

De andere systemen maken direct of indirect gebruik van de winterse omstandigheden om op een energie-zuiniger wijze koude te produceren. Bij al deze systemen is evenwel een lange termijn opslagsysteem noodzakelijk. In bijlage I wordt ingegaan op een aantal kenmerken en technische eigenschappen van zo'n lange termijn opslagsysteem.

Uitgaande van de beschikbaarheid van zo'n opslagsysteem kan op verschillende manieren gebruik worden gemaakt van de winterse kou. In de eerste plaats kan een zogenaamde natte koeltoren worden gebruikt om koude te maken (§ 3.2). Hierbij wordt actief buitenlucht door een warmtewisselaar geblazen. De koudeproductie an sich vraagt daarbij geen primaire energie, maar de circulatieventilator gebruikt een duidelijke hoeveelheid elektriciteit.

Nog zuiniger methoden om gebruik te maken van de winterse kou zijn geheel passieve systemen zoals een verwarmd wegdek (het Road Energy System) en de benutting van het regenwaterbassin. Kasdekbevoeiing in de winter, waarmee relatief warm water op het kasdek wordt afgekoeld kan ook als vorm van passieve koudeproductie worden gezien. De drie genoemde systemen worden uitgewerkt in § 3.3.

De meest energiezuinige wijze van de productie van koude is echter het gebruik van een warmtepomp (§ 3.4). Door een warmtepomp te gebruiken wordt de energie die in het te koelen medium is opgeslagen (de warmte die in de zomer aan het opslagsysteem is toegevoerd) namelijk nuttig gebruikt (in de andere systemen wordt deze warmte in de vorm van afvalwarmte aan de buitenlucht afgegeven en daarmee niet nuttig gebruikt).

Aan het eind van het hoofdstuk wordt besloten met een kort overzicht.

#### 3.1 Koudeproductie met koelmachines

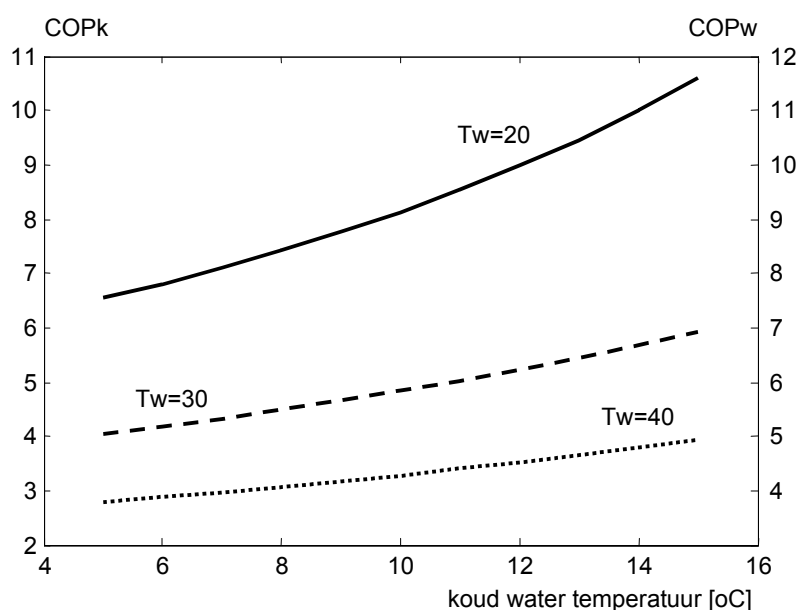
Bij verdamping nemen vloeistoffen latente warmte op uit hun omgeving. Bij condensatie van deze damp op een oppervlak wordt de verdampingswarmte weer afgegeven. Door de verdamping bij een lage druk te laten plaatsvinden en de condensatie bij een hoge druk kan de verdamping bij een lage temperatuur en de condensatie bij een hoge temperatuur plaatsvinden. Op deze manier kan warmte vanaf een laag naar een hoog temperatuurniveau worden 'verpompt'. Het koudemiddel verdampt aan de koude, lage drukzijde en condenseert aan de warme, hoge drukzijde.

Naast het bovenbeschreven mechanisme van een compressiekoelmachine kan een soortgelijk effect worden bereikt door gebruik te maken van de temperatuurafhankelijkheid van de oplosbaarheid van gasen in een vloeistof. Op dit principe is de absorptiekoelmachine gebaseerd.

Omdat de prestaties hiervan in de tuinbouw echter sterk achterblijven ten opzichte van compressie koelmachines<sup>1</sup> wordt hierop in dit rapport niet verder ingegaan.

Het opvoeren van de druk van het verdampte koudemiddel kost mechanische energie zodat een koelmachine een externe krachtbron nodig heeft. Het energiegebruik van deze externe krachtbron komt eveneens als warmte aan de warme kant van de koelmachine vrij. De hoeveelheid koude per eenheid externe aandrijfenergie wordt de COP genoemd (Coefficient Of Performance, of, in het Nederlands de Opbrengstfactor). De COP neemt af naarmate het temperatuurverschil tussen de koude en de warme kant toeneemt.

In onderstaande figuur is de COP van gemiddelde commercieel verkrijgbare koelamachines weergegeven als functie van de temperatuur van de warme en de koude kant. De linker y-as geeft de opbrengstfactor voor koude (COP<sub>k</sub>) en de rechter as de opbrengstfactor voor warmte (COP<sub>w</sub>). De COP<sub>w</sub> is per definitie 1 punt hoger dan de COP<sub>k</sub>.



*Figuur 3-1 COP voor koudeproductie en voor warmteproductie als functie van de temperatuur van het koude water voor drie warmwater temperaturen*

De figuur laat zien dat de hoeveelheid koude per eenheid aandrijf-energie (de COP<sub>k</sub>) sterk afneemt wanneer de temperatuur aan de warme kant oploopt.

Bij gebruik van grondkoeling wordt er meestal koud water gemaakt van ongeveer 10 °C en wordt de warme kant van de koelmachine op 30 tot 35 °C gebracht. De gebruikelijke koude COP bij koelmachines voor grondkoeling ligt dus rond 4, wat betekent dat er voor de productie van 1 MJ koude 0.07 kWh aandrijf-energie nodig is.

Om koude te kunnen blijven produceren moet het warme water echter zijn warmte weer afstaan. Hiervoor wordt bij koelmachines meestal een koeltafel gebruikt (vergelijkbaar met de radiator van een auto). Het aandrijven van de daarmee geïntegreerde ventilatoren kost elektriciteit. De productspecificatie van een min of meer willekeurige ventilator-unit (type ACE van firma ECO Coils & Coolers, bestaande uit een set met 6 fans met een ventilatordiameter van 800mm) laat

<sup>1</sup> Een absorptiekoelmachine kan vooral bij kleine capaciteiten in economisch opzicht rendabel zijn. Ook in gevallen waarin een relatief groot hoogwaardig warmte-overschot is (bijvoorbeeld uit een WK-installatie) ten opzichte van de koudevraag kan een absorptie-koelmachine gunstig zijn.

zien dat dit maximaal 0.0026 kWh per MJ bedraagt. Een impressie van zo'n ventilator-unit (onbekend merk), met maar liefst 30 ventilatoren, is in figuur 3-2 weergegeven.



*Figuur 3-2 Een koeltafel waarmee de afvalwarmte van een koelmachine kan worden afgevoerd. Bron: onbekend*

Ook het rondpompen van water door de verdamper en condensor van de koelmachine kost elektriciteit. Volgens het installatieburo Wilk van der Sande is het drukverlies dat hierbij optreedt 0.2 bar aan beide zijden van de koelmachine. Het drukverlies over de koeltafel is 0.4 bar.

Wanneer de koude wordt gebruikt voor grondkoeling toepassingen vindt de koudedistributie plaats via een uitgebreid slangen-netwerk. Een dergelijk netwerk levert een klein drukverlies op (0.05 bar). Wordt de koude echter gebruikt voor kasluchtkoeling middels luchtbehandelingskasten dan spelen er grotere drukverliezen (0.4 bar).

Het drukverlies vertaalt zich in elektriciteitsverbruik volgens de formule

$$\text{Elektriciteitsverbruik} = \text{drukverlies} * 10^5 * \text{m}^3 / 70\% / 3.6 \cdot 10^6 \quad [\text{kWh}]$$

waarin het drukverlies wordt uitgedrukt in bar (en na vermenigvuldiging met  $10^5$  wordt omgerekend naar Pa). De term 70% verwerkt de efficiëntie is waarmee elektrisch vermogen via de schoepen in de pomp wordt omgezet in druk en de term  $3.6 \cdot 10^6$  rekent het energieverbruik in Joules om naar kWh.

Uitgewerkt levert deze formule

$$\text{Elek}_{\text{pomp}} = 0.04 * \text{drukverlies} \quad [\text{kWh}/\text{m}^3]$$

De formule laat zien dat het elektriciteitsverbruik afhangt van het aantal rondgepompte  $\text{m}^3$  water. Het elektriciteitsverbruik per eenheid koude hangt daardoor samen met het temperatuurverschil waarmee de energie wordt getransporteerd. Hierin speelt de warmtecapaciteit van water ( $4.18 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \text{ K})$ ) de belangrijkste fysische rol.



Bij grondkoeling-systemen is het temperatuurverschil tussen warme en koude kant bij systemen die op een koelmachine zijn gebaseerd niet groter dan zo'n 4 °C. Bij gangbare systemen voor kaslucht koeling (bijvoorbeeld in de phalenopsis) kan dit verschil wat groter zijn, zo'n 8 °C. Het temperatuurverschil over een koeltafel is in de regel zo'n 10 °C.

Wanneer alle elektriciteitsverbruikende componenten die een rol spelen in de koudeproductie met behulp van een koelmachine bij elkaar worden gezet ontstaat het volgende beeld.

### **Koelmachine**

Elektriciteitsverbruik bij koudeproductie: 0.07 kWh/MJ

Elektriciteitsverbruik koeltafel: 0.0026 kWh/MJ

Drukverlies verdamper en condensor: elk 0.2 bar

Drukverlies koelnet grondkoeling: 0.05 bar

Drukverlies koelnet luchtkoeling: 0.4 bar

Drukverlies koeltafel: 0.4 bar

Elektriciteitsverbruik bij typische grondkoelinginstallatie ( $\Delta T_{\text{circulate}} = 4 \text{ °C}$ )

$$0.07 + 0.0026 + 0.04 * [(0.2 + 0.05) / (4.18 * 4) + (0.2 + 0.4) / (4.18 * 10)] = 0.0738 \text{ kWh/MJ}$$

Elektriciteitsverbruik bij typische luchtkoelinginstallatie ( $\Delta T_{\text{circulate}} = 8 \text{ °C}$ )

$$0.07 + 0.0026 + 0.04 * [(0.2 + 0.4) / (4.18 * 8) + (0.2 + 0.4) / (4.18 * 10)] = 0.0739 \text{ kWh/MJ}$$

In de uitgeschreven formules zijn de getallen 4.18 (de warmtecapaciteit van water) en de temperatuurverschillen 4, 8 en 10 °C terug te vinden. De factor 0.04 is de term waarmee drukverlies wordt omgezet in elektriciteitsverbruik.

Het blijkt dat het elektriciteitsverbruik per eenheid koude tussen de twee toepassingsgebieden van de koude nauwelijks verschilt. Dit komt door de overheersende rol van de koelmachine in het totale gebruik (95%).

Gegeven de koudebehoefte van gemiddeld 260 MJ per m<sup>2</sup>/jaar bij teelten met grondkoeling betekent dit dat grondkoeling met een koelmachine gemiddeld 19 kWh elektriciteit per m<sup>2</sup> per jaar vereist. Wanneer voor een gesloten kas de koudevraag op 2000 MJ wordt gesteld zou de productie hiervan met een koelmachine leiden tot een verbruik 148 kWh.

Omerekend naar primaire energie met een gemiddeld centralerendement van 43% betekent het gebruik van een koelmachine in de freesiateelt een primair energieverbruik van 5.2 m<sup>3</sup> aardgas per m<sup>2</sup> kas per jaar. Voor de gesloten kas zou er 40 m<sup>3</sup> a.e. primaire energie voor de koeling gebruikt worden.

## **3.2 Koudeproductie met behulp van koeltorens**

Het gebruik van koelmachines zoals dat in het vorige hoofdstuk is besproken dient voor de productie van koud water (8 tot 10 °C). Onder winterse omstandigheden is de luchttemperatuur vaak lager dan die gewenste koelwatertemperatuur zodat, wanneer gebruik gemaakt zou worden van een lange termijn ondergronds energie opslagsysteem, de gewenste koude zonder koelmachine in de winter voortgebracht zou kunnen worden.

Op sommige bedrijven wordt reeds van deze mogelijkheid gebruik gemaakt (Tesselaar en Pekkeriet, 2002). Het betreft in deze situatie een zogenaamde natte koeltoeren, waarbij door gebruik te maken van de verdampingswarmte van water koude kan worden gemaakt die zelfs

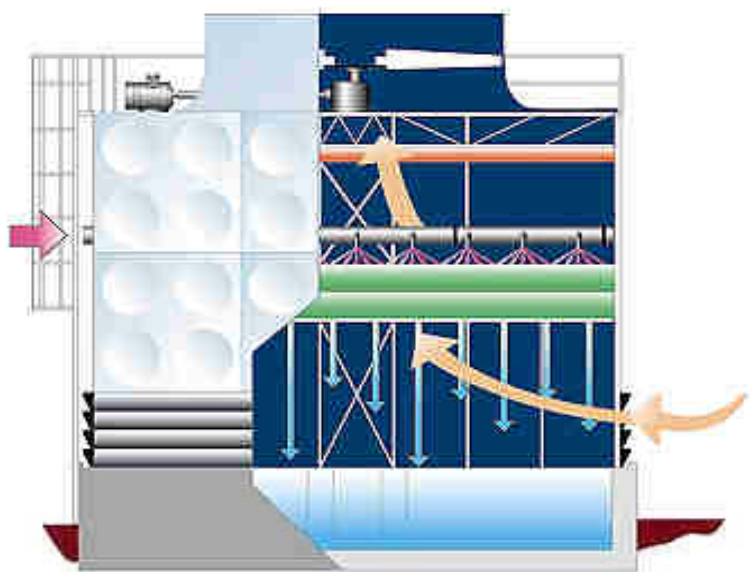
onder de luchttemperatuur uitkomt<sup>2</sup>. Een impressie van zo'n natte koeltoren is afgebeeld in figuur 3-3. In figuur 3-4 is een opengewerkte schets van zo'n koeltoren getekend. In figuur 3-5 is afgebeeld op welke wijze de koeltoren wordt aangesloten op het ondergrondse energieopslagsysteem.



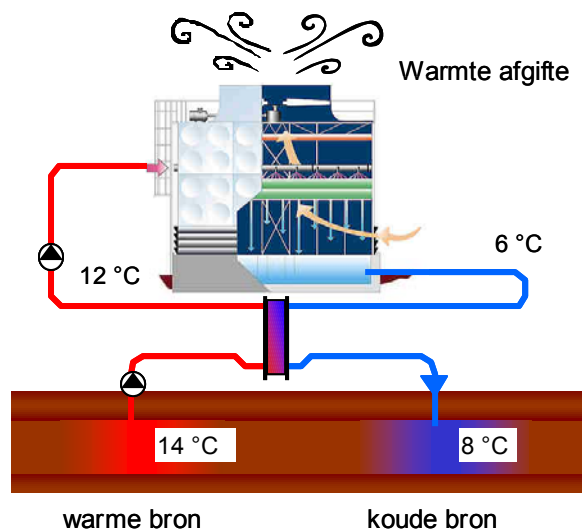
*Figuur 3-3 Foto van een natte koeltoren (CMC dubbele koeltoren-units van Polacel)*

---

<sup>2</sup> Een waterdruppel die in de lucht zweeft krijgt na verloop van tijd de natte bol temperatuur. Deze ligt een paar graden onder de luchttemperatuur (afhankelijk van de luchtvochtigheid).



Figuur 3-4 Principeschema van een natte koeltoren (CMD koeltoren van Polacel)



Figuur 3-5 Winterse koudeproductie met een natte koeltoren.

De totale hoeveelheid koude die met een koeltoren zoals in figuur 3-3 en 3-4 is afgebeeld kan worden geproduceerd hangt sterk af van de temperatuur waarop het te koelen water gebracht moet worden. Hoe kouder dit water moet zijn, hoe minder uren de buitenluchtcondities zodanig zijn dat de installatie in werking kan zijn. Bovendien neemt de koelcapaciteit toe naarmate het temperatuurverschil tussen buitenlucht en de gemiddelde temperatuur van het te koelen medium groter is.

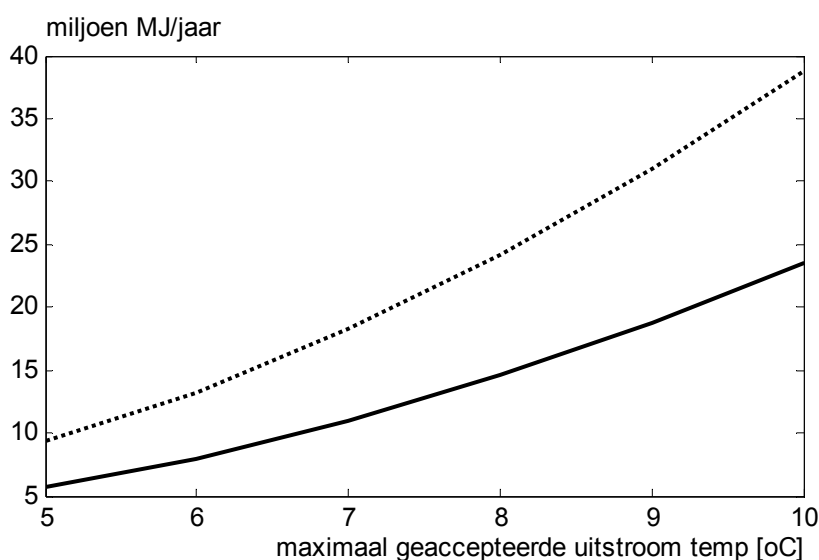
Als de maximale uittrede-temperatuur van de koeltoren op 8 °C wordt gesteld kan de machine 4610 bedrijfsuren per jaar maken. Bij 6 °C is dit gedaald naar 3520 uren en bij 4 °C zijn dit nog maar 2290 bedrijfsuren.

Op basis van verstrekte gegevens door de firma Polacel zijn voor twee koeltorens berekeningen gemaakt (de CMD16-DH-90-PS3/3 met een waterdoorstroming van maximaal 60 m<sup>3</sup>/uur en de CMDR11 180-DH-90-PS3/3 met een maximale waterdoorstroming van 100 m<sup>3</sup>/uur).

In figuur 3-6 figuur is aangegeven welke koudeproductie deze koeltorens in een gemiddeld Nederlands jaar kunnen leveren als functie van de maximaal geaccepteerde uitstroomtemperatuur.

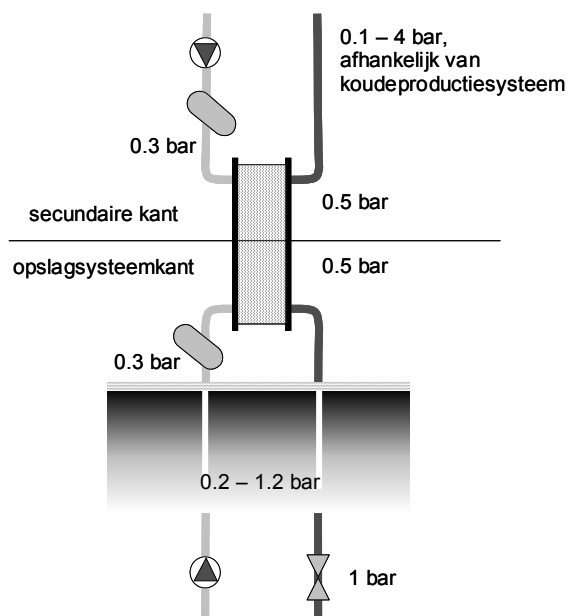
Uit de figuur lijkt de conclusie te kunnen worden getrokken dat het nuttig is om hoge uittree temperaturen te accepteren. De keerzijde van hoge uittree temperaturen is echter dat de watervolumina die voor de opslag nodig zijn en de benodigde pompcapaciteiten sterk toenemen. Hogere uittree temperaturen leveren dus een grote koudeproductie, maar de gebruikswaarde van deze koude wordt minder. Voor praktische koeltoepassingen in de tuinbouw moet dan ook gestreefd worden naar een uittree temperatuur van maximaal 6 °C. De hier beschreven koeltoren CMC16-Dh-90 levert daarbij ca. 8 miljoen MJ koude en de grotere levert in dat geval 13 miljoen MJ koude. De productspecificatie geeft aan dat van dit koelvermogen ongeveer 50% op het conto van latente warmte moet worden geschreven zodat deze koeltorens gemiddeld 260 gram water per MJ koude verdampen.

Om de koeltoren te laten functioneren wordt buitenlucht door de installatie heen gezogen. De kleine koeltoren (*Polacel CMC16-DH-90*) gebruikt hiervoor een ventilator met een vermogen van 15.5 kW en de grote koeltoren (*Polacel CMDR12 180-DH-90*) een ventilator van 26 kW. Gegeven de 3520 draaiuren (het aantal uren waarbij de buitenlucht in een gemiddeld jaar de minimaal vereiste natte bol temperatuur heeft) is het elektriciteitsverbruik van de koeltoren dus 0.007 kWh/MJ koude (zowel voor de grote als de kleinere koeltoren). Dit is 10 keer minder dan de 0.0726 kWh/MJ koude die verbruikt wordt wanneer gebruik wordt gemaakt van een koelmachine.



*Figuur 3-6 Relatie tussen totale jaarlijkse koudeproductie en maximale temperatuur van het water dat aan de uitgang van de koeltoren beschikbaar komt voor de Polacel CMC16-DH-90 (figuur 3-4) bij een waterhoeveelheid van 60 m<sup>3</sup>/h (getrokken lijn) en Polacel CMDR12 180-DH-90 (figuur 3-3) bij een waterhoeveelheid van 100 m<sup>3</sup>/h (gestippelde lijn)*

De productie van koude gedurende de winter voor gebruik in de zomer vereist echter het gebruik van een ondergronds energie opslagsysteem. Hierbij moet in de winter én in de zomer water over het bronnensysteem en door een warmtewisselaar worden verpompt. Met dit verpompen van water moeten drukverschillen worden overwonnen, waardoor mechanische energie verloren gaat. In figuur 3-7 is een schets getekend van de scheidingswisselaar zoals die bij een ondergronds opslagsysteem gebruikt wordt.



*Figuur 3-7 Typische drukverliezen in het hydraulisch systeem bij toepassing van een ondergronds energieopslagsysteem.*

In figuur 3-7 zijn typische drukvallen getekend. In het algemeen worden voor dit soort systemen platenwisselaars gebruikt die bij maximale doorstroming een drukval opleveren van 0.5 bar. Om vervuiling van de warmtewisselaars te voorkomen worden er fijne filters in de leidingen geplaatst, waardoor de totale drukval aan elke kant van de warmtewisselaar oploopt naar zo'n 0.8 bar. Om ontgassing te voorkomen wordt het water aan de opslagsysteem-zijde onder druk gehouden door middel van een smookklep onderin de infiltratieleiding. Deze klep levert een drukval van 1 bar (de Zwart en van Elswijk, 2003). De totale weerstand van het aanzuigen en infiltreren van water in de watervoerende lagen vereist een drukverschil van 0.2 tot 1.2 bar. Omwille van de eenvoud wordt voor deze variatie het gemiddelde gebruikt, dus 0.7 bar gesteld. De totale weerstand aan de opslagsysteemkant wordt daarmee bij de ontwerp pompcapaciteit 2.5 bar.

Aan de secundaire kant speelt altijd de drukval van 0.8 bar over de warmtewisselaar en het filter. Daarnaast speelt er in de winter nog een drukval die afhankelijk is van het koudeproductiesysteem en in de zomer de drukval over het systeem dat de koude gebruikt. Bij gebruik van het regenwaterbassin als koudeproductie-unit (zie § 3.3) zal de drukval in de winter klein zijn (0.1 bar in de aan- en afvoerleidingen + 0.8 bar over de warmtewisselaar en filter). Bij gebruik van bijvoorbeeld deksproeiers als koudeproductiesysteem is de totale drukval in de winter groot (4 bar + 0.8 bar over de warmtewisselaar en filter).

Bij de natte koeltoren is het totale drukverlies eveneens klein omdat het te koelen water eenvoudig over een spons-achtig oppervlak hoeft te worden verspreid en de opvoerhoogte niet meer dan 3 meter bedraagt (0.3 bar).

Het drukverlies bij de koudeproductie met behulp van een koeltoren aan de secundaire kant komt daarmee op 1.1 bar.

Wanneer de koude die in de winter wordt gemaakt in de zomer weer naar boven gehaald moet worden zullen opnieuw drukverliezen ontstaan. Het drukverlies aan aquiferzijde is in de zomer niet anders dan in de winter. Aan gebruiks-zijde is het drukverlies afhankelijk van de toepassing van de koude. In de voorgaande paragraaf (§ 3.1) is aangegeven dat gangbare koude-distributiesystemen voor grondkoeling (slangen in de teeltbedden) 0.05 bar drukverlies opleveren en luchtkoelings-units, zoals gebruikt in gesloten kassen ongeveer 0.4 bar drukverlies geven.

Om nu het totale energieverbruik te berekenen dat met de koudeproductie via een koeltoren in de winter gemoeid is moet nog worden berekend hoeveel m<sup>3</sup> water verpompt moet worden per MJ koude. Ook hier speelt op dezelfde manier het gehanteerde temperatuurverschil een rol. In de vorige paragraaf is er 4 °C gesteld voor grondkoeling en 8 °C voor koel-blokken. Hoewel het belang van grotere temperatuurverschillen bij gebruik van een ondergronds energieopslagsysteem groot is zal het in de praktijk vrijwel niet mogelijk zijn om meer dan deze 4 en 8 °C te realiseren. Daarom worden deze temperaturen ook in de rest van dit hoofdstuk aangehouden. Op grond van de bovengenoemde gegevens kan een soortgelijk overzicht worden gemaakt als aan het eind van § 3.1.

#### **Koeltoren voor koudeproductie in de winter**

Elektriciteitsverbruik bij koudeproductie: 0.007 kWh/MJ

Drukverlies bij koude laden: (winter) 3.6 bar

Drukverlies bij koude gebruik grondkoeling: 3.3 + 0.05 bar

Drukverlies bij koude gebruik luchtkoeling: 3.3 + 0.4 bar

Elektriciteitsverbruik bij typische grondkoelinginstallatie ( $\Delta T_{\text{opslag}} = 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )

$$0.007 + 0.04 \cdot [(3.6 + 3.3 + 0.05) / (4.18 \cdot 4)] = 0.024 \text{ kWh/MJ}$$

Elektriciteitsverbruik bij typische luchtkoelinginstallatie ( $\Delta T_{\text{opslag}} = 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )

$$0.007 + 0.04 \cdot [(3.6 + 3.3 + 0.4) / (4.18 \cdot 8)] = 0.016 \text{ kWh/MJ}$$

In het totale energieverbruik zit ongeveer de grofweg 40% van het verbruik in de koeltoren en het grootste deel in de drukverliezen die met het opslagsysteem gemoeid zijn.

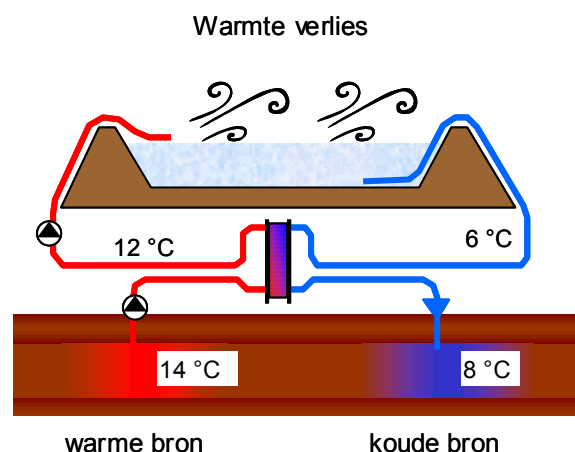
In vergelijking met koudeproductie met een koelmachine in de zomer is het gebruik van een natte koeltoren en een ondergronds seizoens-opslagsysteem 68% (teelten met grondkoeling) tot 79% (gesloten kassen) zuiniger.

### 3.3 Passieve koudeproductie

Bij gebruik van een koeltoren moeten grote hoeveelheden lucht door de installatie worden geblazen. Hierbij is er sprake van gedwongen (geforceerde) convectieve warmte-overdracht. Het kenmerk van deze warmte-overdracht is dat er relatief veel warmte kan worden overgedragen bij lage temperatuur, maar dat er een duidelijke hoeveelheid aandrijf-energie nodig is. Bij gebruik van een natte koeltoren bij de gesloten kas is dit 44% van het totale elektriciteitsgebruik die aan de koudeproductie toegerekend kan worden. Bij gebruik van een natte koeltoren als koudebron voor grondkoeling zit 30% van het totale elektriciteitsverbruik van de koudevoorziening in de ventilator.

Het elektriciteitsverbruik dat met die geforceerde luchtverplaatsing nodig is kan worden voorkomen wanneer gebruik gemaakt wordt van vrije convectie. De keerzijde van deze vrije convectie is dat de warmte-overdracht relatief klein is.

In deze paragraaf worden drie mogelijke toepassingen van passieve koelsystemen bestudeerd. De eerste mogelijkheid is het gebruik van het regenwaterbassin als koelend oppervlak. Immers. Het bassin vormt een relatief groot oppervlak dat meestal onafgedekt is en daardoor gemakkelijk warmte verliest naar de omgeving. Wanneer er relatief warm water bovenin het bassin zou worden ingelaten en koud water aan de onderkant zou worden afgepompt dan zou op deze manier met enkel het elektriciteitsgebruik van circulatiepompen koude kunnen worden geproduceerd. Een schets van een mogelijke uitvoeringsvorm staat weergegeven in figuur 3-8

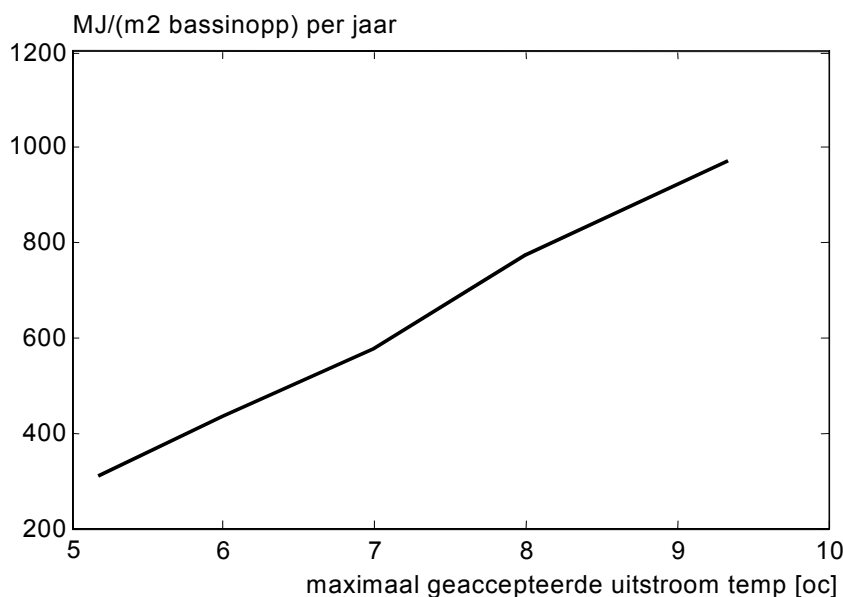


*Figuur 3-8 Koudeproductie met gebruikmaking van het regenwaterbassin.*

Net zoals bij de natte koeltoren zal de hoeveelheid koude die met het gebruik van het regenwaterbassin als koudeproductiesysteem gegenereerd kan worden afhangen van de maximaal geaccepteerde temperatuur aan de uitgang van het koelsysteem.

In figuur 3-9 is deze relatie afgebeeld. De grafiek is gemaakt aan de hand van een dynamisch model van het warmteverlies van een regenwaterbassin. In het model wordt het regenwater in het bassin verwarmd door de zon en staat het zijn warmte af via voelbare en latente warmte-overdracht (verdamping) naar de buitenlucht en middels uitstraling naar de hemel. De temperatuur van de bodem onder het opslagbassin is eveneens meegenomen in het model.





*Figuur 3-9 Jaarlijkse koudeproductie per m<sup>2</sup> regenwaterbassin in afhankelijkheid van de maximale temperatuur waarmee het water naar de warmtewisselaar wordt gestuurd.*

De grafiek toont een (vrijwel) lineair verband tussen de koudeproductie en de temperatuur waarmee het water uit het bassin wordt afgetapt. Ook hier geldt dat het accepteren van een hoge maximale temperatuur tot een grotere koudeproductie leidt, maar dat de waarde van die koude afneemt. Bij 6 °C kan van een regenwaterbassin verwacht worden dat dit 400 MJ koude per m<sup>2</sup> waterbassin per jaar kan voortbrengen.

Het elektriciteitsverbruik van deze passieve vorm van koeling wordt uitsluitend veroorzaakt door het verpompen van water over de beide zijden van de warmtewisselaar.

De drukverliezen tijdens de benutting van de koude in zomer zijn precies gelijk aan de drukverliezen die in de vorige paragraaf voor de zomerperiode zijn genoemd. De drukverliezen tijdens de koudeproductie in de winter zijn kleiner omdat er geen statische druk hoeft te worden overwonnen (zolang de uitstroomopening van de warmwaterinlaat niet boven het wateroppervlak van het bassin uitkomt). De drukval in de winterperiode wordt daardoor 3.4 bar.

### **Gebruik regenwaterbassin**

Elektriciteitsverbruik bij koudeproductie: -

Drukverlies bij koude laden: (winter) 3.3 bar

Drukverlies bij koude gebruik grondkoeling: 3.3 + 0.05 bar

Drukverlies bij koude gebruik luchtkoeling: 3.3 + 0.4 bar

Elektriciteitsverbruik bij typische grondkoelinginstallatie ( $\Delta T_{\text{opslag}} = 4 \text{ °C}$ )

$$0.04 * [(3.3 + 3.3 + 0.05) / (4.18 * 4)] = 0.016 \text{ kWh/MJ}$$

Elektriciteitsverbruik bij typische luchtkoelinginstallatie ( $\Delta T_{\text{opslag}} = 8 \text{ °C}$ )

$$0.04 * [(3.3 + 3.3 + 0.4) / (4.18 * 8)] = 0.008 \text{ kWh/MJ}$$

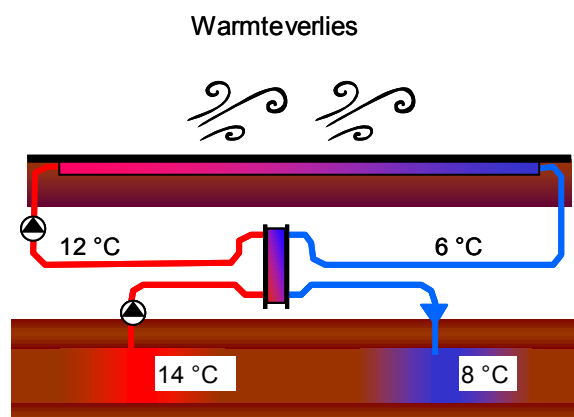
Ten opzichte van het gebruik van koelmachines in de zomer is het gebruik van het regenwaterbassin als koudebron bij toepassingen zoals de gesloten kas 89% zuiniger en bij grondkoeling toepassingen 78% zuiniger.



Een ander systeem waarmee via passieve warmte-afgifte koude kan worden geproduceerd is het zogenaamde Road Energy System. Dit kan het beste beschreven worden als een vloerverwarmingssysteem dat in een wegdek of op het buitenterrein om het tuinbouwbedrijf kan worden aangelegd. Het systeem is ontworpen om een wegdek vorstvrij te houden en daarmee gladheid te bestrijden. In de context van dit project kan echter ook gekeken worden naar de hoeveelheid koude die met zo'n systeem op een energie-zuinige, passieve wijze geproduceerd kan worden.

In figuur 3-10 is een schets gemaakt van de werking van het systeem.

Het Road Energy System bestaat uit een slangenstelsel dat in het wegdek is aangebracht. Wanneer het systeem wordt gebruikt als methode om koude te produceren, dan zou de watertemperatuur kunnen worden gemeten. Als deze temperatuur aan de koude kant van het systeem onder een bepaalde temperatuur daalt (figuur 3-10 is dit 6 °C) kan een waterstroom op gang gebracht worden en kan warm aquiferwater worden afgekoeld.

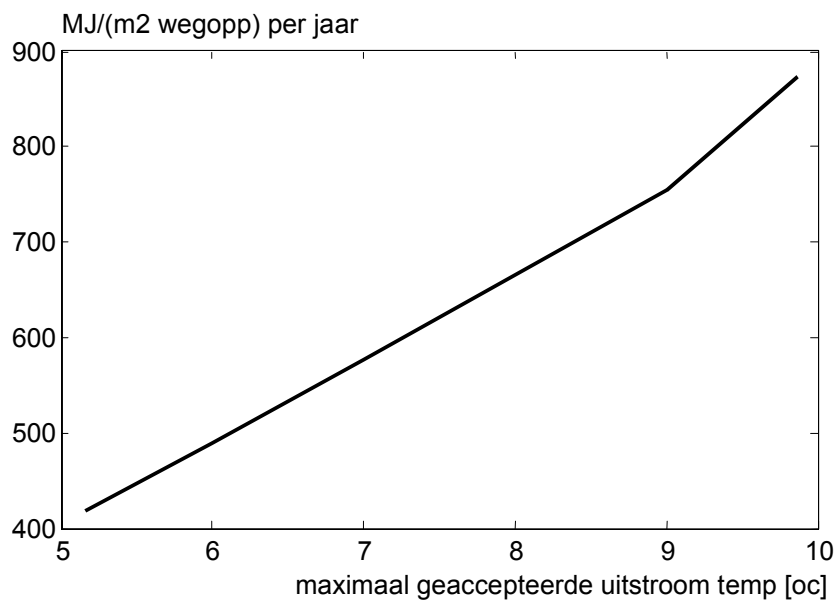


*Figuur 3-10 Koudeproductie met gebruikmaking van het Road Energy System.*

Uiteraard hangt ook bij dit systeem de hoeveelheid koude die ermee geproduceerd kan worden af van de temperatuur waarop de koude gebracht moet worden.

In figuur 3-11 wordt hiervan een grafiek gegeven

Als ook hierbij wordt uitgegaan van maximaal geaccepteerde uitgaande watertemperatuur van 6 °C dan blijkt dat met een m<sup>2</sup> Road Energy System 25% meer koude kan worden gemaakt dan met een m<sup>2</sup> regenwaterbassin (500 MJ/(m<sup>2</sup> jr) in plaats van 400 MJ/(m<sup>2</sup> jr)). Het elektriciteitsverbruik voor de circulatie van het water door het slangenstelsel in de weg zal vrijwel gelijk zijn aan het elektriciteitsgebruik bij het gebruik van het regenwaterbassin als koudeproductiesysteem.

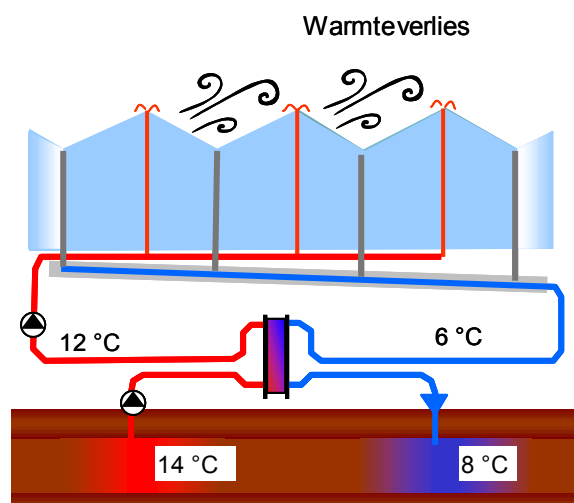


*Figuur 3-11 Jaarlijkse koudeproductie per m² Road Energy System in afhankelijkheid van de maximale temperatuur waarmee het water naar de warmtewisselaar wordt gestuurd.*

De besparing van dit systeem ten opzichte van het gebruik van een koelmachine in de zomer is dus eveneens 78% voor kassen waarbij de koude wordt gebruikt voor grondkoeling en 89% in geval de koude wordt gebruikt voor toepassingen zoals de gesloten kas.

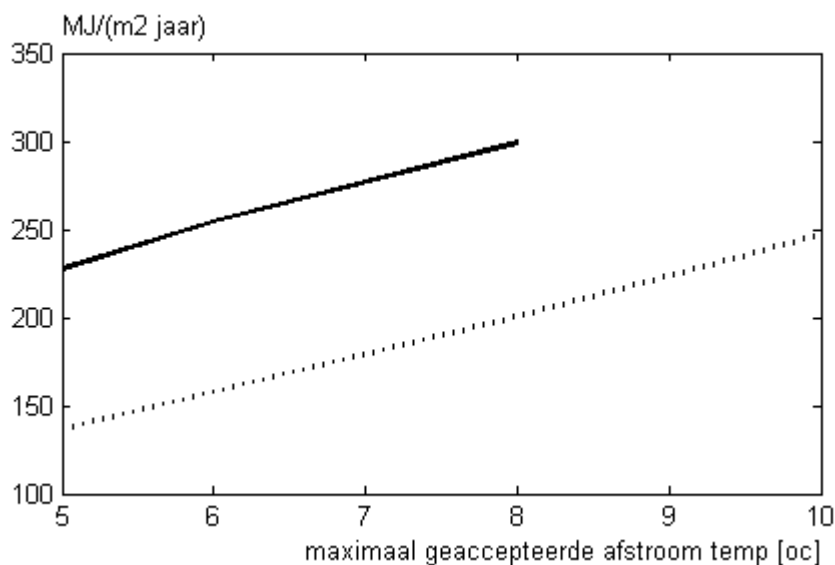
Het derde passieve koudeproductiesysteem dat in dit rapport belicht wordt is het gebruik van deksproeiers. In vorige studies van A&F zijn de perspectieven van deksproeiers voor koeling in de zomer belicht (de Zwart, 2004; de Zwart *et.al.* 2003). In deze situaties werd er koud water op het dek gespoten op momenten dat het in de kas te warm is. Dit water warmt dan op en geeft onderwijl koeling aan de kas.

Dezelfde installatie kan in de winter worden gebruikt om koude te produceren. In die gevallen kan relatief warm water op de kas worden gesproeid, wat vervolgens afkoelt en koud weer via de hemelwaterafvoer terugkomt. Een schets van deze situatie is afgebeeld in figuur 3-12



*Figuur 3-12 Koudeproductie door gebruik van deksproeiers in de winter.*

Omdat warmte-overdracht altijd afhankelijk is van een zeker temperatuurverschil zal ook hier de hoeveelheid koude die met het systeem gemaakt kan worden afhangen van de maximaal geaccepteerde temperatuur. Daarnaast hangt de koudeproductie sterk samen met de kasluchttemperatuur. Voor een kas met een energiescherm geldt dat de dektemperatuur ongeveer  $\frac{3}{4}$  van de buitenlucht-temperatuur en  $\frac{1}{4}$  van de kasluchttemperatuur bedraagt. Het dek in een warmere kas (bijvoorbeeld bij tomaat) zal, zelfs wanneer het scherm dicht is, dus altijd duidelijk warmer zijn dan het dek van een koude kas (zoals freesia). De mogelijkheid voor koudeproductie met deksproeiers zal in een freesia-kas dus groter zijn dan in de groenteteelt. Het gewas-effect komt in figuur 3-13 dan ook duidelijk naar voren.



*Figuur 3-13 Jaarlijkse koudeproductie per m<sup>2</sup> kas bij gebruik van deksproeiers in de winter in de tomatenteelt (gestippelde lijn) en in de freesiateelt (getrokken lijn) als functie van de maximale temperatuur waarmee het water van het dek af mag stromen.*

Overigens is in de resultaten die in deze figuur zijn afgebeeld voorbij gegaan aan het feit dat het sproeien van water op momenten dat het stevig vriest risicovol is. Zolang alle sproeiers voldoende water blijven krijgen is er geen gevaar maar als er sproeiers zodanig verstopt raken dat het waterdebiet onvoldoende is om de sproeier vorstvrij te houden zullen deze kapot kunnen vriezen.

De getrokken lijn stopt bij een maximaal geaccepteerde afstroom temperatuur van 8 °C. Dit omdat bij de berekeningen voor de freesiateelt is uitgegaan van water dat met een temperatuur van 10 °C op het dak wordt gespreid. In de berekeningen aan de tomatenteelt is uitgegaan van de beschikbaarheid van water van 14 °C. Dit verschil komt voort uit het eerder genoemde feit dat bij gebruik van koude voor grondkoeling geen hoge temperaturen in de warme bron verwacht mogen worden.

Als ook bij de berekening van de potenties van het dakbevoeiing-systeem wordt uitgegaan van maximaal geaccepteerde uitgaande watertemperatuur van 6 °C dan blijkt dat de toepassing van deksproeiers als koudeproductiesysteem in de tomatenteelt zo'n 150 MJ koude per m<sup>2</sup> per jaar kan opleveren en in de freesiateelt 250 MJ/(m<sup>2</sup> jr).

Bij deze berekeningen is uitgegaan van een iets groter sproeidebiet dan in de praktijk gebruikelijk is, namelijk 3 liter/(m<sup>2</sup> uur). Dit omdat anders het water vaak naar waarden tot ver onder de 6 °C

wordt gekoeld, wat een verlies aan koudeproductie oplevert en bovendien het bevezingsgevaar vergroot.

In de tomatenteelt wordt op deze manier 5 m<sup>3</sup> water per jaar versproeid (ruim 1600 draaiuren). In de freesiateelt komen door de lagere kasluchttemperatuur veel meer uren voor waarop het kasdek kouder dan 6 °C is en wordt bijna 7.6 m<sup>3</sup> water versproeid (in ruim 2500 draaiuren).

Van de totale koudeproductie zal een deel door de verdamping van water plaatsvinden. Het simulatiemodel berekent dat dit op jaarbasis in de tomatenteelt 40 liter/m<sup>2</sup> is en in de freesiateelt 65 liter/m<sup>2</sup>. Overigens zal dit waterverbruik niet zo'n groot probleem zijn omdat dit verbruik geheel in de winter plaatsvindt en er dan toch al gauw een overschot aan water in het bassin ligt.

Het feit dat het water over het dek versproeid moet worden leidt tot een belangrijke toename van de totale drukval die tijdens de werking van de installatie in stand moet worden gehouden. Deze druk is 4 bar (de Zwart, 2004). Het te versproeien waterdebiet in de winter is echter wat kleiner omdat de beperkte sproeicapaciteit van de standaard deksproeiers ertoe leidt dat de afstroomtemperatuur vaak lager zal zijn dan de beoogde 6 °C.

Om de warmtewisselaar op maximale capaciteit te laten werken kunnen de debieten aan primaire en aan secundaire zijde het beste gelijk gehouden worden. Dit betekent dat de debieten die tijdens de koudeproductie over het dek worden versproeid ook aan aquiferzijde moeten worden gehanteerd.

Wanneer er op grond van bovenstaande analyse opnieuw een tabelletje met kenmerken van de koudeproductie door middel van een dekbevoeiingssysteem wordt opgesteld ontstaat het volgende beeld

#### **Gebruik van deksproeiers**

Elektriciteitsverbruik bij koudeproductie: -

Drukverlies bij koude laden: (winter)  $2.5 + 0.8 + 4 = 7.3$  bar

Drukverlies bij koude gebruik grondkoeling:  $3.3 + 0.05$  bar

Drukverlies bij koude gebruik luchtkoeling:  $3.3 + 0.4$  bar

Elektriciteitsverbruik bij typische grondkoelinginstallatie ( $\Delta T_{\text{opslag}} = 4$  °C)  
 $0.04 \cdot [7.3 \cdot 7.6 / 250 + (3.3 + 0.4) / (4.18 \cdot 4)] = 0.018$  kWh/MJ

Elektriciteitsverbruik bij typische luchtkoelinginstallatie ( $\Delta T_{\text{opslag}} = 8$  °C)  
 $0.04 \cdot [7.3 \cdot 5.0 / 150 + (3.3 + 0.4) / (4.18 \cdot 8)] = 0.014$  kWh/MJ

De termen  $7.3 \cdot 7.6 / 250$  en  $7.3 \cdot 5.0 / 150$  dienen (tezamen met de 0.04 die buiten haakjes gebracht is, zie § 3.1) ter berekening van het elektriciteitsverbruik in de winter. In de getallen 7.6 en 3.2 worden de eerder genoemde jaarlijkse hoeveelheden water die met het systeem versproeid zijn teruggevonden en 250 en 150 zijn de daarmee geproduceerde hoeveelheden koude.

De conclusie uit bovenstaande berekeningen is dat het gebruik van deksproeiers een hoger elektriciteitsverbruik met zich meebrengt dan het gebruik van het regenwaterbassin en het road energy system, en nauwelijks minder gebruikt dan de natte koeltoren.

Het gemiddeld warmere kasdek tijdens het sproeien geeft echter ook een zekere verlaging van het gasverbruik. Het kasklimaatmodel berekent een gasbesparing van 0.5 m<sup>3</sup> per m<sup>2</sup> per jaar in de tomatenteelt en 1.1 m<sup>3</sup> per m<sup>2</sup> per jaar in de freesiateelt. Omgerekend naar elektriciteit bij een gemiddeld centralerendement van 43% is dit equivalent met een elektriciteitsbesparing van respectievelijk 1.85 en 4.0 kWh per m<sup>2</sup> per jaar<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Met 0.5 m<sup>3</sup> aardgas kan een elektriciteitscentrale met een rendement van 43% 1.85 kWh elektriciteit maken

Wanneer dit voordeel wordt toegerekend naar de koudeproductie betekent dit bij de tomatenteelt een energiebesparing van  $1.85/150 = 0.012$  kWh per MJ koude en in de Freesiateelt een besparing van  $4/250 = 0.016$  kWh per MJ koude.

Wanneer deze voordelen worden afgetrokken van de eerder genoemde elektriciteitsverbruiken dan wordt het energieverbruik voor koudeproductie in de freesiateelt  $0.018 - 0.016 = 0.002$  kWh/MJ en wordt dit in de tomatenteelt zelfs negatief.  $0.011 - 0.012 = -0.001$  kWh/MJ.

Dekbevloeiing als koudeproductiesysteem kan dus praktisch gesproken worden gezien als een systeem waarmee op vrijwel 100% duurzame basis koude geproduceerd kan worden. Het energieverbruik voor het heen en weer pompen wordt immers vrijwel geheel gecompenseerd door de energiebesparing die door vermindering van de warmtevraag wordt gerealiseerd.

Verlies van lichttransmissie van de kas is nauwelijks een probleem omdat het in de simulatie van de Freesiateelt slechts 300 uur voorkwam dat de installatie overdag aan stond (12% van de tijd). Verreweg de meeste uren waarop de installatie draait vallen in de nacht en/of bij een gesloten scherm.

### **Conclusies**

Vanuit het overzicht van de drie passieve koudeproductiesystemen die in § 3.3 zijn onderzocht kan de conclusie worden getrokken dat deze allen koude produceren met een duidelijk lager elektriciteitsgebruik dan koudeproductie met geforceerde warmteuitwisseling (koeltoren, § 3.2). Daar waar het gebruik van een koeltoren in de winter al tot zo'n 70% energiebesparing ten opzichte van het gebruik van een koelmachine in de zomer leidt scoren deze passieve koelsystemen al gauw 80% energiebesparing.

De hoeveelheid koude die met deze systemen kan worden geproduceerd is echter klein ten opzichte van de hoeveelheid die met een koeltoren kan worden geproduceerd. Één koeltoren van het type *Polacel CMDR12 180-DH-90* (figuur 3-3) levert voldoende koude voor 5 ha grondkoeling, terwijl de koude die op een gemiddeld tuinbouwbedrijf met het regenwaterbassin kan worden geproduceerd slechts zo'n 10% van het kasoppervlak van koude kan voorzien.

Toepassing van het road energy system op het erf bij een gemiddeld tuinbouwbedrijf is genoeg voor de grondkoeling van maximaal 20% van het bedrijf.

Het gebruik van dekbevloeiing in de freesiateelt komt qua grootte-orde evenwel zeer dicht in de buurt van een goede match tussen de energiezuinige productiecapaciteit van een kas en de koudebehoefte voor grondkoeling in diezelfde kas. Bovendien is deze vorm van koudeproductie van de drie passieve systemen energetisch gezien de meest gunstige omdat parallel aan de koudeproductie de warmtevraag van de kas wordt beperkt. Dit omdat de af te voeren warmte niet geheel wordt vernietigd, maar deels wordt gebruikt voor de beperking van het warmteverlies van de kas.

In de volgende paragraaf wordt ingegaan op het perspectief van warmtepompen, waarmee 100% van de afvalwarmte kan worden benut voor de dekking van de warmtevraag.

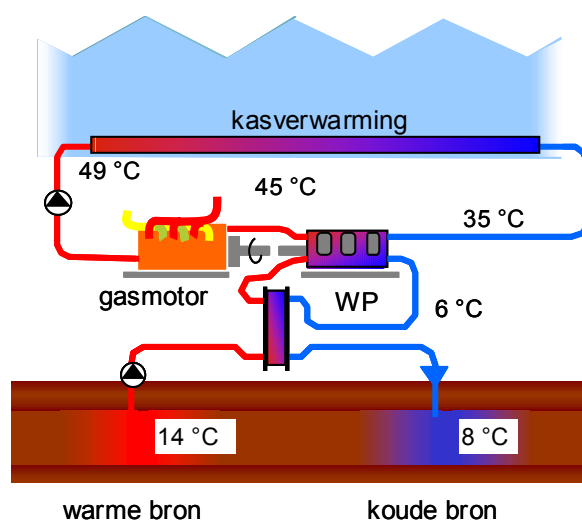
### 3.4 Koudeproductie met behulp van warmtepompen

In alle koelsystemen die in de voorgaande paragrafen de revue passeerden werd de warmte die bij de koudeproductie vrijkomt niet expliciet benut. Bij het road energy system wordt met de afvalwarmte de weg ijsvrij gehouden en bij de deksproeiers komt ongeveer 10 tot 15% van de afvalwarmte ten gunste van een verminderde warmtebehoefte.

In § 3.1 kwam echter al naar voren dat bij gebruik van een koelmachine afvalwarmte vrijkomt. Op momenten dat er in de tuinbouw koude nodig is zal er meestal niet tegelijkertijd ook warmte nodig zijn<sup>4</sup>. De gangbare koelmachines zijn dan ook ontworpen met een zo effectief mogelijke vernietiging van de warmte.

Wanneer er echter gebruik wordt gemaakt van een ondergronds energie opslagsysteem kan de koude in perioden worden geproduceerd waarop er wél behoefte is aan warmte (de winter). In dat geval kan de koelmachine als een warmtepomp worden gebruikt. In de regel betekent dit dat het temperatuurniveau van de condensor wat hoger moet worden gekozen (40 tot 50 °C). Dit gaat enigszins ten koste van de COP, maar daar staat tegenover dat de warmte die bij de warmtepomp vrijkomt benut kan worden en dus het primaire energieverbruik van andere warmteproductie-apparaten zal verminderen.

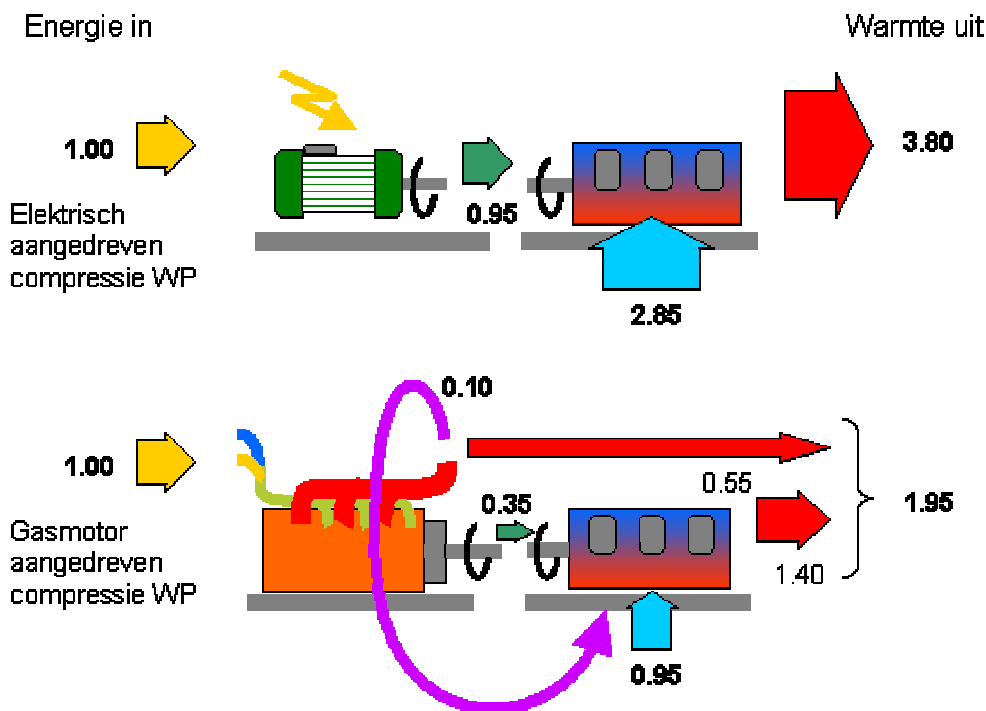
In figuur 3-14 wordt een illustratie gegeven van het gebruik van de warmtepomp als verwarmingsunit. In deze figuur wordt de warmtepomp aangedreven met behulp van een gasmotor (in de praktijk zal deze middels een WK via een generator en elektromotor elektrisch gekoppeld zijn aan de warmtepomp).



*Figuur 3-14 De warmtepomp als warmtebron voor kasverwarming die tevens koud water produceert voor koeltoepassingen in de zomer.*

In plaats van een gasmotor aangedreven warmtepomp kan ook gebruik gemaakt worden van een elektrisch, vanuit het openbare net aangedreven warmtepomp. In figuur 3-15 zijn de energiestromen die bij beide typen warmtepompen spelen in beeld gebracht.

<sup>4</sup> Een uitzondering hierop vormt het gebruik van actieve ontvochtiging met behulp van luchtbehandelingskasten in de winter



*Figuur 3-15 Karakteristieke energiecijfers voor een elektrisch aangedreven en gasmotor aangedreven compressie warmtepomp.*

Bij de elektrisch aangedreven warmtepomp wordt 0.75 MJ koude per MJ warmte geproduceerd en bij de gasmotor aangedreven variant (een elektrisch aangedreven warmtepomp in combinatie met een WK-unit) komt 0.49 MJ koude per MJ warmte vrij. Hierbij wordt er van uitgegaan dat er geen afvalwarmte van de WK wordt vernietigd. Dit uitgangspunt is inherent aan de beoogde inzet van de warmtepomp, namelijk als energiezuinige koudeproductiemethode.

Bezien vanuit de energiebehoefte voor deze warmte- en koudeproductie kan uit figuur 3-15 worden afgeleid dat de elektrisch aangedreven warmtepomp 10 MJ koude per kWh levert. Dit betekent onder het huidige opwekkingsrendement van het Nederlandse elektriciteitspark (43%) dat aan de warmtepomp 0.82 MJ primaire energie per MJ koude toegerekend moet worden. Bij deze koude komt evenwel  $1/0.75 = 1.33$  MJ warmte beschikbaar die in mindering gebracht kan worden op de hoeveelheid warmte die door een ketel moet worden voortgebracht. De ketel gebruikt hierdoor 1.3 MJ primaire energie minder (uitgaande van een rendement van 102% op onderwaarde). Afgezien van het elektriciteitsverbruik dat voortkomt uit de drukverliezen die met de opslag gemoeid zijn (zie figuur 3-7) leidt dus het gebruik van een elektrisch aangedreven warmtepomp tot een primaire energiebesparing van 0.52 MJ per MJ koude.

Bij een gasmotor aangedreven warmtepomp levert één MJ primaire energie een koudeproductie van 0.95 MJ en een warmteproductie van 1.95 MJ (zie figuur 3-15). Door deze warmte-output hoeft de ketel 1.90 MJ minder warmte te produceren. Afgezien van het elektriciteitsverbruik in verband met de drukverliezen bij de watercirculatie kan gesteld kan worden dat het gebruik van de warmte-output van de een gasmotor aangedreven warmtepomp leidt tot een primaire energiebesparing van 0.95 MJ per MJ koudeproductie.

Het elektriciteitsgebruik dat gepaard gaat aan de waterverplaatsingen over het opslagsysteem in de winter en de zomer kan met behulp van de informatie in de eerdere paragrafen gemakkelijk

worden berekend. Zowel in de winter als in de zomer speelt de 2.5 bar drukverlies aan de aquiferzijde van de warmtewisselaar (zie figuur 3-7). In de winter komt hier bovenop het steeds terugkerende drukverlies van 0.8 bar (scheidingswisselaar plus filter) en nog eens 0.2 voor het drukverlies van de verdampers van de warmtepomp (zie § 3.1)<sup>5</sup>.

Concreet betekent dit dat het elektriciteitsverbruik voor het laden van de koudebron bij een  $\Delta T$  van 4 °C (grondkoelingssituatie) dan  $0.04 \cdot (2.5 + 0.8 + 0.2) / (4.18 \cdot 4) = 0.0084 \text{ kWh/MJ}$  wordt. In geval een grotere  $\Delta T$  over het opslagsysteem kan worden gerealiseerd (8 °C) wordt het verbruik half zo groot en dus 0.0042 kWh/MJ.

Bij het ontladen van de koudebron in de zomer is het elektriciteitsverbruik voor het verpompen van water  $0.04 \cdot (2.5 + 0.8 + 0.05) / (4.18 \cdot 4) = 0.0080 \text{ kWh/MJ}$  in grondkoelingssituaties en  $0.04 \cdot (2.5 + 0.8 + 0.2) / (4.18 \cdot 8) = 0.0042 \text{ kWh/MJ}$  in geval de koude door luchtbehandelingskasten wordt geleid.

Voor het overall overzicht moeten de elektriciteitsverbruiken die gepaard gaan aan de opslag van de koude worden omgerekend in primaire energie alvorens ze kunnen worden opgeteld bij het verbruik dat voor de warmtepomp is genoemd.

In deze omrekening speelt het omzettingrendement van de centrale een rol volgens

$$\text{Primaire energie} = \text{kWh} \cdot 3.6 / \eta_{\text{centrale}} \quad [\text{MJ primaire energie}]$$

wat bij een centrale rendement van 43% neerkomt op Primaire energie =  $8.4 \cdot \text{kWh}$ .

Het totale primaire energieverbruik dat met het verpompen van water voor de opslag van koude gemoeid is bedraagt voor kassen waarbij de koude wordt gebruikt voor grondkoeling

$$(0.0084 \text{ (winter)} + 0.0080 \text{ (zomer)}) \cdot 8.4 = 0.14 \text{ MJ primaire energie per MJ koude.}$$

Voor kassen met luchtbehandelings-installaties, zoals de gesloten kas is dit de helft, dus 0.07 MJ primaire energie per MJ koude.

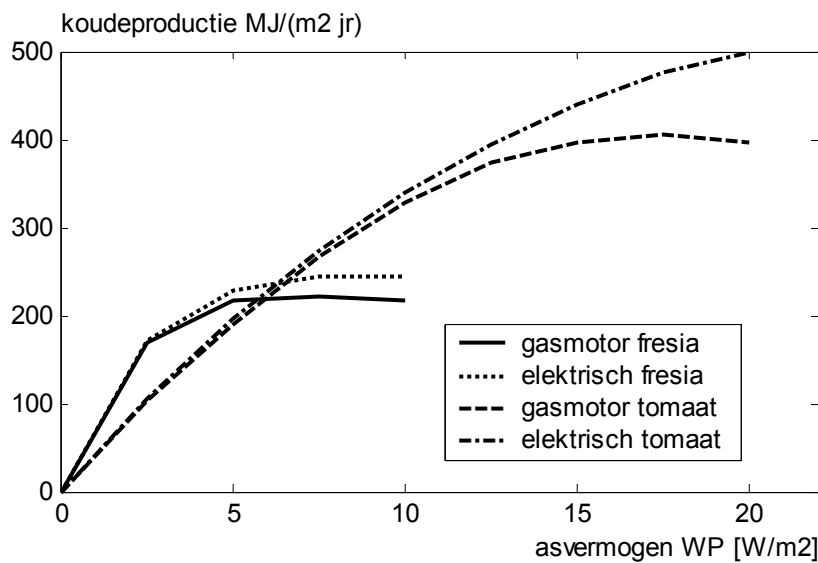
Rekening houdend met bovenstaande parasitaire verbruiken betekent het gebruik van een warmtepomp als energiezuinig koudeproductiemiddel dat er met een warmtepomp die aangedreven wordt uit het openbare net een netto energiebesparing kan worden gerealiseerd van 0.37 tot 0.44 MJ primaire energie per MJ koudeproductie wordt bespaard.

Bij een gasmotor aangedreven warmtepomp is dit 0.81 tot 0.88 MJ primaire energie per MJ koude.

De genoemde prestatiecijfers geven aan dat de gasmotor aangedreven warmtepomp qua energiebesparingsprestatie duidelijk beter scoort dan de elektrisch aangedreven variant. Omdat echter de besparing is uitgedrukt per eenheid geproduceerde koude, waarbij ook nog de vrijkomende warmte moet kunnen worden benut, moet voor een zuivere vergelijking ook gekeken worden naar de koudeproductie die de beide typen weten te realiseren. In onderstaande figuur is de koudeproductie die middels de beide typen warmtepompen op een tomatenbedrijf en op een freesiabedrijf kan worden geproduceerd als functie van het asvermogen weergegeven.

<sup>5</sup> Het drukverlies in de condensor van de warmtepomp wordt buiten beschouwing gelaten omdat dit niet veel zal verschillen van het drukverlies dat in de alternatieve warmte-productieunits (ketel+condensor) optreedt. Aangezien de warmteproductie van de warmtepomp in de plaats komt van de warmteproductie van de ketel is er alleen een verschuiving van de plaats waar het drukverlies optreedt.





*Figuur 3-16 Jaarlijkse koudeproductie van twee typen warmtepompen in de tomatenteelt en in de freesiateelt*

Het eerste dat opvalt is dat het koudeproductiepotentieel in de freesiateelt veel kleiner is dan in de tomatenteelt. Dit volgt uit de veel grotere warmtevraag in de tomatenteelt. Het feit dat de koudeproductie bij de freesiateelt bij kleine warmtepompvermogens groter is komt doordat de kasluchttemperatuur, en dus de gemiddelde buistemperatuur in de freesiateelt lager is. De COP is daardoor beter, zodat bij een klein asvermogen toch een behoorlijke koudeproductie gerealiseerd kan worden.

De maximale koudeproductie is ook in de tomatenteelt echter nogal beperkt, wat vooral komt doordat in de zomer veel CO<sub>2</sub> gewenst is en er dus liever met de ketel (via de buffer) dan met de warmtepomp verwarmd wordt. De ketel geeft immers veel meer CO<sub>2</sub> per eenheid warmte en bovendien kan de hoogwaardige warmte van de ketel goed gebufferd worden.

Zoals op grond van de gegevens in figuur 3-15 verwacht kan worden is in elk van de teelten de koudeproductie bij de elektrisch aangedreven warmtepomp groter dan bij de gasmotor aangedreven machine. Het verschil is echter niet zo erg groot zodat de energiebesparingsprestatie van de gasmotor aangedreven warmtepomp duidelijk groter zal blijven dan die van de elektrisch aangedreven machine.

### 3.5 Koudeproductiesystemen op een rij

In de vorige paragrafen is het energieverbruik van een aantal opties voor de productie van koude in de tuinbouw uitgerekend. In onderstaande tabellen worden de resultaten nog eens op een rijtje gezet. Om alle getallen vergelijkbaar te maken zijn de elektriciteitsgebruiken (die uitgedrukt waren in kWh) overal omgerekend naar primair energieverbruik (uitgedrukt in MJ). Hierbij is de bovengenoemde factor van 8.4 gebruikt, die geldt bij een centralerendement van 43%.

In de tabellen zijn de eerder genoemde verbruikscijfers verdeeld over de posten 'productie' en 'opslag en gebruik'. De som van deze twee kolommen komt (na verwerking van de conversiefactor 8.4) overeen de eerder genoemde cijfers, maar de verdeling die over deze twee posten is gemaakt zal hier en daar moeilijk te traceren zijn. Dit omdat zo'n verdeling tot op zekere hoogte arbitrair is. Zo is bij het dekbevoeiing alleen het pompvermogen waarmee het water over het dek versproeid wordt als productie-energie aangemerkt.

Er is een tabel gemaakt voor een typische grondkoelings-situatie. Hiervoor is een freesiateelt als uitgangspunt gekozen. Bij grondkoelings-situaties zal het temperatuur-verschil tussen warme en koude bron in de praktijk niet meer dan 4 °C bedragen, zodat er slechts 16.8 MJ koude per m<sup>3</sup> water kan worden opgeslagen. Dit heeft een opdrijvend effect op het elektriciteitsverbruik voor de de koude-opslag.

Tabel 3.1. Overzicht van het primaire energiegebruik dat kan worden toegerekend aan de koudeproductie voor een freesiakas met grondkoeling. De koude wordt daarbij via een slangenstelsel in de kas gebracht en het temperatuurverschil tussen warme en koude bron bedraagt 4 °C.

| systeem      | productie    | opslag en gebruik                       | besparing op warmtevraag | totaal primair verbruik | maximale koudeproductie per jaar       |
|--------------|--------------|---|--------------------------|-------------------------|--|
|              |              | MJ <sub>prim</sub> /MJ <sub>koude</sub> |                          |                         |  |
| koelmachine  | 0.614 (elek) | 0.006                                   | 0                        | <b>0.62</b>             | onbeperkt                              |
| koeltoren    | 0.06 (elek)  | 0.14                                    | 0                        | <b>0.20</b>             | onbeperkt                              |
| bassin       | verwaarloosb | 0.13                                    | 0                        | <b>0.13</b>             | 40 MJ/m <sup>2</sup> <sub>kas</sub> *  |
| Road Energy  | verwaarloosb | 0.13                                    | 0                        | <b>0.13</b>             | 25 MJ/m <sup>2</sup> <sub>kas</sub> ** |
| deksproeiers | 0.04 (elek)  | 0.11                                    | -0.14                    | <b>0.01</b>             | 250 MJ/m <sup>2</sup> <sub>kas</sub>   |
| Electr. WP   | 0.82 (elek)  | 0.14                                    | -1.3                     | <b>-0.34</b>            | 250 MJ/m <sup>2</sup> <sub>kas</sub>   |
| Gasm. WP     | 0.95 (gas)   | 0.14                                    | -1.9                     | <b>-0.81</b>            | 220 MJ/m <sup>2</sup> <sub>kas</sub>   |

\*Het regenwaterbassin produceert 400 MJ koude per m<sup>2</sup> bassin, maar omdat het bassinoppervlak gemiddeld slechts 10% van het bedrijfsoppervlak beslaat is dit getal door 10 gedeeld.

\*\*Het Road Energy System produceert 500 MJ koude per m<sup>2</sup> erf, maar omdat het erfoppervlak gemiddeld slechts 5% van het bedrijfsoppervlak beslaat is dit getal door 20 gedeeld.

In tabel 3.2 is een soortgelijk overzicht gemaakt voor een kas waarin middels luchtbehandelings-installaties gekoeld wordt. Hierbij is het mogelijk om een temperatuurverschil van 8 °C tussen warme en koude bron in het opslagsysteem tot stand te brengen, waardoor het energieverbruik voor de opslag vermindert. Qua teelt is hierbij uitgegaan van een tomatenteelt. Deze heeft een duidelijk grotere warmtevraag dan de freesiateelt, wat vooral tot uitdrukking komt in de grotere maximale koudeproductie van de warmtepomp-opties.

Tabel 3.2. Overzicht van het primaire energiegebruik dat kan worden toegerekend aan de koudeproductie voor een situatie zoals in de (semi) gesloten kas. De koude wordt daarbij via luchtbehandelingskasten in de kas gebracht en het temperatuurverschil tussen warme en koude bron bedraagt 8 °C.

| systeem      | productie    | opslag en gebruik                                  | besparing op warmtevraag | totaal primair verbruik | maximale koudeproductie per jaar        |
|--------------|--------------|--|--------------------------|-------------------------|---|
|              |              | $\text{MJ}_{\text{prim}}/\text{MJ}_{\text{koude}}$ |                          |                         |   |
| koelmachine  | 0.614 (elek) | 0.006  | 0                        | <b>0.62</b>             | onbeperkt                               |
| koeltoren    | 0.06 (elek)  | 0.07   | 0                        | <b>0.13</b>             | onbeperkt                               |
| bassin       | verwaarloosb | 0.07   | 0                        | <b>0.07</b>             | 400 MJ/m <sup>2</sup> <sub>kas</sub> *  |
| Road Energy  | verwaarloosb | 0.07   | 0                        | <b>0.07</b>             | 500 MJ/m <sup>2</sup> <sub>kas</sub> ** |
| deksproeiers | 0.04 (elek)  | 0.08   | -0.10                    | <b>-0.02</b>            | 150 MJ/m <sup>2</sup> <sub>kas</sub>    |
| Electr. WP   | 0.82 (elek)  | 0.07   | -1.3                     | <b>-0.41</b>            | 500 MJ/m <sup>2</sup> <sub>kas</sub>    |
| Gasm. WP     | 0.95 (gas)   | 0.07   | -1.9                     | <b>-0.88</b>            | 400 MJ/m <sup>2</sup> <sub>kas</sub>    |

\*Het regenwaterbassin produceert 400 MJ koude per m<sup>2</sup> bassin, maar omdat het bassinoppervlak gemiddeld slechts 10% van het bedrijfsoppervlak beslaat is dit getal door 10 gedeeld.

\*\*Het Road Energy System produceert 500 MJ koude per m<sup>2</sup> erf, maar omdat het erfoppervlak gemiddeld slechts 5% van het bedrijfsoppervlak beslaat is dit getal door 20 gedeeld.

De belangrijkste conclusie die uit de tabellen 3.1 en 3.2 getrokken kan worden is dat het verleggen van de kunstmatige koudeproductie van zomer naar koudeproductie in de winter tot een duidelijke energiebesparing leidt. Weliswaar gaat een deel van de besparing weer verloren door het energieverbruik van het seizoens-opslag-systeem dat daarvoor nodig is, maar het overall effect blijft duidelijk positief.

De grootste besparing wordt uiteraard bereikt wanneer de warmte die bij de productie van koude beschikbaar komt ook nog eens wordt benut. Dit blijkt al wanneer voor de koeling gebruik wordt gemaakt van deksproeiers in de winter. Het kasdek wordt hierdoor warmer en de warmtevraag van de kas neemt af.

De benutting van de af te voeren warmte wordt echter veel beter gerealiseerd bij toepassing van een warmtepomp, waarbij een gasmotor aangedreven warmtepomp (in de praktijk een combinatie van een WK en een elektrisch aangedreven warmtepomp) duidelijk betere potenties oplevert dan de warmtepomp wordt aangedreven vanuit het openbare elektriciteitsnet.

## 4 Uitwerking voor een praktijksituatie

In het voorgaande is steeds een onderscheid gemaakt tussen de situatie waarbij koude wordt gebruikt voor grondkoelings-situaties en waarbij koude wordt gebruikt voor semi-gesloten kassen. In dit hoofdstuk zal voor beide situaties worden gekeken naar het economisch en energetisch effect van de toepassing van energiezuinige alternatieven, waarbij het gebruik van een koelmachine als referentie wordt gehanteerd.

### 4.1 Koudeproductie-alternatieven voor de freesiateelt

#### Referentie

In een freesiateelt met grondkoeling wordt bij gebruik van een koelmachine op jaarbasis 19 kWh per m<sup>2</sup> per jaar gebruikt. Volgens kwantitatieve informatie voor de glastuinbouw zijn de aanschafkosten voor zo'n koelmachine € 30.000,- per ha en bedragen de afschrijvings- en onderhoudspercentages respectievelijk 8% en 5%. Uitgaande van een rentepercentage van 4% vormen de vaste jaarkosten dus  $3 \cdot 0,15 = € 0,45$  per m<sup>2</sup>.

De som van vaste en variabele kosten bedragen bij een elektriciteitsstarief van gemiddeld € 0,05 per kWh (voornamelijk plateau-uren) bedragen derhalve € 1,41 per m<sup>2</sup> per jaar.

#### Koeltoren

Wanneer voor deze situatie zou worden besloten om op een energiezuinige wijze koude te gaan produceren moet begonnen worden met de aanleg van een ondergronds energieopslagsysteem. Ten behoeve van het verkrijgen van voldoende koelvermogen bij een klein temperatuurverschil (typisch voor grondkoelings-installaties) moet deze een capaciteit kunnen leveren van 80 m<sup>3</sup>/ha per uur. Voor de kosten die aan zo'n systeem toegekend moeten worden circuleren veel verschillende getallen. In 2002 heeft A&F in samenspraak met vertegenwoordigers uit de installatiepraktijk een gemiddelde prijs opgesteld van € 1930 \* maxDebiet + 78000 als richtprijs voor een compleet ondergronds energieopslagproject (de Zwart en Knies, 2002). Bij de genoemde 80 m<sup>3</sup> per uur zou dit betekenen dat zo'n opslagsysteem € 230.000,- euro zou kosten. Er zijn echter ook publicaties van praktijktuinders die bronnen hebben laten aanleggen voor € 25.000,- (Tesselaar, 2002). Met een afschrijvingstermijn van 30 jaar, een onderhoudspercentage van 2% en een rentepercentage van 4% variëren de jaarkosten daarmee van € 0,18 tot € 1,62 per m<sup>2</sup>. Het is duidelijk dat bij de hoogste van deze twee het gebruik van energiezuinige koudeproductie ondenkbaar is. Dit strookt niet met de praktijk, waar regelmatig energie-opslagsystemen worden aangelegd. Er wordt daarom in de rest van deze paragraaf gerekend met € 0,50 voor de jaarkosten van het ondergronds energieopslagsysteem (een investering van € 69.000). Hiermee wordt dus gesteld dat € 0,18 wel heel erg goedkoop is, maar € 1,62 onwaarschijnlijk hoog ligt.

Een koeltoren met een capaciteit van 80 m<sup>3</sup>/uur kost volgens bestudering van een aantal offertes van Polacel (zie figuur 3-3) € 25.000. Bij toepassing van 10% afschrijving, 5% onderhoud en 4% rente zijn de jaarkosten € 0,43 per m<sup>2</sup>.

Volgens § 3.2 is het elektriciteitsverbruik bij gebruik van een koeltoren 0,024 kWh/MJ \* 260 MJ = 6,2 kWh. Bij een gemiddeld elektriciteitsstarief van € 0,035 per kWh (voor de helft dalstarief en voor de andere helft plateau-tarief) zijn de elektriciteitskosten dan € 0,22.

De totale jaarkosten zijn daarmee € 1,15, waarmee de jaarkosten € 0,26 per m<sup>2</sup> lager zijn dan in de referentie-situatie. De meer-investering van € 64.000 wordt dan in ruim 11 jaar terugverdiend.

Voor de berekening van de bovengenoemde terugverdientijd worden de netto investeringen gedeeld door de cashflow. De cashflow is niet hetzelfde als het saldo. In de koeltoren-optie is het saldo € 0.26, maar de cashflow is in deze optie € 0.55. Deze is aanzienlijk hoger omdat hierin geen afschrijvingen zijn opgenomen, maar wordt berekend uit de elektriciteitsbesparing minus de onderhoudskosten en de rentelasten over de investering.

### **Regenwaterbassin + koeltoren**

De energiezuinige koudeproductie kan nog wat goedkoper worden gemaakt wanneer deze wordt gecombineerd met het energiezuiniger en goedkopere regenwaterbassin. Het regenwaterbassin, met een wateroppervlak van 10% van het kas-oppervlak kan 15% van de benodigde koude produceren ( $400 \text{ MJ} * 1000 \text{ m}^2 / (260 \text{ MJ} * 10.000 \text{ m}^2)$ ). De jaarkosten van de koeltoren dalen daardoor met 15% en het gemiddelde elektriciteitsgebruik wordt  $0.85*0.024+0.15*0.016 = 0.023$  kWh/MJ koude.

De kosten voor elektriciteit dalen dan met € 0,01 de kosten die met de investering samenhangen dalen met € 0,05. Het netto resultaat groeit daardoor van € 0,26 naar € 0,42 en de terugverdientijd daalt naar 10 jaar.

### **Road Energy system + koeltoren**

De kosten voor de aanleg van een Road Energy System zullen vergelijkbaar zijn met de aanleg van een vloerverwarmingsnet in een betonvloer. Volgens kwantitatieve informatie voor de Glastuinbouw bedragen deze kosten € 3,50 per m<sup>2</sup> en moeten hiervoor een afschrijvingspercentage en onderhoudspercentage van respectievelijk 7% en 1% worden gehanteerd.

Wanneer wordt verondersteld dat de erfverharding waarin het Road Energy System kan worden aangelegd 5% van het bedrijfsoppervlak beslaat dan kan 10% van de benodigde koude met dit systeem worden geproduceerd ( $500 \text{ MJ} * 500 \text{ m}^2 / (300 \text{ MJ} * 10.000 \text{ m}^2)$ ).

De jaarkosten voor deze combinatie bedragen onder de genoemde uitgangspunten € 1,43 per m<sup>2</sup>, en zijn daarmee iets lager dan bij gebruik van een koeltoren.

Het totale energieverbruik is slechts fractioneel lager. Het grootste voordeel van het Road Energy System is dan ook vooral het feit dat de erfverharding het hele jaar ijsvrij gehouden kan worden.

### **Deksproeiers in combinatie met het regenwaterbassin**

Deksproeiers alleen kunnen de koudebehoefte net niet dekken, maar in combinatie met de koude die met het regenwaterbassin kan worden verzameld lukt dit wel. De deksproeiers leveren dan 250 MJ en de het regenwaterbassin de resterende 10 MJ.

Qua investeringen voor een standaard deksproei-systeem (met een sproeidebiet van 3 liter/m<sup>2</sup> per jaar) wordt in het rapport “Praktijkexperiment duurzame energieverzameling door middel van daksproeiers” (de Zwart, 2004) een bedrag van € 1.5 per m<sup>2</sup> genoemd met een afschrijvingstermijn van 10 jaar en een onderhoudspercentage van 2%. De totale jaarkosten voor het dekbevoeiingssysteem komen daarmee op € 0.21 per m<sup>2</sup>. De elektriciteitskosten komen op  $(250 \text{ MJ} * 0.018 \text{ kWh/MJ} + 10 \text{ MJ} * 0.016 \text{ kWh/MJ}) * € 0.035/\text{kWh} = € 0.16$ , wat reeds lager is dan bij gebruik van een koeltoren.

Daarbij verstookt de ketel ook nog eens  $1.1 \text{ m}^3$  gas minder, waardoor bij een gasprijs van gemiddeld € 0.15 per  $\text{m}^3$  ruim € 0.16 per  $\text{m}^2$  wordt bespaard. De resultante van jaarkosten voor ondergronds energieopslagsysteem, dekbevloeiing, elektriciteitsverbruik en gasbesparing is € 0,65, waardoor deze combinatie jaarlijks € 0,69 per  $\text{m}^2$  bespaart. De terugverdientijd wordt berekend op 6 jaar, waarbij deze combinatie het best renderende passieve systeem is.

### **Warmtepomp in combinatie met het gebruik van het bassin**

In de Freesiateelt produceert een warmtepomp met een asvermogen van 50 kW/ha 210 MJ koude per  $\text{m}^2$  per jaar (nauwelijks afhankelijk van het type warmtepomp). Er zal dus nog 40 MJ additionele koude moeten worden geproduceerd. Dit kan op een goedkope manier door een serie-schakeling van het regenwaterbassin en de warmtepomp. In dat geval mag de uitstroomtemperatuur van het bassin namelijk iets hoger gesteld worden en groeit de productie. De warmtepomp kan dan immers de verdere uitkoeling naar  $6^\circ\text{C}$  realiseren. Zo'n serieschakeling had bij de vorige opties geen zin omdat het daar allemaal passieve koelsystemen betrof.

Bij gebruik van een elektrisch aangedreven warmtepomp loopt het elektriciteitsverbruik op naar  $210 \text{ MJ} * (0.1 + 0.0164) \text{ kWh/MJ} + 50 \text{ MJ} * 0.016 \text{ kWh/MJ} = 25 \text{ kWh}$ . In deze berekening is het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp berekend uit de conclusies die onder figuur 3-15 zijn getrokken (10 MJ koude per kWh en dus 0.1 kWh per MJ en 0.0164 kWh voor het verpompen van water). De elektriciteitskosten zijn in dat geval  $25 * 0.035 = € 0.88$ .

De gasbesparing bedraagt  $1.3 \text{ MJ}_{\text{prim}}/\text{MJ} * 210 \text{ MJ} = 286 \text{ MJ}$ , wat overeenkomt met  $9.2 \text{ m}^3$  aardgas en een waarde vertegenwoordigt van  $9.2 * € 0.15 = € 1.38$

Qua investeringen wordt in plaats van de € 3,- voor de koelmachine (referentiesituatie) een ondergronds energieopslagsysteem van € 6.90 en een elektrische warmtepomp van € 3,06 gebruikt (kostprijs van de warmtepomp conform “De kas als zonne-energie oogster” (de Zwart, 2004)). De elektrische warmtepomp is dus praktisch net zo duur als de koelmachine (wat voor de hand ligt omdat het vrijwel hetzelfde apparaat is). Voor de jaarkosten wordt gerekend met een afschrijvingsperiode van 10 jaar en een onderhoudspercentage van 5%. De jaarkosten van de elektrische warmtepomp komen daarmee op € 0,52 per  $\text{m}^2$ .

De jaarkosten voor het ondergronds energieopslagsysteem zijn net als in de vorige gevallen € 0,50 per  $\text{m}^2$  (aangenomen dat het systeem voor € 69.000 per ha kan worden aangelegd).

Het saldo komt daarmee op  $1,41 - (0,50 + 0,52 + 0,88 - 1,38) = 0,89$  per  $\text{m}^2$  per jaar.

De jaarlijkse cashflow is 1.22, waardoor de terugverdientijd op de meer-investering op 5.7 jaar uitkomt.

Wanneer een gasmotor warmtepomp wordt gebruikt dan zakt het elektriciteits verbruik naar 4.2 kWh en zakken de elektriciteitskosten naar € 0,15 per  $\text{m}^2$  per jaar. De gasbesparing zakt echter ook (de warmtepomp is immers gasmotor aangedreven). In plaats van € 1.38, zoals in het vorige stuk leidt het gebruik van een gasmotor warmtepomp tot een gaskostenbesparing van € 1,00 per  $\text{m}^2$ . (de warmtepomp gebruikt  $0.030 \text{ m}^3$  gas per MJ koude en bespaart  $0.060 \text{ m}^3$  gas bij de ketel. Een koudeproductie van 220 MJ levert dus  $220 * 0.030 = 6.6 \text{ m}^3$  gasbesparing, wat bij een commodity prijs van 15 cent per  $\text{m}^3$  € 1,- waard is).

De jaarkosten van een gasmotor aangedreven warmtepomp met een asvermogen van  $5 \text{ W}/\text{m}^2$  zijn echter wat hoger, namelijk € 0.85 per  $\text{m}^2$  jaar.

Het overall effect is een evenwel een iets hoger saldo, namelijk € 0,91 per  $\text{m}^2$  per jaar.

De cashflow is ook hoger, namelijk € 1.40 per  $\text{m}^2$  per jaar, maar omdat de investeringen eveneens hoger zijn komt de terugverdientijd iets hoger uit (6.4 jaar).

## Conclusie

Voor de Freesiateelt waar de grondkoeling een koudebehoefte van 260 MJ per m<sup>2</sup> per jaar oplevert, is het onder de gestelde uitgangspunten bedrijfseconomisch verantwoord om in plaats van de gangbare praktijk, waarbij deze koude wordt gemaakt met een koelmachine, over te stappen naar een systeem met seizoensbuffering van koude in een ondergronds energieopslagsysteem. Voorwaarde is dat zo'n systeem (met de maximaal de debiet van 80 m<sup>3</sup>/(ha uur)) voor zo'n € 70.000 kan worden aangelegd.

Wanneer de koude vervolgens met een koeltoren wordt geproduceerd, waardoor vooral gebruik wordt gemaakt van de winterse koude, wordt 13 kWh elektriciteit per m<sup>2</sup> per jaar bespaard op een referentieniveau van 19 kWh. De terugverdiendtijd is echter lang, 11 jaar.

Andere energiezuinige systemen (het gebruik van deksproeiers, een elektrisch aangedreven warmtepomp of een gasmotor aangedreven warmtepomp) zijn zowel energetisch als economisch gunstiger. Bij deze systemen wordt de investering in 5.7 tot 6½ jaar terugverdiend.

De investering in het gebruik van deksproeiers die in de winter met name 's nachts worden aangezet om middels het koude dek water te koelen geeft een energiebesparing van jaarlijks bijna 160 MJ primaire energie (5 m<sup>3</sup> aardgas equivalenten) ten opzichte van het gebruik van een koelmachine in de zomer.

De elektrisch aangedreven warmtepomp leidt tot een jaarlijkse primaire energiebesparing van 250 MJ primaire energie (bijna 8 m<sup>3</sup> aardgas equivalenten per m<sup>2</sup> per jaar) en wordt terugverdiend in 5.7 jaar.

Een gasmotor aangedreven warmtepomp geeft jaarlijks 370 MJ primaire energie besparing, wat overeenkomt met 12 m<sup>3</sup> aardgas equivalenten. De investering in de gasmotor warmtepomp en het seizoens-opslag systeem worden in 6½ jaar terugverdiend.

Wanneer in de toekomst evenwel de energieprestatie van de tuinbouw niet zozeer wordt afgemeten naar het gebruik van primaire energie, maar meer op grond van de CO<sub>2</sub>-uitstoot van het bedrijf kan het perspectief van de elektrische warmtepomp toenemen ten opzichte van het perspectief van de gasmotor aangedreven warmtepomp.

Immers, bij gebruik van een gasmotor verbruikt het freesiabedrijf nog altijd zo'n 11 m<sup>3</sup> aardgas, terwijl dit bij gebruik van een elektrische warmtepomp niet meer dan 8 m<sup>3</sup> op het freesiabedrijf verstoekt zal worden. Dat de elektriciteitscentrale voor de productie van de stroom voor de elektrische warmtepomp 7 m<sup>3</sup> aardgas per m<sup>2</sup> per jaar verstoekt blijft buiten beeld wanneer alleen naar CO<sub>2</sub> productie die op het bedrijf vrijkomt wordt gekeken.

## 4.2 Additionele koudeproductie voor gesloten kassen

### Referentie

De koudebehoefte voor een gesloten kas is zeer groot in vergelijking tot die van teelten met grondkoeling. De toepassing van koelmachines in de zomer, wat bij de Freesiateelt als referentie gold, is voor gesloten kassen dan ook geen optie. 2000 MJ koudeproductie zou immers een koelmachine met een asvermogen van 100 W/m<sup>2</sup> vergen (jaarkosten € 4,-) en samen met een elektriciteitsverbruik van 148 kWh zouden de jaarkosten al boven de € 10,- per m<sup>2</sup> liggen. Bij een productiestijging van 20% (door de sluiting van de kas) en een gemiddelde productwaarde van € 45,- per m<sup>2</sup> per jaar zouden de kosten niet worden terugverdiend, nog afgezien van de kosten voor financiering van luchtbehandelingskasten en luchtverdeelsystemen.

Daarom wordt voor de bespiegelingen op koudeproductie-systemen voor gesloten kassen de situatie waarbij reeds gebruik wordt gemaakt van een ondergronds energieopslagsysteem als uitgangspunt gehanteerd.

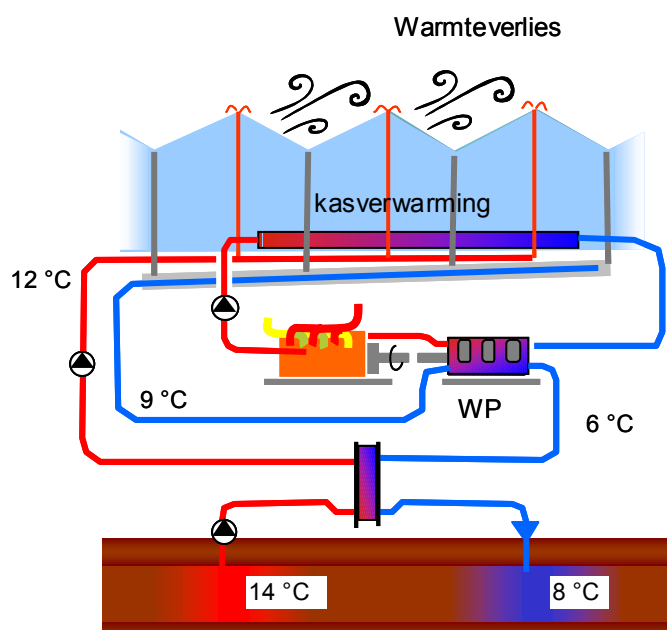
In de definitie van de referentiesituatie wordt derhalve reeds gebruik gemaakt van een gasmotor aangedreven warmtepomp. Deze produceert volgens figuur 3-15 400 MJ koude. Dit is het resultaat van een simulatieberekening met een warmtepomp voor de tomatenteelt met scherm in een energiezuinige set klimaatinstellingen. Uitgaande van een totale koudebehoefte van 2000 MJ/m<sup>2</sup>/jaar zou er dus nog 1600 MJ additionele koudeproductie nodig zijn om de gehele kas gesloten te kunnen houden.

De oplossing die bij Themato voor het koudetekort is gekozen bestaat uit het sluiten van een beperkt deel van de kas, waardoor de koudeproductie van de gehele kas ten dienste staat van de koeling van een klein deel. Op grond van bovengenoemde gegevens zou 20% van de kas gesloten kunnen worden. Bij Themato is een groter deel gesloten (26%). Er is nog geen rapportage beschikbaar waaruit kan worden afgeleid of deze grotere gesloten fractie het gevolg is van een groter warmteverbruik (en dus grotere koudeproductie) of dat de warmtepomp beter presteert dan in de simulaties is aangenomen.

### Alternatieven

Aangezien het huidige concept van gesloten kassen reeds maximaal gebruik maakt van het energiebesparende potentieel van koudeproductie (koudeproductie met behulp van een gasmotor aangedreven warmtepomp) zullen alle alternatieve koudeproductiesystemen tot een hoger energieverbruik leiden. Van deze alternatieve systemen (natte koeltoeren in de winter, het regenwaterbassin, het Road Energy System en het dekbevoeiingssysteem) is het dekbevoeiingssysteem het energie-zuinigste (zie tabel 3.2).

In de discussie rond figuur 3-13 werd uitgegaan van een koudeproductie potentieel van 150 MJ/m<sup>2</sup> per jaar, die gerealiseerd zou kunnen worden bij een maximale afstroomtemperatuur van 6 °C. Wanneer het dekbevoeiingssysteem echter in serie wordt gezet met de warmtepomp dan kan de eis voor de maximaal geaccepteerde afstroomtemperatuur worden verhoogd en zou deze op 10 °C gesteld kunnen worden. Volgens figuur 3-13 wordt de hoeveelheid koude die in dat geval vanaf het kasdek kan worden verzameld 250 MJ per m<sup>2</sup> per jaar. Het systeem zou dan kunnen werken volgens onderstaande figuur.



*Figuur 4-1 Serieschakeling van kasdekbevoeiingssysteem met de warmtepomp.*



In de praktijk zal het regenwaterbassin hierbij ook nog een bufferende rol spelen omdat het water dat van het kasdek afstoomt daarin terecht komt.

Op jaarbasis zal met de bovengeschetste serieschakeling  $250 + 400 = 650$  MJ koude kunnen worden geproduceerd. In dat geval zou bijna  $1/3$ , in plaats van 20% van het bedrijf gesloten kunnen worden met slechts 2.8 kWh extra elektriciteitsverbruik per  $m^2$  ( $250 \text{ MJ} * 0.011 \text{ kWh/MJ}$ , zie samenvattend overzicht bij gebruik van deksproeiers). Het gemiddeld warmere kasdek leidt ook nog tot een verlaging van de warmtevraag. Deze is bij de bespreking van figuur 3-13 voor de tomatenteelt op  $0.5 \text{ m}^3$  aardgas gesteld, maar doordat de warmte met een warmtepomp wordt geproduceerd geeft dit bij een gesloten kas slechts  $0.25 \text{ m}^3$  gasbesparing. Dit levert dus kostenbesparing van € 0.04 per  $m^2$  per jaar.

De investeringen voor deze extra koudeproductie mogelijkheid bedragen € 1,- per  $m^2$ . Daar komt nog de uitbreiding van de warmte-opslagcapaciteit bij. Deze zal immers ongeveer 1.5 maal zo groot moeten worden.

De andere passieve systemen (Road Energy System en regenwaterbassin) hebben een dermate kleine capaciteit dat deze in het kader van een additionele koudeproductie voor gesloten kassen niet relevant zijn.

Het gebruik van een koeltoren in de winter om koude te maken voor de zomer kan op elke capaciteit worden toegepast. De investering voor zo'n koeltoren zijn echter hoger (zo'n € 2,50 voor 250 MJ, zie de verhandeling over koeltorens bij de freesiateelt). Het elektriciteitsgebruik is eveneens duidelijk hoger (zie tabel 3.2).

## Conclusie

De koudeproductie voor gesloten kassen wordt in de referentie situatie gerealiseerd door gebruik te maken van gasmotor aangedreven warmtepomp. In de tabel 3.2 is te zien dat dit reeds het meest energie-zuinige koudeproductiesysteem is.

Gezien de doelstelling van dit project moet dus geconcludeerd worden dat er geen alternatieven kunnen worden doorgerekend. Er is echter desalniettemin een berekening gedaan naar het gebruik van deksproeiers, omdat deze bij de Freesiateelt ook een goed perspectief gaven. Het blijkt mogelijk om door serieschakeling van deksproeiers met de warmtepomp zo'n 250 MJ koude extra kan worden gemaakt met slechts 2.8 kWh elektriciteit en lage investeringskosten. Daarbij wordt er een kleine additionele energiebesparing gerealiseerd ( $0.25 \text{ m}^3 / (m^2 \text{ jaar})$ )

## 5 Conclusies en aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

De productie van koude met een koelmachine kost een aanzienlijke hoeveelheid primaire energie ( $0.62 \text{ MJ}_{\text{prim}}$  per MJ koude). In de tuinbouw is er behoefte aan koude voor grondkoeling of kasluchtkoeling en op die momenten is er geen warmtevraag. Bij gebruik van koelmachines wordt de warmte die bij de koudeproductie vrijkomt dus direct vernietigd.

Wanneer in deze situatie gebruik wordt gemaakt van seizoensbuffering in een ondergronds energieopslagsysteem kan een forse energiebesparing worden gerealiseerd.

Met name in teelten met grondkoeling, waar het gebruik van koelmachines in de zomer als referentie geldt, levert de verplaatsing van koudeproductie naar de winter een primaire energiebesparing voor koudeproductie van tenminste 65%. Indien het ondergrondse energieopslagsysteem dat daarbij hoort (typisch  $80 \text{ m}^3/(\text{ha uur})$ ) voor ongeveer € 70.000 kan worden aangelegd kunnen de investeringen die voor zo'n energiezuinig systeem nodig zijn ook bedrijfseconomisch rendabel worden ingezet.

De energetisch meest perspectiefvolle optie is het gebruik van de gasmotor aangedreven warmtepomp als systeem waarmee in de winter, met gebruik van de vrijkomende warmte, een koudevoorraad voor de zomer gemaakt kan worden. Met deze installatie kunnen in een gemiddelde freesiateelt jaarlijks  $12 \text{ m}^3$  aardgas-equivalenten aan primaire energie worden bespaard. De helft van deze besparingen komt voort uit vermeden gasverbruik voor elektriciteitsproductie in de centrale. Het andere deel komt voort uit de benutting van de afvalwarmte van de koudeproductie, waardoor de ketel minder hoeft te verwarmen. Onder de gehanteerde uitgangspunten is het bedrijfseconomisch saldo € 0.91 en is deze installatie in  $6\frac{1}{2}$  jaar terugverdiend.

Indien een elektrisch aangedreven warmtepomp wordt gebruikt veranderen de economische parameters nauwelijks, maar daalt de energiebesparingspotentie naar bijna  $8 \text{ m}^3$  aardgas equivalenten per  $\text{m}^2$  per jaar.

De derde optie die bij de freesiateelt de kortste korte terugverdientijd laat zien is het gebruik van deksproeiers. Deze investering is in 6 jaar terugverdiend en levert onder de gehanteerde uitgangspunten een bedrijfseconomisch saldo van € 0,69

Andere opties, zoals het gebruik van koeltorens, de benutting van het regenwaterbassin en het gebruik van een Road Energy System (een soort vloerverwarming in de erfverharding) besparen eveneens energie ten opzichte van de koelmachine in de zomer maar leveren een klein saldo en een lange terugverdientijd. Bovendien kunnen het regenwaterbassin en het Road Energy System alleen in combinatie met een ander koudeproductiesysteem worden ingezet.

De koudeproductie voor gesloten kassen is een heel ander verhaal. Dit komt voornamelijk omdat de referentie die hierbij gehanteerd moet worden meteen al de meest energiezuinige wijze van koudeproductie is (namelijk het gebruik van een gasmotor aangedreven warmtepomp). De koudeproductie van zo'n installatie is echter ontoereikend om geheel in de koudeproductie van een gesloten kas te kunnen voorzien. Daarom wordt in de huidige praktijk de koudeproductie met het volledige kasoppervlak gerealiseerd en slechts een deel van de kas gesloten.

Alle opties om de koudeproductie te doen toenemen, en daarmee de gesloten fractie te kunnen laten groeien leiden tot een hoger energieverbruik, en passen derhalve niet in het kader van dit project. Omdat het gebruik van deksproeiers bij de Freesiateelt echter goede perspectieven liet zien is deze optie ook voor de gesloten kas in beschouwing genomen.

Het bleek dat door serieschakeling van de koudeproductie van deksproeiers met die van de warmtepomp de totale koudeproductie van 400 MJ/(m<sup>2</sup> jaar) kon oplopen naar 650 MJ/(m<sup>2</sup> jaar). Het extra elektriciteitsgebruik dat hiermee gepaard gaat bedraagt slechts 2.8 kWh/(m<sup>2</sup> jaar). De bedrijfseconomische implicatie hiervan is niet doorgerekend omdat een grotere koudeproductie betekent dat een grotere fractie van de kas gesloten kan worden. Er komen dan vele kostenposten bij (luchtbehandelingskasten, luchtverdeelslangen) en ook extra gewasopbrengsten. Zolang er nog geen rapportages over deze kosten voorhanden zijn (bijvoorbeeld aan de hand van het demonstratieproject 'Themato') kan hierover geen goede analyse gemaakt worden.

## 5.2 Aanbevelingen

Bij de bedrijfseconomische uitwerking kwam opnieuw naar voren dat rapportages over de investeringskosten voor de aanleg van een ondergronds energieopslagsysteem zeer grote verschillen vertonen. De eerdere studie die het IMAG hiernaar gedaan heeft, en waarbij vertegenwoordigers uit de praktijk betrokken waren, leidt tot prijzen die het onmogelijk maken om voor de tuinbouw op bedrijfseconomisch rendabele wijze gebruik te maken van deze techniek. Toch zijn er voorbeelden van tuinders die dit soort installaties gebruiken. Om in het kader van dit project toch een aantal berekeningen te kunnen maken is gesteld dat een ondergronds energieopslagsysteem met een capaciteit van 80 m<sup>3</sup>/uur voor € 69.000 aangelegd dus € 860,- per m<sup>3</sup> per uur. Gezien het grote energiebesparingspotentieel dat met ondergrondse energieopslagsystemen gerealiseerd kan worden is het aanbevelenswaardig om samen met stakeholders de knelpunten in de prijsvorming van de productiekosten in kaart te brengen en daarna gericht te zoeken naar mogelijkheden om die kosten te verlagen. Bij de bovengenoemde kosten voor een dekbevoeiingssysteem kunnen hiermee zo'n 5 m<sup>3</sup> aardgas equivalenten worden bespaard met een terugverdientijd van 6 jaar. Er is evenwel nog geen praktijkervaring naar dit systeem gedaan, zodat het aanbevelenswaardig is dit koudeproductiesysteem in de praktijk te beproeven.

## 6 Literatuur

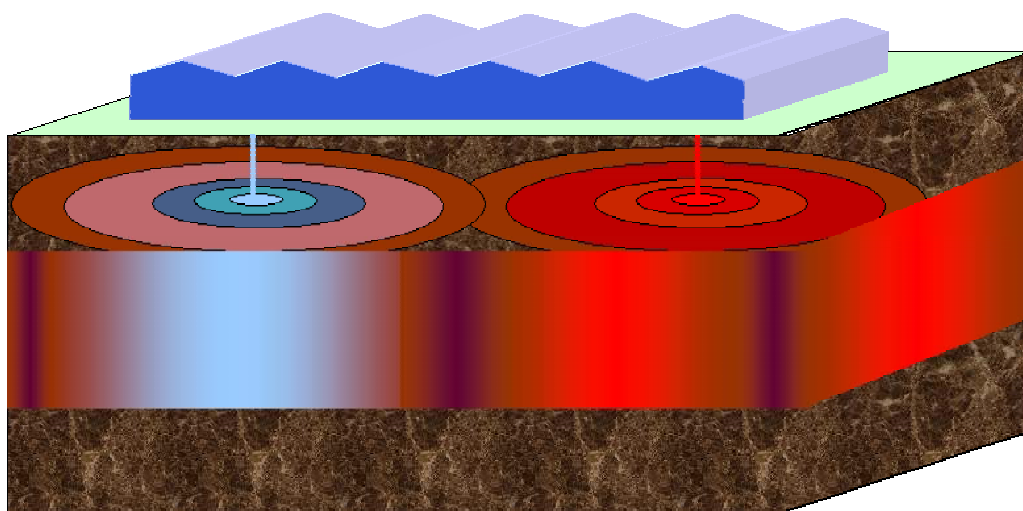
- Tesselaar, P. en E. Pekkeriet, 2002, Terugkoelen van grondwater met behulp van een koeltoren t.b.v. wortelkoeling, Novem, Projectnummer 98/J0192/00300
- Schoonderbeek, G.G., A. de Gelder, E.M.B. Heller en J.J.G. Opdam, 2003, Telen in een gesloten tuinbouwkas; praktijkexperiment, Productschap Tuinbouw, Projectnummer 11110
- Zwart, H.F. de en R. van Elswijk, 2002, Onderlinge beïnvloeding van ondergrondse energieopslagsystemen voor tuinbouwkassen, IMAG, Wageningen
- Zwart, H.F. de, E.G.O.N. Janssen en H. Loeffen, 2004, Kaskoeling en aquiferlading door middel van een dakbevoeiingssysteem, Agrotechnology & Food Innovations, Wageningen, rapport 082
- Zwart, H.F. de en G.L.A.M. Swinkels, 2002, De kas als zonne-ergie oogster, IMAG, Wageningen, rapport 2002-04
- Zwart, H.F. de en P. Knies, 2002, Kostenberekeningsschema voor warmte- en koudeopslagssystemen ten behoeve van de inzet van warmtepompen in de Nederlandse glastuinbouw, IMAG, Wageningen, Rapport nr P2002-65
- Zwart, H.F. de, 2004, Praktijkexperiment Duurzame energieverzameling door middel van dakspoeiers, Agrotechnology & Food Innovations, Wageningen, Rapport 233

## BIJLAGE I. Ondergrondse energieopslagsystemen

Wanneer de zomerse koudebehoefte op een energiezuinige manier in de winter tot stand wordt gebracht ontstaat er een grote opslagbehoefte. Ter indicatie: in een kas met grondkoeling is zo'n 260 MJ koude per m<sup>2</sup> per jaar nodig dat bij gebruik ongeveer 4 °C in temperatuur verhoogd wordt. Dit betekent dat er ruim 15 m<sup>3</sup> koud water per m<sup>2</sup> kas wordt gebruikt. Het is dus niet realistisch te veronderstellen dat dit zou kunnen plaatsvinden in een speciaal bassin. Indien dit namelijk onder het kasoppervlak zou worden geplaatst zou het hele kasoppervlak zo'n 15 meter diep moeten worden uitgegraven.

Een reeds veel toegepast warmteopslagsysteem voor kleine temperatuurverschillen en grote volumina is de benutting van ondergrondse watervoerende lagen, de zogenoemde aquifers. Deze aquifers worden gevormd door gestapelde dikke lagen zand (in de orde van 10 tot 20 meter), afgewisseld met dunne kleilagen. Wanneer zuig en persleidingen tot in deze zandlagen geboord worden, kan verwarmd of afgekoeld water in de ondergrond worden opgeslagen voor later gebruik.

In Figuur I-1 wordt hiervan een schetsmatige situatie getoond.



Figuur I-1 Schets van een kas waaronder het watervoerende zandpakket wordt gebruikt voor de seizoensopslag van warmte

Wanneer bij het laden van het warmteopslagsysteem relatief koud water wordt opgepompt slinkt de koude 'waterbel' en wordt het gebied met relatief warm water groter. Bij het ontladen van het systeem gebeurt het tegenovergestelde. Als de watervoerende laag dik genoeg is (meer dan 15 meter) en de putten ver genoeg uit elkaar liggen (meer dan 100 meter) zullen de laad- en ontladstromen elkaar niet zoveel in de weg zitten. Een gedetailleerde verhandeling hierover is beschreven in het rapport "Onderlinge beïnvloeding van ondergrondse energieopslagsystemen voor tuinbouwkassen" (de Zwart en van Elswijk, 2002)