

50060657-KPS/SEN 02-3020

**Kansen voor lage-temperatuurwarmte in  
combinatie met warmtepompen en warm-  
te-opslag in aquifers**

**Deelrapport: opties voor koelen en ont-  
vochtigen**

Arnhem, 11 november 2002

Auteur R.J.F. van Gerwen  
KEMA Power Generation & Sustainables

Ten behoeve van Novem en Productschap Tuinbouw

## Colofon

Dit deelrapport “Opties voor koelen en ontvochtigen”, is onderdeel van de rapportage van het project “Kansen voor lage-temperatuurwarmte in combinatie met warmtepompen en ondergrondse energieopslag bij (bijna) gesloten kassen”, dat KEMA in opdracht van Novem en Productschap Tuinbouw heeft uitgevoerd. Het rapport gaat in op de belangrijkste opties, die er zijn voor het koelen en ontvochtigen van kaslucht. De resultaten van deze nevenstudie zijn gebruikt in de hoofdstudie “Haalbaarheid warmtepompgebaseerd koel-/ontvochtigings- en verwarmings-systeem met warmteopslag in aquifers” (KEMA-rapportnummer: 50060657-KPS/SEN 02-3035).

Dit project is mede mogelijk gemaakt door subsidieverlening door het Productschap Tuinbouw in het kader van de algemene subsidieverordening van het productschap (PT-projectnummer 10711) en door Novem op grond van het Besluit Subsidies Energie-programma's, programma-onderdeel Energiebesparing in agrarische bedrijven (Novem projectnummer 335519/0210).



© KEMA Nederland B.V., Arnhem, Nederland. Alle rechten voorbehouden.

KEMA Nederland B.V. en/of de met haar gelieerde maatschappijen zijn niet aansprakelijk voor enige directe, indirecte, bijkomstige of gevolgschade ontstaan door of bij het gebruik van de informatie of gegevens uit dit document, of door de onmogelijkheid die informatie of gegevens te gebruiken.

De inhoud van dit rapport mag aan derden niet anders dan als één geheel worden ontsloten, voorzien van bovengenoemde aanduidingen met betrekking tot auteursrechten en aansprakelijkheid.

## INHOUD

	blz.
TEN GELEIDE.....	4
SAMENVATTING .....	5
1 Inleiding en doelstelling .....	9
2 Programma van eisen.....	11
2.1 Kasklimaat .....	11
2.2 Installatie.....	12
3 Toepasbare technieken .....	14
3.1 Koeling.....	14
3.2 Ontvochtiging.....	20
3.3 Haalbaarheid van technieken .....	28
4 Systemen.....	32
4.1 Overwegingsfactoren.....	32
4.2 Te verwachten massa- en energiestromen .....	33
4.3 Mogelijke systemen .....	38
4.4 Technische en economische vergelijking van de systemen .....	47
4.5 Optie 1: Systeem met centrale warmtepomp en buisontvochtiging/-koeling/- verwarming .....	47
4.6 Optie 2: systeem met centrale luchtbehandeling.....	53
4.7 Optie 3: Decentrale koeling en ontvochtiging .....	56
4.8 Optie 4: vochtabsorptie met een zoutoplossing.....	57
5 Slotbeschouwing en conclusies.....	61
5.1 Slotbeschouwing.....	61
5.2 Conclusies .....	65
LITERATUUR.....	69

## TEN GELEIDE

Dit document maakt deel uit van de rapportage in het kader van het project “Kansen voor lage-temperatuurwarmte in combinatie met warmtepompen en ondergrondse energieopslag bij (bijna) gesloten kassen”, dat KEMA met subsidie van het Productschap Tuinbouw en Noverm heeft uitgevoerd.

Het document behandelt de problematiek van de deelstudie *koelen en ontvochtigen van kaslucht*, wat een essentieel deelproces is voor een gesloten (of bijna gesloten) kasconcept. Het rapport bespreekt een aantal mogelijke technieken hiervoor, beschrijft de fysische achtergrond, evalueert de toepassingsmogelijkheden en beperkingen hiervan in een totaal energievoorzieningsconcept, en raamt globaal het benodigde investeringsniveau en de energie- en onderhoudskosten hiervoor. Tenslotte wordt een keuze gemaakt voor een koel-/ontvochtigingstechniek en voor een globaal overall systeemconcept. Voor dit concept wordt in het projectvervolg een meer gedetailleerde systeem- en energie-analyse gemaakt en wordt de rentabiliteit bepaald. Deze analyses worden in een separaat rapport uitgewerkt (rapportnummer 50060657-KPS 02 3035).

### Kanttkening

De in paragraaf 4.5 tot en met 4.8 van dit rapport genoemde financiële getallen voor de onderzochte kaskoel-/ontvochtigingsconcepten zijn globaal, in die zin dat ze voor een ruw systeemconcept en de grote lijnen van de verwachte bedrijfsvoering hiervan zijn ingeschat. Ze zijn alleen bedoeld zijn ter onderlinge vergelijking van de concepten. Het kostenniveau ligt waarschijnlijk hoger dan in een praktische situatie, omdat noch de dimensionering, noch de inzetstrategie zijn geoptimaliseerd. De cijfers zijn gebruikt om een verantwoorde keuze van met name de ontvochtigingstechniek te kunnen maken. Ze mogen niet worden gebruikt als criterium om de haalbaarheid van het totaalconcept van de gesloten kas te beoordelen, daar bij deze berekeningen nog niet een voldoende afstemming van het energievoorzieningssysteem - qua overall ontwerp, dimensionering en bedrijfsvoering - is gemaakt op de typische variabiliteit in de koel-, ontvochtigings- en verwarmingsbehoefte.

## **SAMENVATTING**

In het licht van de energieparagraaf uit het GlaMi-convenant tussen overheid en de glastuinbouwsector staan gesloten (of bijna gesloten) kassen momenteel volop in de belangstelling, omdat ze in potentie goede mogelijkheden bieden om het energieverbruik te reduceren en het aandeel duurzame energie in het verbruik op te voeren. Dergelijke kassen dienen te beschikken over een actieve koel- en ontvochtigingsmogelijkheid van de kaslucht om op warme dagen en bij hoge verdamping door het gewas in de kas een acceptabel en zo mogelijk optimaal binnenklimaat te kunnen handhaven.

Dit rapport behandelt een aantal mogelijke koel- en ontvochtigingstechnieken, beschrijft de fysische achtergrond, evalueert de toepassingsmogelijkheden en beperkingen hiervan in een totaal energievoorzieningsconcept, en raamt globaal het benodigde investeringsniveau en de jaarlijkse energie- en onderhoudskosten. Tenslotte wordt op basis van de financiële en energetische prestaties een keuze gemaakt voor een koel-/ontvochtigingstechniek en voor een globaal overall systeemconcept voor de energievoorziening. Het gekozen systeemconcept wordt in het hoofdrapport van het project qua energiehuishouding en rentabiliteit nader uitgewerkt.

De onderzochte ontvochtigingstechnieken vallen globaal in twee categorieën uiteen, die in principe beide bruikbaar zijn:

- 'uitkoelontvochtiging' (ook wel 'condensatieontvochtiging' genoemd)
- absorptieontvochtiging (ontvochtiging middels een absorptiezout).

Voor koeling zijn er in beginsel 3 verschillende mogelijkheden:

- passieve koeling (warmtewisselaar met buitenlucht, "buried pipe")
- indirecte verdampingskoeling (verdamping van water in lucht onttrekt de benodigde verdampingswarmte aan die lucht, waardoor deze afkoelt)
- actieve koeling middels een koelmachine (warmtepomp) en/of een aquifer.

Voor gesloten kassen is alleen de laatste optie bruikbaar. Deze actieve koeling laat zich goed combineren met de ontvochtigingsfunctie die ook moet worden gerealiseerd. In het bijzonder in combinatie met de uitkoelontvochtiging leidt de combinatie tot systeemwinst in die zin, dat de benodigde installaties grotendeels voor beide functies – koelen en ontvochtigen - kunnen worden gebruikt.

De warmte die hierbij vrijkomt kan - indien nodig - direct voor herverwarming worden aangewend of worden opgeslagen voor later hergebruik.

Hierdoor vallen de benodigde meerinvesteringskosten voor deze combinatie gunstiger uit dan voor een combinatie van koeling met absorptie-ontvochtiging.

Ook is het energieverbruik gunstiger (zie ook onderstaande tabel). Om deze redenen wordt een principekeuze gemaakt voor uitkoelontvochtiging in combinatie met een koelmachine/warmtepomp en aquifer. (Overigens zullen voor pure ontvochtigingstoepassingen zonder substantiële koelbehoefte absorptiesystemen in veel gevallen wel goedkoper zijn.)

Voor de genoemde combinatie zijn drie systeemconcepten onderscheiden:

- optie 1: centrale koelmachine/warmtepomp met buisontvochtiging/-koeling/-verwarming
- optie 2: centrale koelmachine/warmtepomp met centrale luchtbehandeling
- optie 3: decentrale koel-, ontvochtigings- en verwarmingsunits met geïntegreerde warmtepomp (te plaatsen in de kas).

Voor de in alle opties benodigde koelmachine/warmtepomp (KM/WP) is voor de eerste twee opties gekeken naar zowel een elektrisch aangedreven compressiewarmtepomp (EWP) als naar een absorptiewarmtepomp (AWP). Bij optie 3 is alleen een (kleine) elektrische warmtepomp beschouwd.

Deze concepten (en dat van de absorptieontvochtiging met decentrale ontvochtigingsunits en centrale absorptiezoutregeneratie, optie 4) zijn op basis van de jaarkoel-, ontvochtigings- en verwarmingsvraag *globaal* geanalyseerd ten aanzien van energieverbruik en benodigde investeringen. De belangrijkste resultaten hiervan zijn aangegeven in de onderstaande tabel. Daar het hier vooral gaat om een onderlinge vergelijking van de concepten, zijn de getallen in de tabel (behalve het gasverbruik en het koudetekort in de aquifer) genormeerd op de waarden van de EWP-variant van optie 2 (die arbitrair op 100 is gesteld).

Opties → Jaarverbruiks- of kosten- kengetal	een- heid	Optie 1: centrale KM/WP met buisontvocht- ging/-koeling/ -verwarming		Optie 2: centrale KM/WP met cen- trale luchtbehande- ling en luchtverde- ling via slangen		Optie 3: de- centrale KM/WP-units in de kas		Optie 4: decen- trale absorptieont- vochtigingsunits en centrale (ab- sorber)regeneratie	
		<i>EWP</i>	<i>AWP</i>	<i>EWP</i>	<i>AWP</i>	<i>EWP</i>	<i>AWP</i>	<i>EWP</i>	<i>AWP</i>
<i>Type warmtepomp</i>									
Gasverbruik	Nm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0	38	0	38	0	x	37	65
Elektriciteitsverbruik	<sup>1)</sup> -	91	9	100	16	98	x	86	23
Primaire energie verbruik	<sup>1)</sup> -	91	86	100	94	98	x	161	156
Totaal jaarkosten <sup>2)</sup>	<sup>1)</sup> -	93	91	100	97	107	x	150	158
Koude tekort aquifer <sup>3)</sup>	%	42	69	41	69	41	x	40	69

- <sup>1)</sup> dit getal is genormeerd op de waarde van de EWP-variant van optie 2 (die arbitrair op 100 is gesteld)
- <sup>2)</sup> hierin zijn begrepen de energie- en onderhoudskosten en de kapitaalkosten (de laatste zijn berekend als termijnbedrag op basis van een annuïteitenlening tegen 6% rente gedurende 10 jaar)
- <sup>3)</sup> koudetekort betekent dat er in de winter te weinig warmte aan de aquifer wordt getrokken, om in de zomer over voldoende koude te kunnen beschikken (er zal extra koude gewonnen moeten worden, om de aquifer thermisch neutraal te kunnen bedienen).

Uit de tabel kan het volgende worden geconcludeerd.

- De absorptieontvochtigingsvariant (optie 4) is ten opzichte van de uitkoelontvochtigingsvarianten (optie 1, 2 en 3) te duur en het energieverbruik voor deze toepassing te hoog. De optie valt dus af.
- Over een jaar gezien hebben de absorptiewarmtepompenvarianten (AWP's) ten opzichte van compressiewarmtepompen een veel groter koudetekort (tot bijna 70%). Deze mismatch is zo groot dat AWP's in principe (bij een stand-alone energievoorziening) afvallen als alternatief voor de warmtepomp, ondanks dat ze qua jaarkosten en energieverbruik (bij optie 1 en optie 2) iets beter scoorden dan de corresponderende EWP-varianten.

Binnen de globale verkenning van deze deelstudie kan nog geen definitief eindoordeel over de beste van de resterende systeemconcepten worden gemaakt. De EWP-variant van optie 1 lijkt op het eerste gezicht iets gunstiger dan de EWP-variant van optie 2. Bij de eerste bestaan echter nog twijfels of de dimensionering wel voldoende groot genomen is om ook de (tamelijk frequent voorkomende) situatie van gelijktijdige koeling/ontvochtiging en verwarming te kunnen garanderen, en of er in dat geval door afwisselend warme en koude buizen in de kas geen onacceptabele (micro) klimaatverschillen zullen gaan optreden. In de offerte is uitgegaan van luchtsystemen.

Daarom en gezien de niet al te grote verschillen in de energieprestatie en kosten met optie 1, zal in de hoofdstudie - in overeenstemming met de projectbeschrijving in de offerte - de variant met centrale luchtbehandeling (optie 2) qua energiehuishouding en rentabiliteit nader worden uitgewerkt. Voor de andere twee overgebleven EWP-varianten bestaat die ruimte binnen het huidige projectkader niet.



## 1 INLEIDING EN DOELSTELLING

Gesloten kassen worden in dit project gezien als kassen waarin warmte- en vochtafvoer plaatsvinden via actieve koeling en ontvochtiging van kaslucht in plaats van natuurlijk ventilatie. Voordelen van een gesloten kas staan in tabel 1 samengevat.

Tabel 1 Voordelen van een gesloten kas

<b>Actieve ontvochtiging en/of koeling</b>			
<b>wat wordt bereikt</b>	<b>met als gevolg</b>	<b>belang in perspectief van</b>	
		<b>de tuinder</b>	<b>het milieu</b>
geen verlies van CO <sub>2</sub> bij het afvoeren van vocht en/of warmte	minder CO <sub>2</sub> -dosering nodig	lagere kosten	minder CO <sub>2</sub> -uitstoot, besparing primaire brandstof
	hogere CO <sub>2</sub> -concentratie	hogere opbrengst	effectiever gebruik van grondstoffen <sup>1)</sup>
terugwinning en hergebruik latente warmte uit vocht	minder stoken	mogelijk lagere kosten	minder CO <sub>2</sub> -uitstoot, besparing primaire brandstof
geen verlies van warmte bij het afvoeren van vocht <sup>2)</sup>	minder stoken	lagere kosten	minder CO <sub>2</sub> -uitstoot, besparing primaire brandstof
betere beheersing kasklimaat	minder infectiedruk en kans op natslaan	hogere opbrengst	effectiever gebruik van grondstoffen
	minimaal stoken en CO <sub>2</sub> -doseren	lagere kosten	minder CO <sub>2</sub> -uitstoot, besparing primaire brandstof
terugwinning (gedestilleerd) water uit kaslucht	minder water nodig	lagere kosten	minder wateronttrekking
minder uitwisseling van insecten <sup>3)</sup>	minder infectiedruk, minder biologische bestrijding	hogere opbrengst, lagere kosten	effectiever gebruik van grondstoffen

1) per kg product hoeft er minder CO<sub>2</sub>, substraat en dergelijke gebruikt te worden

2) alleen van belang als het buiten koud is en er actief verwarmd moet worden. Warmteverlies treedt op zowel omdat warme lucht wordt afgevoerd als wel omdat daarvoor de energieschermen op een kier moeten

3) mindere verlies van insecten voor biologische bestrijding, minder bezoek van ongewenste insecten.

Voor de tuinder zijn er voordelen te behalen in de zin van lagere bedrijfskosten en hogere opbrengsten, voor het milieu in de zin van zuiniger omgaan met grondstoffen (inclusief fossiele brandstof). Het milieuvoordeel is door het GLAMI-convenant tussen de overheid en de tuinders (onder andere een efficiencyverbetering van 65% in 2010 ten opzichte van 1980) gekoppeld aan het belang van de tuinder.

Trends in de glastuinbouw zijn:

- assimilatiebelichting voor meer teelten (ook groenten)
- toepassing van energieschermen wordt steeds gangbaarder.

## 2 PROGRAMMA VAN EISEN

### 2.1 Kasklimaat

Aan het kasklimaat worden bepaalde eisen gesteld. Deze staan in tabel 2 samengevat en voornamelijk gebaseerd op (KEMA, 2000, opgesteld in overleg met PPO). De infectiedruk en de kans op natslaan van vruchtlichamen en dikke plantdelen zijn voor de tuinder enkele van de belangrijkste aandachtspunten met betrekking tot de beheersing van het binnenklimaat.

Tabel 2 Eisen c.q. wensen die gesteld kunnen worden aan het binnenklimaat van een kas. Hierbij is primair uitgegaan van een tomatenteelt, die model staat voor verschillende andere energie-intensieve teelten. Volgens PPO zijn er een groot aantal gewassen (bijvoorbeeld komkommer, paprika, maar ook rozen en chrysanten), die qua klimaat vergelijkbare eisen stellen als de tomaat

Grootheid	Grenzen	Opmerking
relatieve vochtigheid (RV)	70 - 90%	Hangt af van de teelt. Vanaf circa 85% RV bestaat de kans dat schimmelvorming optreedt. Door inhomogeniteiten in het kasklimaat kan dan plaatselijk condensatie optreden. De kans op een lagere RV dan 70% bestaat eigenlijk alleen in de winter. Een te lage RV kan uitdroging tot gevolg hebben. Lokaal kan bij zonneschijn en bij 'opstoken' in de ochtend (en dus extra verdamping) de RV op vruchtlichamen en dikke plantdelen 100% worden (natslaan). Dit levert schade op en moet voorkomen worden.
Temperatuur	22 - 25 °C	Dit is overdag in het algemeen optimaal e.e.a. afhankelijk van de lichtintensiteit. Bij lagere temperatuur wordt de groei i.h.a. vertraagd. In de praktijk wordt vaak een minimum temperatuur van circa 16 à 17 °C gehanteerd (een en ander afhankelijk van de teelt). Boven de 25 °C neemt de dissimilatie sneller toe dan de assimilatie waardoor de netto fotosynthese afneemt (opbrengstverlies). Boven de 40 °C treedt bladverbranding op.

Grootheid	Grenzen	Opmerking
CO <sub>2</sub> -concentratie	800-1000 ppm	Dit is productietechnisch optimaal (financieel hoeft dit niet het geval te zijn). Boven de 2000 ppm treedt schade op. Minimaal wordt naar 400-450 ppm gestreefd. Beneden de 360 ppm treedt sterke afname van de fotosynthese op.
Belichting	40-300 W/m <sup>2</sup>	Bij belichte teelten is 40-100 W/m <sup>2</sup> opgenomen elektrisch vermogen nu de norm. De trend is richting 150 W/m <sup>2</sup> . Belichting wordt vooral toegepast in de bloementeelt, maar vindt ook steeds meer ingang in de groenteteelt.
Luchtsnelheid	< 4 á 5 m/s	Schatting, daarboven treedt "wapperen" van plantdelen en daarmee lengtegroeiremming op (RGD, 1990).
Geluid	minimaal: < 80 dBA, gewenst: < 60 dBA	De invloed van geluid op de plantengroei is, voor zover bekend, verwaarloosbaar. Belangrijk is dat er minimaal zonder gehoorbeschermende maatregelen in een kas gewerkt kan worden. 60 dBA is de geluidsterkte van een normaal gesprek.

## 2.2 Installatie

Aan de kasinstallatie (dus ook actieve ontvochtiging en/of koeling) kunnen vanuit het perspectief van de tuinder de volgende twee basiseisen worden gesteld:

- regelbaar over een voldoende groot gebied zodat de kasklimaatcondities gedurende het hele jaar zo dicht mogelijk bij de optimale condities blijven, in ieder geval minimaal binnen de gestelde grenzen waarbij schade optreedt (zie paragraaf 2.1)
- minimale kosten van kasklimaatbeheersing bij een gewenste gewasproductie over de economische levensduur van de kas, dat wil zeggen de optimale combinatie van lage energiekosten en lage investeringskosten.

Vanuit milieuoogpunt komt de eis naar voren van een minimaal gebruik van grondstoffen (ook fossiele brandstof) en daarmee reductie van de CO<sub>2</sub>-uitstoot. Deze eis is meestal strijdig met het streven naar minimale kosten, omdat energiezuinige installaties in de regel duurder zijn.

**Nadere eisen:**

- de klimaatinstallatie mag niet te veel licht wegnemen (geen grote luchtkanalen in de nok van de kas)
- de klimaatinstallatie mag geen schadelijke stoffen bevatten die bij een defect in de kas terecht kunnen komen
- de installatie mag geen infectierisico vormen bijvoorbeeld een broeihaard voor schimmels en bacteriën
- de installatie moet praktisch realiseerbaar zijn. Dit laatste betekent onder andere dat de hoeveelheden te verplaatsen lucht realiseerbaar moeten zijn, dat volumina van opslag-tanks binnen proporties blijven en dergelijke. Een belangrijk item zal zijn het centraal of decentraal ontvochtigen en/of verwarmen dan wel een combinatie van centraal en decentraal
- in de praktijk betekent de duurzaamheids eis, dat warmte die in de zomer aan de kas wordt onttrokken (door koeling en/of ontvochtiging), moet worden opgeslagen en in de winter weer moet worden gebruikt
- de installatie mag geen overmatige hinder voor de (werk)omgeving vormen. Bijvoorbeeld de geluidproductie van de installatie moet zodanig laag zijn dat zowel in de kas als daarbuiten de geldende normen niet worden overschreden. Met name voor de nachtsituatie zijn de geluidnormen streng.

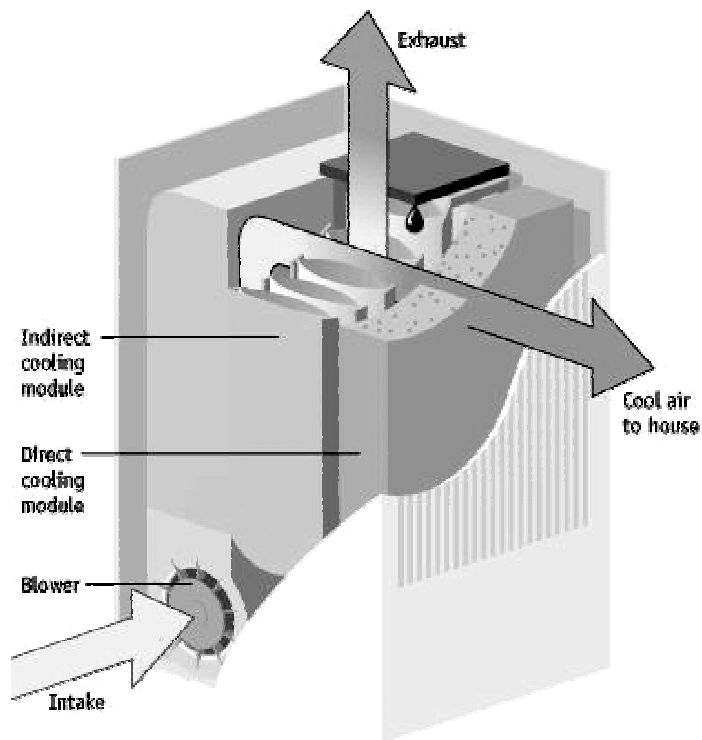
### 3 TOEPASBARE TECHNIKEN

#### 3.1 Koeling

De eenvoudigste manier van koelen is door de verdamping van water. Dat is de manier waarop planten ook hun temperatuur regelen. De latente warmte voor de verdamping wordt onttrokken aan de lucht waardoor deze afkoelt. Daarnaast zal het te verdampen water iets kouder zijn dan de kaslucht, dus ook bijdragen aan de koeling van de kas. Deze bijdrage is echter miniem. De latente warmte van water bedraagt circa 0,69 kWh/kg (2500 kJ/kg) bij 0 °C. Verdamping van één liter water per minuut levert een koelvermogen van circa 40 kW op. Voor een gesloten kas is dit geen goede oplossing, indien directe inspuiting wordt gebruikt. In de regel moet daar juist vocht verwijderd worden en is het weinig zinvol extra vocht in te brengen.

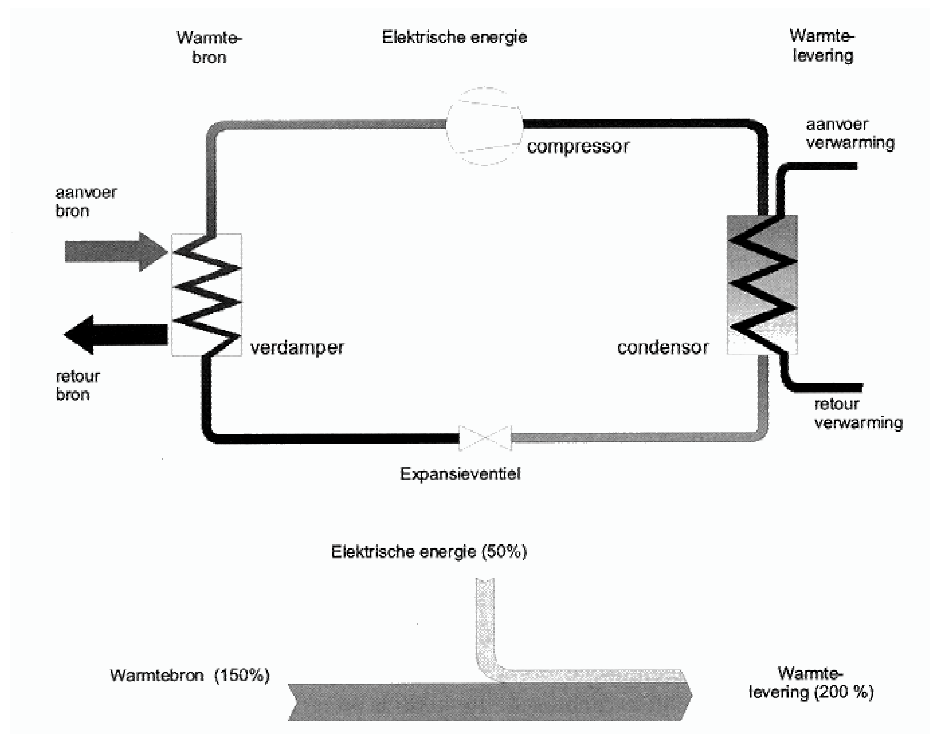
Een alternatief is "indirecte" verdamping van water. Dit principe wordt toegepast in de SMARTCOOL (zie figuur 1). SMARTCOOL is een merknaam. Het principe is dat lucht van buiten worden binnengezogen en in twee stromen wordt gesplitst. In een gecombineerde verdamper/warmtewisselaar wordt in één deel van de lucht water verdampt waardoor beide luchtstromen gekoeld worden. Omdat de SMARTCOOL een airconditioner is voor woningen wordt de relatief droge afgekoelde lucht nog eens bevochtigd waardoor deze extra afkoelt. In een kas zal dit niet nodig zijn. De afgekoelde, vochtige lucht kan weer naar buiten geblazen worden. SMARTCOOL claimt een COP (verhouding van koelvermogen en toegevoerd elektrisch vermogen) van tussen de 8 en de 16. Het enige energiegebruik is voor de ventilator en een waterpomp. Wel is er sprake van waterverbruik, 25 m<sup>3</sup> per jaar voor een gemiddelde woning in de VS. Nadeel van dit principe is dat het alleen werkt als de relatieve vochtigheid in de buitenlucht niet te hoog is.

De meest gebruikelijke manier van koelen is via een compressiewarmtepomp (koelkast). Voor de volledigheid geeft figuur 2 de schematische werking weer. Een geschikt koude-middel wordt op druk gebracht en gesmoord tot een vloeistof/dampmengsel bij lage(re) temperatuur. De vloeistof verdampt waarbij warmte uit de omgeving wordt opgenomen. De damp wordt gecompriëerd waarna warmte bij een hogere temperatuur wordt afgestaan en de damp condenseert. Deze vloeistof wordt vervolgens weer gesmoord.



Figuur 1 Principe van koeling door indirecte verdamping van water (SMARTCOOL)

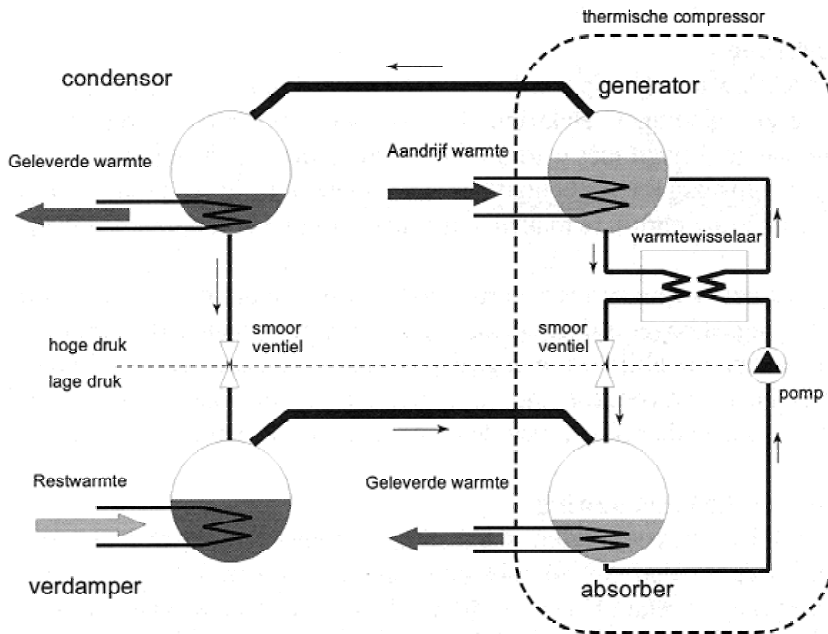
De maat voor de werking van een warmtepomp is de COP (coefficient of performance). Voor koeling is dit de verhouding tussen het koelvermogen en het ingaand (elektrisch) vermogen van de compressor. Voor verwarming is dit de verhouding tussen het geleverde warmtevermogen en het ingaand (elektrisch) vermogen. Echter, bij gebruik voor koeling doet de temperatuur waarbij warmte wordt afgegeven er niet toe en kan de COP hoger zijn dan op grond van de COP voor verwarming berekend wordt. De COP voor een compressiewarmtepomp voor verwarming ligt, afhankelijk van de temperatuur aan de koude- en warme zijde tussen de 2,5 en 6. De effectieve temperatuurlift ligt tussen de 20 °C en 45 °C. De kosten van een elektrische warmtepomp liggen tussen de 113 EUR /kW<sub>th</sub> voor 500 kW<sub>th</sub> tot 68 EUR/kW<sub>th</sub> voor 2MW<sub>th</sub> of meer (prijspeil 1998 exclusief plaatsing en kosten van de bron en het warmteafgiftesysteem, (Boot, 1998)).



Figuur 2 De principewerking van een compressiewarmtepomp (Boot, 1998)

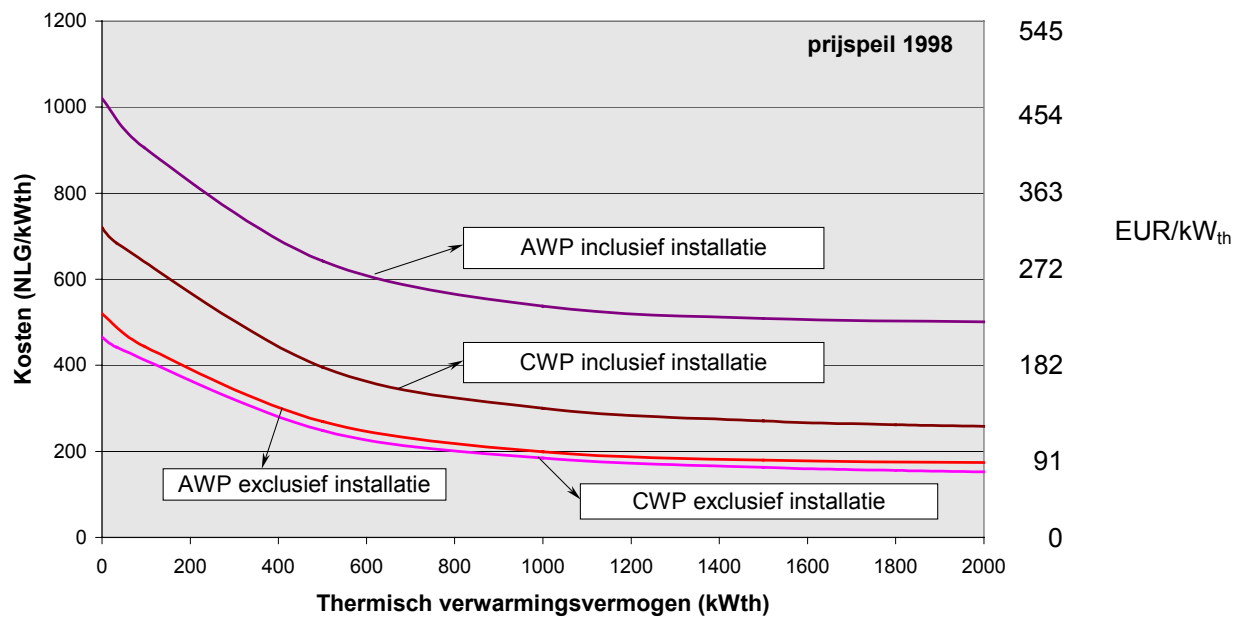
Een andere mogelijkheid van koelen is het gebruik van een absorptiewarmtepomp. Het principeschema hiervan is in figuur 3 weergegeven. De ingaande aandrijfenergie is een warmtestroom in plaats van mechanische arbeid. Voordeel van de absorptiewarmtepomp is het feit dat de installatie weinig bewegende delen bevat. De installatie vergt daardoor weinig onderhoud en is betrouwbaar. Ook het deellastgedrag is goed. Nadeel is de lange opwarmtijd. De absorptiewarmtepomp haalt een COP van 1,5-1,7 bij een effectieve temperatuurlift tussen de 30 °C en de 50 °C. Kosten (prijsspeil 1998, exclusief plaatsing en kosten van de bron en het warmteafgiftesysteem, (Boot, 1998)) liggen tussen de 127 EUR/kW<sub>th</sub> voor 500 kW<sub>th</sub> tot 82 EUR/kW<sub>th</sub> voor 2MW<sub>th</sub> of meer. De temperatuur van de aandrijfwarmte moet hoger zijn naarmate de temperatuur van de te leveren warmte hoger ligt.





Figuur 3 Principeschema van een absorptiewarmtepomp (Boot, 1998)

In figuur 4 zijn de typische kosten van een warmtepomp (met en zonder installatiekosten) als functie van de grootte (thermisch vermogen aan de warme zijde) weergegeven. Deze grafiek is gebaseerd op Boot (1998). Aangenomen is dat de installatiekosten gelijk meeschalen met de investeringskosten zonder installatie. De absorptiewarmtepomp is in aanschaf iets duurder dan de compressiewarmtepomp. Het installeren van een absorptiewarmtepomp is echter veel duurder dan van een elektrische compressiewarmtepomp. In totaal komt de elektrische compressiewarmtepomp er, wat betreft investeringskosten, het best uit. De kosten in figuur 4 zijn gebaseerd op prijspeil 1998 met een marge van  $\pm 20\%$ . Op basis van de inflatie mag verwacht worden dat warmtepompen in guldens van 2001 duurder zullen zijn. Daar staat tegenover dat door het leereffect de kosten reëel zullen dalen. Aangenomen wordt, dat deze effecten elkaar vooralsnog opheffen en dat figuur 4 in guldens van 2001 ook bruikbaar is. Verder wordt aangenomen, dat in de 'kosten inclusief installatie' ook de kosten van de elektrische aansluiting en/of de aardgas aansluiting zijn opgenomen.



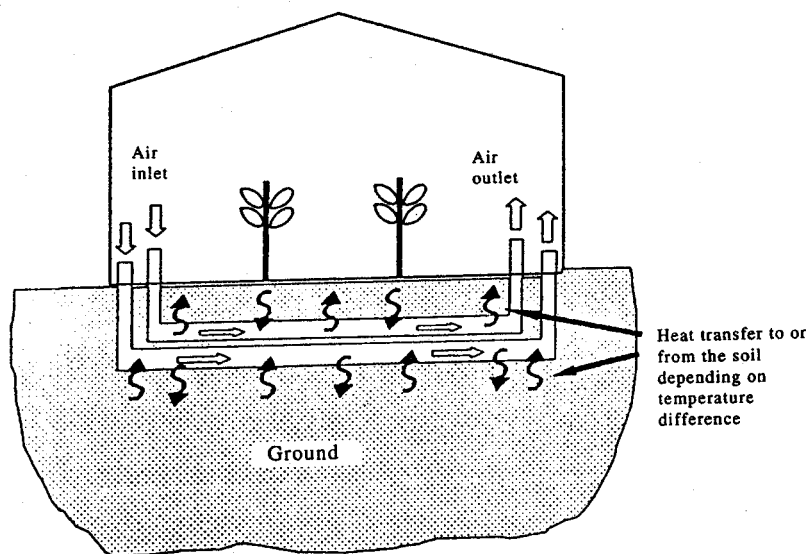
Figuur 4 Kosten voor warmtepompen met en zonder installatie als functie van het thermisch vermogen (warme zijde) op basis van Boot (1998). De kosten van een bron zijn niet opgenomen in deze grafiek. AWP staat voor een absorptiewarmtepomp, CWP staat voor een elektrische compressiewarmtepomp

De absorptiewarmtepomp en de compressiewarmtepomp zijn zowel voor koeling als voor verwarming te gebruiken. Het ligt voor de hand om de warmte die 's zomers vrijkomt bij de koeling van de kas met een warmtepomp in de winter te gebruiken voor de verwarming van de kas. Een vorm van lange termijn warmteopslag is dan noodzakelijk. In de praktijk wordt gebruik gemaakt van een aquifer (zie verderop in deze paragraaf).

Warmtepompen die voor koeling worden gebruikt kunnen tevens dienen als ontvochtiger. Deze toepassing wordt in paragraaf 3.2 besproken.

Naast deze traditionele manier van koelen zijn er ook nog alternatieve manieren als akoestische koeling en magnetische koeling. Deze technieken verkeren nog in het onderzoekstadium en worden vooralsnog niet verder beschouwd. Koeling door halfgeleiders (Peltier-elementen) is op voorhand te duur voor grootschalige toepassing.

Een passieve manier van koelen wordt beschreven door Santamouris (1996). Hij beschrijft een zogenaamd "buried pipe" systeem. Pijpen van plastic, aluminium of beton, met een diameter van 10-20 cm worden op 0,5-2 m onder de grond onder de kas ingegraven (figuur 5). Onderlinge afstand is circa 40 cm. Overdag wordt overtollige warmte via de pijpen afgegeven aan de grond. 's Nachts wordt deze warmte opgenomen om de kas te verwarmen. Dit is vooral effectief in periodes waarin het 's nachts koud is en overdag veel zonneschijn is. Santamouris rapporteert over toepassing in een groot aantal landen (niet Nederland) en een vermindering van de jaarlijkse warmtebehoefte met 30-60%.



Figuur 5 Principe van "buried pipes" om energie te besparen door dag-nacht opslag van warmte in de grond onder de kas

Naast dag/nacht-opslag in de grond (of in een bovengronds warmtebuffer) kan ook gebruik gemaakt worden van seizoensopslag in de bodem (IFT, IF Technology, 2001). Dit kan middels een aquifer (een watervoerende laag in de grond). Grondwater heeft een constante temperatuur van circa 11 °C. Door dit water op te pompen en te gebruiken via een warmtewisselaar kan gekoeld worden. Een aquifer moet echter wel thermisch neutraal bedreven worden. Dat wil zeggen dat gemiddeld over een jaar (of een aantal jaren) in de winter niet meer warmte aan een aquifer mag worden onttrokken dan er in de zomer ingestopt wordt. Anders gesteld: bij een constant verondersteld pompdebiet van de aquifer moet de gemiddelde injectietemperatuur over de beschouwde periode gelijk zijn aan de plaatselijke grondwatertemperatuur. Als de aquifer wordt gebruikt voor koelen en verwarmen is in de regel een warmtepomp nodig om de warmte uit de aquifer in de winter op een acceptabel temperatuurniveau te brengen.

De warmtepomp kan in de zomer gebruikt worden om te koelen, waarbij de vrijkomende warmte gebruikt wordt om de aquifer op te warmen. Als de aquifer alleen gebruikt wordt voor directe koeling (zonder warmtepomp), moet de aquifer in de winter gekoeld worden. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren via warmtewisseling met oppervlaktewater.

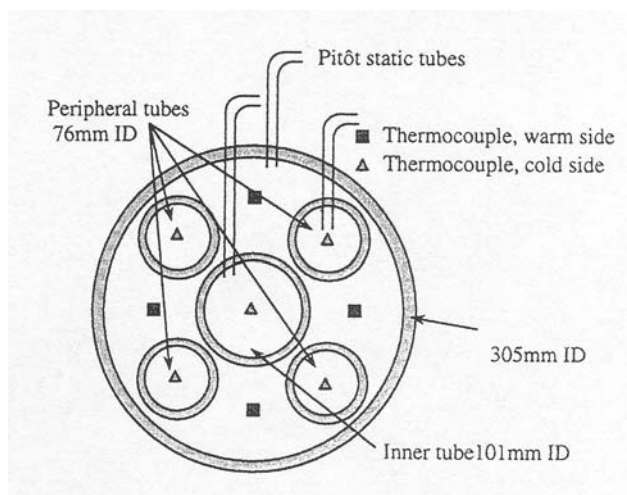
Een aquifer kan op twee manieren bedreven worden: met één stroomrichting (vast injectie- en onttrekkingsput) en met twee stroomrichtingen (twee putten die wisselend gebruikt worden voor onttrekking en injectie). In het eerste geval (men spreekt dan van 'recirculatiesysteem', NOVEM 2001) is de installatie eenvoudiger en is de temperatuur van het te onttrekken grondwater min of meer constant. In de injectieput wordt water met een wisselende temperatuur (jaargemiddeld gelijk aan de grondwatertemperatuur) ingebracht waarbij in de grond temperatuurverevening plaatsvindt. In het tweede geval ('opslagsysteem') wordt 's winters koude van een lager temperatuurniveau dan het grondwater opgeslagen in de grond en zomers warmte van een hoger temperatuurniveau dan het grondwater. De temperatuursprong die bereikt kan worden is circa 8-15°C. Wat betreft koeling ligt dit iets hoger dan bij een conventionele koelinstallatie, die werkt bij een temperatuurtraject van 6-13°C (watertemperatuur in de luchtkoeler). De COP van een aquifer, gedefinieerd als de onttrokken koude gedeeld door de pompenergie ligt rond de 13. De investeringskosten van een aquifer bedragen circa 164-182 EUR/kW<sub>th</sub> (360-400 NLG/kW<sub>th</sub>) voor bronnen, putbehuizingen, bronpompen, bronkoppelen en leidingwerk in de putbehuizing. Inclusief transportleidingwerk, leidingwerk en appendages in technische ruimte, scheidingswarmtewisselaar en regeling en bekabeling kan dit oplopen tot ca 273 EUR/kW<sub>th</sub> (NLG 600).

### 3.2 Ontvochtiging

Voor het ontvochtigen van lucht zijn een aantal mogelijkheden die ook in de praktijk toegepast worden.

- Uitkoelen van vocht. De temperatuur van de lucht wordt verlaagd tot (ver) onder het dauwpunt. Het in de lucht aanwezige vocht condenseert grotendeels (afhankelijk van de temperatuur) en wordt afgevoerd. De lucht wordt daarna weer op temperatuur gebracht.
- Absorberen van vocht. Door gebruik te maken van een vochtabsorberende stof (silica gel, zoutoplossing) kan vocht aan de lucht worden onttrokken. De vochtabsorberende stof moet geregenereerd worden. Op voorhand wordt gesteld dat hiervoor alleen continue processen in aanmerking komen. Formeel is er overigens verschil tussen absorptie (in de stof zelf, bijv. zouten) en adsorptie (aan het oppervlak, bijv. silica gel). Voor het gemak wordt in dit stuk alleen van absorptie gesproken, ook als het adsorptie betreft.

De meest eenvoudige manier van uitkoelen is met een warmtewisselaar en koude buitenlucht (Rousse, 1999). Deze methode is alleen geschikt als het buiten relatief koud is ten opzichte van binnen en is dus maar een beperkt deel van het jaar bruikbaar. Rousse rapporteert over demonstraties van warmtewisselaars voor kassen met een efficiëntie van 70-80% en bestand tegen vorst. Figuur 6 geeft een voorbeeld van een prototype warmtewisselaar, opgebouwd uit kunststof pijpen.



Figuur 6 Voorbeeld van een prototype warmtewisselaar voor gebruik in een kas (Rousse, 1999)

Voor mechanische uitkoeling wordt meestal een elektrisch aangedreven compressiewarmtepomp (CWP) gebruikt. Bij een gegeven elektrisch vermogen hangt het vochtverwijderend vermogen af van de COP van de CWP en van de temperatuur en de luchtvochtigheid van de te ontvochtigen lucht. Om inzicht te krijgen in het benodigde elektrische vermogen volgt een eenvoudig rekenvoorbeeld. Stel een COP voor koeling van 2,5. Dat houdt in dat per  $kW_e$  compressorvermogen 2,5  $kW$  koude wordt geproduceerd. Dit komt overeen met de condensatiewarmte van 1 g vocht per seconde, oftewel 3,6 kg vocht per uur. Het specifiek energieverbruik voor ontvochtiging is dan  $1/3.6 = 0,28$  kWh/kg (1000 kJ/kg). Dit is de theoretisch minimaal haalbare waarde bij de gegeven COP). In de praktijk moet de lucht mee afgekoeld worden en dat kost ook energie. Specificaties van fabrikanten noemen getallen van 0,46 kWh/kg tot 0,64 kWh/kg (Calorex), 0,35 kWh/kg (Dry-Comfort) of 0,42 kWh/kg (Dryfast). Het verschil zit waarschijnlijk in de mate van ontvochtiging, de initiële condities van de lucht en de COP van de warmtepomp.

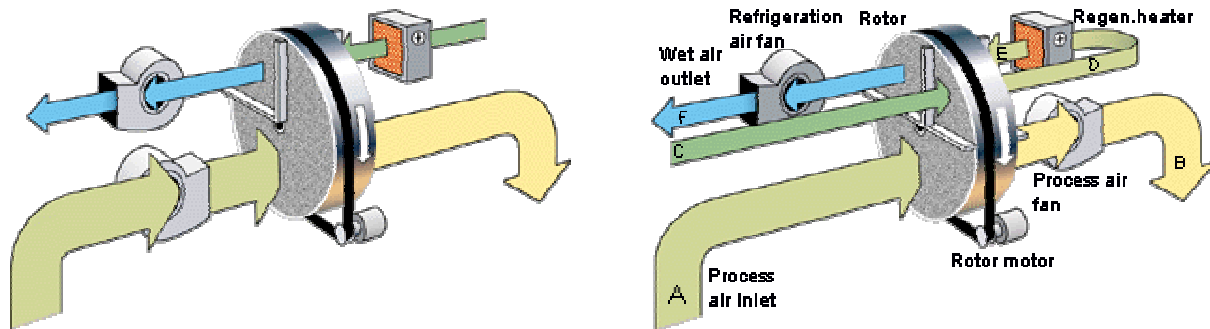
De koude lucht kan gebruikt worden om te koelen. Indien er een warmtevraag is, kan deze lucht over de condensor geleid worden en zo opgewarmd worden. Voordeel is dat op deze manier ook latente warmte wordt teruggewonnen.

Uitkoeling van vocht kan ook met een aquifer. Door het hogere temperatuurniveau van een aquifer is de uitkoeling echter minder effectief (dat wil zeggen dat meer lucht verplaatst zal moeten worden om dezelfde hoeveelheid vocht te verwijderen).

Absorptie van vocht gebeurt in de praktijk ook vaak met een absorptiewiel. Figuur 7 geeft het prinsipeschema weer. Vochtige lucht (figuur 7, onder A) wordt door een sector van het absorptiewiel geleid en daar ontvochtigd. Door een andere sector van het wiel stroomt hete lucht die het vocht in het wiel weer opneemt en afvoert naar buiten. Door een extra sectie in het wiel op te nemen kan een deel van de door het wiel opgenomen warmte worden teruggewonnen. Het wiel bestaat meestal uit chemisch gebonden silica gel. Punten van aandacht zijn:

- verlies van drogermateriaal (kwam voor bij niet chemisch gebonden silica gel of zoutgeïmpregneerde wielen)
- bestand tegen condensatie (zoutgeïmpregneerde wielen zijn dit niet)
- schimmel- en bacteriegroei in het wiel (bij voldoende hoge hete-luchttemperatuur gebeurt dit niet, in een zoutgeïmpregneerd wiel ook niet).

Fabrikant Seibu Giken DST hanteert een regeneratietemperatuur van 140 °C. Dit is voldoende om schimmel- en bacteriegroei tegen te gaan. Additioneel voordeel is dat ook schimmels en bacteriën in de lucht gedood worden. Bij toepassing in kassen moet voorkomen worden, dat ook insecten voor biologische bestrijding in het wiel terechtkomen. Deze overleven het niet en kunnen het absorptiewiel verstoppelen. Het verbruik van warmte voor een warmtewiel met warmteterugwinning is circa 1,39 kWh per kg afgevoerd vocht. Het specifieke energieverbruik is dus duidelijk hoger dan bij uitkoeling van vocht, maar de benodigde energie is van lagere kwaliteit.

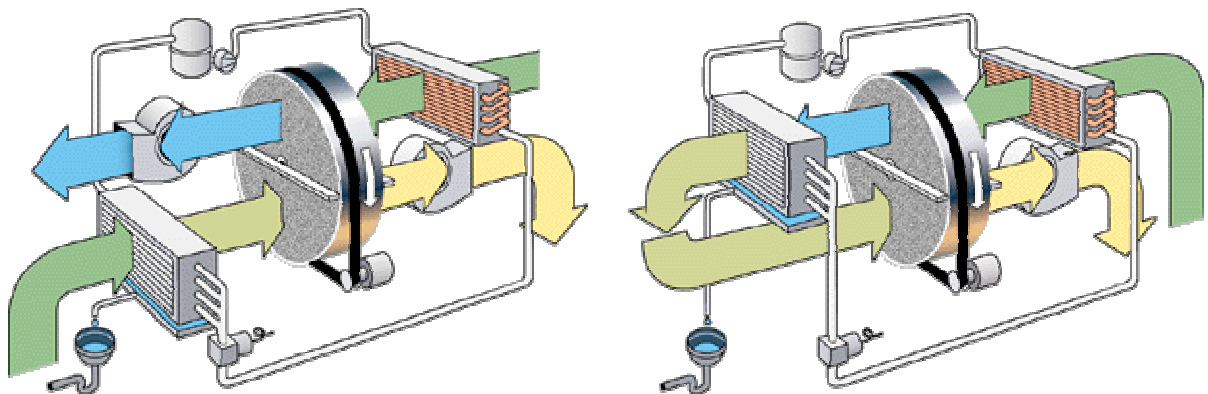


Figuur 7 Schema van de werking van een absorptiewiel, links de meest eenvoudige uitvoering, rechts met warmteterugwinning (Seibu Giken DST)

Het ligt voor de hand om een warmtewiel te combineren met een (compressie)warmtepomp. Op deze manier kan de ingaande lucht worden gekoeld (en ontvochtigd) en kan latente warmte worden onttrokken aan de vochtige lucht. In figuur 8 staan een tweetal mogelijkheden weergegeven. Het (elektrisch) energieverbruik van het gesloten systeem is circa 0,89 kWh/kg. Voor het open systeem is het energieverbruik het laagst, circa 0,58 kWh/kg. Dit is vergelijkbaar met alleen uitkoeling van vocht. Het verschil is dat met een absorptiewiel veel lagere luchtvochtigheden kunnen worden gehaald (een dauwpunt van  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  is haalbaar, overeenkomend met een RV van 10% bij  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Dit is met alleen uitkoeling moeilijk haalbaar. Bij uitkoeling van vocht treedt beneden  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  bevriezing op met alle gevolgen (o.a. blokkering van de luchtweg) van dien. Uitkoeling tot een dauwpunt van  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  is mogelijk niet nodig omdat in een kas 70% RV minimaal gewenst is. Het voordeel van ver uitkoelen is dat minder lucht mee afgekoeld wordt en ook minder capaciteit nodig is voor het verplaatsen van lucht.

Gezien de opbouw van de getoonde warmtepomp/absorptiewiel-combinaties zal de regeneratie van het wiel bij een temperatuur van maximaal  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  plaatsvinden. Dit is mogelijk te laag om effectief bacteriegroei en/of schimmelvorming tegen te gaan.

Naast absorptie in een warmtewiel kan ook gebruik gemaakt worden van systemen gebaseerd op een zoutoplossing in water. Zoutoplossingen hebben de eigenschap dat de dampdruk boven een verzadigde zoutoplossing (dat wil zeggen verzadigd met zout) veel lager is dan de verzadigingsdampdruk van lucht bij dezelfde temperatuur. Dit is in figuur 8 weergegeven voor LiBr, een geschikte zout voor deze toepassing (veel gebruikt in absorptiekoelmachines).

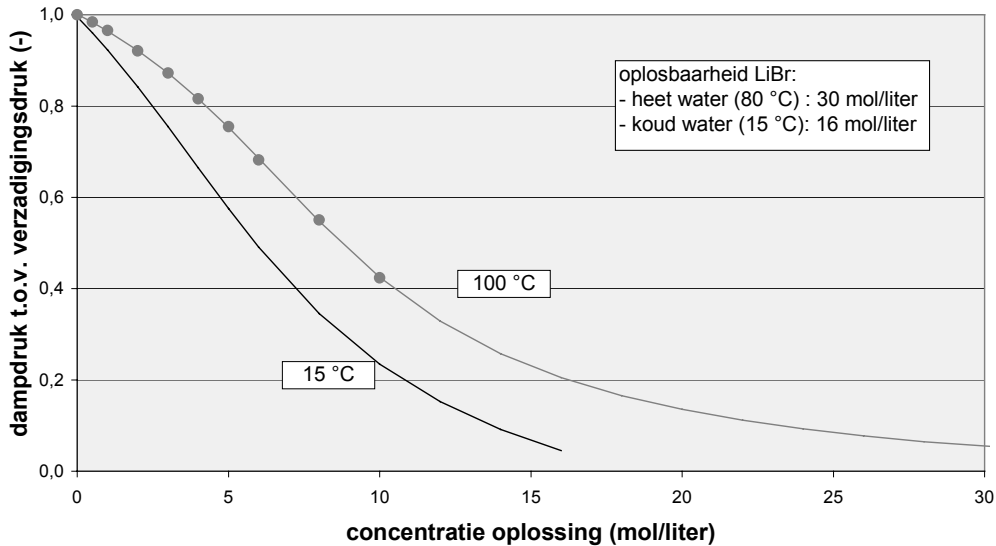


Figuur 8 Combinatie van een warmtepomp met een absorptiewiel, respectievelijk een open (links) en een gesloten (rechts) systeem (Seibu Giken DST)

Industriële voorbeelden van het gebruik van een zoutoplossing als ontvochtiger is bijvoorbeeld het Polykath systeem van fabrikant Kathabar Systems Europe (onderdeel van Imtech). Het voordeel van een zoutoplossing is dat deze rondgepompt kan gaan worden. Daardoor kan ter plaatse ontvochtigd worden en centraal geregenereerd worden. Een ander voordeel is dat vrijwel alle schimmels en bacteriën bij aanraking met de zoutoplossing worden gedood.

Zoutoplossingen (bijvoorbeeld LiBr, zie figuur 9) kunnen echter corrosief zijn vooral in combinatie met zuurstof hetgeen duurdere materialen met zich meebrengt en de werkt temperatuur limiteert. Fabrikant Kathabar gebruikt een "vloeibaar zout" (Kathene) waarvan de samenstelling niet wordt vermeld in de toegezonden documentatie. Echter, telefonisch contact heeft aangegeven dat LiCl het hoofdbestanddeel vormt van dit mengsel.

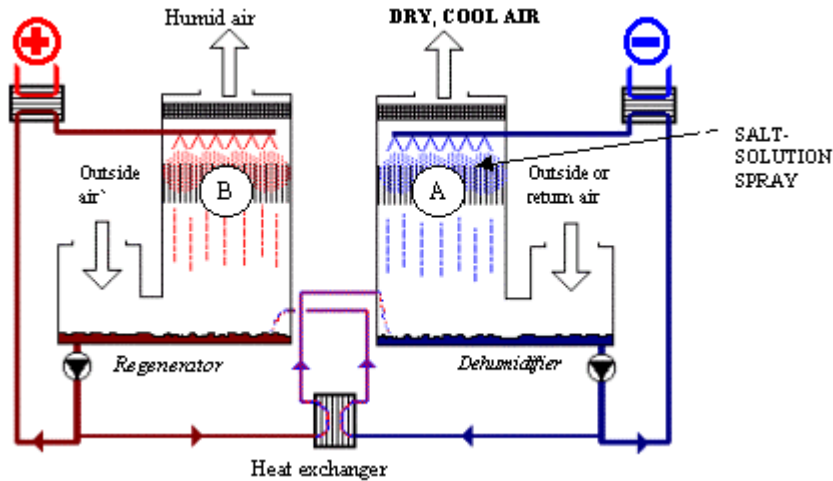




Figuur 9 De relatieve dampdruk boven een oplossing van LiBr als functie van de concentratie. De doorlopende curven zijn een schatting, de gemarkeerde punten zijn meetwaarden

Figuur 10 geeft een principeopzet van een ontvochtigingsinstallatie op basis van een zoutoplossing (Kathabar Systems Europe). Een geconcentreerde zoutoplossing (LiCl) wordt blootgesteld aan kaslucht (figuur 10 A). De oplossing zal zolang water uit de lucht opnemen tot deze zodanig is verdund dat de dampdruk boven de oplossing gelijk is aan de dampdruk in de kas. Hierbij komt latente warmte vrij. De zoutoplossing stijgt dus in temperatuur (en kan daardoor minder vocht opnemen). Deze vrijkomende warmte wordt weggekoeld. In de regel is hier "gewoon" koelwater uit een koeltoren (20 °C) voldoende voor.

De verdunde zoutoplossing wordt drooggestookt (figuur 10 B). Bij verhoogde temperatuur (voor Kathabar systemen is de toelaatbare temperatuur van de zoutoplossing maximaal 90 °C) wordt water weer uitgedampt waarbij latente warmte wordt opgenomen. De geconcentreerde zoutoplossing wordt in A weer gebruikt om kaslucht te ontvochtigen. De in de warmtewisselaar toegevoerde warmte komt vrij in de vorm van latente warmte (waterdamp) en sensibele warmte (opwarming van de (buiten)lucht waarmee de zoutoplossing ontvochtigd wordt). Door het toepassen van warmteterugwinning wordt een groot deel van deze sensibele warmte teruggewonnen. Zoals al gemeld dient de zoutoplossing die gebruikt wordt om te ontvochtigen, te worden gekoeld. Door de temperatuur van de zoutoplossing te verlagen kan ook koeling van de kaslucht worden bewerkstelligd.



Figuur 10 Principeschema van ontvochtiging met een zoutoplossing (Kathabar Systems Europe). In sectie A vindt de ontvochtiging van de kaslucht plaats, in sectie B ontvochtiging van de zoutoplossing

Een industriële manier om te drogen is het zogenaamde stoomdrogen. Oververhitte stoom wordt gebruikt om vocht te verdampen. Het verdampte vocht komt samen met de voorheen oververhitte stoom als vrijwel verzadigde stoom vrij. Een deel van de stoom wordt opnieuw oververhit en gebruikt om te drogen, de resterende stoom kan gebruikt worden voor bijvoorbeeld de productie van heet water. Stoomdrogen is zinvol voor het drogen van vaste stoffen waarbij een atmosfeer zonder lucht kan worden gecreëerd. Het grote voordeel van stoomdrogen is dat warmte vrijkomt op een bruikbaar temperatuurniveau. Voor luchtontvochtiging is stoomdrogen niet rechtstreeks geschikt, wel indirect om bijvoorbeeld een zoutoplossing te drogen.

Het verbruik van een stoomdroger is circa 0,75 kWh/kg (Voorter, 1994). Hiervan is 70% á 80% terug te winnen als bruikbare warmte. De kosten bedragen EUR 454000 (NLG 1 miljoen, prijspeil 1994) voor een droger met een capaciteit van een ton waterdamp per uur. Vooralsnog lijkt stoomdrogen vooral voor grote industriële processen zinvol.

In tabel 3 zijn een aantal gegevens van op de markt verkrijgbare drogers samengevat.

Tabel 3 Overzicht van in de handel verkrijgbare droogsystemen (gegevens van leveranciers en/of fabrikanten, prijspeil 2000). NTB = nader te bepalen, niet opgegeven door de fabrikant

Fabrikant/ leverancier	Type/fabrikant droger	Capaciteit (kg/uur)	Verbruik (kWh/kg)		Kosten (EUR/ (kg/h))	Opmerkingen
			Elekt	Therm		
Kathabar Systems Europe	Polykath small	46 22 °C/80%	0,16 <sup>1)</sup>	1,6 <sup>4)</sup>	815	zoutoplossing, doodt schimmels en bacteriën
	Polykath big	144 22 °C/80%	0,11 <sup>1)</sup>	1,6 <sup>4)</sup>	420	idem
	Kathapac	tot 2000 22 °C/80%	ntb	1,6 <sup>4)</sup>	140-200	idem, deze unit is maatwerk
Interland techniek	Dantherm X-AF 12/24S	59 28 °C/60%	0,65	ntb	550	compressiekoeler voor zwembaden
	Dehutech DA-6000	39 20 °C/60%	ntb	1,35 <sup>2)</sup>	880	absorptiewiel silica gel
	Dehutech DA-13000	86 20 °C/60%	ntb	1,53 <sup>2)</sup>	770	absorptiewiel silica gel
Dryfast	Calorex DF-1500	8,3 20 °C/80%	0,28	-	535	compressiekoeler, bouwdroger
	Calorex DH-600	25 20 °C/75%	0,42	-	480	compressiekoeler, stationair gebruik
D&F techniek	DST R-122	95 20 °C/60%	1,31		460	absorptiewiel silica gel
	DST DF-082	14,5 20 °C/60%	0,91		2050	absorptiewiel silica gel met compressiekoeler
	DST EF-082	17,4 20 °C/60%	0,34	-	1760	absorptiewiel silica gel met compressiekoeler
	DST EF-242	148 20 °C/60%	0,40	-	990	absorptiewiel silica gel met compressiekoeler
STORK	-	1000		0,75 <sup>3)</sup>	540	stoomdrogen

1) elektrisch vermogen pompen en ventilatoren, exclusief koelen en uitstoken van vocht

2) thermisch vermogen voor uitstoken van vocht, exclusief elektriciteitsverbruik voor ventilatoren en motor voor het absorptiewiel

3) komt vrij als stoom, 70-80% terugwinbaar voor andere processen

4) circa 50% koeling (20 °C) en 50% verwarming (90-120 °C) (Egberts, 2000)

Een aantal van de in tabel 3 genoemde systemen zijn warmtepompsystemen specifiek voor drogen. Van een tweetal van deze systemen (de Dantherm X-AF 12/24S en de Calorex DH-600) is aan de hand van de systeemgegevens (Interland, 2000; Dryfast, 2001) de prijs per kWth afgegeven warmte bepaald. Deze blijkt binnen 20% overeen te komen met de kosten zoals gegeven in figuur 4 (er van uitgaande dat de prijzen in tabel 3 ook installatiekosten bevatten). In verdere berekeningen zal grafiek 4 dan ook uitgangspunt zijn voor de kosten van warmtepompen, ook voor koelen en ontvochtigen.

### 3.3 Haalbaarheid van technieken

In tabel 4 zijn de beschouwde technologieën nog eens samengevat. Alle technologieën zijn ook technisch haalbaar en worden in één of andere vorm al commercieel toegepast. In tabel 5 is een "consumentenbeoordeling" gegeven van de beschouwde technologieën.

Tabel 4 Overzicht van de beschouwde technologieën

Functie	Technologie		Opmerkingen
koeling	verdamping water	direct	weinig zinvol, vocht moet weer afgevoerd worden, mogelijk wel in combinatie met effectieve ontvochtiging
		indirect	goedkoop; waterverbruik! Latente warmte niet terugwinbaar. Alleen bruikbaar bij lage RV buiten.
	warmtepomp	compressie koelmachine	standaard technologie, mechanische energie nodig, redelijk deellastgedrag, snel op te starten
		absorptie koelmachine	standaard technologie, thermische energie nodig, goed deellastgedrag, langzame start
	aquifer		minder lage koeltemperatuur bereikbaar dan met warmtepomp, aquifer moet geregenereerd worden, relatief weinig energieverbruik
ontvochtiging	uitkoelen	compressie koelmachine	combinatie met koelen mogelijk, zie boven
		absorptie koelmachine	combinatie met koelen mogelijk, zie boven
		(lucht/lucht) warmtewisselaar	alleen bruikbaar als de buitentemperatuur laag is, volumineus
		aquifer	combinatie met koelen mogelijk, zie boven
	absorberen	absorptiewiel	haalt lage RV, regenereren kost energie, combinatie met CWP mogelijk
		zoutoplossing	corrosie is aandachtspunt, vooral bij hoge temperaturen, regenereren kost energie, combinatie met een CWP mogelijk
	stoomdrogen	oververhitte stoom	industriële proces voor grootschalige toepassing, mogelijk interessant voor het regenereren van absorptiezouten, restwarmte bruikbaar.

Tabel 5 Vergelijkingstabel van de beschouwde technologieën. Met efficiëntie wordt bedoeld de mate waarin een lage temperatuur of lage vochtigheidsgraad kan worden bereikt. In milieu-aspecten komt bijvoorbeeld tot uitdrukking de kans op weglekken van koelmiddel, wel/geen elektriciteitsverbruik (in verband met NOx-productie bij opwekking), en eventuele andere schadelijke milieueffecten

Legenda:

- ++ scoort ten opzichte van gemiddelde van spectrum zeer goed
- + scoort ten opzichte van gemiddelde van spectrum goed
- +/- scoort ten opzichte van gemiddelde van spectrum neutraal/gemiddeld
- scoort ten opzichte van gemiddelde van spectrum matig
- scoort ten opzichte van gemiddelde van spectrum zeer matig

	energetische prestatie	efficiëntie	praktische realiseerbaarheid	milieuaspecten	bruikbaarheid warmte/vocht	zinnvolle combinatie met WP voor RV	combinatie met LT-net	investeringen
<b>koelen</b>								
verdampingskoeling direct	++	-	++	++	--	--	nvt	++
verdampingskoeling indirect	+	-	+	+	--	--	nvt	+
compressiekoelmachine	+/-	++	+	+/-	+	++ <sup>3)</sup>	++	+/-
absorptiekoelmachine	- <sup>1)</sup>	+	+	+	+	+/- <sup>3)</sup>	++	-
aquifer	++	+	+	++	+	++	+	+/-
<b>ontvochtigen</b>								
warmtewisselaar	++	+	+/-	+	-	-	-	+
compressiekoelmachine	+/-	++	++	+/-	+	++ <sup>3)</sup>	++	+/-
absorptiekoelmachine	- <sup>1)</sup>	+	+	+	+	+/- <sup>3)</sup>	++	-
aquifer	+	+/-	+	++	+	++	+	+/-
absorptiewiel	+/- <sup>1)</sup>	++	++	+	-	+	-	-
zoutoplossing	+/- <sup>1)</sup>	++	+	+	+/- <sup>4)</sup>	-	-	++
stoomdrogen	+ <sup>2)</sup>	+	-	+	++	-	-	+

1) afhankelijk van de bron van warmte voor aandrijving/regeneratie

2) afhankelijk of restwarmte goed gebruikt kan worden

3) koel/ontvochtigingsfunctie omkeren

4) afhankelijk van de droogtechniek; met MDR (mechanische dampcompressie) goed bruikbaar

Vooralsnog lijken warmtepompen goed te scoren omdat een combinatie van koelen en ontvochtigen mogelijk is. Het is echter de vraag of en hoeveel ervaring er al is met omkeerbare warmtepompen in de praktijk. Technisch is er niet zo gauw een voorkeur uit te spreken voor een AWP of een CWP. Een aquifer biedt ook goede mogelijkheden voor koeling en ontvochtiging. Combinatie van directe koeling met een aquifer en indirecte koeling via een warmtepomp ligt voor de hand. Vochtabsorptietechnieken kunnen ook gecombineerd worden met een warmtepomp (via mechanische damprecompressie, zie verderop). Machines op basis van een absorptiewiel lijken vooralsnog te duur. Ontvochtigen met een zoutoplossing is een relatief goedkope techniek. De kosten van het energiegebruik voor het uitstoken van de zoutoplossing zullen echter wel in het totale economische plaatje moeten worden meegenomen. Mogelijk kan dit samengaan met CO<sub>2</sub>-productie voor de kas.

## 4 SYSTEMEN

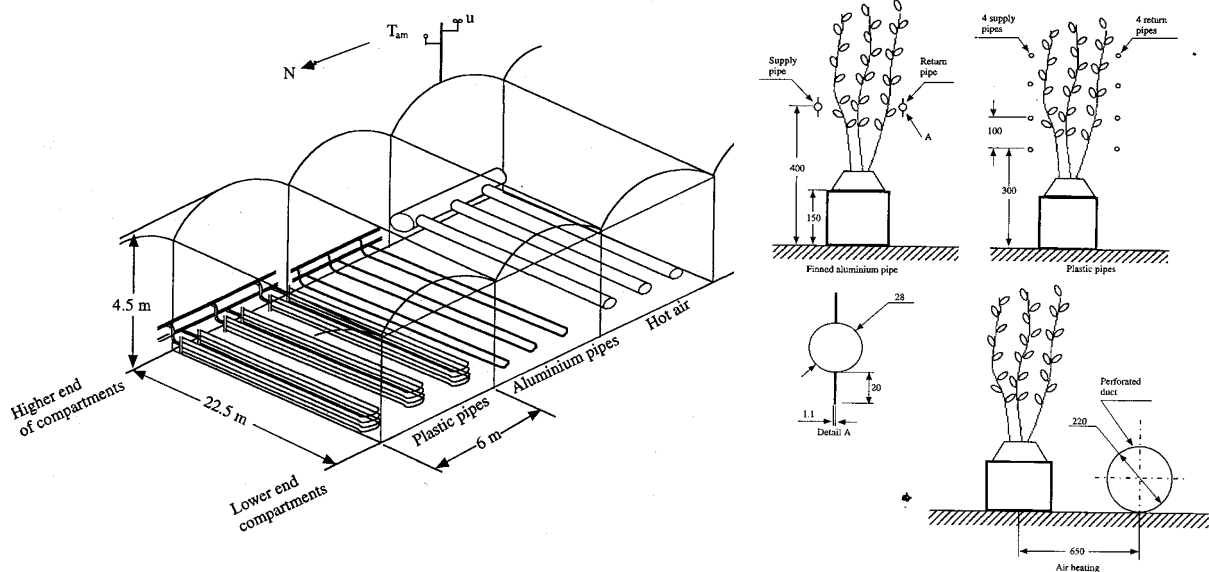
### 4.1 Overwegingsfactoren

Als gekeken wordt naar een systeem voor ontvochtigen en koelen in een kas dan komen een aantal aandachtspunten naar voren.

- *Centraal of decentraal klimatiseren.* Centrale klimaatbeheersing betekent in de regel de verplaatsing van een enorme hoeveelheid lucht (met bijbehorende energieverbruik). Daar staat tegenover dat één centrale installatie vaak economisch aantrekkelijker is dan een aantal decentrale units met dezelfde gezamenlijke capaciteit.
- *Luchtverwarming of buisverwarming* of een combinatie van beide. Als voor koeling en/of ontvochtiging lucht verplaatst moet worden kan tevens gedacht worden aan luchtverwarming. Teitel (1999) beschrijft experimenten met een vergelijking tussen luchtverwarmde en buisverwarmde kassen. Figuur 11 beschrijft de experimentele opzet. Zijn bevindingen zijn dat bij buisverwarming de bladtemperatuur over het algemeen hoger is dan de luchttemperatuur (door het stralingsaandeel). Bij luchtverwarming is de bladtemperatuur over het algemeen lager dan de luchttemperatuur. Hij concludeert dat bij luchtverwarming de kans op schimmelziekten daarom groter is. Met luchtverwarming bleken de schommelingen in de relatieve vochtigheid in de kas (bij aan-uit regeling van de temperatuur) hoger en het temperatuurprofiel in de kas ongelijkmatiger. Het energieverbruik voor lucht- en buisverwarming bleek nauwelijks te verschillen.
- *Veel of weinig ontvochtigen.* De keus is tussen veel lucht niet al te veel ontvochtigen of minder lucht veel ontvochtigen. De eerste optie stelt minder hoge eisen aan de ontvochtigingstechnologie maar vraagt om een grote luchtverplaatsing. De tweede optie vraagt een "betere" technologie maar minder luchtverplaatsing. Bij een uitkoeling met een aquifer is deze keuze er overigens niet omdat het temperatuurregime van een aquifer vrijwel vast ligt.
- Door de kas goed te ontvochtigen hebben de planten meer mogelijkheid om door verdamping te koelen. Op die manier wordt gebruik gemaakt van de natuurlijke koelcapaciteit in de kas. Hierbij moet overigens worden opgelet, dat niet te ver ontvochtigd wordt. De planten gaan zich bij een lage RV tegen uitdroging beschermen, door de huidmondjes wat meer te sluiten. Hierdoor wordt de gaswisseling tussen plant en omgeving gereduceerd, wat echter ook betekent dat de opname van CO<sub>2</sub> minder wordt, waardoor de assimilatie wordt geremd.
- De installatie moet geschikt zijn om de warmte die in de zomer aan de kas wordt onttrokken (sensibel en latent) op te vangen en op te slaan voor gebruik in de winter. Dit betekent een vorm van seizoensopslag. Vooralsnog wordt alleen een aquifer hiervoor technisch en economisch haalbaar geacht.



- Systemwinst zal te behalen zijn in het koppelen van functies. Zo kan de distributie van droge en/of gekoelde lucht gecombineerd worden met de distributie van CO<sub>2</sub> uit rookgas en kan een lage-temperatuur (LT) net gebruikt worden voor verwarming en voor koeling (hoewel dit in de 'kwakkelseizoenen' tot problemen kan leiden omdat zowel verwarmd als ontvochtigd moet worden).
- In alle gevallen is een warmtepomp aanwezig om de opgeslagen warmte in de aquifer op een bruikbaar temperatuurniveau te brengen.



Figuur 11 Experimentele opzet voor het vergelijken van de effecten van buisverwarming en luchtverwarming (Teitel, 1999)

## 4.2 Te verwachten massa- en energiestromen

In deze paragraaf wordt een inschatting gegeven van de te verwachten massa- en energiestromen en de dimensionering van de koel- en ontvochtigingsoppervlakken. Deze inschatting is bedoeld om een gevoel te krijgen voor de verhoudingen tussen koelen en ontvochtigen. Alle warmte- en vochtstromen, condensatieoppervlakten en dergelijke in deze paragraaf zijn gerelateerd aan 1 m<sup>2</sup> kasoppervlak.

In tabel 6 is een overzicht gegeven van de vereiste warmtestromen en dergelijke voor de klimatisering van een gesloten kas met tomaten. Deze stromen zijn berekend met behulp van het KEMA-kasmodel en op basis van een standaard (verkort) referentiejaar (NEN 5060).

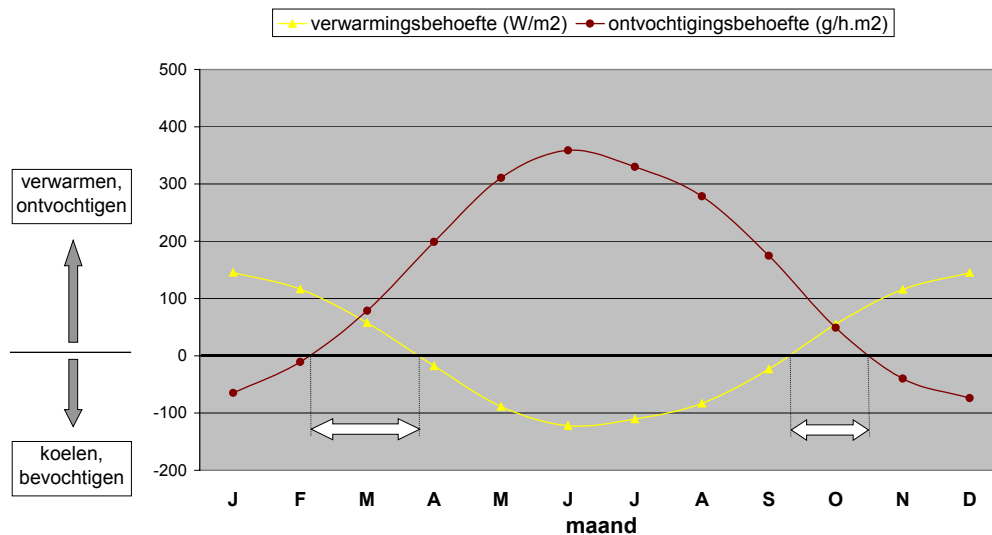
De temperatuur van de gesloten kas is op maximaal 25 °C gesteld bij maximaal 85% relatieve vochtigheid (RV). Dit betekent dat er bij veel zonne-instraling juist zoveel gekoeld en ontvochtigd wordt, dat deze condities niet overschreden worden. Het verwarmingstemperatuursetpoint bedraagt van 11 december tot 10 januari overdag 19°C en 's nachts 18 °C en van 11 januari tot 20 november overdag 18 °C en 's nachts 17 °C. De kas heeft een beweegbaar energiescherm met een energiebesparing van 42% indien het volledig gesloten is. (Het sluit als de buitentemperatuur 10 graden lager is dan de kastemperatuur, mits de globale instraling minder dan 50 W/m<sup>2</sup> is). (De maximale leaf-area-index bij deze berekening was 5.6). In tabel 6 is het eigen energieverbruik van de klimaatinstallatie nog niet meegenomen (behalve elektriciteit voor de CO<sub>2</sub>- en ketelventilator en voor pompen van het CV-systeem).

Tabel 6 Vereiste energiestromen en capaciteiten voor klimatisering van een gesloten kas met tomaten over een jaar per m<sup>2</sup> kasoppervlak (exclusief hulpenergie voor koel- en ontvochtigingsinstallaties)

	<b>Maximaal gevraagde capaciteit</b>	<b>Gemiddelde jaarvraag</b>	<b>Bedrijfstijd</b>	<b>Gemiddelde capaciteit over bedrijfstijd</b>
warmte	180 W (200) kortstondig	1,4 GJ	6300 uur	63 W
CO <sub>2</sub>	10 g/uur	16,7 kg	4000 uur	4,2 g/uur
elektriciteit	1,5 W	9,4 kWh	8500 uur	1,1 W
koeling (sensibele koude)	180 W (238) kortstondig	0,33 GJ	1300 uur	70 W
ontvochtiging	350 g/uur	436 kg	4400 uur	99 g/uur

Nadere beschouwing van de vraagpatronen geeft aan dat koeling alleen nodig is als ook ontvochtiging nodig is (maar niet andersom). In het winterseizoen zijn geen koeling en ontvochtiging nodig. Verwarming, CO<sub>2</sub> en elektriciteit zijn het hele jaar door nodig. Naar schatting 20% van de warmtebehoefte is nodig binnen 24 uur waarin ook een koudebehoefte is. Dat betekent dat circa 20% van de totale warmtebehoefte via een warmtebuffer gedekt kan worden door warmte die ontstaat tijdens koeling en/of ontvochtiging van de kas. Deze schatting is nodig om een schatting te maken van het totale jaarenergieverbruik voor verschillende koel- en ontvochtigingsopties.

In figuur 12 wordt een inschatting gegeven van de verwarmingsbehoefte en ontvochtigingsbehoefte van een kas (daggemiddelde per maand). De inschatting is gebaseerd op een zeer eenvoudig model en slechts indicatief. Belangrijkste punt is dat de ontvochtigingsbehoefte en de warmtebehoefte niet geheel in tegenfase lopen. Rond maart en oktober is er een periode van circa één maand met gemiddeld een warmtebehoefte en een ontvochtigingsbehoefte. Bij het gebruik van bijvoorbeeld een omkeerbare warmtepomp zal hier rekening mee moeten worden gehouden.



Figuur 12 Daggemiddelde verwarmings- en ontvochtigingsbehoefte in een kas, gebaseerd op een zeer eenvoudig kasmodel. De waarden langs de y-as zijn slechts indicatief. De grafiek geeft aan dat zowel in de lente als in de herfst rekening moet worden gehouden met circa één maand waarin zowel een warmtebehoefte als een ontvochtigingsbehoefte bestaat

De jaarlijkse actieve ontvochtigingsbehoefte van de modelkas wordt geschat op 436 kg per m<sup>2</sup> kasoppervlak per jaar. Dit komt overeen met een gemiddelde ontvochtigingscapaciteit van 50 g per uur. De vochtbelasting is echter niet over de hele dag en het hele seizoen gelijkmatig. De maximale belasting is circa 7 maal deze waarde (350 g per uur, zie tabel 6). Uitgaande van kaslucht van 25 °C en 85% RV en aangenomen dat deze deels ontvochtigd wordt door uitkoeling op een oppervlak van circa 10 °C, dan komt een condensatie van 350 g/h overeen met een luchtverplaatsing van 31 m<sup>3</sup> per uur naar het koude oppervlak.

Voor de condensatie op een oppervlak  $\phi_c$  geldt (Tammes en Vos, 1980):

$$\phi_c = \beta \times (P - P'_o)$$

Waarin:  $\phi_c$  = condensatiestroom (kg/s)  
 $P$  = partiële waterdampdruk in de omgevingslucht (Pa)  
 $P'_o$  = verzadigingsdampdruk boven het oppervlak (Pa)  
 $\beta$  = de waterdampovergangscoefficiënt (s/m)  
 =  $22 \cdot 10^{-9}$  s/m voor binnencondities (weinig tot geen convectie)  
 =  $130 \cdot 10^{-9}$  s/m voor buitencondities (luchtsnelheid 4 m/s).

Voor condensatie van kaslucht (neem aan 25 °C, 85% RV) op een oppervlak van 10 °C (zonder convectie) is de condensatiesnelheid circa 115 g per m<sup>2</sup> condenserend oppervlak per uur. Bij een maximale vochtbelasting van 350 g/h moet dus circa 3,1 m<sup>2</sup> condensatieoppervlak van 10 °C aanwezig zijn. Indien gekoeld wordt tot 2 °C is nog 2,2 m<sup>2</sup> nodig. Uitgaande van een zoutoplossing en aannemende dat de dampdruk boven deze zoutoplossing 15% is van de verzadigingsdruk in de lucht (praktijkgegevens Kathabar systeem, zie tabel 3), dan is nog circa 2,0 m<sup>2</sup> contactoppervlak nodig. Een verzadigde zoutoplossing is even effectief als een oppervlak met een temperatuur van -3 °C. Een zoutoplossing zal, door opname van vocht, verdunnen waardoor de dampdruk boven de oplossing stijgt en daarmee de effectiviteit van de ontvochtiging daalt. Deze dient daarom te worden geregenereerd.

Het genoemde oppervlak heeft betrekking op het condensatieoppervlak zonder geforceerde luchtverplaatsing (bijvoorbeeld een glasoppervlak of een gekoelde vloer). Bij geforceerde luchtverplaatsing (bijvoorbeeld bij commerciële bouwdrogers met ingebouwde ventilator en warmtepomp) kan het werkelijke oppervlak naar schatting een factor zes kleiner worden (de  $\beta$ -factor wordt zeker een factor zes groter, zie boven).

De maximale koelbehoefte (sensibele warmte, zonder ontvochtiging!) in een kas bedraagt naar schatting 180 W/m<sup>2</sup> (KEMA-schatting, tabel 6). Dit is minder dan een derde van de maximale effectieve zoninstraling in een kas (circa 900 W/m<sup>2</sup>). Stel dat deze warmte onttrokken moet worden aan lucht van 25 °C en 85% relatieve vochtigheid (RV) en stel dat dit gebeurt door de lucht te koelen tot 10 °C. Dan is circa 31 m<sup>3</sup> lucht per uur nodig om dit vermogen aan sensibele warmte te kunnen onttrekken. Tevens vindt condensatie plaats. Hiervoor is circa 240 W/m<sup>2</sup> nodig. Naarmate dieper gekoeld wordt is minder lucht nodig. Bij een koelend oppervlak van 2 °C is nog 21 m<sup>3</sup>/h lucht nodig. Voor condensatie is dan 220 W/m<sup>2</sup> nodig omdat, naarmate de luchttemperatuur lager wordt, in absolute zin per graad temperatuurverlaging minder vocht wordt uitgekoeld.

Uitgaande van een warmteovergangscoefficiënt van  $8 \text{ W/m}^2\text{K}$  (zonder geforceerde luchtstroming, (Tammes en Vos, 1980)) is voor de afkoeling van lucht tot  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  bij een warmtestroom van  $180 \text{ W/m}^2$  (sensibele warmte, aangenomen wordt dat condensatie en afkoeling tegelijkertijd maar onafhankelijk plaatsvinden) een koelend oppervlak van circa  $1,5 \text{ m}^2$  nodig. Bij geforceerde luchtstroming (warmteovergangscoefficiënt  $>25 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) is dit oppervlak minimaal drie maal zo klein.

De resultaten van de oriënterende berekeningen zijn samengevat in tabel 7. Het zijn slechts orde-grootte berekeningen om een indruk te krijgen van het benodigde oppervlak en om in te schatten in hoeverre bestaande oppervlakken (bijvoorbeeld het vloeroppervlak) kunnen worden ingezet.

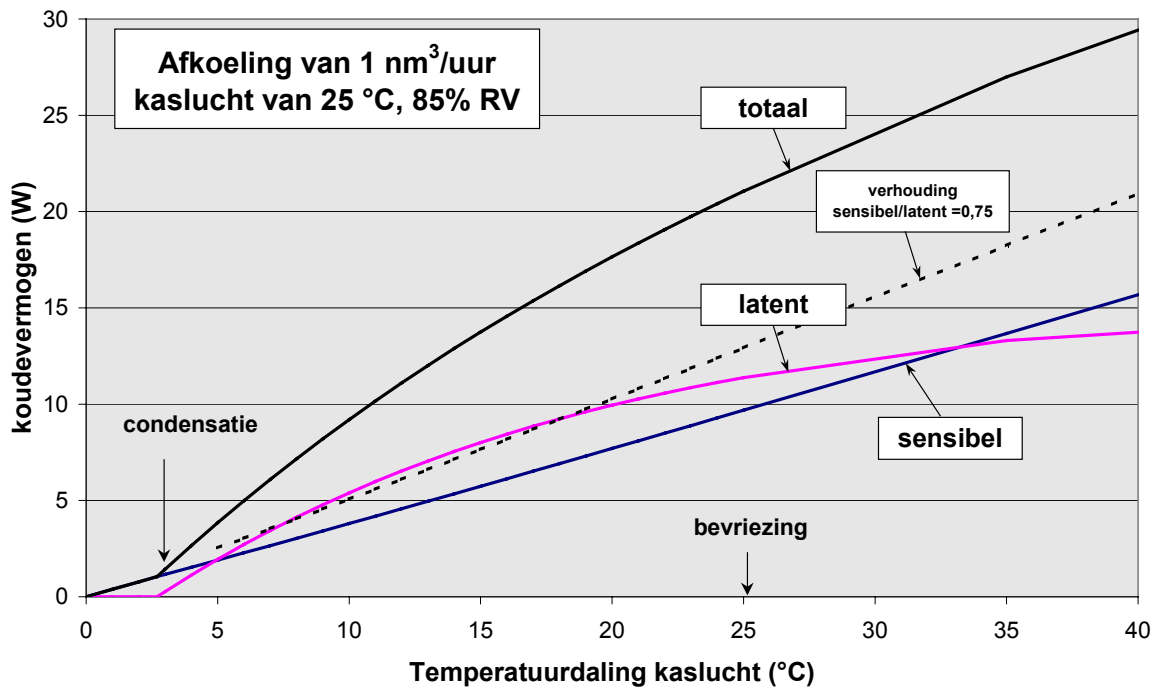
Tabel 7 Resultaten van oriënterende berekeningen met betrekking tot het benodigde koelen/of condensatieoppervlak in een kas betrokken op de piekbelasting

	<b>Benodigd actief oppervlak (<math>\text{m}^2</math> per <math>\text{m}^2</math> kasoppervlak)</b>	
	<b>voor koeling (180 W sensibel)</b>	<b>voor condensatie (350 g/h)</b>
natuurlijke convectie	1,5	2,0-3,1
geforceerde luchtverplaatsing	< 0,5	< 0,6
	<b>benodigde luchtstroom (<math>\text{m}^3/\text{uur}</math> per <math>\text{m}^2</math>)</b>	
geforceerde luchtverplaatsing	31	31

Bovengenoemde schattingen voor het actief oppervlak voor koelen en ontvochtigen en de benodigde luchtstroom gelden voor de maximale belasting. Het actief oppervlak voor koelen en ontvochtigen is vrijwel gelijk evenals de benodigde luchtstroom bij geforceerde luchtverplaatsing. Dat maakt het combineren van systemen voor koelen en ontvochtigen eenvoudiger.

Koelen en ontvochtigen door een koud oppervlak vinden gelijktijdig plaats. Het is praktisch niet mogelijk om met een koud oppervlak alleen te koelen of alleen te ontvochtigen. Figuur 13 geeft aan wat de verhouding is tussen koeling (sensibele warmte) en ontvochtiging (latente warmte) bij afkoeling van  $1 \text{ Nm}^3$  lucht van  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  en  $85\% \text{ RV}$ . Totdat condensatie optreedt (bij  $22,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ) vindt alleen overdracht van sensibele warmte plaats. Daarna neemt het aandeel latente warmte snel toe. Dit aandeel neemt weer af bij grotere temperatuuurdalingen omdat dan nog relatief weinig vocht uitgekoeld kan worden.

Uit figuur 13 blijkt dat de verhouding tussen overdracht van sensibele warmte en latente warmte bij een temperatuurdaling tussen de 10 °C en de 20 °C redelijk constant is. Voor de berekeningen in deze notitie wordt aangenomen dat bij uitkoeling de verhouding tussen overdracht van sensibele warmte en van latente warmte 0,75 is.



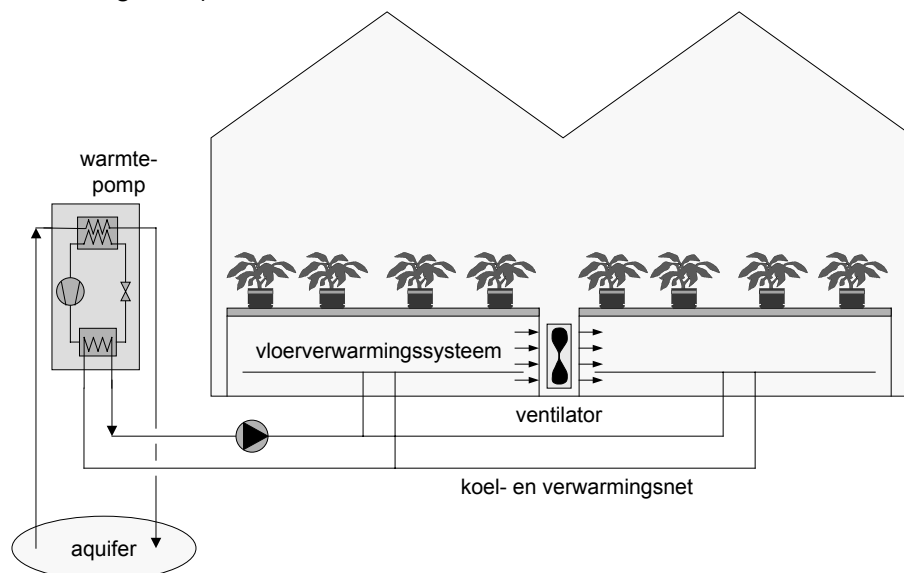
Figuur 13 Verhouding tussen overdracht van sensibele warmte en latente warmte bij afkoeling van 1 Nm<sup>3</sup> kaslucht als functie van de temperatuurdaling van de kaslucht

#### 4.3 Mogelijke systemen

Uitgangspunt is dat er voor de kas een hulpwarmteketel, een aquifer en een warmtepomp beschikbaar zijn. In deze paragraaf staan, op basis van de gegevens en beschouwingen in voorgaande paragrafen, de zinnige combinaties met de eerder genoemde koel- en ontvochtigingstechnieken genoemd.

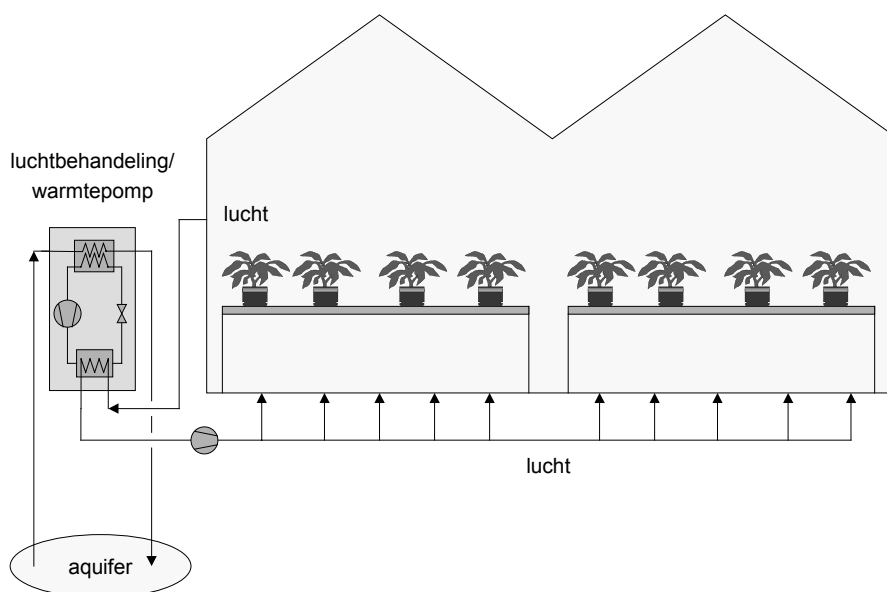
De eerste indruk ontstaat dat om te koelen en/of te ontvochtigen een lokale oplossing het beste is. In essentie transporteer je zo alleen koude en/of vocht (en koelmiddel). Bij centrale ontvochtiging wordt veel lucht getransporteerd wat in principe niet nodig is. Alleen topkoeling en/of -ontvochtiging toepassen en de rest via natuurlijke ventilatie doen is een alternatief.

Een eerste mogelijkheid is het koelen van de kas door het koelen van de vloer of door gebruik te maken van een soort vloerelementen (gecombineerde vloerverwarming en *vloerkoeling*, figuur 14). In essentie is dan ongeveer 1 m<sup>2</sup> actief oppervlak per m<sup>2</sup> vloeroppervlak mogelijk. Bij gewassen die geheel boven de vloer worden geteeld, op teelttafels of teeltgoten, is dit mogelijk wat te vergroten met een constructie onder de tafels of goten). Condens kan worden opgevangen (extra voorziening) en worden hergebruikt. Mogelijk zijn voor een voldoende grote koel- en ontvochtigingscapaciteit ventilatoren nodig om voldoende luchtverplaatsing onder de teelttafels te krijgen. Het systeem kan worden uitgerust met een centrale warmtepomp. Naar keuze kan in de zomer gekoeld worden met water direct uit de koude bron van de aquifer of met gekoeld water uit de warmtepomp. Op deze manier vindt ook terugwinning van latente warmte uit de kas plaats. Tegelijkertijd ontvochtigen en verwarmen is niet mogelijk. Dit is wel mogelijk als dit systeem additioneel aan een warmte-afgiftenet wordt gekoppeld. Ook kan gekozen worden voor twee warmtepompen waarvan er één kan verwarmen en één kan ontvochtigen. Het idee is, dat in de periode dat zowel verwarming als ontvochtiging nodig is, niet de maximale capaciteit nodig is en dus volstaan kan worden met de halve capaciteit voor iedere functie. Een punt van aandacht/zorg bij vloerkoeling is de temperatuurverdeling in verticale richting. Koude lucht blijft in principe onder in de kas hangen. Er dient voor voldoende verticale luchtbeweging te worden gezorgd, om de koude lucht op te mengen met de warmere en vochtigere kaslucht meer naar boven (tot minimaal de top van het gewas).



Figuur 14 Koeling, ontvochtiging en verwarming in een kas met een vloerkoeling/verwarmingssysteem en een centrale warmtepomp. In de figuur is de verwarmingssituatie getekend met een elektrische warmtepomp. Door de warmtepomp om te keren kan gekoeld worden. De ventilator is optioneel

Een tweede optie is de traditionele "*zwembadmethode*": centrale luchtontvochtiging en een systeem met luchtkanalen (zie figuur 15). Aangenomen wordt dat luchtkanalen in de nok van de kas vanuit het oogpunt van lichtwegvangst niet toegestaan zijn. Daarom wordt een systeem van luchtafzuiging aan één zijde van een kas en luchtinblaas via kanalen en slangen onder de teeltgoten of teelttafels of in de grond voorgesteld (zie ook figuur 11). Koeling en ontvochtiging vinden plaats in één of meerdere warmtepompunits. Dit kunnen zowel absorptiewarmtepompen als compressiewarmtepompen zijn. Afhankelijk van de koelbehoefte kan de ingeblazen lucht weer op temperatuur worden gebracht met de warmte die vrijkomt bij de koeling/ontvochtiging. Eventueel kan centraal koudeopslag plaatsvinden om piekkoeling te leveren. Het systeem kan ook gebruikt worden om in de winter te verwarmen, door de warmtepomp om te keren.

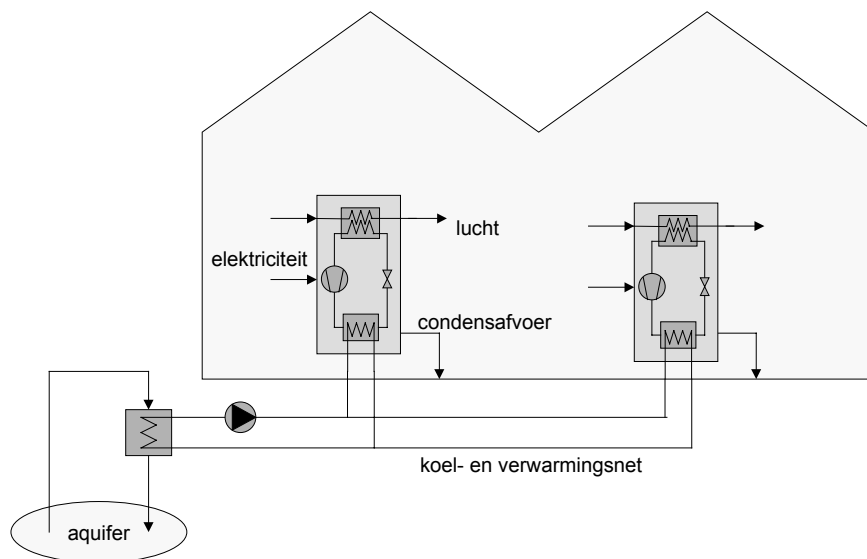


Figuur 15 Centrale koeling/ontvochtiging/verwarming van kaslucht met een warmtepomp. Hier is de situatie getekend dat de kas verwarmd wordt met een elektrische warmtepomp

Een derde optie is *decentrale koeling/ontvochtiging* (figuur 16). In plaats van een centrale warmtepompunit worden een aantal decentrale units neergezet die gekoppeld worden aan een waterleidingnet voor koeling en/of verwarming. Als deze units omkeerbaar zijn, kunnen ze ook gebruikt worden voor verwarming in de winter. Naast een waterleidingnet moet ook een elektriciteitsnet in de kas worden aangelegd dat zwaar genoeg is voor de warmtepompen.



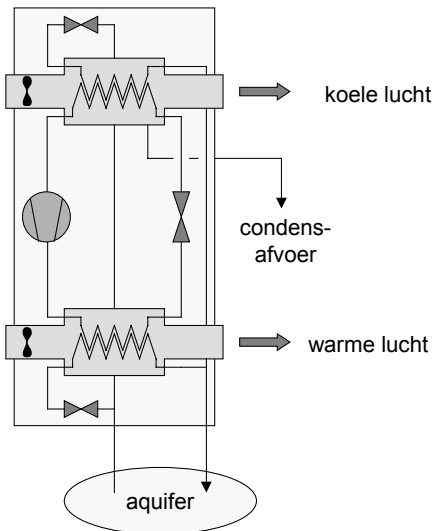
Een voordeel is dat de units gebruikt kunnen worden voor gelijktijdige verwarming en ontvochtiging. In dat geval wordt de warmte aan de condensorzijde niet weggekoeld via de aquifer maar weer terug de kas in geblazen. Deze optie lijkt op voorhand duur maar is flexibel. Figuur 17 geeft een voorbeeld van de uitvoering van een dergelijke unit.



Figuur 16 Koeling, ontvochtiging en verwarming met decentrale warmtepompunits. In de huidige configuratie is de warmtepomp geschakeld als koeler/ontvochtiger

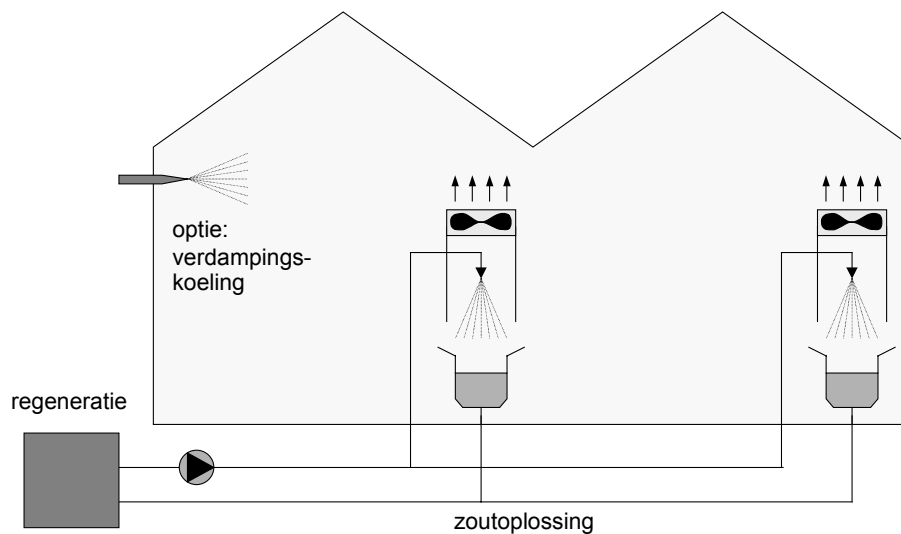
De warmtepomp in figuur 17 is uitgevoerd met een dubbele warmtewisselaar aan de condensorzijde en dito aan de verdamperzijde. In geval alleen warmte nodig is wordt de verdamperzijde verwarmd met water uit de warme bron van de aquifer en wordt de condensorzijde gebruikt om kaslucht op te warmen. Is er behoefte aan koeling, dan wordt de condensorzijde gekoeld met water uit de aquifer en wordt de verdamperzijde gebruikt voor luchtkoeling. In dit geval treedt tevens ontvochtiging op. Is er ontvochtiging nodig zonder koeling dan wordt de aquifer niet of slechts gedeeltelijk gebruikt. Aan de verdamperzijde wordt de kaslucht ontvochtigd en aan de condensorzijde wordt de kaslucht herverwarmd met de vrijgekomen latente warmte en met het vermogen dat de compressor heeft opgenomen. De unit kan ook gebruikt worden om te koelen met alleen de aquifer. De compressor van de warmtepomp wordt dan uitgezet.

De verdeling van de koude (en in mindere mate de warmte) in de kas is nog een belangrijk punt van zorg ('valt' de koude lucht aan de uitblaaszijde niet lokaal - voordat ze is opgemengd met de omgevingskaslucht - op de kop van een deel van het gewas, waardoor lokaal in het gewas 'cold spots' ontstaan?; hoe groot moet/kan de worp van de units zijn in het perspectief van de benodigde/gewenste menging met kaslucht?).



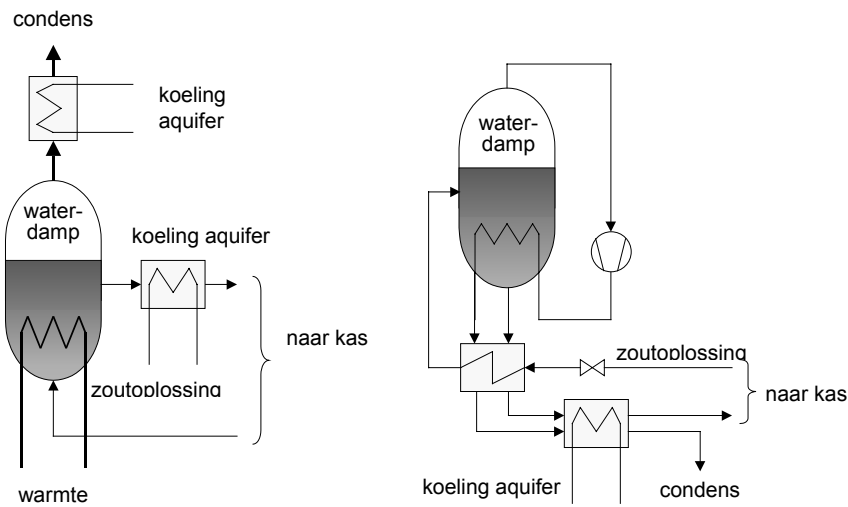
Figuur 17 Een voorbeeld van een decentrale multifunctionele warmtepompunit (combinatie-unit) voor koelen, verwarmen en ontvochtigen met en zonder koeling

Een laatste optie die wordt beschouwd is de ontvochtiging met behulp van een *geconcentreerde zoutoplossing* (figuur 18). Deze zoutoplossing wordt in geconcentreerde vorm rondgepompt en in decentrale units verspreid. De oplossing neemt water op uit de lucht en stijgt daardoor in temperatuur. De zoutoplossing wordt centraal weer ontvochtigd. Dit systeem kan gebruikt worden voor ontvochtiging en in beperkte mate voor koeling, namelijk door de zoutoplossing te koelen. Het kan echter gecombineerd worden met een verdampingskoeler. Door te ontvochtigen wordt ruimte geschapen voor extra verdampingskoeling. Door de temperatuur van de zoutoplossing die wordt rondgepompt te variëren, kan in enige mate gekoeld en/of verwarmd worden. Verdere verwarming vindt in deze situatie plaats met een conventioneel buizenverwarmingssysteem op lagere temperatuur (geschikt voor een warmtepomp).



Figuur 18 Ontvochtigen met een geconcentreerde zoutoplossing, eventueel gecombineerd met verdampingskoeling

In figuur 19 zijn een tweetal opties genoemd om de zoutoplossing zelf te ontvochtigen. Conventioneel is uitstoken bij maximaal 90 °C (temperatuur van de zoutoplossing). Dit is energie-intensief. De optie met conventioneel uitstoken kan echter gecombineerd worden met een absorptiewarmtepomp. In de zomer, als veel koelvermogen nodig is, komt ook warmte op een hoger temperatuurniveau vrij (van de AWP) die kan worden gebruikt om de zoutoplossing mee te ontvochtigen (eventueel na verdere verwarming door de ketel). De CO<sub>2</sub> van de ketel die de warmte produceert voor de AWP en/of de regeneratie, kan gebruikt worden voor CO<sub>2</sub>-bemesting. Een optie om de energie-efficiëntie van dit systeem te verhogen, is gebruik te maken van mechanische dampcompressie (MDC) maar dit is waarschijnlijk duur en de combinatie met CO<sub>2</sub>-productie ontbreekt. Vooral nog zal alleen naar de optie met een absorptiewarmtepomp gekeken worden.



Figuur 19 Opties om een zoutoplossing te ontvochtigen; van links naar rechts respectievelijk gewoon uitstoken, eventueel met warmte uit de warmtepomp, en uitstoken via mechanische dampcompressie

In tabel 8 zijn de voor- en nadelen van de vier verschillende opties samengevat. Een uitgangspunt bij het opstellen van deze tabel was dat voor de duurzame verwarming van de kas al een warmtepomp en een aquifergebaseerd warmte-opslagsysteem nodig zijn.

Tabel 8 Voor- en nadelen van de diverse systemen voor koeling, ontvochtiging en verwarming in een kas. Uitgangspunt is dat er al een aquifer en een WP al nodig zijn voor verwarming in de winter

Omschrijving systeem	Voordelen	Nadelen
vloerverwarming en -koeling in combinatie met een buizenverwarmingsnet	relatief goedkoop systeem; weinig ingrepen in de kasruimte zelf nodig, waardoor deze (nagenoeg) volledig voor de teelt beschikbaar blijft; conventioneel systeem	voor ontvochtiging mogelijk extra ventilatoren nodig; niet toepasbaar als tegelijkertijd verwarming en ontvochtiging nodig is, tenzij het systeem gecombineerd wordt met een additioneel warmte-afgiftenet; koude lucht blijft van nature onderin hangen: er moet wellicht kunstmatig verticale luchtbeweging worden gecreëerd voor een goede menging met warmere en vochtigere lucht erboven.
centrale luchtbehandeling (zwembadoptie)	centrale unit meestal efficiënter dan decentrale units; combineerbaar met bestaande CWP; conventioneel systeem; met voldoende vertakt luchtdistributiesysteem (bijvoorbeeld slangen onder teeltgoten) is een goede verdeling van de behandelde lucht in de kas mogelijk.	veel luchtverplaatsing, grote luchtkanalen nodig, moeilijk implementeerbaar in bestaande kas; omkeerbaar maken CWP brengt kosten met zich mee; energieverbruik voor luchtverplaatsing
decentrale luchtbehandeling met combi-unit	standaard unit te gebruiken; bij omkeerbare CWP ook warmtelevering mogelijk (dan echter geen standaard unit meer); flexibel op te bouwen	decentrale units minder efficiënt en relatief duurder dan centrale unit; zwaarder elektriciteitsnet in kas; koelwaternet nodig (kan evt. LT-net zijn); neemt ruimte en licht weg in kas; energieverbruik voor luchtverplaatsing; goede verdeling in de kas van met name koude is een punt van zorg
decentraal ontvochtigen met zoutoplossing, regenereren met AWP	relatief goedkoop systeem (maar voor koeling is daarnaast nog een koelmachine nodig); schimmel- en bacteriëndodend; schept eenvoudig ruimte voor verdampingskoeling	geen directe koeling; wel combinatie met verdampingskoeling mogelijk; risico zwevende zoutdeeltjes (?); onbeproefd concept; neemt ruimte weg in kas; investering naast de investering in een AWP

Alleen de (centrale) luchtbehandeling vraagt veel en grote luchtkanalen voor de benodigde luchtverplaatsing (orde-grootte 300 à 500 duizend m<sup>3</sup> per uur per hectare kas voor piekkoeling, afhankelijk van kasluchttemperatuur en -vochtigheid en de temperatuur van het koude oppervlak in de luchtbehandelingskasten). Bij een luchtsnelheid van 8 m/s betekent 340 duizend m<sup>3</sup> per uur een kanaaldiameter van 1,9 m om de lucht voor één hectare te transporteren. Naar verwachting is er bij dit systeem met een voldoende vertakt luchtdistributienet een goede verdeling van gekoelde en ontvochtigde lucht (en ook van verwarmde lucht) in de kas mogelijk. Qua capaciteit is het ook hier de vraag, of het niet beter is de installatie uit te leggen op een lagere koelcapaciteit (dan de piek) en incidenteel de ramen te openen.

In de praktijk (Israël) wordt luchtverwarming in kassen wel toegepast middels geperforeerde pijpen op de bodem tussen de planten. In Nederland wordt in 2001 - 2002 bij PPO in Naaldwijk een praktijkexperiment uitgevoerd met een centraal luchtbehandelingssysteem met luchtdistributieslangen onder de teeltgoten in een proefkas van 1400 m<sup>2</sup> met een tomatenteelt. De capaciteit is zodanig gekozen, dat de kas in principe geheel gesloten kan worden 'bedreven'.

Bij luchtverwarming moet rekening worden gehouden met een lagere bladtemperatuur door het ontbreken van straling. De kans op natslaan en schimmelvorming wordt daardoor groter. Indien om die reden een hogere kastemperatuur wordt aangehouden, leidt dit tot extra energiegebruik. Met luchtverwarming zullen de variaties in temperatuur en luchtvochtigheid in de kas (zowel in tijd als in plaats) waarschijnlijk groter zijn. Ook dit verhoogt het risico van natslaan en schimmelvorming.

Een conclusie die getrokken wordt, is dat het installeren van de volledige piekkoelcapaciteit niet zinvol lijkt. Uit de jaarbelastingduurkromme (JBDK) blijkt, dat slechts gedurende de helft van het jaar ontvochtigingscapaciteit nodig is en dat met een ontvochtigingscapaciteit van 200 g/m<sup>2</sup>/hr (53% van de piek) circa 80% van de ontvochtiging kan plaatsvinden.

De "buried pipe" lijkt een eenvoudige methode om bijvoorbeeld in de zomer extra koelcapaciteit te verkrijgen. Het is de vraag of gedurende de nacht voldoende "koelcapaciteit" aanwezig is om de grond onder de kas weer af te koelen. Dit vraagt om uitgebreidere simulaties.

#### 4.4 Technische en economische vergelijking van de systemen

Het technisch en economisch vergelijken van de vier bovengenoemde systemen is complex. De conclusie is al getrokken dat het installeren van de maximaal gevraagde koelcapaciteit en/of ontvochtigingscapaciteit in de praktijk niet zinvol is, maar dat het beter is gedurende de piekvraag naar koeling en/of ontvochtiging natuurlijke ventilatie toe te passen. Dit heeft echter grote invloed op de CO<sub>2</sub>-vraag. De vraag hoe groot de koel/ontvochtigingsinstallatie moet worden uitgelegd is in feite een economische optimalisatie waarbij de meeropbrengst, de investeringskosten en de energiekosten een belangrijke rol spelen. Een dergelijke studie kan pas voldoende nauwkeurig gedaan worden door de beoogde installatie te implementeren in het bestaande KEMA-kasmodel en op uurbasis (of korter) de benodigde energiestromen en CO<sub>2</sub>-stromen te berekenen. Op basis van de resultaten van dit model, de energieprijzen, de investeringskosten, de verwachte opbrengstverhoging door toepassing van een (semi-)gesloten kas en een aantal ander minder belangrijke factoren als onderhoudskosten, kan het economisch rendement berekend worden. Dit rendement moet uiteindelijk geoptimaliseerd worden.

Een dergelijke grondige aanpak valt buiten het bestek van dit projectdeel. Daarom is gekozen voor een andere, meer globale aanpak waarbij er van uitgegaan wordt dat de maximale koel- en ontvochtigingscapaciteit geïnstalleerd worden. Dat betekent dat voor alle vier in paragraaf 4.3 genoemde systemen hetzelfde vraagpatroon voor warmte, CO<sub>2</sub>, elektriciteit (afgezien van elektriciteit voor de installaties), koeling en ontvochtiging wordt gehanteerd en ook dezelfde opbrengstverhoging wordt aangenomen.

#### 4.5 Optie 1: Systeem met centrale warmtepomp en buisontvochtiging/-koeling/-verwarming

Bij dit systeem wordt uitgegaan van een warmteoverdrachtsysteem onder de teelttafels/teeltgoten of deels onder de dakgoot. Uitgaande van het vereiste maximale ontvochtigingsvermogen zijn bij natuurlijke convectie zes koel/verwarmingsbuizen (51 mm) per kap van 3.20 m nodig. Deze buizen dienen voorzien te zijn van vinnen zodat een oppervlaktevergroting ontstaat van een factor 8. Het oppervlak van deze buizen is ook voldoende om te koelen en de kas in de winter volledig met lage temperatuur warmte (55-35 °C) te verwarmen. Het buizensysteem is gescheiden in twee delen zodat eventueel gelijktijdig verwarming en ontvochtiging kan plaatsvinden. Uitgangspunt daarbij is dat de maximale koel/ontvochtigingscapaciteit (zomer) en de maximale verwarmingscapaciteit (winter) nooit gelijktijdig nodig zijn.

Een complicerende factor is dat er gedurende bepaalde delen van het jaar zowel ontvochtiging als verwarming nodig is. Uit de berekende vraagpatronen volgt echter dat deze behoeften vrijwel complementair zijn: overdag ontvochtigen, 's nachts verwarmen met een periode van overlap (waarin zowel (her)verwarming als ontvochtiging nodig is). Met een buffer voor warmteopslag kan deze periode van overlap overbrugd worden. Daarmee worden de warmtevraag en de koudevraag in de tijd ontkoppeld. In paragraaf 4.2 is al aangegeven dat er van wordt uitgegaan dat maximaal 20% van de warmtebehoefte van de kas kan worden gedekt met warmte die ontstaat tijdens de koeling/ontvochtiging van de kas en die tijdelijk in een buffer wordt opgeslagen (deze aanname dient in een meer gedetailleerde studie nader te worden geanalyseerd).

Maximaal is 200 W aan verwarmingsvermogen nodig (piek, alle waarden per m<sup>2</sup> kasoppervlak). Omdat koelen altijd samengaat met ontvochtigen en omdat zowel voor koelen als voor ontvochtigen dezelfde techniek (uitkoelen) wordt gebruikt, kan in deze situatie uitgegaan worden van één koudevraagpatroon. De maximale koudevraag (koelen én ontvochtigen) is 420 W.

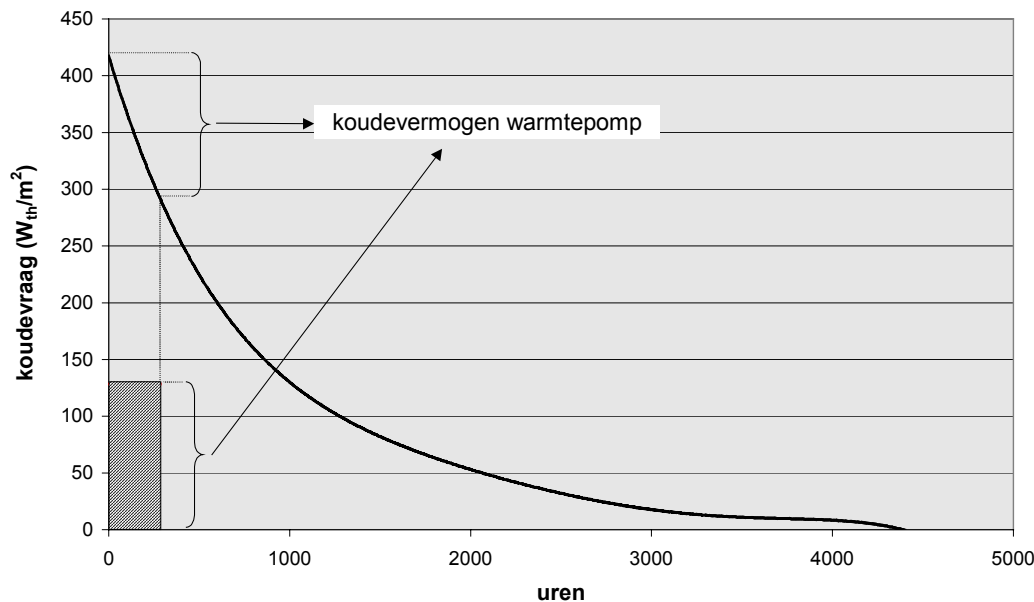
Dit komt voor een warmtepomp met een COP van 3,5 voor verwarming (2,5 voor koeling) overeen met een verwarmingsvermogen van 590 W. Dit is meer dan drie maal het maximaal benodigde thermische vermogen. Voor een absorptiewarmtepomp ligt deze verhouding (door de lage COP) nog schever. Noodzakelijk is daarom om een groot deel van het koel- en ontvochtigingsvermogen rechtstreeks uit de aquifer te halen. Van belang is dan wel dat de aquifer in de winter voldoende gekoeld kan worden, of door de warmtepomp, of door oppervlaktewater of lucht.

De keuze kan gemaakt worden om alle koudevermogen uit de aquifer te halen of om de warmtepomp in te zetten als koeler naast de aquifer (figuur 20). Dit heeft als voordeel dat de aquifer op een minder hoog vermogen hoeft te worden uitgelegd terwijl de investeringen in de warmtepomp al zijn gedaan. Met behulp van een warmtebuffer kan ook de warmte die vrijkomt bij het koelen van de kas met de warmtepomp (overdag), 's nachts gebruikt worden om de kas te verwarmen. Wel is sprake van meer energieverbruik voor de warmtepomp, en het omkeerbaar maken van een warmtepomp is installatietechnisch waarschijnlijk complex.

De keuze tussen een absorptiewarmtepomp en een elektrische warmtepomp is vooral een economische keuze. Bij gebruik van een absorptiewarmtepomp met ketel wordt jaargemiddeld circa 2 maal zoveel CO<sub>2</sub> geproduceerd als nodig is in de kas. Aanname is dat door toepassing van een warmtebuffer 90% van alle CO<sub>2</sub> die nodig is, gelijktijdig met warmteproductie kan worden opgewekt.



In geval van een elektrische warmtepomp is extra CO<sub>2</sub>-dosering nodig. Omdat sprake is van een gesloten kas en dus relatief weinig CO<sub>2</sub>-verlies, wordt in dit geval uitgegaan van zuivere CO<sub>2</sub>-dosering.



Figuur 20 Jaarbelastingduurkromme voor de koudevraag (koeling en ontvochtiging) met daarin de mogelijke bijdrage van de warmtepomp (dit geval elektrisch) bij minimale inzet (dat wil zeggen het minimaal aantal draaiuren dat de WP moet bijsprijngen als het koudevermogen van de aquifer onvoldoende is)

In tabel 9 worden de verschillende varianten voor een systeem van een centrale warmtepomp met aquifer vergeleken. De investeringen zijn uitgedrukt in annuïteiten over 10 jaar tegen 6% rente. Daarnaast is voor onderhoud en bedrijfsvoering 2% van de investeringskosten per jaar aangenomen. Een lage-temperatuur (LT) buissysteem met vinnen zal naar verwachting veel duurder zijn dan een conventioneel buissysteem. Bovendien zullen er voorzieningen moeten komen voor de opvang van condenswater. De investering in een normaal buisrailsysteem (6 buizen per 3.2 m kap op de grond) is circa EUR 7,26 per m<sup>2</sup> (PBG 1999). Grove schatting is dat een LT-buissysteem het dubbele kost. De investeringen van de warmtepomp volgen uit figuur 4.

Verdere aannames:

- elektrische warmtepomp : COP =3,5; één warmtepomp per ha
- absorptiewarmtepomp : PER = 1,6; één warmtepomp per ha
- aquifer : opslagrendement 80%; specifieke investering 182 EUR/kWth
- ketel : rendement 100% (OW); in alle gevallen aanwezig
- kosten aardgas : 0,182 EUR/nm<sup>3</sup> (inclusief vastrecht, aansluitkosten e.d.)
- kosten elektriciteit : 0,068 EUR/kWh (inclusief vastrecht, aansluitkosten e.d.).

Voor de kosten van CO<sub>2</sub> is een eenvoudige (investerings)berekening gedaan waarin de kosten voor een CO<sub>2</sub>-distributienet, een eventuele rookgasventilator inclusief elektriciteitsverbruik, de huur van een CO<sub>2</sub>-opslagtank en dergelijke in zijn verwerkt (maar geen rookgasreiniging als de CO<sub>2</sub> afkomstig is van een WKK). Op basis hiervan zijn voor de gekozen referentieteelt de volgende jaarlijkse CO<sub>2</sub>-kosten bepaald:

- open kas (conventioneel), CO<sub>2</sub> uit rookgas: 1,45 EUR/m<sup>2</sup>
- gesloten kas, CO<sub>2</sub> uit rookgas: 0,82 EUR/m<sup>2</sup>
- gesloten kas, zuivere CO<sub>2</sub> uit tank: 2,68 EUR/m<sup>2</sup>.

Het primair energiegebruik voor elektriciteit is berekend op basis van het rendement van een gemiddelde centrale op dit moment (43%) en 5% netverliezen.

Tabel 9 Globale raming van energiegebruik en kosten voor een gesloten kas (per jaar per m<sup>2</sup> kas) bij toepassing van een centrale warmtepomp met aquifer en LT-(gevinde) buiskoeling/-ontvochtiging/-verwarming. Min. betekent minimale inzet dat wil zeggen dat de WP net voldoende draaiuren voor koude maakt om bij te springen als de aquifer onvoldoende koudecapaciteit heeft. W-balans betekent dat de WP zoveel draaiuren maakt voor koude dat precies voldoende warmte wordt geproduceerd om te compenseren voor ongewenste koeling van de kas bij ontvochtiging

Warmtepomp		Elektrische warmtepomp			Absorptiewarmtepomp		
		niet	min.	W-balans	niet	min.	W-balans
<b>inzet WP voor koelen</b>							
elektriciteit	kWh	166	161	163	16	16	14
aardgas	nm <sup>3</sup>	0	0	0	38	38	39
primaire energie	GJ	1,46	1,42	1,43	1,36	1,34	1,35
kosten LT-buizen <sup>1)</sup>	EUR	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27
kosten elektriciteit <sup>2)</sup>	EUR	11,30	10,98	11,07	1,04	0,91	0,91
kosten aardgas WP	EUR	-	-	-	6,81	6,81	6,85
kosten CO <sub>2</sub>	EUR	2,67	2,67	2,67	0,64	0,64	0,64
invest./onderhoud WP <sup>1)</sup>	EUR	3,36	3,36	3,36	6,40	6,40	6,40
investering aquifer <sup>1)</sup>	EUR	11,89	8,26	8,26	11,89	9,98	9,98
<b>totaal</b>	<b>EUR</b>	<b>31,49</b>	<b>27,54</b>	<b>27,64</b>	<b>29,04</b>	<b>27,00</b>	<b>27,05</b>
koudetekort aquifer	%	42	41	36	70	69	66

<sup>1)</sup> kosten zijn de jaarlijkse kapitaalkosten uitgaande van een annuïteitenlening tegen 6% rente gedurende 10 jaar

<sup>2)</sup> meerkosten elektriciteit voor de warmtepomp en de pomp van de aquifer

Uit tabel 9 volgt dat de varianten elkaar wat betreft primair energiegebruik niet veel ontlopen. Wat kosten betreft is de variant met een warmtepomp die tevens ingezet wordt als koeling gunstiger dan de variant waarin de warmtepomp niet wordt ingezet voor koeling. Dit is vooral het gevolg van de relatief hoge investeringskosten per kW<sub>th</sub> van de aquifer. De absorptiewarmtepomp is over de gehele linie iets voordeliger dan de elektrische compressiewarmtepomp, voornamelijk door de lagere aardgaskosten in vergelijking tot de elektriciteitskosten. Voor de variant met de AWP is het koudetekort in de aquifer wel het grootst. Dit betekent dat de aquifer in de winter gekoeld moet worden via bijvoorbeeld een regenwaterbasin (of levering van warmte aan een collega-tuinder). Dit is overigens voor alle varianten nodig. Opvallend is dat het nauwelijks uitmaakt, of de warmtepomp minimaal wordt ingezet, of zodanig dat precies genoeg warmte wordt geproduceerd om te compenseren voor ongewenste koeling (W-balans).

Dit komt omdat de warmtepomp ook wordt ingezet voor warmtelevering. Wordt de warmtepomp minder ingezet voor koude, dan wordt er minder warmte geproduceerd tijdens koudeproductie en moet de warmtepomp dus meer ingezet worden voor alleen warmteproductie. Dit heft elkaar op (het verschil wordt veroorzaakt door het warmteverlies in de buffer).

De variant waarin de elektrische warmtepomp maximaal wordt ingezet vraagt waarschijnlijk om een grotere warmtebuffer dan normaal. Kosten voor het omkeerbaar maken van een warmtepomp zijn niet meegenomen in de investeringskosten.

Om de in tabel 9 genoemde systemen te kunnen inschatten op economische haalbaarheid is in tabel 10 een overzicht gemaakt van de te verwachten (meer- en minder)kosten van een open kas ten opzichte van een gesloten kas. Hierbij is aangenomen dat de "open kas" zijn warmte krijgt op basis van een ketel met een rendement van 100%(op onderwaarde). Bij een (constante) gasprijs van 0,182 EUR/nm<sup>3</sup> komt dit neer op 5,76 EUR/GJ. Bij een warmtevraag van 1,65 GJ/m<sup>2</sup>.jaar is dit 9,44 EUR/m<sup>2</sup>. Tevens worden de investeringskosten van een conventioneel buis-railsysteem bespaard (7,26 EUR/m<sup>2</sup>). Uiteindelijk moet de gesloten kas ook een meeropbrengst opleveren. Uitgaande van een normale jaaropbrengst (open kas) van 50 kg tomaten per m<sup>2</sup>, een productietoename van 20% bij een gesloten kas en een jaargemiddelde tomatenprijs van 0,68 EUR/kg zal de gesloten kas 6,81 EUR/m<sup>2</sup> aan productieopbrengst meer hebben.

Tabel 10 Minderkosten en meeropbrengst door productieverhoging (per jaar per m<sup>2</sup> kas) voor een gesloten kas

<b>Minderkosten/meeropbrengsten gesloten kas per m<sup>2</sup></b>		
minderkosten warmte open kas	EUR	9,44
minderkosten CO <sub>2</sub> open kas	EUR	1,45
minderkosten buis-railsysteem open kas <sup>2)</sup>	EUR	1,13
meerproductie gesloten kas	EUR	6,81
<b>totaal</b>	<b>EUR</b>	<b>18,83</b>

<sup>2)</sup> uitgaande van een annuïteitenlening tegen 6% rente gedurende 10 jaar

Uit tabel 10 blijkt dat (op basis van een globale berekening op jaargemiddelden) geen van de opties een batig saldo oplevert. Dit was ook te verwachten gezien het feit dat de installatie is gedimensioneerd op nagenoeg de volledige koude en verwarmingsvraag. Duidelijk is wel dat het zinvol is de WP ook als koelmachine in te zetten. Dit scheelt in investeringskosten en pompenergiekosten van de aquifer. Hierbij is echter geen rekening gehouden met meerinvesteringen die nodig zijn om de warmtepomp omkeerbaar te maken.

Het vergelijkbare primaire energieverbruik voor een open kas bedraagt circa 2,0 GJ/m<sup>2</sup>. Dit betreft het energiegebruik voor verwarming en voor CO<sub>2</sub>-productie (voor CO<sub>2</sub>-productie is additioneel aardgas nodig en elektriciteit voor de CO<sub>2</sub>-ventilatoren). Wat betreft primair energiegebruik leveren de hier beschouwde opties een besparing in primaire energie op van circa 0,6 MJ/m<sup>2</sup> (30%).

#### 4.6 **Optie 2: systeem met centrale luchtbehandeling**

De zogenaamde "zwembadoptie" (luchtbehandeling in één of meerdere centrale units) komt redelijk overeen met het reeds behandelde systeem met een centrale warmtepomp. De grootste verschillen zijn dat nu geen LT-buizennet meer nodig is maar een systeem van luchtkanalen. Uitgangspunt is één of meerdere units die lucht afzuigen op één punt en inblazen via een systeem van luchtkanalen (figuur 15). Belangrijke items zijn de dimensionering van de luchtkanalen, de kosten en het drukverlies (in verband met de energiekosten voor de ventilatoren). Ten opzichte van de vorige optie is er overigens nog een klein verschil. De vorige variant is een 'watersysteem'. Deze variant beschrijft een 'luchtsysteem'. Dit betekent andere (grotere) warmtewisselaars en een extra ventilator voor de luchtverplaatsing.

De meer- of minderinvestering in een ventilator en een grotere warmtewisselaar worden vooralsnog klein geacht ten opzichte van de totale investering in de warmtepompunit en daarom in deze beschouwing verwaarloosd.

De dimensionering van het aantal warmtepompunits per hectare hangt af van de grootte van de luchtkanalen voor transport en de kostenvoordelen van een grotere unit ten opzichte van de extra kosten voor luchttransportleidingen. Bij een dimensionering van één unit per hectare worden de luchttransportkanalen onaanvaardbaar groot (meer dan 2 m maximale diameter), bij een keuze voor 2 units per hectare worden de afmetingen van de luchttransportkanalen hanteerbaar.

Dit betekent een unitgrootte van 900 kWth (sensibele koude / warmte). Uit figuur 4 volgt dat vanaf die grootte relatief weinig kostenvoordelen te behalen zijn door schaalvergroting. Twee units per ha wordt daarom aangenomen in de verdere kostenberekeningen.

De gebruikte geperforeerde luchtkanalen hebben een relatief hoge voordruk nodig (250 pa, Interland, 2000). Verder zijn er nog de drukverliezen in het transportkanaal en in de warmte-wisselaars (voor koeling/ontvochtiging) en voor verwarming. In totaal wordt (bij vollast) een opvoerhoogte van 900 Pa aangehouden. Bij deellast is de situatie gunstiger. Als het luchtdebiet door het systeem halveert, wordt de drukval ongeveer een kwart van de vollast waarde. Het effect op het benodigde elektriciteitsverbruik is nog gunstiger (in het ideale geval is het benodigde vermogen dan slechts één achtste van het vollastverbruik). Naar verwachting kunnen de luchtbehandelingskasten voor een groot deel van het jaar op deellast worden bedreven. Rekening houdend met een benodigde minimum voordruk voor de geperforeerde distributiekkanalen, mag het toerental van de ventilator niet te laag worden. We gaan er vanuit dat het netto regelbereik van de ventilatoren ca 40-100% is. Als basis voor de berekening van het elektriciteitsverbruik van de ventilatoren van de units nemen we een (jaar)gemiddelde opvoerhoogte van de ventilatoren van de units aan van 400 Pa.

Omdat al sprake is van een luchtverdeelsysteem, kan een apart systeem voor het verdelen van CO<sub>2</sub> achterwege blijven. Dit betekent lagere kosten voor CO<sub>2</sub>. De luchttransportkanalen dienen overigens geïsoleerd te worden om condensatie tegen het kanaaloppervlak tegen te gaan.

In tabel 11 is weergegeven wat de geschatte kosten zijn voor deze "zwembadoptie". In tabel 11 is er van uitgegaan dat de warmtepomp altijd wordt ingezet voor koeling.

In tabel 9 bleek al dat het niet inzetten van de warmtepomp voor koeling extra investeringen met zich meebrengt (een aquifer met meer thermisch vermogen) die hoger liggen dan de kosten van extra energieverbruik van de warmtepomp. De optie zonder inzet van de warmtepomp voor koeling wordt daarom niet verder beschouwd.

Tabel 11 Globale raming van energiegebruik en kosten voor een gesloten kas (per jaar per m<sup>2</sup> kas) bij toepassing van een centrale warmtepomp met luchtbehandeling ("zwembadoptie") en een aquifer. Min. betekent minimale inzet dat wil zeggen dat de WP net voldoende draaiuren voor koude maakt om bij te springen als de aquifer onvoldoende koudecapaciteit heeft. W-balans betekent dat de WP zoveel draaiuren maakt voor koude dat precies voldoende warmte wordt geproduceerd om te compenseren voor ongewenste koeling van de kas bij ontvochtiging

Warmtepomp		Elektrische warmtepomp		Absorptiewarmtepomp	
inzet WP voor koelen		min.	W-balans	min.	W-balans
elektriciteit	kWh	177	178	29	29
aardgas	Nm <sup>3</sup>	0	0	38	39
primaire energie	GJ	1,56	1,57	1,47	1,48
kosten luchtkanalen	EUR	2,86	2,86	2,86	2,86
kosten elektriciteit <sup>1)</sup>	EUR	12,03	12,12	1,95	1,95
kosten aardgas WP	EUR	-	-	6,81	6,85
kosten CO <sub>2</sub>	EUR	2,63	2,63	0,18	0,18
invest. / onderhoud WP	EUR	3,95	3,95	6,99	6,99
investering aquifer	EUR	8,26	8,26	9,98	9,98
<b>totaal</b>	<b>EUR</b>	<b>29,72</b>	<b>29,81</b>	<b>28,77</b>	<b>28,82</b>
koudetekort aquifer	%	41	36	69	66

1) voor de warmtepomp, de pomp van de aquifer en de ventilator van de luchtbehandeling

Uit tabel 11 volgt dat de optie met een elektrische warmtepomp en de optie met een absorptiewarmtepomp elkaar niet significant ontlopen. De opties zijn duurder dan die van de optie met een centrale warmtepomp. De belangrijkste oorzaken zijn:

- luchtkanalen zijn duurder dan een lage-temperatuur buisnet
- de ventilatoren voor de lucht verbruiken een significante hoeveelheid elektriciteit, dit omdat geperforeerde kanalen een hoge voordruk vragen voor een goede werking (het elektriciteitsverbruik kan worden beperkt door de – frequentieregelde - ventilatoren zoveel mogelijk in deellast te bedienen)
- de investering in de warmtepompunits ligt iets hoger omdat het vermogen per unit lager ligt.

Evenals in tabel 9 is in tabel 11 het verschil tussen de varianten met een verschillende inzet van de warmtepomp voor koude qua kosten verwaarloosbaar klein. Het koudetekort van de aquifer is voor de W-balans variant het kleinst.

Wat betreft de reductie van het primair energiegebruik scoort deze optie wat minder dan optie 1 (circa 22 à 26 %), wederom door het hoge energiegebruik van de ventilatoren.

#### 4.7 **Optie 3: Decentrale koeling en ontvochtiging**

Deze optie maakt gebruik van decentrale koeling en ontvochtiging gecombineerd met verwarming (zie figuur 16). De decentrale units (figuur 17) worden zodanig klein gekozen dat geen luchtkanalen nodig zijn. Op basis van in de handel verkrijgbare droogunits wordt een unit grootte van 36 kW<sub>th</sub> warmte aangehouden. Dit houdt in dat per ha 50 units nodig zijn. Doordat schaalvoordelen ontbreken zullen deze units een relatief hoge investering vergen. Daar staat tegenover dat geen lucht transport- en distributiekkanalen nodig zijn. Wel is een (geïsoleerd) leidingsysteem nodig om de units op de aquifer aan te sluiten. Hiervoor wordt een investering van EUR 2,27 per m<sup>2</sup> kas voor aangenomen.

Uitgangspunt is verder dat met dergelijk kleine units alleen een elektrische compressie-warmtepomp een zinvolle keuze is. Bij deze optie is wel een apart leidingsysteem nodig om CO<sub>2</sub> te distribueren. De opvoerhoogte van de ventilatoren kan minder zijn (geen kanalen). De opvoerhoogte wordt geschat op 300 Pa. Tabel 12 geeft de resultaten van de berekeningen.



Tabel 12 Globale raming van energiegebruik en kosten voor een gesloten kas (per jaar per m<sup>2</sup> kas) bij toepassing van decentrale warmtepompunits. Min. betekent minimale inzet dat wil zeggen dat de WP net voldoende draaiuren voor koude maakt om bij te springen als de aquifer onvoldoende koudecapaciteit heeft. W-balans betekent dat de WP zoveel draaiuren maakt voor koude dat precies voldoende warmte wordt geproduceerd om te compenseren voor ongewenste koeling van de kas bij ontvochtiging

Warmtepomp		Elektrische warmtepomp	
		min.	W-balans
inzet WP voor koelen			
elektriciteit	kWh	173	4
primaire energie	GJ	1,53	1,54
kosten leiding aquifer	EUR	0,32	0,32
kosten elektriciteit <sup>1)</sup>	EUR	11,80	11,89
kosten CO <sub>2</sub>	EUR	2,68	2,68
invest. / onderhoud WP	EUR	8,67	8,67
investering aquifer	EUR	8,26	8,26
<b>totaal</b>	<b>EUR</b>	<b>31,72</b>	<b>31,81</b>
koudetekort aquifer	%	41	36

1) voor de warmtepomp, de pomp van de aquifer en de ventilator van de unit

Uit tabel 12 blijkt dat deze optie de duurste is van alle tot nu toe gepresenteerde opties. Dit is voornamelijk een gevolg van het feit dat door het relatief lage vermogen van de unit de kosten per kWh hoog liggen. Het verschil in kosten met de "zwembadoptie" is echter niet groot. Het energieverbruik is wel iets lager dan de (EWP) "zwembadoptie" omdat het elektriciteitsverbruik van de ventilatoren lager is (minder opvoerhoogte nodig) terwijl is aangenomen dat de COP van de warmtepomp gelijk is aan die van een grote unit.

#### 4.8 Optie 4: vochtabsorptie met een zoutoplossing

Deze optie verschilt wezenlijk van de voorgaande opties. Het grote voordeel van ontvochtigen met een zoutoplossing is, dat niet tegelijkertijd (ongewenste) koeling optreedt. Uit tabel 3 blijkt dat de kosten, afhankelijk van de grootte van de unit, kan variëren tussen de EUR 136,- en de EUR 817,- per kg/uur ontvochtigingscapaciteit.

Van belang is hoe de ontvochtigingsinstallatie gecombineerd wordt met de installatie voor koelen en verwarmen. In principe zijn er een warmtepomp en een aquifer aanwezig voor verwarming in de winter. Uit voorgaande beschouwing wordt geconcludeerd dat een centrale warmtepomp met een lage-temperatuurnet de goedkoopste optie is. Bij ontvochtiging met een zoutoplossing is echter luchttransport nodig. Het ligt voor de hand dit luchttransport te combineren met verwarming. Dat wil zeggen:

- een zwembadvariant waarbij de lucht centraal wordt geconditioneerd. Dit vraagt om een relatief duur systeem van luchtkanalen maar met als voordeel een centrale unit die door schaalgrootte minder investeringen vraagt
- een variant met decentrale ontvochtigingsunits gecombineerd met een warmtewisselaar voor naverwarming of -koeling van de ontvochtigde lucht. Er is dan alleen transport en distributie van koel- en verwarmingswater nodig en van de zoutoplossing (voor centrale ontvochtiging).

Gekozen wordt voor de tweede variant. Hierin komt het potentieel van deze optie beter tot uiting. In decentrale units wordt lucht ontvochtigd en de vrijkomende latente warmte wordt weggekoeld met behulp van water uit de aquifer waarbij de lucht op dezelfde temperatuur blijft. In een nakoeler kan de lucht in temperatuur worden verlaagd. Voordeel is dat, door de lage luchtvochtigheid, geen condensatie optreedt en dus alle koudevermogen voor koeling kan worden gebruikt. De aquifer moet nog steeds op maximaal koudevermogen (koeling en ontvochtiging) worden uitgelegd.

In een centrale unit wordt de zoutoplossing geregenereerd. Dit gebeurt door de oplossing te verwarmen tot een temperatuur van minimaal 70 °C en in lucht te versproeien. De lucht warmt op en neemt vocht uit de zoutoplossing op. Hiervoor is dus de latente warmte van het verdampte water nodig plus de (sensibele) warmte die nodig is om de lucht op te warmen. Deze sensibele warmte kan teruggewonnen worden door een warmtewisselaar en gebruikt worden om de ingaande lucht te verwarmen. De warmte voor deze regeneratie kan geleverd worden door een WKK of een ketel. In beide gevallen is sprake van CO<sub>2</sub>-productie die gebruikt kan worden voor bemesting van de kas. Er wordt van uitgegaan dat de benodigde warmte voor het uitstoken van vocht door de reeds aanwezige ketel geleverd wordt.

Op basis van bovenstaande worden de volgende uitgangpunten gehanteerd:

- de investering in de ontvochtigingsinstallatie (decentrale ontvochtiging met koeling/opwarming en centrale regeneratie van de zoutoplossing) bedraagt EUR 272,- per kg/uur ontvochtigingsvermogen (inclusief een warmtewisselaar bij de decentrale ontvochtigingsunits voor naverwarming/koeling)
- van de sensibele warmte die voor de regeneratie van de zoutoplossing wordt gebruikt wordt 98% weer teruggewonnen voor opwarming van de ingaande regeneratielucht (op basis van Egberts, 2000). Alle latente warmte gaat verloren
- de zoutoplossing wordt geregenereerd met behulp van warmte uit een ketel. Deze ketel produceert op jaarbasis meer dan voldoende CO<sub>2</sub> om de kas te voorzien
- zowel de regeneratieunit als de ontvochtigingsunits maken gebruik van ventilatoren. Het energiegebruik is bepaald op basis van een gemiddelde luchtflow van circa 10 Nm<sup>3</sup>/uur en een opvoerhoogte van 400 Pa.

Op basis van deze gegevens zijn voor een viertal varianten de kosten bepaald voor deze optie. Deze zijn in tabel 13 weergegeven.

Tabel 13 Globale raming van kosten voor een gesloten kas (per jaar per m<sup>2</sup> kas) bij toepassing van een centrale warmtepomp met decentrale absorptie-ontvochtigingsunits en een aquifer. Min. betekent minimale inzet dat wil zeggen dat de WP net voldoende draaiuren voor koude maakt om bij te springen als de aquifer onvoldoende koudecapaciteit heeft. W-balans betekent dat de WP zoveel draaiuren maakt voor koude dat net geen warmtevernietiging optreedt

Warmtepomp		Elektrische warmtepomp		Absorptiewarmtepomp	
inzet WP voor koelen		min.	W-balans	min.	W-balans
elektriciteit	KWh	152	152	41	41
aardgas	nm <sup>3</sup>	37	37	65	65
primaire energie	GJ	2,51	2,51	2,43	2,43
kosten leidingen	EUR	0,73	0,73	0,73	0,73
kosten elektriciteit <sup>1)</sup>	EUR	10,35	10,35	2,77	2,77
kosten aardgas WP	EUR	-	-	5,13	5,17
Kosten aardgas tbv regeneratie	EUR	6,53	6,53	6,53	6,53
kosten CO <sub>2</sub>	EUR	0.64	0.64	0.64	0.64
invest./onderhoud WP	EUR	3,36	3,36	6,40	6,40
invest./onderhoud aquifer	EUR	8,21	8,21	9,94	9,94
invest./onderhoud ontvochtigingsinstallatie	EUR	14,84	14,84	14,84	14,84
<b>totaal</b>	<b>EUR</b>	<b>44,65</b>	<b>44,65</b>	<b>46,97</b>	<b>47,01</b>
koudetekort aquifer	%	40	38	69	68

1) voor de warmtepomp, de pomp van de aquifer en de ventilatoren

Uit tabel 13 blijkt dat alle varianten hogere kosten met zich meebrengen dan enige van de voorgaande opties. Dit hangt samen met de hoge kosten voor de ontvochtigingsunit en de aardgaskosten voor regeneratie. Wel blijkt dat, in vergelijking met de eerste optie, de kosten voor elektriciteit of aardgas voor de warmtepomp lager zijn. Een efficiëntere regeneratie van de zoutoplossing (bijvoorbeeld met behulp van mechanische damprecompressie) zal een lager energieverbruik op leveren voor regeneratie maar ook hogere investeringskosten. Door het energieverbruik voor regeneratie, is ook het primaire energieverbruik voor deze optie hoger dan van alle andere opties en van de normaal geventileerde kas.

## 5 SLOTBESCHOUWING EN CONCLUSIES

### 5.1 Slotbeschouwing

Het realiseren van een gesloten of grotendeels gesloten kas impliceert het toepassen van installaties voor het koelen en ontvochtigen van kaslucht. Een verkenning geeft aan dat er een aantal mogelijkheden zijn voor het koelen en ontvochtigen. Voor koeling zijn er drie mogelijkheden:

- passieve koeling (warmtewisselaar met buitenlucht, "buried pipe")
- indirecte verdampingskoeling
- actieve koeling middels een warmtepomp en/of een aquifer.

Voor ontvochtiging zijn twee mogelijkheden te noemen:

- uitkoelen (via één van bovengenoemde methoden). Men spreekt in dit geval ook wel van condensatieontvochtiging
- absorberen (via een absorptiewiel of absorptiesysteem op basis van een zoutoplossing).

Ook is een combinatie van koelen en ontvochtigen mogelijk door eerst lucht te ontvochtigen tot een niveau lager dan gewenst en daarna te koelen door verdamping van water (DEC: desiccative evaporative cooling).

Welke van deze opties economisch de meest interessante is hangt af van een groot aantal facetten:

1. toelaatbare kascondities
2. keuze van het koel/ontvochtigingssysteem
3. dimensionering van het systeem
4. integratie van de productie van warmte, CO<sub>2</sub>, koeling en ontvochtiging.

Deze vier punten worden hierna besproken.

Als eerste is van groot belang *welke kascondities toelaatbaar* zijn. In deze studie is uitgegaan van vaste (grens)waarden voor de kascondities (onder andere maximaal 25 °C en 85% RV). Op basis daarvan is de behoefte aan verwarming, actieve (sensibele) koeling, ontvochtiging en CO<sub>2</sub> bepaald voor een referentieteelt in een gesloten kas (tomaat). De grootste verschillen met een open kas zijn:

- een veel lagere behoefte aan CO<sub>2</sub>. Doordat de kas gesloten is (nauwelijks koeling/ontvochtiging door ventilatie) ontwijkt veel minder CO<sub>2</sub>

- door de gereduceerde ventilatie heeft een gesloten kas in principe een gereduceerde warmtebehoefte. Indien echter ontvochtiging plaats vindt middels uitkoelen, is het – vanwege de in het algemeen grotere ontvochtigingsvraag dan koelvraag – vaak nodig de ontvochtigde lucht te herverwarmen. Hierdoor kan de totale jaarverwarmingsvraag groter worden dan bij de normaal geventileerde kas. De herverwarmingsvraag kan echter worden gedekt uit de bij ontvochtiging/koeling vrijkomende (latente plus sensibele) warmte, mits die middels een koelmachine/warmtepomp op een voldoende hoog temperatuurniveau vrijgemaakt wordt. (De koelmachine/warmtepomp is derhalve een essentieel onderdeel van de ‘uitkoelontvochtigingsvariant’.)
- behoefte aan actieve ontvochtiging en aan koeling. Uitgedrukt in (sensibel plus latent) vermogen is de ontvochtigingsbehoefte veel hoger dan de koelbehoefte.

Duidelijk is dat de toelaatbare kascondities invloed hebben op de vraagpatronen. Door incidenteel een hogere temperatuur en/of luchtvochtigheid toe te laten kan de installatie voor koeling en ontvochtiging kleiner worden gedimensioneerd wat investeringskosten scheelt. De keerzijde hiervan is bijvoorbeeld een mindere opbrengst door niet-optimale kascondities of hogere kosten voor meer CO<sub>2</sub>-productie. Er zal sprake zijn van een economisch optimale grootte.

Als tweede facet is de *keuze van het koel/ontvochtigingssysteem* van belang. Uitgangspunt is dat al een warmtepomp met aquifer aanwezig moet zijn voor verwarming in de winter. Omdat de investering in deze installatie al ‘gedaan’ is, ligt het voor de hand ook te koelen/ontvochtigen met de warmtepomp en de aquifer (hoewel het omkeerbaar maken van een warmtepomp additioneel investeringen met zich meebrengt). De keuzes die hier gemaakt moeten worden zijn systeemkeuzes: hoe wordt de koude in de kas gebracht (luchtverwarming, condensorbuisen) en hoe combineert dit met de verwarmingsfunctie. Een systeembenadering is hierbij onmisbaar. Overigens blijkt dat, zelfs als de warmtepomp op het volledige verwarmingsvermogen van de kas wordt uitgelegd, het koudevermogen van die warmtepomp veel te klein is om geheel in de totale koudebehoefte van de kas (voor koelen en ontvochtigen) te voorzien. De aquifer zal een groot deel van de koudelevering voor haar rekening moeten nemen. Dit heeft als gevolg dat er een koudetekort ontstaat in de aquifer. Er wordt in de winter te weinig koude door de warmtepomp in de aquifer gepompt (of anders gezegd: te weinig warmte aan de aquifer onttrokken) om de kas in de zomer te kunnen koelen/ontvochtigen. Additionele koeling van de aquifer in de winter is altijd nodig, waarbij ook gedacht kan worden aan LT-warmtelevering aan derden (bijvoorbeeld het leveren middels een warmtepomp van een deel van de warmtevraag van een belendend glastuinbouwbedrijf).

Als derde aandachtspunt is er de *dimensionering* van het systeem. In dit rapport is er van uitgegaan dat het warmtepompsysteem wordt uitgelegd op de piekvraag voor verwarming. Ook de koel/ontvochtigingsvraag wordt volledig gedekt door de installatie. Deze keuze is gemaakt om de diverse opties onderling te kunnen vergelijken. Bij een andere dimensionering van de installatie zal het vraagpatroon per optie veranderen. Die verandering in vraagpatroon is alleen met een volledig kassimulatiemodel (zoals door KEMA gebruikt om het vraagpatroon van een gesloten kas te bepalen) te bepalen. Dit valt buiten het bestek van deze studie maar is wel aan te bevelen voor een volgende fase.

Punt vier (*integratie*) hangt hiermee samen: productie van warmte, CO<sub>2</sub>, koeling en ontvochtiging vindt niet onafhankelijk plaats. Afhankelijk van de installatie worden bijvoorbeeld CO<sub>2</sub> en warmte of koeling en ontvochtiging gelijktijdig geproduceerd. Dit houdt in dat, afhankelijk van de installatie, gebruik gemaakt kan worden van de CO<sub>2</sub> die vrijkomt bij verwarming, of dat het (eventuele) teveel aan koeling dat optreedt als ontvochtigd wordt, gecompenseerd moet worden. Dit vraagt een goed integratieconcept, wat met name ook tot uiting dient te komen in de regeling- en besturing van de diverse deelsystemen (“inzetstrategie”).

De keuze om de WP-installatie te dimensioneren op de volledige warmtevraag is gedaan om de verschillende opties onderling te kunnen vergelijken. Het is dan ook geen verrassing dat de meerkosten van een dergelijke installatie voor ieder beschouwde optie niet opwegen tegen de minderkosten van minder CO<sub>2</sub>-vraag en een hogere opbrengst. De optie met een lage-temperatuur buizensysteem voor verwarming en koeling lijkt vooralsnog de minste kosten met zich mee te brengen, maar de deels gelijktijdige ontvochtiging en (her)verwarming vraagt wellicht nog om een grotere dimensionering dan in deze deelstudie is aangenomen. Ook is nog onduidelijk of de afwisselend koude en warme buizen, die in dat geval nodig zijn, niet tot onacceptabele lokale klimaatverschillen in de kas leiden. Opties met luchtverwarming (centraal of decentraal) lijken wat meer kosten met zich mee te brengen onder andere vanwege de elektriciteitskosten voor de ventilatoren. De bij ontvochtiging vaak noodzakelijke gelijktijdige herverwarming is bij deze variant eenvoudiger uit te voeren (door toevoeging van een herverwarmingswarmtewisselaar in de luchtbehandelingskast, die waterzijdig op de condensorzijde van de warmtepomp wordt aangesloten). De herverwarmde lucht wordt vervolgens via het distributiesysteem overal in de kas op de juiste temperatuur weer ingeblazen. Naar verwachting zullen er minder lokale klimaatverschillen optreden dan bij de alternerend warme en koude buizen van optie 1. Verder is bij dit systeem is (in tegenstelling tot opties 1 en 3) geen separaat CO<sub>2</sub>-doseersysteem nodig.

Op het eerste gezicht lijkt ook het ontvochtigen met een zoutoplossing (optie 4) een aantrekkelijke optie. In tegenstelling tot het uitkoelen van vocht treedt geen (vaak ongewenste) koeling op. Bovendien is de zoutoplossing intrinsiek schimmel- en bacteriëndodend. Dit is een belangrijk voordeel in een kas. Echter, deze optie vraagt een aanzienlijke extra investering in het ontvochtigingssysteem, terwijl de aquifer niet kleiner gedimensioneerd kan worden (tenzij koelwater van circa 25 °C voorhanden is). Er staat dus geen minderinvestering tegenover de meerinvestering voor het ontvochtigingssysteem. Wel is sprake van minder energieverbruik (door de warmtepomp) omdat geen ongewenste koeling tijdens ontvochtiging optreedt, waardoor herverwarming overbodig wordt. Echter, het uitstoken van vocht uit de zoutoplossing vraagt ook een significante hoeveelheid energie. Door het toepassen van bijvoorbeeld mechanische damprecompressie kan dit energieverbruik verminderd worden, maar deze variant valt buiten het bestek van deze studie.

De totaalkosten van de absorptieontvochtigingsvariant zijn in vergelijking met de condensatie-ontvochtigingsvarianten ca 30 à 40 % hoger. Gecombineerd met het hogere primaire energieverbruik kan geconcludeerd worden, dat deze optie vooralsnog niet in aanmerking komt.

Voor een gedegen economische beschouwing zullen kansrijke opties, geoptimaliseerd op grootte en inzetstrategie, in een kasmodel op uurbasis moeten worden doorberekend. In lijn met de huidige praktijk zal de warmtepomp kleiner gedimensioneerd dienen te worden om voldoende vollastdraaiuren te maken (maar dat betekent wel dat er een groter koudetekort ontstaat). Een keuze zal gemaakt moeten worden in hoeverre een momentane overschrijding van kascondities toelaatbaar is (welke invloed dit heeft op de productie) en in hoeverre de kas semi-gesloten wordt gehouden (dat wil zeggen pieken in de koel- of ontvochtigingsvraag opvangen door de kas momentaan te openen).

Op basis van de huidige berekeningen lijkt de optie met een centrale warmtepomp en een lage-temperatuur buizenet wat betreft kosten en wat betreft energieverbruik de beste optie. Het is echter nog de vraag of de in een aantal situaties benodigde gelijktijdige koeling en verwarming bij de gekozen dimensionering kan worden gerealiseerd (en of dus niet een hogere investering voor het buizenet vereist is) en verder of er in dat geval geen lokale klimaatverschillen zullen ontstaan door afwisselend koude en warme buizen. Bij optie 2 - centrale warmtepomp met centrale luchtbehandeling - is de herverwarming relatief eenvoudig uit te voeren, en worden er kleinere lokale klimaatverschillen in de kas verwacht. Wel lijkt het primaire energieverbruik van deze variant op voorhand iets hoger.



Door optimalisatie van de dimensionering van de systemen kunnen de investeringskosten nog dalen zonder dat de energieprestaties sterk verminderen. Die dimensionering kan ook gunstig worden beïnvloed door het toevoegen van tussenbuffers voor koude- en warmteopslag, waardoor het maximale vermogen van de aquifer kan worden beperkt. Tegenover de meerinvestering van de tussenbuffers, staat een lagere investering in het seizoensopslag-systeem.

Voor de haalbaarheid is verder van belang in hoeverre de geschatte productievermeerdering bij een gesloten kas gerealiseerd wordt. Dit is een parameter met grote invloed op de economische haalbaarheid van de diverse opties.

Binnen het bestek van deze studie is het niet mogelijk alle uitkoelontvochtigingsvarianten nader uit te werken. Op basis van de in dit rapport beschreven globale verkenning (en in overeenstemming met de in de projectbeschrijving aangegeven focus) wordt in het vervolg van deze studie optie 2 (centrale warmtepomp met centrale luchtbehandeling) nader uitgewerkt. De nadere uitwerking houdt, dat voor dit systeem de energiehuishouding over een (referentie)jaar met behulp van simulaties nader zal worden geanalyseerd. Ook worden de investeringen nader afgeschat en de rentabiliteit berekend. Dit werk zal in een apart deelrapport worden beschreven.

## 5.2 Conclusies

### *Ontvochtigingstechnieken*

1. Absorptiewielen voor ontvochtiging van kaslucht zijn te duur.
2. Zoutoplossingen zijn interessant voor luchtontvochtiging, omdat die kan plaatsvinden bij de heersende luchttemperatuur en dus niet gepaard hoeft te gaan met afkoeling van de lucht. Er is wel koelwater nodig – maar van een relatief hoge temperatuur, ca 20 à 25 °C - om de latente warmte, die bij het absorberen van het vocht in het zout optreedt, af te voeren. Daarvoor is in het algemeen geen koelmachine of aquifer nodig. Verder is de bacteriëndodende werking een voordeel. Bij gesloten kassen is echter vaak ook koeling nodig. Dit vraagt dan additioneel toch een koelinstallatie, waardoor de totaalinvestering hoger wordt dan bij een gecombineerd koel-/condensatie-ontvochtigingssysteem.
3. Condensatie-ontvochtiging kan goed worden gecombineerd met koeling. Echter, omdat koeling en condensatie gekoppeld zijn, kan het bij een relatief grote ontvochtigingsvraag en geringe koelvraag nodig zijn de ontvochtigde lucht te herverwarmen.

### *Koeling*

4. Voor de benodigde koeling in de zomer is een combinatie van koude afkomstig uit de koude bron van een aquifergebaseerd koude/warmte-seizoensopslagsysteem en van een koelmachine (KM) goed geschikt. De warmte die aan de condensor van de koelmachine vrijkomt, kan (geheel of gedeeltelijk) òf worden gebruikt voor eventuele herverwarming van de ontvochtigde kaslucht, òf worden opgeslagen in de warme bron van de aquifer.

### *Verwarming*

5. De koelmachine heeft in de winter de functie van warmtepomp (WP). Aan de koude zijde van de warmtepomp, wordt warmte onttrokken aan water uit de warme bron van de aquifer. Dit gekoelde water wordt weer geïnjecteerd in de koude bron van de aquifer ('koude laden'). De warmte die aan de warme zijde van de warmtepomp vrijkomt, wordt gebruikt voor de kasverwarming.
6. Wat betreft het type warmtepomp/koelmachine kunnen zowel - bij voorkeur elektrisch aangedreven - compressiewarmtepompen (EWP's) als absorptiewarmtepompen (AWP's) worden gebruikt. Omdat absorptiewarmtepompen per eenheid afgegeven warmte veel minder bronwarmte gebruiken (en dus minder koude produceren), zal er bij keuze van een AWP een groter koude tekort optreden dan bij de keuze van een EWP (circa 65% meer). Om die reden is een EWP beter geschikt voor een stand-alone energievoorziening van een gesloten kas.

### *Systeemconcepten*

Een overall energievoorzieningsconcept voor een gesloten kas bestaat uit een kaslucht-koel-, -ontvochtigings- en -verwarmingssysteem (KOV), een koude- en warmteproductiemogelijkheid, en een koude en warmte-opslagsysteem. Als KOV-systeem is uit energetisch en investeringsoogpunt een buizensysteem waarvan het warmtewisselend oppervlak met vinnen is vergroot interessant. Er dient echter wel rekening te worden gehouden met lokale klimaatverschillen indien gelijktijdige koeling/ontvochtiging en (her)verwarming dient plaats te vinden.

7. Bij een KOV-systeem bestaande uit luchtbehandelingskasten (LBK's) is (her)verwarming relatief eenvoudig uit te voeren met een extra verwarmingsbatterij in de LBK. Bij een centrale LBK (of desgewenst enkele kleinere 'centrale' LBK's) kan de (her)verwarmde lucht met een goed ontworpen luchtdistributiesysteem weer gelijkmatig in de kas worden verdeeld. Het eigen energieverbruik is wat hoger dan bij het buizensysteem, doordat het benodigde transport van de lucht meer energie vraagt dan het transport van water bij het buizensysteem.

Ook ligt het benodigde investeringsniveau naar verwachting wat hoger. Bij decentrale LBK's in de kas kan het (forse) energieverbruik van het luchttransport naar verwachting aanzienlijk worden gereduceerd. Door de kleinere schaalgrootte zijn deze decentrale units (met kleine KM/WP) per oppervlakte-eenheid kas wel duurder.

8. De 4 onderscheiden systeemconcepten (zie optie 1 tot en met 4 in de tabel hieronder) zijn op basis van de jaarcool-, -ontvochtigings- en -verwarmingsvraag globaal geanalyseerd ten aanzien van energieverbruik, benodigde investeringen en exploitatiekosten. De tabel hieronder geeft hiervan de belangrijkste resultaten. Daar het hier alleen gaat om een onderlinge vergelijking van de concepten, zijn de getallen in de tabel (behalve het gasverbruik en het koudetekort in de aquifer) genormeerd en wel op de waarden van de EWP-variant van optie 2 (die arbitrair op 100 is gesteld).

Opties → Jaarverbruiks- of kosten- kengetal	een- heid	Optie 1: centrale KM/WP met buisontvocht- ging/-koeling/ -verwarming		Optie 2: centrale KM/WP met cen- trale luchtbehande- ling en luchtverde- ling via slangen		Optie 3: de- centrale KM/WP-units in de kas		Optie 4: decen- trale absorptieont- vochtigingsunits en centrale (ab- sorber)regeneratie	
		<i>EWP</i>	<i>AWP</i>	<i>EWP</i>	<i>AWP</i>	<i>EWP</i>	<i>AWP</i>	<i>EWP</i>	<i>AWP</i>
<i>Type warmtepomp</i>									
Gasverbruik	Nm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0	38	0	38	0	x	37	65
Elektriciteitsverbruik	<sup>1)</sup> -	91	9	100	16	98	x	86	23
Primaire energie verbruik	<sup>1)</sup> -	91	86	100	94	98	x	161	156
Totaal jaarkosten <sup>2)</sup>	<sup>1)</sup> -	93	91	100	97	107	x	150	158
Koude tekort aquifer <sup>3)</sup>	%	42	69	41	69	41	x	40	69

<sup>1)</sup> dit getal is genormeerd op de waarde van de EWP-variant van optie 2 (die arbitrair op 100 is gesteld)

<sup>2)</sup> hierin zijn begrepen de energie- en onderhoudskosten en de kapitaalskosten (de laatste zijn berekend als termijnbedrag op basis van een annuïteitenlening tegen 6% rente gedurende 10 jaar)

<sup>3)</sup> koudetekort betekent dat er in de winter te weinig warmte aan de aquifer wordt getrokken, om in de zomer over voldoende koude te kunnen beschikken (er zal extra koude gewonnen moeten worden, om de aquifer thermisch neutraal te kunnen bedrijven)

9. Vanwege de veel hogere investering en het veel hogere primair energieverbruik dan bij de eerste 3 opties het geval is, valt optie 4 af. De AWP-varianten binnen de opties 1, 2, en 3 vallen (bij een stand-alone energievoorziening) af vanwege het grote koudetekort dat er bij optreedt.

10. Voor de drie overgebleven (EWP-)systeemvarianten, dient voor een evenwichtige verdere vergelijking een nadere optimalisatie te worden uitgevoerd, onder andere wat betreft dimensionering, inzetstrategie, warmte/koude-tussenbuffering en EWP-aandrijving, waarbij rekening moet worden gehouden met de kenmerkende variabiliteit van de vraagpatronen voor warmte, koude en ontvochtiging. Binnen de globale verkenning van deze deelstudie kan derhalve nog geen definitief eindoordeel over de beste van de resterende systeemconcepten worden gegeven. De EWP-variant van optie 1 lijkt op het eerste gezicht iets gunstiger dan de EWP-variant van optie 2. Bij de eerste bestaan echter nog twijfels of de dimensionering wel voldoende groot genomen is om ook de (tamelijk frequent voorkomende) situatie van gelijktijdige koeling/ontvochtiging en verwarming te kunnen garanderen, en of er in dat geval door afwisselend warme en koude buizen in de kas geen onacceptabele (micro) klimaatverschillen zullen gaan optreden. In de offerte is uitgegaan van luchtsystemen voor de KOV-functies. Daarom, en gezien de niet al te grote verschillen in de energieprestatie en totaalkosten met optie 1, zal in de hoofdstudie de variant met centrale luchtbehandeling (optie 2) qua energiehuishouding en rentabiliteit nader worden uitgewerkt. Voor de andere twee overgebleven EWP-varianten bestaat die ruimte binnen het huidige projectkader niet, maar deze kunnen desgewenst in een projectvervolg nader worden onderzocht.

## LITERATUUR

BOOT, H. et al., 1998. Handboek industriële warmtepompen, Kluwer bedrijfsinformatie.

Dryfast, 2001. Productinformatie en prijsopgave van Calorex drogers, Dryfast, Schiedam.

Egberts, K., 2000. Ongekende mogelijkheden met adsorptie luchtconditionering, TVVL magazine 12/2000.

IFT, 2001. Informatie op [www.if-tech.nl](http://www.if-tech.nl).

IF Technology, 2001. Toepassing van lage-temperatuurwarmte in de glastuinbouw – deelstudie ondergrondse energieopslag.

INTERLAND, 2000. Productinformatie en prijslijst van Interland techniek, Dordrecht.

KEMA, 2000 (Ruijter, J. de.) Aktie/besluitenlijst eerste vergadering werkgroep project "kansen voor lage-temperatuurwarmte in combinatie met warmtepompen en energieopslag in de glastuinbouw", projectnr. 50060657 d.d. 18-09-2000.

NOVEM, 2001. Energie-opslag in aquifers.

PBG, 1999 (Woerden, S.C. van e.a.). Kwantitatieve informatie voor de glastuinbouw 1999-2000, ISSN 1387-2427, Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente.

Rousse, D.R. et al., 1999. A low cost, durable and efficient dehumidifier for heat recovery in agriculture, Heat and technology, Vol. 17, nr. 1.

RGD, 1990. Beaufortschaal voor windkracht, uit: informatiemap voor bouwfysici van de RijksGebouwenDienst.

Santamouris et al., 1996. Energy conservation in greenhouses with buried pipes, Energy Vol. 21, No. 5, pp. 353-360.

Tammes, E. en Vos, B.H. 1980. Warmte- en vochttransport in bouwconstructies, Kluwer Technische Boeken.

Teitel et al, 1999. A comparison between pipe and air heating methods for greenhouses, J. Agric. Engng res. (1999) 72, 259-273.

Voorter, P.H.C., 1994. Energiezuinig drogen: vocht als stoom afvoeren, in: Energie en Milieuspectrum 10-94.