

*TNO-rapport*  
TNO-MEP – R 98/301

TNO Milieu, Energie  
en Procesinnovatie

TNO-MEP  
Business Park E.T.V.  
Laan van Westenenk 501  
Postbus 342  
7300 AH Apeldoorn

Telefoon: 055 549 34 93  
Fax: 055 541 98 37  
Internet [www.mep.tno.nl](http://www.mep.tno.nl)

## **Techniekinventarisatie mechanische koeling in de utiliteitsbouw**

### **Inclusief geïntegreerde systemen voor verwarming en koeling**

Datum  
juni 1999 (2<sup>e</sup> druk)

Auteurs  
S.M. van der Sluis      TNO-MEP  
M. Rolloos              TNO-Bouw

Met medewerking van  
P.A. Elkhuizen      TNO-Bouw  
G. Kuipers          TNO-MEP  
J.P. van der Stoel   TNO-MEP  
M. Verwoerd        TNO-MEP  
M.J.E. Verschoor    TNO-MEP

Projectnummer  
28849

NOVEM Projectnummer  
149.100.7181

Bestemd voor  
NOVEM  
Catharijnesingel 59  
Postbus 8242  
3503 RE Utrecht

Alle rechten voorbehouden.  
Niets uit deze uitgave mag worden  
vermenigvuldigd en/of openbaar  
gemaakt door middel van druk,  
fotokopie, microfilm of op welke  
andere wijze dan ook zonder  
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd  
uitgebracht, wordt voor de rechten en  
verplichtingen van opdrachtgever en  
opdrachtnemer verwezen naar de  
Algemene Voorwaarden voor  
onderzoeksopdrachten aan TNO, dan  
wel  
de betreffende terzake tussen de  
partijen gesloten overeenkomst.  
Het ter inzage geven van het  
TNO-rapport aan direct  
belanghebbenden is toegestaan.

© 1999 TNO

Het kwaliteitssysteem van TNO Milieu, Energie en  
Procesinnovatie voldoet aan ISO 9001.

TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie is een nationaal  
en internationaal erkend kennis- en contractresearch  
instituut voor bedrijfsleven en overheid op het gebied van  
duurzame ontwikkeling en milieu- en energiegerichte  
procesinnovatie.

Nederlandse Organisatie voor toegepast  
natuurwetenschappelijk onderzoek TNO

Op opdrachten aan TNO zijn van toepassing de Algemene  
Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO zoals  
gedeponeerd bij de Arrondissementsrechtbank en de  
Kamer van Koophandel te 's-Gravenhage



## Samenvatting

De “techniekinventarisatie mechanische koeling in de utiliteitsbouw” schetst een beeld van de momenteel toegepaste systemen voor mechanische koeling in utiliteitsgebouwen, en van alternatieve en innovatieve oplossingen voor koeling.

Alhoewel de inventarisatie zich richt op systemen voor koude opwekking, wordt ook de distributie en afgifte van koude globaal behandeld. Zeker bij de innovatieve systemen zijn opwekking, distributie en afgifte namelijk niet meer zo streng gescheiden als dat bij conventionele systemen gebruikelijk is. Ook de toepassing van de warmtepomp wordt in de inventarisatie genoemd.

In de inventarisatie ligt de nadruk op de energetische prestaties van de verschillende systemen voor mechanische koeling in de utiliteitsbouw. Energiebesparende opties voor conventionele koelsystemen worden behandeld, die veelal berusten op het -wanneer mogelijk- gebruikmaken van vrije koeling.

De alternatieve en innovatieve systemen die aan de orde komen zijn de volgende:

- Thermosyphon systeem
- DX - systeem
- Versatemp
- Desiccative Evaporative Cooling
- Koude distributie met fase - overgang / korte termijn koude opslag
- Air Cycle
- Thermo Akoestische Koeling
- (Mede) Door zonne - energie aangedreven koeling
- Bodemwarmtewisselaars

De indeling van systemen voor koeling in de utiliteitsbouw als “conventioneel” dan wel “alternatief en/of innovatief” berust - in deze techniekinventarisatie- voornamelijk op de bekendheid van de systemen in de Nederlandse wereld van de installatietechniek.



## Inhoudsopgave

Samenvatting .....	3
Inhoudsopgave.....	5
1. Inleiding .....	7
2. Koeling in de utiliteitsbouw .....	11
3. Conventionele koelmachines.....	31
4. “State of the Art” energiebesparende koelsystemen .....	41
5. Overzicht state of the art koelsystemen.....	61
6. Alternatieve en innovatieve mechanische koelsystemen.....	65
6.1 Inleiding .....	65
6.2 Ontwikkelingen op compressor gebied .....	66
6.3 Ontwikkelingen op het gebied van absorptie systemen .....	72
6.4 Energetische referenties.....	73
6.5 Thermosyphon systeem.....	76
6.6 DX - systeem.....	84
6.7 Versatemp systeem .....	92
6.8 Desiccative Evaporative Cooling (DEC systeem).....	97
6.9 IJsslurrie koude distributie systemen.....	101
6.10 Air Cycle Systeem.....	108
6.11 Thermo-akoestische koeling .....	116
6.12 (Mede) Door zonne-energie aangedreven koeling .....	123
6.13 Wärmtepompssystemen met bodemwarmtewisselaars voor koeling en verwarming .....	126
7. Overzicht alternatieve en innovatieve koelsystemen .....	129
8. Literatuur.....	135
9. Verantwoording .....	141



## 1. Inleiding

### Achtergrond en doel

Deze techniekinventarisatie “mechanische koeling in de utiliteitsbouw” geeft een overzicht van bestaande en innovatieve koelsystemen, gebruikt voor koude-opwekking in de utiliteitsbouw. Daarbij wordt vooral aandacht besteed aan het energiegebruik (en milieu aspecten) van de verschillende koelsystemen, onder andere in relatie tot de Energie Prestatie Normering. De studie is uitgevoerd in opdracht van NOVEM, in het kader van het programma “Lange Termijn onderzoekprogramma Gebouwde Omgeving” (LTGO).

Onder mechanische koeling wordt in deze studie verstaan die koelsystemen waarbij energie (warmte, elektriciteit) wordt toegevoerd om warmte te kunnen onttrekken, anders dan de energie die nodig is voor het transport van lucht, water en eventueel andere media.

Naast deze techniekinventarisatie betreffende mechanische koeling, worden in opdracht van NOVEM-LTGO ook andere techniek inventarisaties uitgevoerd. Sommigen daarvan zijn bij uitstek interessant voor de utiliteitsbouw, zoals de techniekinventarisatie “energie opslag in aquifers” en de techniekinventarisatie “bevochtigingssystemen”.

### Motivatie

Waarom aandacht voor mechanische koeling? Argumenten daarvoor komen voort uit verschillende invalshoeken, zoals:

- Een enquête onder leveranciers en adviseurs van koelsystemen leert dat er de laatste jaren een grote toename in de vraag naar koeling in de utiliteitsbouw is opgetreden door:
  - hogere comforteisen,
  - betere isolatieniveaus en luchtdichtheid van gebouwen,
  - hogere koellasten (toename van aantal mensen en elektronische apparatuur per m<sup>2</sup> oppervlak).
- De aandacht voor het broeikaseffect, onder andere verwoord in het Kyoto protocol (1997), heeft de noodzaak tot verhoogde introductie van rationeel energiegebruik en duurzame energiebronnen versterkt. Naast de bovengenoemde toename van energiegebruik voor koeling “per m<sup>2</sup>”, is ook sprake van een uitbreiding van het volume van koeling [1]. Voor de nabije toekomst moet rekening gehouden worden met een stijging van het bijbehorende energiegebruik welke hoger ligt dan de 2,5% groei in de afgelopen tien jaar. Hierdoor dreigen de emissiereductie-programma’s niet gehaald te worden. Een extra inspanning tot energiebesparing voor de

ontwerpers, bouwers, gebruikers en beheerders op het gebied van de gebouwde omgeving is nodig om de voorziene groei zoveel mogelijk te compenseren.

- De aanscherping van de Energie Prestatie Normering (EPN) dwingt - teneinde een acceptabele energie prestatie coëfficiënt te behalen - tot het overwegen van alternatieve (energiebesparende) systemen voor onder andere de opwekking en levering van koude. Overigens dienen de alternatieve systemen dan ook binnen de EPN correct gewaardeerd te worden, waartoe deze studie mede een aanzet wil geven.
- De eis tot vervanging van ozonlaag aantastende koudemiddelen (CFK's en HCFK's) voortkomend uit het Montreal protocol stimuleert onderzoek naar alternatieve koudemiddelen en koelmethoden.
- Toepassing van nieuwe technieken wordt veelal vertraagd door onbekendheid; met name de koelmachine wordt in de bouwwereld veelal als "black box" beschouwd. Door middel van het geven van een overzicht en de "ins and outs" van de nieuwe technieken voor koude opwekking en koude distributie kan worden getracht die onbekendheid te verminderen.

## Opzet van de rapportage

De rapportage behandelt voornamelijk de verschillende mogelijkheden voor mechanische koeling. Voorafgaand aan die behandeling wordt in de inleiding de motivatie voor deze studie aangegeven, en wordt in het daaropvolgende hoofdstuk kort ingegaan op systemen voor klimatisering in de utiliteitsbouw.

### De koelsystemen worden ruwweg verdeeld in 3 groepen:

- **conventionele systemen**
- **"state of the art" energiebesparende systemen**
- **alternatieve en innovatieve systemen.**

**Niet in alle gevallen is het mogelijk om een duidelijk onderscheid te maken voor bovenstaande indeling. De indeling van een systeem (conventioneel, "state of the art" of innovatief c.q. alternatief) is voor wat betreft deze techniekinventarisatie vooral gemaakt op basis van de bekendheid van het systeem in de wereld van de utiliteitsbouw. De bekendheid met bepaalde systemen wordt niet alleen bepaald door "de hoeveelheid gerealiseerde projecten", maar ook door de aandacht die in de literatuur en op lezingen aan de systemen is geschonken.**

De rapportage bevat zo veel mogelijk uitdieping van de energetische aspecten van de verschillende systemen van koude opwekking. Dit omdat in het huidige politieke klimaat het energiegebruik van een installatie- concept een belangrijke motivatie is geworden voor de keuze voor een bepaald concept, vanwege de in Nederland geldende Energie Prestatie Normering (EPN) en de wereldwijde aandacht voor reductie van CO<sub>2</sub> emissies en energiebesparing (het Kyoto protocol).



Deze rapportage is hoofdzakelijk bedoeld om de onbekendheid weg te nemen betreffende nieuwe en innovatieve koelsystemen in de utiliteitsbouw. Daarmee kan deze studie een hulpmiddel zijn bij het ontwikkelen van een strategie voor een verdere reductie van het energiegebruik in de utiliteit in de komende jaren.

De eerste drie hoofdstukken van deze rapportage zijn bedoeld als inleiding voor lezers, die minder bekend zijn met koeling in de klimatisering. Hoofdstuk 3 behandelt de conventionele koelsystemen.

De hoofdstukken 4 en 5 zijn gewijd aan “state of the art” energiebesparende koelsystemen, die voor adviseurs en installateurs die werkzaam zijn in het vakgebied als bekend mogen worden verondersteld.

In de hoofdstukken 6 en 7 komen de minder bekende alternatieven voor koeling aan de orde, en de innovaties op het gebied van koeling (veelal gecombineerd in complete systemen voor klimatisering).

Door middel van verwijzingen naar de “kennis bezitters” betreffende de verschillende behandelde systemen, wordt getracht de kennis betreffende deze systemen toegankelijk te maken voor installatie adviseurs, installateurs en fabrikanten / leveranciers.



## 2. Koeling in de utiliteitsbouw

### Koudebehoefte in de utiliteitsbouw en mogelijkheden tot beperking van de koellast

Bij klimatisering in de utiliteitsbouw is het hoofddoel een klimaat te bereiken, dat voldoet aan de comforteisen zoals vermeld in het Programma van Eisen voor het gebouw. De eisen worden doorgaans gesteld in de vorm van onder- en bovenwaarden voor luchttemperatuur en luchtvochtigheid, waarbij tevens wordt gespecificeerd hoeveel uren per jaar de temperatuurwaarden over- of onderschreden mogen worden.

De comforteisen leiden, samen met de architectuur van het gebouw en het geplande gebruik van de ruimten, tot een “warmtebehoefte” (WBG) en een “koudebehoefte” (KBG) voor het gebouw.

De afgelopen jaren is, met betrekking tot terugdringen van het energiegebruik voor mechanische koeling, vooral getracht om:

- de koudebehoefte van het gebouw te minimaliseren
- in de “resterende” koudebehoefte te voorzien op natuurlijke wijze (d.w.z. zonder mechanische koeling).

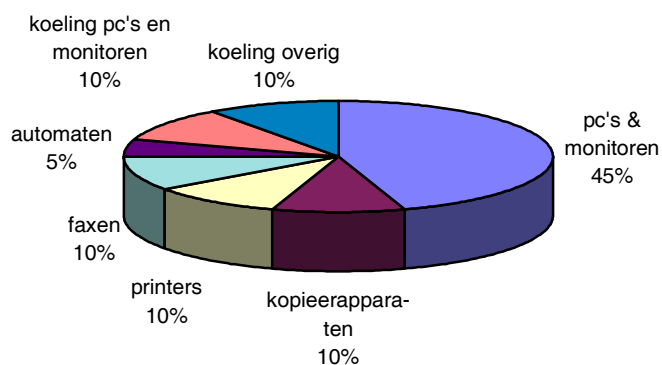
*Tabel 1 Invloedsfactoren op koudebehoefte van een gebouw, onafhankelijk van de gekozen klimatiseringsinstallatie.*

Architectuur	Gebruik
Oriëntatie (zon invloed)	Comforteisen; eisen luchtkwaliteit
Constructie (thermische massa)	Warmte afgifte apparatuur (PC's e.d.)
Gevel ontwerp (raampercentage)	Verlichting
Materiaalkeuze (beglazing)	Bezetting
Zonwering	.....

Mogelijkheden die ter beschikking staan voor het terugdringen van de koudebehoefte van een gebouw zijn onder andere:

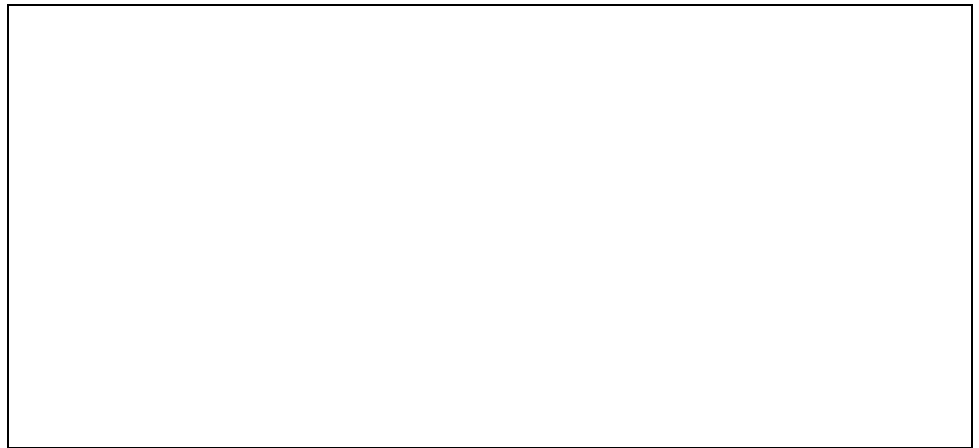
- Gebouwen kunnen energie-efficiënter worden uitgevoerd door een juiste keuze van de gebouweigenschappen die van invloed zijn op de koude- en warmtebehoefte. De meest bekende voorbeelden van het beperken van de warmtebehoefte zijn het toepassen van isolatie en het (passief) benutten van zonne- energie. Het beperken van de koudebehoefte kan ook door passieve maatregelen worden gerealiseerd, zoals benutting van de bufferwerking van de gebouwmassa en het reduceren van koellasten door een goede keuze van beglazing (percentage glas ten opzichte van het totale geveloppervlak, type beglazing) in combinatie met het toepassen van zonwering. Indien daartoe de vrijheid bestaat, kunnen ook door de keuze van de oriëntatie van het gebouw (noord/zuid of oost/west) de warmte- en koudebehoefte beïnvloed worden.

- De koudebehoefte van een gebouw kan in principe onderverdeeld worden naar een koudebehoefte die ontstaat als gevolg van externe factoren (zoals transmissie van warmte bij een hoge buitentemperatuur, en zontoetreding) en een koudebehoefte voor het verwijderen van de interne warmtelast. De interne warmtelast wordt veroorzaakt door de warmte afgifte van personen, verlichting en kantoorapparatuur. Met name de laatste jaren heeft de toepassing van kantoorapparatuur (PC's, kopieermachines e.d.) een enorme vlucht genomen wat heeft geleid tot een stijging van de interne warmtelast. In Figuur 1 is te zien dat een groot deel van de interne warmtelast door kantoorapparatuur wordt veroorzaakt door pc's. Het overige deel is de warmte die kopieerapparaten, printers, faxen, etc. afgeven.



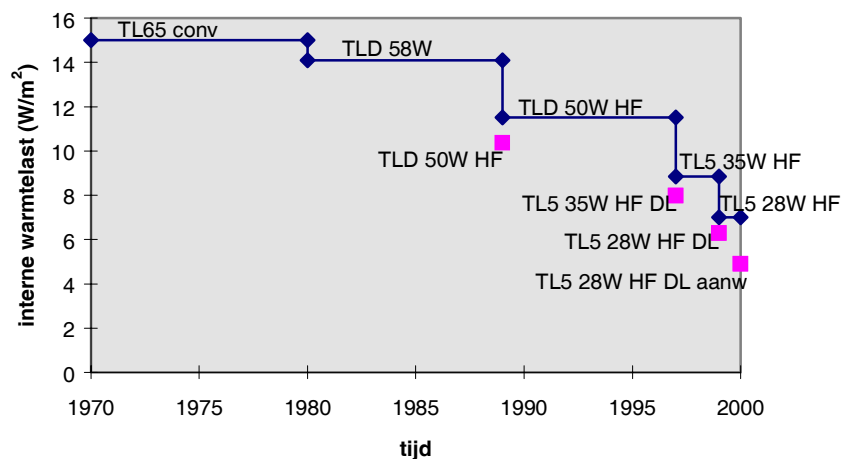
*Figuur 1* Verdeling interne warmtelast kantoorapparatuur in Verenigd Koninkrijk 1998 [46]

De ontwikkeling van de interne warmtelast veroorzaakt door pc's is weergegeven in Figuur 2. Door de invoering van kleurenbeeldschermen ontstond eind jaren '80 een sprong in de warmtelast naar een hoger niveau ( $15 \text{ W/m}^2$ ). Vervolgens vond in de jaren '90 een lichte stijging plaats door de snellere processors en steeds krachtigere machines. Door de huidige ontwikkeling van de Thin Film Transistor (TFT) monitoren en door invoering van de power save mode is een sterke daling van de warmtelast mogelijk. Een verdere daling is mogelijk wanneer in de loop der jaren een steeds groter deel van de software geschikt gemaakt wordt voor een power save mode.



Figuur 2 Interne warmtelast veroorzaakt door pc's

De ontwikkeling van de interne warmtelast veroorzaakt door verlichting is afgebeeld in Figuur 3. Het elektrisch vermogen en daarmee de interne warmtelast is door de ontwikkeling van de tl-lamp in de loop der jaren gedaald van 15 naar 7 W/m<sup>2</sup>. Door daglichtregeling, aanwezigheidsschakelingen en een optimale benutting van het daglicht kan deze warmtelast teruggebracht worden naar een niveau lager dan 5 W/m<sup>2</sup> [47].



Figuur 3 Interne warmtelast veroorzaakt door verlichting

Door het terugdringen van de interne warmtelast kan de koudebehoefte van het gebouw beïnvloed worden. Daarmee leveren investeringen in energie efficiënte verlichting en apparatuur in feite een dubbel voordeel: een lager direct energiegebruik (voor verlichting en apparatuur), en een verkleining van de benodigde koelinstallatie - met een bijbehorend lager energiegebruik voor koeling.

- Tenslotte is het evident dat de gestelde comforteisen een zeer belangrijke invloed hebben op de warmtebehoefte en koudebehoefte van een gebouw. Voorlopig gaan we er echter van uit, dat deze comforteisen niet mogen worden opgeofferd aan de doelstelling om energie te besparen. Anderzijds liggen hier wel mogelijkheden om te komen tot systemen die niet of slechts gedeeltelijk in werking zijn wanneer gedetecteerd wordt dat in de betreffende ruimte geen personen aanwezig zijn.

Alhoewel bij het voorkomen van koudebehoefte in eerste instantie wordt gedacht aan bouwtechnische aspecten en aan gebruikersgedrag, is het ook denkbaar dat de klimatiseringsinstallatie zelf aanleiding geeft tot een koudevraag. Dit is bijvoorbeeld het geval bij ventilatie, op momenten dat de buitentemperatuur hoger is dan de gewenste binnentemperatuur (beter is het om te spreken van de enthalpie van de buitenlucht ten opzichte van de gewenste enthalpie van de binnenlucht): hierdoor wordt door de installatie een koudevraag geïntroduceerd. Het beperken van ventilatielucht hoeveelheden tot die welke uit hygiënische overwegingen noodzakelijk zijn, kan in deze situatie de koudebehoefte beperken.

Mogelijkheden om in een resterende koudebehoefte te voorzien zonder gebruik te maken van mechanische koeling, worden doorgaans aangeduid als natuurlijke koeling, waarin een verdere onderverdeling - alhoewel niet zeer scherp - is aan te brengen in “vrije koeling” en “verdampingskoeling”. Vrije koeling en verdampingskoeling worden behandeld in hoofdstuk 4. Mogelijkheden zijn onder andere:

- Vrije koeling door gebruikmaking van buitenlucht / ventilatie
  - gebruikmakend van onbehandelde buitenlucht (te openen ramen, ventilatieroosters e.d.)
  - gebruikmakend van koelere buitenlucht tijdens de nacht (zomernachtventilatie)
  - gebruikmakend van bevochtiging van buitenlucht (verdampingskoeling)
- Vrije koeling met behulp van een watercircuit, voorzien van bijvoorbeeld koeltorens (in de koeltorens zelf wordt gebruik gemaakt van verdampingskoeling) of verdampingscondensoren.
- Overige systemen voor vrije koeling
  - koeling van toevoerlucht met behulp van een ondergronds buizenstelsel, waarbij de lucht wordt gekoeld door de grondmassa.
  - koeling van water ten behoeve van een watercircuit met behulp van warmtewisselaars in de bodem (verticale bodem warmte-wisselaars, eventueel in de vorm van heipalen).

De mogelijkheden voor het toepassen van vrije koeling en verdampingskoeling worden zeer sterk beïnvloed door de temperatuur waarbij gekoeld wordt. Wanneer alle systemen voor koeling bijvoorbeeld zijn uitgelegd op een aanvoertemperatuur van 6 °C, is (volledige) vrije koeling mogelijk bij buitentemperaturen lager dan 6 °C

en (volledige) verdampingskoeling mogelijk wanneer het dauwpunt van de buitentemperatuur lager is dan 6 °C.

Vanzelfsprekend is in de meeste voorkomende situaties de koelbehoefte bij dergelijk lage buitentemperaturen minimaal, en treedt het leeuwendeel van de koelbehoefte op bij hogere buitentemperaturen.

Om gebruik te kunnen maken van vrije koeling en verdampingskoeling, moet de aanvoertemperatuur voor koeling zo hoog mogelijk gekozen worden. Aan de andere kant hebben systemen voor ontvochtiging - wanneer die aanwezig zijn - behoefte aan een lage aanvoertemperatuur, om de ontvochtiging mogelijk te maken. Voor een gewenste vertrektemperatuur van 24 °C en een Relatieve Luchtvochtigheid van 55% is de maximale temperatuur van het koelwater 9 tot 12 °C<sup>1</sup>. Het is daarom zinvol om de systemen voor koeling en ontvochtiging van elkaar te ontkoppelen (zodat het systeem voor ontvochtiging niet een onnodig lage temperatuur voor koeling oplegt). De mogelijkheid tot ontkoppelen wordt geboden door gebruik te maken van gescheiden koelsystemen, of door gebruik te maken van sorptietechnieken voor de ontvochtiging.

De keuze voor de temperatuur waarbij gekoeld wordt, wordt doorgaans gemaakt door de adviseur of ontwerper. Een hoge aanvoertemperatuur vergroot de mogelijkheden om gebruik te maken van vrije koeling, maar leidt ook tot de noodzaak van grotere warmtewisselende oppervlakken (zoals bijvoorbeeld koelplafonds).

Ondanks de inspanningen om te komen tot een minimale koudebehoefte, en het daarin voorzien door gebruikmaking van natuurlijke koeling, is duidelijk geworden dat mechanisch koeling niet geheel kan worden voorkomen in alle situaties.

### **Koudevoorziening in de utiliteitsbouw**

In deze paragraaf wordt ingegaan op de verschillende onderdelen van systemen voor koudevoorziening in de utiliteitsbouw, ook wel - zij het niet geheel terecht - aangeduid als airconditioning systemen.

Uiteindelijk is het doel van klimaatinstallaties om de gestelde comforteisen (temperatuur en vochtigheid) in de “bewoonde” vertrekken in een gebouw zo veel mogelijk te handhaven. “Levering van koude” wordt daarbij gebruikt voor twee comfortaspecten:

---

<sup>1</sup> Om het maximale temperatuurniveau van het koelwater voor ontvochtiging te bepalen, kan het mollier-diagram voor vochtige lucht gebruikt worden. Om een gewenste vertrektemperatuur van 24 °C en een RV van 55% te verkrijgen moet de lucht eerst gekoeld worden naar 14 °C. Indien het temperatuurverschil tussen het koelwater en de te koelen lucht 2 tot 5 °C bedraagt, dan zal de maximale temperatuur van het koelwater 9 tot 12 °C bedragen.

- koelen (onttrekken van voelbare warmte, bij gelijkblijvend vochtgehalte) van toevoerlucht of vertreklucht.
- ontvochtiging van toevoerlucht

### Systemen voor koude opwekking (decentraal en centraal)

In Nederland zijn de systemen die voor koude opwekking in de Utiliteitsbouw worden gebruikt voor het overgrote deel (98%) compressie koelmachines. In Tabel 2 is een schatting gegeven betreffende de verdere onderverdeling van deze (compressie) koelmachines.

*Tabel 2 Schatting betreffende de onderverdeling van koelmachines t.b.v. comfortkoeling naar een viertal categorieën op basis van cijfers van leveranciers en TVVL [1].*

<b>Categorie</b>	<b>Aantal opgesteld in Nederland</b>	<b>Gemiddeld vermogen (kW)</b>
mini / portable	30.000	2,5
kleine & split systemen	80.000	5,0
middelgrote systemen	8.000	200
grote systemen	700	700

Mini / portable systemen, raamkoelers en (single) split systemen zijn “decentrale” systemen, waarbij per vertrek een volledige installatie aanwezig is. In deze installaties wordt de door de koelmachine geproduceerde koude direct overgedragen aan de vertreklucht. Daarbij treedt ook enige mate van ontvochtiging van de vertreklucht op, maar doorgaans is er geen sprake van handhaving van de gewenste vochtigheid van de vertreklucht.

In “centrale” systemen wordt op één centrale plaats (bijvoorbeeld in het ketelhuis) koude opgewekt, en wordt deze “koude” vervolgens via een transportmedium (doorgaans water) getransporteerd naar de luchtbehandelingskast of naar de te klimatiseren vertrekken en de ontvochtiger. De getransporteerde koude wordt middels een afgifte apparaat aan het vertrek afgestaan.

Meestal wordt de koude in een centrale klimaatinstallatie opgewekt met een “koudwater aggregaat”. Een koudwater aggregaat is een op zichzelf staande koelmachine die koud water levert.

Compressie koelmachines worden aangedreven met een elektromotor. Als alternatief bestaat de absorptie koelmachine, die wordt aangedreven met warmte. In hoofdstuk 3 wordt verder ingegaan op conventionele koelsystemen, in de daarna volgende hoofdstukken worden “state of the art” systemen en innovatieve c.q. alternatieve concepten behandeld.



### Distributie systemen

In centrale systemen dient de centraal opgewekte koude gedistribueerd te worden naar de verschillende te klimatiseren vertrekken, en naar de installatie voor ontvochtiging (indien die aanwezig is) . In hoofdzaak zijn er twee verschillende methoden om dit te bereiken:

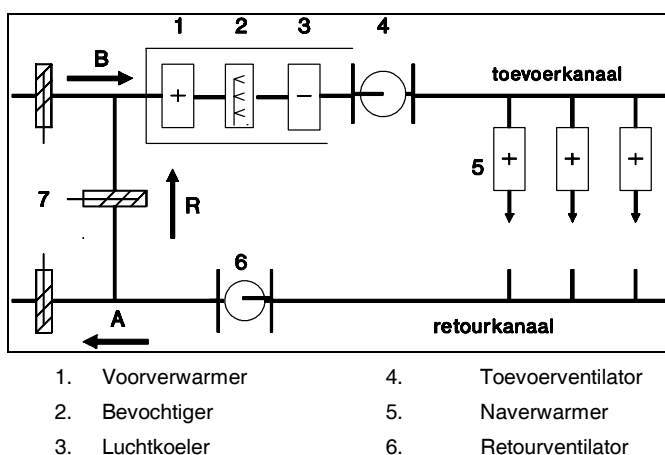
- afgifte van koude t.b.v. koeling en ontvochtiging aan een centrale luchtbehandelingskast. Verdere distributie van de behandelde lucht vindt plaats door middel van luchtkanalen, daarom wordt dit type systeem aangeduid als “all air systeem”.
- afgifte van koude aan een systeem voor ontvochtiging van ventilatielucht, in combinatie met een transport systeem voor koud water naar afgifte apparaten per vertrek.

#### *All air systemen*

Bij een “all air” systeem wordt de totale gebouwbehoefte aan koeling (voelbaar en latent), verwarming en bevochtiging door het luchtsysteem verzorgd. In de gevelzone wordt, doorgaans met warm water, naverwarmd. Afhankelijk van de uitvoering en thermische eigenschappen van de gevel gebeurt dit door 'naverwarming van de lucht' of door 'radiatoren aan de gevel'.

All air systemen worden doorgaans met één luchtkanaal uitgevoerd. All air systemen met twee luchtkanalen (gescheiden warm en koud kanaal) worden tegenwoordig vrijwel niet meer toegepast, en zullen hier dan ook verder niet behandeld worden.

Een éénkanaalsysteem bevat één gemeenschappelijk luchttoevoerkanaal waarbij centraal de warmtewisselaars voor koeling en verwarming zijn opgenomen. Het kanaal distribueert de lucht met één temperatuur naar de verschillende zones (zie Figuur 4). Het temperatuurniveau van de toevoerlucht (primaire lucht) is zowel in de zomer als in de winter 14 à 16 °C, waarvoor een gekoelwater systeem uitgelegd op 6 °C / 12 °C (aanvoer/afvoer) wordt gebruikt t.b.v. koeling en ontvochtiging.



Figuur 4 Principe schema éénkanaal "All Air" systeem

De éénkanaalsystemen worden ingedeeld in constant volume systemen en variabel volume systeem (VAV). Een verdere onderverdeling is mogelijk uitgaande van het type afgifte apparaat, zo wordt bijvoorbeeld gesproken van het "fan powered systeem" (waarbij een ventilator vertrekucht aanzuigt en mengt met de toevoerlucht), of het "constant inductie-rooster systeem" (luchtinblaas met constante snelheid door een kleine uitstroombopening). Een schema betreffende de naamgeving van distributiesystemen is als Tabel 3 opgenomen in dit hoofdstuk.

All-air systemen worden momenteel veelal met warmteterugwinning uitgevoerd. De all-air systemen kunnen verder maximaal gebruik maken van vrije koeling door middel van toevoer van buitenlucht. Nadelen van all-air systemen zijn het grote ruimtebeslag door luchtkanalen, en de kritische inregeling van de verschillende luchthoeveelheden in grote systemen. Energieverspilling veroorzaakt door lekkage in kanalen en eindunits kunnen behoorlijk zijn. De optredende kanaallekkages in utiliteitsgebouwen kunnen oplopen tot 20% of meer. Een detaillering van het energiegebruik (opwekking, distributie, afgifte) van het VAV all-air systeem wordt gegeven in hoofdstuk 6.

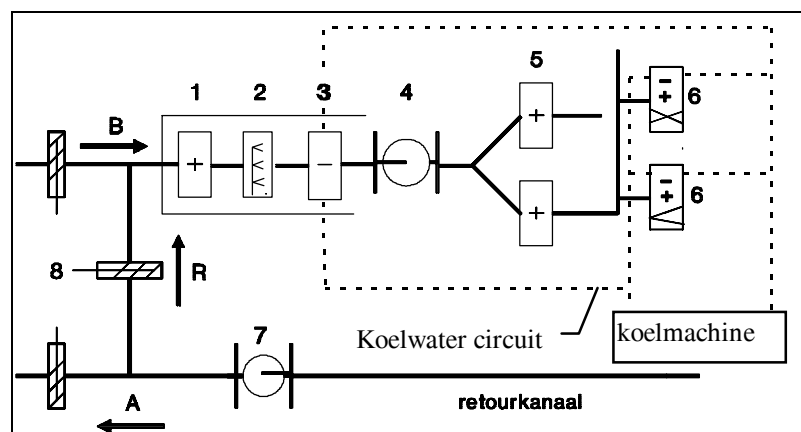
#### Lucht - water systemen

Een lucht - watersysteem bestaat uit een centrale luchtbehandelingskast, een lucht- en water distributiesysteem en afgifte apparaten.

Lucht - water systemen worden als tweepijps of als vierpijps systeem uitgevoerd. De toepassing van driepijps systemen komt men tegenwoordig niet meer tegen. De verschillende systemen (tweepijps en vierpijps) worden verderop beschreven. De naamgeving van de lucht - water systemen is direct gekoppeld aan het type afgifte apparaat (ventilator convector systemen, inductie systemen, koelplafonds); zie hiervoor ook tabel 3.

In het algemeen is de luchttoevoer van een constant debiet. Deze primaire lucht voorziet in de noodzakelijke luchtverversing, en dient verder om de gewenste

luchtvochtigheid te kunnen handhaven. Het luchtzijdige systeem is afgebeeld in Figuur 5. Het temperatuurniveau van de toevoerlucht bedraagt doorgaans 14 à 16 °C, waarbij een gekoeld water temperatuurtraject van 6 °C / 12 °C wordt gebruikt. Het gekoelde water voor de afgifte apparaten kan op een iets hoger temperatuurniveau worden geleverd (14 °C / 18 °C, bij koelplafonds 16 °C / 18 °C). Het voordeel van het gebruiken van een hogere toevoer temperatuur, is dat beter gebruik gemaakt kan worden van vrije koeling. Bij koude-opwekkers leidt een hogere temperatuur bovendien tot een beter rendement.



- |   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. Voorverwarmer                              | 6. Inductie unit,             |
| 2. Bevochtiger                                | Ventilatorconvector           |
| 3. Luchtkoeler                                | Stralingspaneel (koelplafond) |
| 4. Toevoerventilator                          | 7. Retourventilator           |
| 5. Naverwarmer (alleen bij tweepijps systeem) |                               |

*Figuur 5 Principeschema lucht-watersysteem (B = buitenlucht, A = afvoerlucht en R = recirculatielucht)*

Bij een tweepijps systeem wordt het water getransporteerd door één aanvoer- en één retourleiding.

In een “non change-over” systeem wordt de verwarming verzorgd door de primaire lucht, en de koeling door het water. Ook in de winter is hier gekoeld water nodig, om per vertrek de temperatuur te kunnen regelen.

Bij een change-over systeem wordt, op het moment dat de koudebehoefte vervalt (winterseizoen), overgeschakeld: dan wordt de primaire lucht gebruikt voor koeling, en het waterzijdig systeem voor de verwarming. In een klimaat met snel wisselende omstandigheden wordt het change-over systeem minder toegepast, omdat het veelvuldig omschakelen onbalans veroorzaakt.

Het vierpijps systeem heeft gescheiden water circuits voor gekoeld water en voor warm water. De primaire lucht is koel en blijft evenals het gekoelde water gedurende het jaar op dezelfde temperatuur. De afgifte apparaten van zowel tweepijps als vierpijps systemen bepalen voor een groot deel de principewerking van het totale systeem en komen voor in de naamgeving bij de verdere onderverdeling van de systemen.

Het voordeel van lucht - water systemen ten opzichte van all air systemen, is dat deze systemen sneller reageren op wijzigingen in de belasting, en bovendien beter toepasbaar zijn bij sterk verschillende belastingen per vertrek. Vanzelfsprekend is er ook minder ruimte nodig voor de distributiekkanalen. Daar staat tegenover dat de investeringskosten 10 à 15% hoger liggen. Een detaillering van het energiegebruik (opwekking, distributie, afgifte) van het vierpijps systeem wordt gegeven in hoofdstuk 6.

#### Afgifte apparaten (inductie unit, ventilator convector unit, koelplafond)

In de voorgaande sectie is reeds vermeld dat de meeste klimaatsystemen hun naam ontleen aan de diverse typen afgifte apparaten die worden toegepast (zie ook tabel 3). Voor “all air” constant volume systemen worden naverwarmers voor het regelen van de temperatuur toegepast, met verschillende soorten inblaasroosters. In de variabel volume all air systemen wordt de vertrektemperatuur geregeld door het regelen van de ingeblazen hoeveelheid lucht. Hierbij worden soms ook units voorzien van een ventilator gebruikt, om verse- en vertreklucht beter te mengen en een snellere opvang van wisselende belastingen te bewerkstelligen.

Lucht - water systemen maken in hoofdzaak gebruik van drie typen afgifte apparaten. Bij ventilator convectoren (met ventilator) en inductie - units (uittrede van verse lucht met hoge snelheid), dient lucht met enige snelheid over de warmtewisselaars gevoerd te worden teneinde een goede afgifte mogelijk te maken. Bij koelplafonds (stralingspanelen) is een dergelijke hoge luchtsnelheid over het warmtewisselend oppervlak niet nodig, bij deze systemen kan worden volstaan met een minimale ventilatielucht hoeveelheid (nodig voor luchtverversing), die met lage snelheid in het vertrek wordt ingebracht (de zogenaamde verdringingsventilatie). Koelplafonds zijn in staat grotere hoeveelheden warmte af te voeren uit een vertrek (circa 35 tot 100 W/m<sup>2</sup>) dan convectoren of inductie units (circa 35 tot 65 W/m<sup>2</sup>)

Tabel 3 Indeling van systemen voor (warmte- en) koudevoorziening in utiliteitsgebouwen.

Distributie	Naamgeving Systeem	Afgifte	Capaciteitsregeling
All - air	Een kanaal Constant Volume - éénzone systeem - meerzone systeem	Rooster Naverwarmer	Eén temperatuur Zone- temperatuur (hoger/lager)
	Bypass systeem	Regelend rooster	Luchthoeveelheid per vertrek
	Variabel Volume (VAV)	Damperbox (met roosters) Naverwarmer Inductierooster Constant Inductierooster Fan-powered	Variatie van de hoeveelheid lucht die aan het vertrek wordt toegevoerd.
	Dual Conduit	Regelend rooster	Basishoeveelheid + regelbare additionele luchthoeveelheid
	Twee kanaal Constant Volume - zonder naverwarming - met naverwarming - multizone	mengdoos met roosters	Mengen van luchthoeveelheden van verschillende temperatuur
Lucht / Water	Ventilatorconvector	Ventilatorconvector (in plafond of aan gevel) - conventioneel - met inductie	Additioneel koelen of verwarmen van lucht in afgifte subsystemen
	Induktiesysteem - tweepijps - vierpijps	Inductie-unit (in plafond of aan gevel)	Additioneel koelen of verwarmen van lucht in afgifte subsystemen
	Koelplafond met basisventilatie -open/gesloten plafonds vaste leidingsystemen elementsystemen inlegsystemen	Koelplafond met plafond-, of verdringings-rooster	Additioneel koelen of verwarmen parallel aan luchtsysteem
Overig	distributie d.m.v. koudemiddel	DX "indoor unit"	inspuiting verdamper

### Energetische rendementen voor koudevoorziening

Het energiegebruik van een klimaatinstallatie in een gebouw wordt systematisch onderverdeeld in een viertal aspecten:

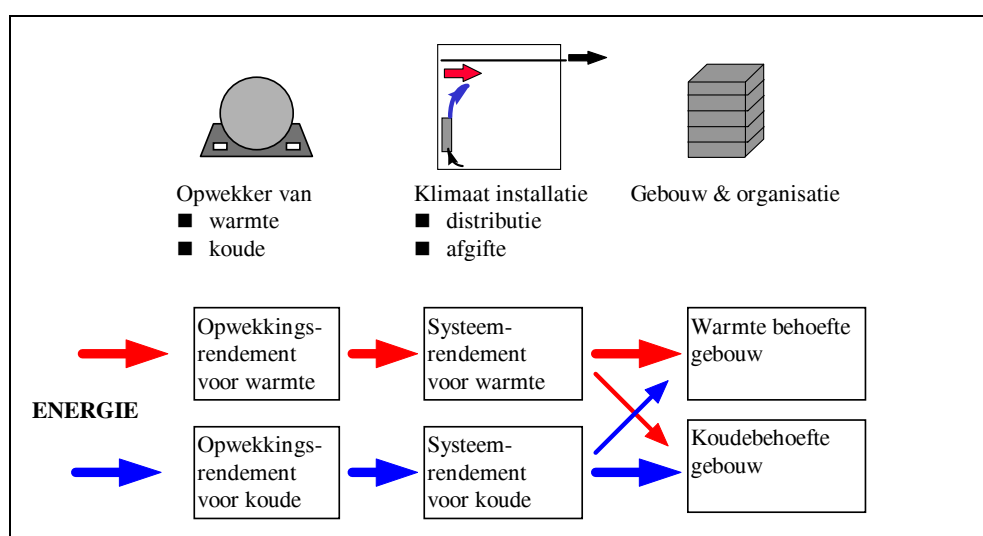
- de gebouwbehoefte, ofwel de behoefte aan verwarming en/of koeling, zijnde die hoeveelheid die het gebouw (en de organisatie) vraagt om de temperatuur op een gewenst niveau te brengen en te houden;
- het systeemrendement (“= transport- en distributierendement”)
- het opwekkingsrendement (“= rendement van koelmachine of verwarmingsketel”).
- energiegebruik voor transport van gekoelde lucht / gekoeld water

In formulevorm kan voor het energiegebruik (voor levering van verwarming en koeling) worden gesteld:

$$\text{Energiegebruik (levering)} = \frac{\text{gebouwbehoefte}}{\text{systeemrendement} * \text{opwekkingsrendement}}$$

$$\text{Energiegebruik (transport)} = \text{Pompenergiegebruik} + \text{ventilatorenergiegebruik}$$

Deze benadering is afkomstig uit het normblad NEN 2916 'Energieprestatie van utiliteitsgebouwen'. De onderlinge samenhang tussen gebouwbehoefte, systeemrendement en opwekking is weergegeven in Figuur 6.



Figuur 6 Onderlinge samenhang tussen opwekkingsrendement, systeemrendement en gebouwbehoefte

## Gebouwbehoefte

Het gebouw heeft door zijn eigenschappen een bepaalde behoefte aan verwarming en koeling. Aan de koudebehoefte is in de voorgaande paragraaf (koudebehoefte in de utiliteitsbouw en mogelijkheden tot beperking van de koellast) aandacht geschonken.

## Systeemrendement

Om de koudebehoefte (of de warmtebehoefte) van de het gebouw te dekken, moet bij systemen met centrale opwekking meer koude (of warmte) worden geproduceerd dan de werkelijke behoefte. "Onderweg" -in het distributiesysteem - treden verliezen op door uitwisseling met de omgeving (bijvoorbeeld lucht lekkages in all-air systemen). Ook bij de afgifte kunnen verliezen optreden, zoals bij het mengen van koude en warme lucht om de gewenste temperatuur te bereiken.

Om de verliezen in het distributie systeem en de afgifte apparaten te kwantificeren wordt het systeemrendement gebruikt.

Er is een systeemrendement voor verwarming, en een systeemrendement voor koeling (vanzelfsprekend zullen deze rendementen in de meeste systemen samenhangen). In Figuur 6 is het concept van de systeemrendementen geïllustreerd. Het systeemrendement heeft betrekking op het verwarmen en koelen van een ruimte en dus betrekking op voelbare warmte (d.w.z. exclusief ontvochtigen / bevochtigen).

In feite wordt met het systeemrendement voor verwarming/koeling bedoeld: "de verhouding tussen de gebouwbehoefte aan verwarming/koeling en de totaal door de klimaatinstallatie geleverde hoeveelheid warmte/koude om in deze behoefte te voorzien". De door de klimaatinstallatie geleverde hoeveelheid warmte/koude wordt omschreven als de systeemlevering.

$$\text{stelsysteemrendement} = \text{gebouwbehoefte} / \text{stelsysteemlevering}$$

Voor een klimaatinstallatie met een systeemrendement van 100% is de systeemlevering gelijk aan de gebouwbehoefte. In feite wordt in die klimaatinstallatie geen "energie vernietigd"<sup>1</sup>. Voor een klimaatinstallatie met een systeemrendement kleiner dan 100% is de systeemlevering groter dan de gebouwbehoefte. Deze toename van de systeemlevering wordt veroorzaakt door:

- A. energievernietiging door het gelijktijdig verwarmen en koelen
- B. leidingverliezen (warmteverlies tijdens het transport van water/lucht)
- C. ontbreken van een individuele regeling van de vertrektemperatuur

Tabel 4 *Systeemrendementen voor koeling volgens NEN 2916:1994 [2], en de pré-norm NEN 2916:1998 [3,4].*

$f_{kb}$  = fractie koudebehoefte in de totale warmte- en koudebehoefte.

Koeltransport d.m.v.	Warmtetransport d.m.v.	Systeemrendement voor koeling (NEN 2916:1994)	Systeemrendement voor koeling (pr. NEN 2916:1998)	
			$f_{kb} = 1/2$	$f_{kb} = 1/3$
lucht	lucht	0,70	1,00	1,00
	water (of water en lucht)	0,45	1,00	1,00
water en lucht	lucht	0,60	0,83	0,76
	water (of water en lucht)	0,55	0,92	0,88
water	lucht	0,30	0,83	0,76
	water (of water en lucht)	0,75	0,92	0,88
koudemiddel	lucht en/of water	-	-	-
ijs-slurry	lucht en/of water	-	-	-

<sup>1</sup> Alhoewel energie niet kan worden vernietigd (er is eigenlijk sprake van exergievernietiging) is dit woord hier om praktische redenen toch gebruikt.

Momenteel (1998) ligt een ontwerp versie ter discussie betreffende de NEN 2916 [3], waarin de systeemrendementen op een andere manier worden bepaald dan in de huidige versie uit 1994. In de ontwerp versie zijn de systeemrendementen onder andere afhankelijk van de verhouding koudebehoefte / warmtebehoefte. De achtergrond bij deze herziene bepaling is opgenomen in een rapportage van TNO [4].

### Opwekkingsrendement

In de ontwerp NEN 2916:1998 is het opwekkingsrendement voor koude van compressiekoelmachines vastgelegd op één bepaalde waarde, overeenkomend met een jaargemiddelde C.O.P. van 4,0. Dit was ook in de NEN 2916:1994 het geval. Nieuw in het ontwerp NEN 2916:1998 is, dat voor systemen met koude - opslag een opwekkingsrendement is opgenomen met een fictieve C.O.P. van 12,0. Ook voor absorptiekoelmachines zijn aparte opwekkingsrendementen opgenomen in het ontwerp. Tenslotte is ook voor de warmtepomp in koelfunctie (in combinatie met koude opslag) een opwekkingsrendement opgenomen overeenkomend met een C.O.P. van 5,0. Een overzicht is gegeven in hoofdstuk 5, Tabel 14.

### Energiegebruik voor transport

In decentrale koelsystemen (per vertrek een op zichzelf staande “airconditioner”) is geen energiegebruik voor transport benodigd, omdat opwekking en afgifte op dezelfde plaats worden gerealiseerd. In de bekende kleine airconditioners (split-units en raamkoelers) is wel sprake van een energiegebruik voor afgifte, in de vorm van een ventilator die de vertreklucht over de koeler circuleert.

In centrale systemen kan het energiegebruik voor transport een aanzienlijk deel uitmaken van het totale energiegebruik voor klimatisering. Het is doorgaans zeer moeilijk om het energiegebruik voor transport van koude te scheiden van het energiegebruik voor transport van warmte en het energiegebruik t.b.v. ventilatie.

In een tweetal referentie installaties (zie hoofdstuk 6) is, ter illustratie, het energiegebruik voor transport (warmte, koude en ventilatie) vrijwel gelijk aan het energiegebruik voor koude opwekking. De referentiesituatie betreft een gebouw met een fractie koudebehoefte  $f_{kb} \approx 0,66$  (koudebehoefte tweemaal zo groot als de warmtebehoefte). In Tabel 5 is het energiegebruik van de twee referentie installaties opgesplitst in de onderdelen warmte opwekking, transport en koude opwekking weergegeven.



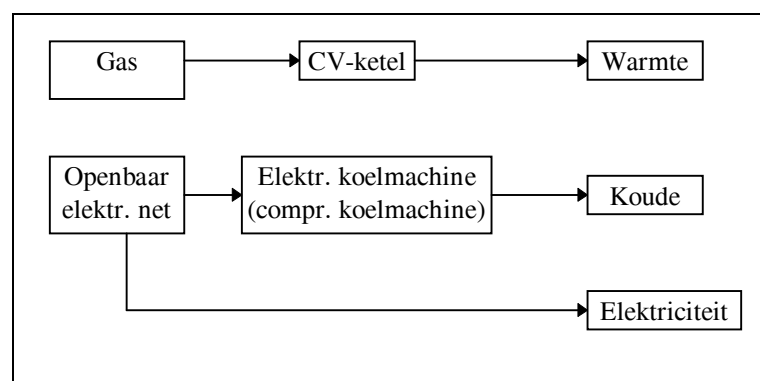
Tabel 5 (primair) energiegebruik voor transport, warmte- en koudeopwekking in twee referentie installaties.

	VAV installatie		Vierpijps inductie installatie	
Transport	32.600 m <sup>3</sup> aeq	25%	26.900 m <sup>3</sup> aeq	30%
Warmte opwekking	60.500 m <sup>3</sup> aeq	46%	33.400 m <sup>3</sup> aeq	37%
Koude opwekking	37.300 m <sup>3</sup> aeq	29%	29.900 m <sup>3</sup> aeq	33%

Met name voor systemen met natuurlijke koeling (vrije koeling) is het energiegebruik voor transport een factor van betekenis, omdat in dit geval het opwekkingsrendement “oneindig groot” is (en daarmee het systeemrendement voor koeling geen reële betekenis heeft).

### Energie conversie systemen voor koeling

In de conventionele klimaatinstallaties wordt warmte meestal geleverd door CV-ketels of een stadsverwarmingsnet, koude door een elektrisch gedreven compressiekoelmachine en elektriciteit door het openbare net (Figuur 7).



Figuur 7 Conventionele energie conversie in de utiliteitsbouw

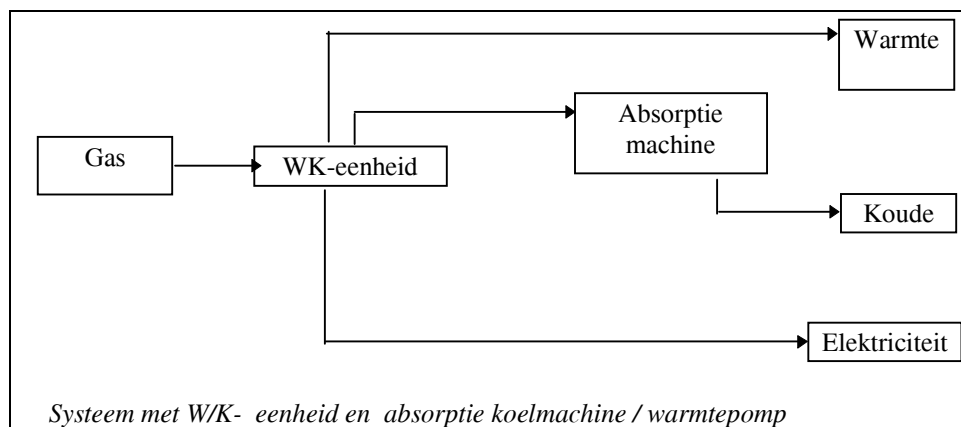
### Behoeften voorziening op gas

Er is een trend naar energievoorziening die nog slechts op één energiedrager berust in plaats van op gescheiden energiedragers voor warmte (gas) en koude (elektriciteit). Bij een energievoorziening op gas, dient echter wel elektriciteit beschikbaar te zijn voor de gebruikelijke elektrische apparatuur zoals verlichting en kantoorapparatuur. Hierin kan voorzien worden door middel van warmte-kracht koppeling (WKK). Een W/K eenheid is een met gas aangedreven elektriciteitsgenerator, waarbij gelijktijdig warmte wordt geproduceerd. Deze warmte voorziet in de winter direct in de warmtebehoefte.

De koudevoorziening (voor koeling en ontvochtiging) kan - bij een behoeften voorziening op gas - worden geleverd met behulp van een absorptie koelmachine<sup>1</sup>

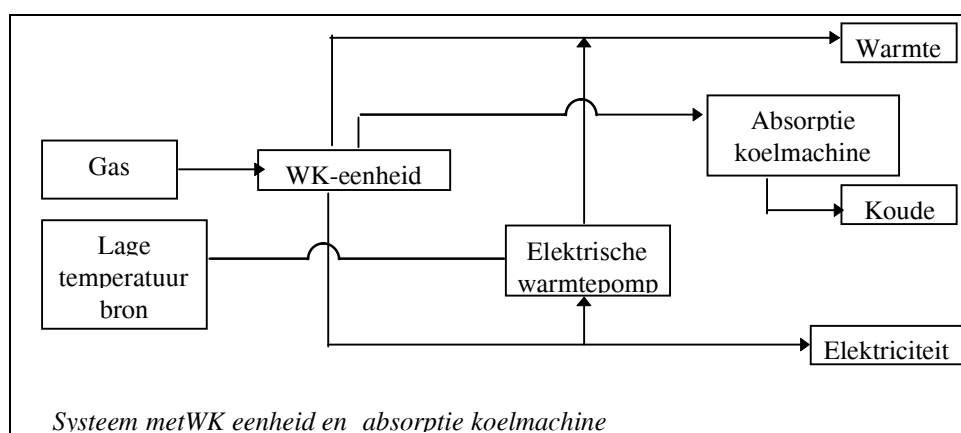
<sup>1</sup> Absorptie koelsystemen worden in hoofdstuk 4 behandeld

of met behulp van cascadekoeling (DEC: Desiccative Evaporative Cooling)<sup>1</sup>. Hiervoor kan de warmte worden gebruikt die door de W/K eenheid wordt geleverd (Figuur 8).



Figuur 8 Behoeften voorziening op gas.

Bij de combinatie W/K - eenheid met absorptiekoelmachine (zoals afgebeeld in Figuur 8), is een optimale behoeften voorziening alleen mogelijk indien er een “balans” is tussen de benodigde hoeveelheid elektriciteit en de hoeveelheid warmte (wintersituatie) c.q. koude (zomersituatie). Doorgaans is in de gebouwde omgeving behoefte aan een verhouding warmtelevering / elektriciteitslevering (Q/E) van circa 5:1, terwijl de W/K -eenheid een Q/E levering heeft van circa 2:1. Een elektrische warmtepomp<sup>2</sup> kan dan worden gebruikt om een deel van de geproduceerde elektriciteit “om te zetten” in warmte, zoals afgebeeld in Figuur 9. [5]



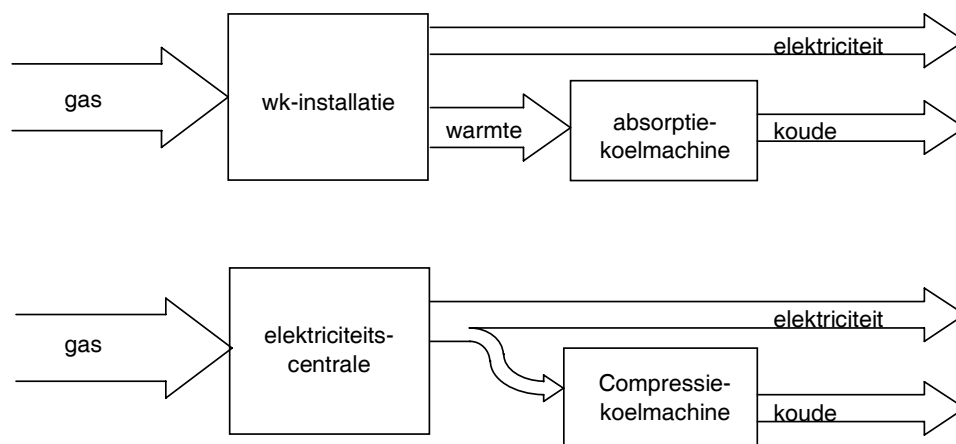
Figuur 9 W/K - eenheid met “verhoogde warmtelevering” door inzet van een elektrische warmtepomp

<sup>1</sup> DEC systemen worden in hoofdstuk 6 behandeld.

<sup>2</sup> De warmtepomp wordt behandeld in hoofdstuk 4.

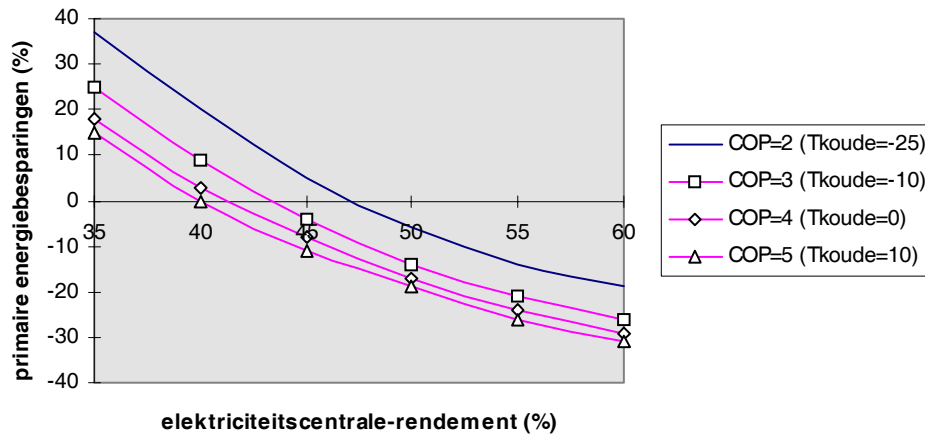
Ook de omgekeerde situatie, waarin de warmtelevering te hoog is bij een volledige inzet van de W/K - eenheid voor eigen elektriciteitsproductie, is denkbaar. Deze situatie, wordt behandeld in hoofdstuk 4 (Figuur 23).

Uit een studie [48] is gebleken dat een wk-installatie in combinatie met een absorptiekoelmachine energetisch vaak minder goed presteert dan het conventionele energieconversiesysteem. In Figuur 10 zijn de energiestromen voor beide systemen weergegeven, waarbij geen sprake is van warmtelevering.



*Figuur 10* Energiestromen WK+absorptiekoelmachine en conventioneel conversiesysteem waarbij geen warmte geleverd wordt

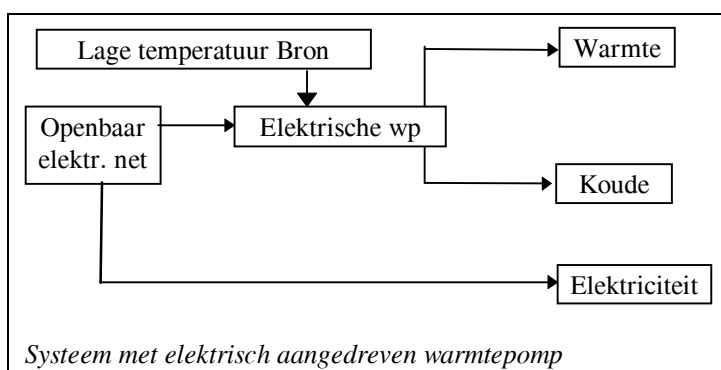
Bij een compressiekoelmachine is de COP sterk afhankelijk van het temperatuurniveau waarop de koude geleverd wordt. Bij het vergelijken van de conversiesystemen is het daarom zaak om dit voor verschillende temperatuurniveaus te doen. In Figuur 11 is weergegeven hoe de energiebesparing van WK in combinatie met een absorptiekoelmachine t.o.v. het conventionele systeem afhangt van het elektriciteitscentrale-rendement en het temperatuurniveau van koudelevering en dus van de COP van de compressiekoelmachine. Hierbij is uitgegaan van een voor beide systemen gelijke koudeproductie van 1000 kW en een eveneens gelijke elektriciteitsproductie van 1346 kW. De absorptiekoelmachine heeft een COP gelijk aan 0.65 en de WK-installatie heeft een elektrisch rendement van 35% en een thermisch rendement gelijk aan 40%. Te zien is dat bij hogere elektriciteitscentrale-rendementen de besparing negatief wordt.



Figuur 11 Primaire energiebesparing wk+absorptiekoeling t.o.v. conventioneel conversiesysteem,  $COP_{abs.koelmach.}=0.65$ ,  $\eta_{el.wk}=35\%$ ,  $\eta_{th.wk}=40\%$

### Behoeftenvoorziening op elektriciteit.

Bij een energievoorziening door elektriciteit wordt de warmte elektrisch opgewekt, waarvoor gebruik gemaakt wordt van een warmtepomp (Figuur 12). Daarbij is het dan wel noodzakelijk dat er warmte op een laag temperatuurniveau beschikbaar is als bron voor de warmtepomp. Hierbij wordt veelal gebruik gemaakt van bodemwarmte of warmte uit ventilatie- of buitenlucht. In de woningbouw zijn dergelijke systemen momenteel sterk in opkomst; in de utiliteitsbouw kennen we al enige tijd de systemen met warmte en koude opslag in aquifers (waterhoudende ondergrondse lagen), gecombineerd met warmtepompen.



Figuur 12 Behoeftenvoorziening volledig door elektriciteit gedekt

### Alternatieve vormen van energievoorziening.

Naast de traditionele vormen van energievoorziening (electriciteit en gas), komen ook andere vormen van energievoorziening steeds vaker voor, zoals stadsverwarming, industriële restwarmtebenutting en stadskoeling.

(een voorbeeld van stadskoeling wordt behandeld in hoofdstuk 4). Deze alternatieve voorzieningen komen vaak voort uit de wens om “afval” warmte te benutten. In veel gevallen kunnen - bij een levering van warmte - technieken worden toegepast die varianten zijn van de eerdere genoemde behoeften voorziening op gas.

Recent staat ook de duurzame energievoorziening in het middelpunt van de aandacht. Duurzame bronnen kunnen zowel op centraal niveau worden ingezet voor de productie van elektriciteit of warmte (windenergie-, biomassa- en zonne-energie centrales), of lokaal worden toegepast binnen een gebouwstelsel (zonne-energie, geothermische energie, gebruik van buitenlucht door middel van bodemopslag en/of warmtepomp).

Samengestelde technieken (combinaties van W/K systemen, absorptiekoeling, warmtepompsystemen e.d.) bieden gunstige voorwaarden voor aansluiting op alternatieve energie voorziening en benutting van duurzame energiebronnen. In hoofdstuk 4, “state of the art energiebesparende systemen”, worden een aantal samengestelde technieken verder uitgewerkt.

Tabel 6 Alternatieve vormen van energievoorziening in de utiliteitsbouw.

<b>Alternatieve energievoorziening</b>	<b>Duurzame energievoorziening</b>
Warmte - Kracht koppeling (WKK)	Zonne energie (PV en thermisch)
Stadsverwarming	Geothermische energie
Stadskoeling	Biomassa
Restwarmtebenutting	Buitenlucht m.b.v. Bodemopslag
	Buitenlucht m.b.v. Warmtepomp



### 3. Conventionele koelmachines

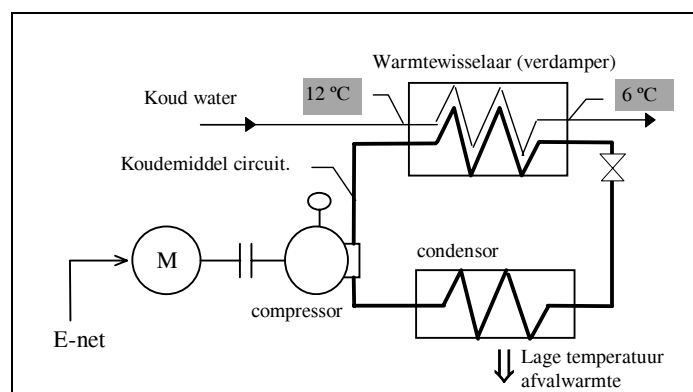
In dit hoofdstuk wordt aandacht besteed aan de op dit moment meest toegepaste koelmachines. Zoals reeds vermeld in hoofdstuk 2, wordt 98% van alle koude opwekking voor klimatisering in de utiliteitsbouw nu verzorgd door (elektrisch aangedreven) compressie koelmachines. Daarnaast bestaan de door warmte aangedreven absorptie koelmachines. Tot slot worden warmtepompen - die tot nu toe in hoofdzaak worden gebruikt voor de opwekking van warmte - ook ingezet voor de levering van koude. In dit hoofdstuk worden deze koelmachines, in de meest eenvoudige uitvoering, behandeld:

- Mechanische compressie koeling
- Absorptie koelmachine
- Warmtepompen

#### Mechanische compressie koeling

De meest voorkomende vorm van koude opwekking in de utiliteitsbouw is het koud water aggregaat (water chiller). Doorgaans is dit een elektrisch aangedreven compressie koelmachine, die koud water levert.

Bij een compressiekoelmachine zuigt een compressor uit de verdamper een koudemiddeldamp aan, die door compressie op een hogere druk wordt gebracht. De compressor wordt elektrisch aangedreven. Het koudemiddel wordt naar de condensor geleid waar het tot vloeistof condenseert en daarbij (afval)warmte afgeeft. Vervolgens vindt in het expansieventiel een reductie van de druk plaats, waarna het vloeibare koudemiddel in de verdamper bij deze lagere druk tot verdamping komt. Hierbij wordt warmte aan water of aan lucht onttrokken, of anders gezegd koude afgegeven.



Figuur 13 Principe schema van een koudwater aggregaat (12°C / 6°C) met compressie koeling

Wanneer de koude wordt afgegeven aan water, spreken we van een koud water aggregaat. Bij koude afgifte aan de lucht spreken we van een “DX systeem”.

Voor het opwekkingsrendement van koelmachines wordt de afkorting C.O.P. gebruikt. De Coëfficiënt Of Performance is gelijk aan de nuttige koudelevering gedeeld door het opgenomen vermogen.

Het ontwerp van een koelsysteem bepaalt in grote mate het te behalen energetische rendement, oftewel de C.O.P. Het rendement neemt toe, naarmate de “koude” en de “warme” zijde van de koelmachine (de verdampings- en condensatietemperatuur) dichter bij elkaar liggen in temperatuur, met andere woorden bij een minimale temperatuur “lift”. Het is daarom energetisch gezien zinvol om de temperatuur van het gekoeld water zo hoog mogelijk te kiezen, terwijl tegelijkertijd gezocht moet worden naar manieren om de temperatuur van de warmte - afgifte (condensor) zo laag mogelijk te houden.

ISSO Publikatie 43 [6] geeft de volgende gebruiksrendementen voor koelmachines met verschillende typen compressoren als richtlijn:

- zuigercompressoren C.O.P. = 2 - 4,7
- schroefcompressoren C.O.P. = 2 - 7,0
- centrifugaalcompressoren C.O.P. = 4 - 8,0

In de Nederlandse Energie Prestatie Normering NEN 2916 (zowel in de bestaande versie uit 1994 als in het ontwerp van 1998) wordt een C.O.P. van 4,0 aangehouden voor alle compressiekoelmachines [2,3]. Hierbij moet bedacht worden dat het hier gaat om een jaargemiddelde C.O.P., dus bij variërende buitencondities en deellastbedrijven.

Het capaciteitsbereik van zuigercompressoren loopt uiteen van enkele tientallen Watts tot circa 700 kW; van circa 80 tot circa 3.500 kW voor schroefcompressoren en van circa 300 tot circa 30.000 kW voor centrifugaalcompressoren. Zuigercompressoren zijn relatief het goedkoopst in de aanschaf, maar vergen meer onderhoud en hebben een kortere levensduur dan schroef- en centrifugaalcompressoren.

In de voorgaande decennia werden CFK's (Chloor - Fluor Koolwaterstoffen) toegepast als koudemiddel in de gesloten koelkringloop. Vanwege de ozonlaag aantastende eigenschappen van CFK's, is het gebruik ervan in koelmachines begin jaren '90 verboden. De huidige generatie compressie koelmachines is CFK vrij. Wel is het nog een aantal jaren toegestaan om HCFK's te gebruiken, die eveneens een schadelijk effect op de ozonlaag hebben, zij het in veel mindere mate.

De Rijksgebouwendienst geeft de voorkeur aan ammoniak als koudemiddel, samen met HFK 134a [7]. Koelen met ammoniak levert een laag energiegebruik en een lage milieubelasting op [8]. In verband met de hoge te stellen eisen aan de



veiligheid van de installatie gevuld met ammoniak, zijn de investeringen 15 à 30% hoger dan bij HFK 134a. De levensduur van de installatie is echter langer. Door de combinatie van deze effecten zullen de verschillen in levensduurkosten beperkt zijn. Ammoniak wordt voornamelijk toegepast voor koelmachines groter dan circa 100 kW, alhoewel momenteel veel ontwikkelingswerk wordt besteed aan kleinere ammoniak installaties.

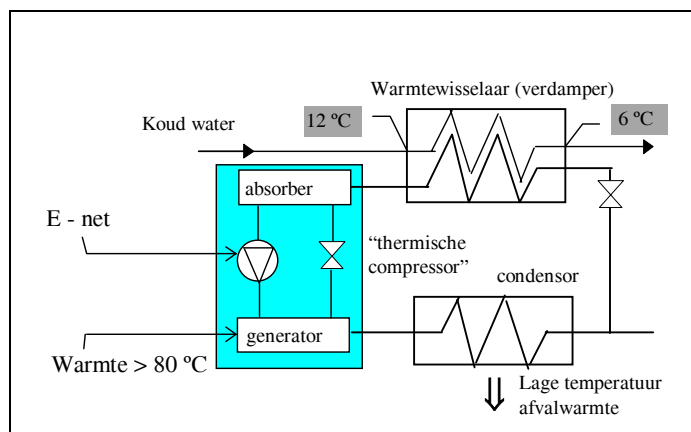
In hoofdstuk 6 worden de huidige ontwikkelingen en innovaties op het gebied van compressoren geschetst.

### Absorptie koelmachine

Een absorptie koelmachine bestaat uit dezelfde onderdelen als de compressie koelmachine, maar in plaats van een elektrisch aangedreven compressor, is er bij een absorptiekoelmachine sprake van een “thermische compressor” die door warmte aangedreven wordt. De absorptiemachine werkt met een zogenaamd stoffenpaar. In de absorber wordt één stof in oplossing gebracht in de andere stof (onder warmte-opname); in de generator wordt door toevoer van warmte het stoffenpaar weer gescheiden.

Elektriciteit is alleen nog benodigd voor de vloeistofpomp in het binnenste van de thermische compressor; kleine absorptiesystemen worden ook wel zonder pomp uitgevoerd. Absorptie koelmachines zijn alleen rendabel als goedkope warmte beschikbaar is.

Bij de aandrijving van een absorptiekoelmachine wordt gebruik gemaakt van hetzij restwarmte van voldoende hoog temperatuurniveau ( $>110^{\circ}\text{C}$ ), die vrijkomt bij de productie van elektriciteit (warmtedistributie, warmte-kracht), hetzij van de warmte van een stoomopwekkingsinstallatie in bijv. ziekenhuizen. De laatste jaren is vooral gewerkt aan het mogelijk maken van lagere temperaturen voor de aandrijving van absorptie koelmachines, om de mogelijkheid van aandrijving met stadsverwarming te openen. Bij de nieuwe generaties absorptie koelmachines is voor de aandrijving warmte van minimaal  $80^{\circ}\text{C}$  benodigd.



Figuur 14 Principe schema van een absorptie koelmachine ( $12^{\circ}\text{C} / 6^{\circ}\text{C}$ )

In vergelijking tot een compressiekoelmachine met dezelfde koelcapaciteit is het gebruik aan primaire energie van een absorptie koelmachine ongeveer tweemaal zo hoog. Een absorptiekoelmachine kan echter toch verantwoord zijn wanneer aan de volgende randvoorwaarden wordt voldaan:

- Wanneer goedkope brandstof aanwezig is (bijvoorbeeld afvalproducten uit de petrochemische industrie).
- Wanneer “afval”warmte beschikbaar is van een voldoende hoog temperatuurniveau (min.80°C)
- Wanneer elektrische energie duur (of niet beschikbaar) is
- Warmwater- of stoominstallaties ‘s zomers een overcapaciteit hebben (bijvoorbeeld stadsverwarming)
- Hoogst mogelijke bedrijfszekerheid (ook bij stroomuitval) bij de koelinstallatie gewenst is. Het vereiste elektrische vermogen voor koudeproductie in een absorptiekoelmachine is gewoonlijk 3 - 10% van het vermogen dat vereist wordt voor een overeenkomstige compressiekoelmachine.

Rendementscijfers, ontleend aan ISSO publicatie 43 [6] zijn:

- ééntraps absorptiekoelmachine C.O.P. = 0,7
- tweetraps absorptiekoelmachine C.O.P. = 1,1 - 1,4

In de Ontwerp NEN 2916:1998 worden absorptiekoelmachines voor koude opwekking gehonoreerd met een C.O.P. van 0,7 (wanneer aangedreven door stadsverwarming) of 1,0 (wanneer aangedreven door een WKK systeem). Voor een vergelijking met compressie koeling is het echter onjuist om de C.O.P.'s te vergelijken; eerder moet (vanuit energetisch oogpunt) worden gekeken naar de verhouding tussen de opwekkingsrendementen betrokken op primaire energie:

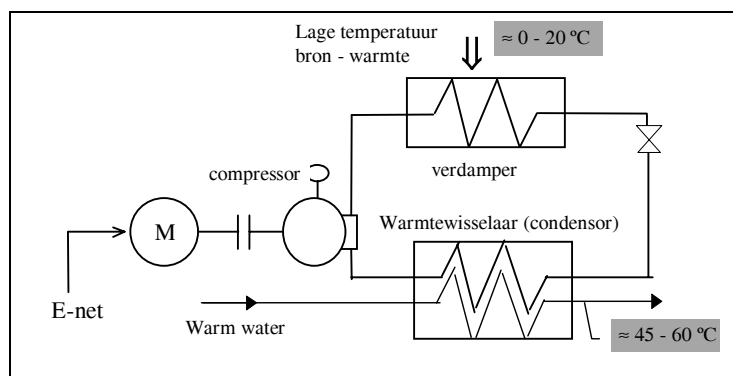
Opwekkingsrendement compressiekoelmachine:	$4,0 * \eta_{el}$	
Opwekkingsrendement absorptiekoelmachine:	$0,7 * \eta_{warmte}$	(stadsverwarming)
Opwekkingsrendement absorptiekoelmachine:	$1,0 * \eta_{WKK}$	(WKK)

Voor het economisch perspectief is het zinvol om de kosten per geleverde kWh koeling te vergelijken van de compressiekoelmachine en de absorptiekoelmachine.

$$\text{Kosten per kJ koude} = \text{kosten per kJ energiedrager} / \text{C.O.P.}$$

## Warmtepompen

De warmtepomp is in de meest voorkomende uitvoering een koelmachine met een hogere condensatie temperatuur (Figuur 15). In een koelmachine wordt de verdamper benut voor de onttrekking van warmte aan een te koelen medium, de onttrokken warmte wordt (als lage temperatuur “afval” warmte) via de condensor afgevoerd. In een warmtepomp wordt de door de condensor geleverde warmte gebruikt voor verwarmingsdoeleinden, de verdamper wordt gevoed met beschikbare warmte van een laag temperatuurniveau.



Figuur 15 Principe van een elektrisch aangedreven compressie warmtepomp

Naast de elektrisch aangedreven compressie warmtepomp, is ook een uitvoering mogelijk waarbij de compressor door een verbrandingsmotor wordt aangedreven. Bij een dergelijke zogenaamd “gasmotorwarmtepomp” kan het verwarmingsmedium (“warm water”), nadat het is opgewarmd in de condensor, naverwarmd worden met de uitlaatgassen van de verbrandingsmotor. Ook de “afval” warmte van de gasmotor kan toegevoegd worden aan het warm water, en draagt zodoende bij aan de totale warmtelevering van de gasmotor warmtepomp.

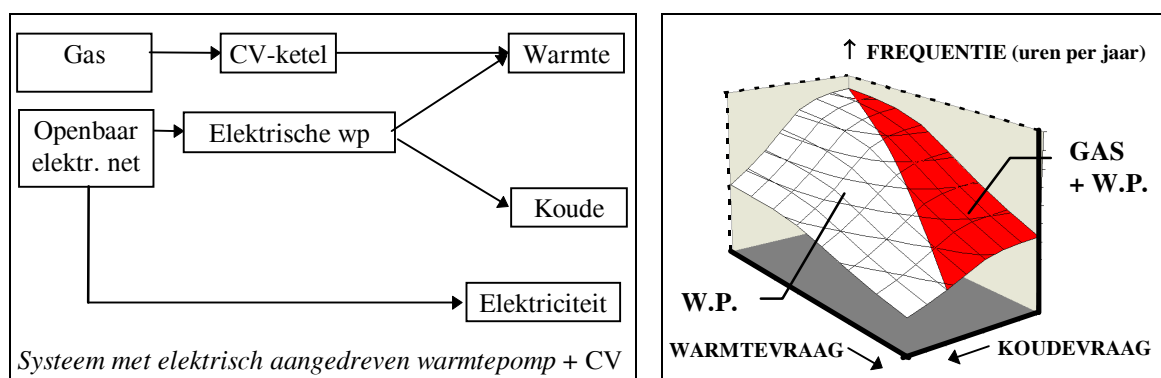
Warmtepompen zijn voor verwarming én voor koeling te gebruiken. Vooral wanneer tegelijkertijd warmte en koude vereist zijn, is een warmtepomp een uitstekende oplossing. Als de warmte en koude niet gelijktijdig nodig zijn, kan een (korte termijn) buffer een warmtepomp rendabel maken.

De warmtepomp is een technologie die in staat is om op zeer efficiënte wijze laagwaardige omgevingswarmte of afvalwarmte op te waarden naar een voor de gewenste toepassing bruikbaar temperatuurniveau. Voor de opwekking van warmte gebruikt de warmtepomp, afhankelijk van het type, in vergelijking met CV-ketels ca. 25 tot 50% minder aan primaire energie. Bronnen waaraan warmte kan worden onttrokken zijn: bronwater, oppervlaktewater, grondwater, buitenlucht, de bodem, restwarmte (proceswarmte, speciale ‘zomercontracten’ bij stadsverwarming), zonnecollectoren (toepassing in winter en voor- en naseizoen) en ventilatielucht.

In het ISSO-Handboek Warmtepompen [9], 1996, zijn de praktische kennis en ervaring met betrekking tot het toepassen van warmtepompen in de gebouwde omgeving gebundeld. Het handboek is een gereedschap om verantwoorde en succesvolle toepassingen te realiseren, toegespitst op de Nederlandse situatie. Onderscheid wordt gemaakt in compressie- en absorptie warmtepompen. De compressie warmtepomp wordt weer onderscheiden in het elektromotor- en gasmotorgedreven type.

De warmtepomp kan naast het verwarmen ook gebruikt worden voor het koelen van de ventilatielucht en daarmee van het gebouw. De te behalen energiebesparing is dan sterk afhankelijk van de verhouding tussen de warmte- en koudevraag van het

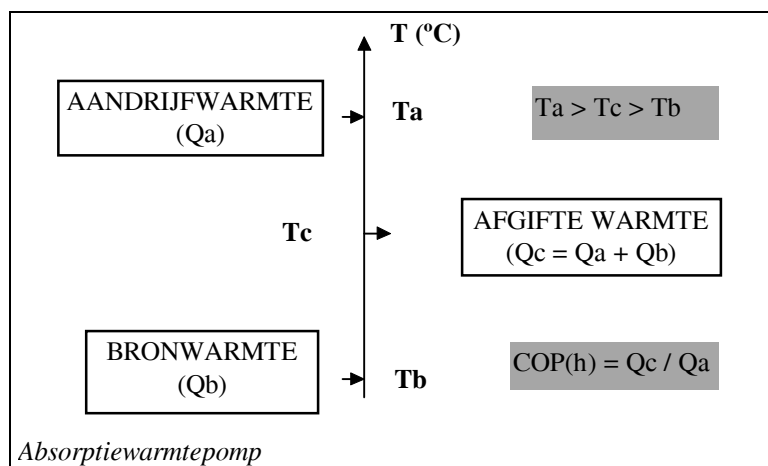
gebouw. De compressie warmtepomp wordt namelijk veelal gedimensioneerd op de maximale koudebehoefte in de zomer en op grond van die capaciteit levert deze in de winter slechts een deel van de totale warmtebehoefte. Een aanvullende CV-ketel blijft dan nodig. Een dergelijk systeem (combinatie warmtepomp met additionele verwarming) wordt een “bivalent” systeem genoemd. Door betere isolatie en luchtdichtheid van gebouwen is dit nu evenwel aan het veranderen, en kunnen ook “monovalente” systemen (WP zonder additionele verwarming) worden toegepast in de utiliteitsbouw. Overigens is het doorgaans uit economische overwegingen zinvol om een bivalent systeem toe te passen, waarbij pieken in de warmtevraag worden opgevangen met een conventioneel verwarmingssysteem, en de warmtepomp een “basislast” levert. Op deze wijze kan een kleinere (en dus goedkopere) warmtepomp worden gebruikt, die dan bovendien bij vollast bedreven kan worden.



Figuur 16 Bivalent systeem: een combinatie van elektrische Warmtepomp voor gelijktijdige levering van koude en warmte, en CV - ketel. Indien niet voldoende warmte wordt geleverd door de warmtepomp (W.P.) wordt met gas bijgestookt.

De relatief grootste energiebesparing kan worden bereikt in gebouwen met een relatief lage warmtebehoefte, omdat het aandeel van de CV-ketel in de totale warmtelevering beperkt blijft. In gebouwen waar naast een warmtevraag tevens een koelvraag bestaat (bijvoorbeeld computerruimten) wordt de grootte en de inpassing van de warmtepomp zodanig gekozen dat de geleverde en onttrokken warmte steeds benut kunnen worden. Om dit mogelijk te maken kan korte-termijnopslag en/of lange-termijnopslag een voorwaarde zijn.

Er zijn ook warmtepompen die door warmte worden aangedreven. Deze absorptie-warmtepompen kunnen soms rendabel worden toegepast in combinatie met een warmte/kracht-eenheid (zie Figuur 8).



Figuur 17 Principe absorptie warmtepomp  
( $Q$  = warmtehoeveelheid,  $T$  = temperatuurniveau)

In tegenstelling tot absorptiekoelmachines worden absorptiewarmtepompen niet in serie gebouwd. De machine wordt per project door de fabrikant ontworpen en samengebouwd. Aanbevolen wordt de fabrikant in een zo vroeg mogelijk stadium bij het ontwerp te betrekken [9].

Absorptiewarmtepompen worden ook wel toegepast in combinatie met:

- stadsverwarming (speciale ‘zomercontracten’)
- zonnecollectoren

De grootte van de momentane COP of PER van een warmtepomp is sterk afhankelijk van de optredende bedrijfscondities. Er bestaat een berekeningsmethode voor het bepalen van de COP op jaarbasis [9]. Bij de bepaling is o.a. de belastingduurkromme van de warmtepomp van belang. Verder is de jaarCOP afhankelijk van:

- soort warmtepomp
- soort warmtebron
- temperatuurniveau warmte-gebruikers bij ontwerpcondities van het warmtepompsysteem
- soort warmtepompbedrijf (monovalent, alternatief bivalent of parallel bivalent)

Bij een alternatief bivalent systeem werken de warmtepomp en de additionele warmte-opwekker niet gelijktijdig, wat wel het geval kan zijn bij een parallel bivalent systeem.

In de Tabellen 7 t/m 10 zijn richtwaarden gegeven voor de verschillende mogelijkheden. De afkortingen EWP, GMWP en AWP staan respectievelijk voor elektrische warmtepomp, gasmotorwarmtepomp en absorptiewarmtepomp.

Tabel 7 Richtwaarden voor COP en PER op jaarbasis voor monovalent bedrijf

Soort warmtebron	Ontwerpaanvoertemperatuur warmtegebruikers (60 °C)			Ontwerpaanvoertemperatuur warmtegebruikers (40 °C)		
	EWP (COP <sub>s</sub> )	GMWP (PER)	AWP (PER)	EWP (COP <sub>s</sub> )	GMWP (PER)	AWP (PER)
Buitenlucht/energiedak	2,6	1,4	1,1	3,2	1,6	1,4
Bodem	2,8	1,5	1,2	3,5	1,7	1,5
Grondwater	3,5	1,7	1,4	4,7	2,0	1,8
Oppervlaktewater	3,2	1,6	1,3	4,1	1,9	1,7
Grondwater met energie- opslag	3,6	1,8	1,5	4,8	2,1	1,9

Tabel 8 Richtwaarden voor de COP en PER op jaarbasis bij een ontwerptemperatuur van de warmtegebruikers van ca. 70 °C (bijvoorbeeld 70-50 °C verwarmingssystemen zoals radiatoren, convectoren, indirecte luchtverwarming).

Soort warmtebron	Bedrijfswijze					
	Alternatief			Paralleel		
	EWP (COP <sub>s</sub> )	GMWP (PER)	AWP (PER)	EWP (COP <sub>s</sub> )	GMWP (PER)	AWP (PER)
Buitenlucht/energiedak	2,7	1,5	1,2	2,6	1,4	1,1
Bodem	2,9	1,6	1,3	2,7	1,5	1,2
Grondwater	3,5	1,8	1,4	3,3	1,7	1,3
Oppervlaktewater	3,1	1,7	1,3	3,0	1,6	1,2
Grondwater met energie- opslag	3,6	1,9	1,5	3,4	1,8	1,3

Tabel 9 Richtwaarden voor de COP en PER op jaarbasis bij een ontwerptemperatuur van de warmtegebruikers van ca. 60 °C (bijvoorbeeld 60-40 °C verwarmingssystemen, zoals radiatoren, convectoren, indirecte luchtverwarming en tapwaterverwarming).

Soort warmtebron	Bedrijfswijze					
	Alternatief			Paralleel		
	EWP (COP <sub>s</sub> )	GMWP (PER)	AWP (PER)	EWP (COP <sub>s</sub> )	GMWP (PER)	AWP (PER)
Buitenlucht/energiedak	2,9	1,6	1,3	2,8	1,5	1,2
Bodem	3,2	1,7	1,4	3,0	1,6	1,3
Grondwater	4,0	1,9	1,6	3,8	1,8	1,5
Oppervlaktewater	3,6	1,8	1,5	3,4	1,7	1,4
Grondwater met energie- opslag	4,1	2,0	1,7	3,9	1,9	1,6

Uitgangspunten bij Tabel 7 t/m Tabel 9:

- EWP/GMWP:  $A = 0,45$
- AWP:  $A = 0,60$  (LiBr/H<sub>2</sub>O)
- het warmtepompaandeel bedraagt 30%
- $T_{\text{cond,uit}}$  volgt een stooklijn zolang het warmtepompvermogen kleiner is dan het netto verwarmingsvermogen. Bij een groter netto verwarmingsvermogen blijft  $T_{\text{cond,uit}}$  nagenoeg constant
- Het temperatuurverschil over de verdamper is gelijk gesteld aan het ontwerp-temperatuurverschil van tabel ....
- $T_{\text{verd,in}}$  is ontleend aan de figuren D2 t/m D4
- voor EWP:  $\eta_{\text{elm}} = 0,93$
- voor GMWP  $\eta_{\text{m}} = 0,32$  en  $\eta_{\text{th}} = 0,48$
- voor AWP  $\eta_{\text{gen}} = 0,85$  en  $T_{\text{gen}} = 140$  °C

Tabel 10 Richtwaarden voor de COP en PER op jaarbasis bij een ontwerptemperatuur van de warmtegebruikers van ca. 40 °C (bijvoorbeeld 40-30 °C bij vloerverwarming, stralingsverwarming in lage ruimten, directe luchtverwarming en zwembadwater).

Soort warmtebron	Bedrijfswijze					
	Alternatief			Parallel		
	EWP (COP <sub>s</sub> )	GMWP (PER)	AWP (PER)	EWP (COP <sub>s</sub> )	GMWP (PER)	AWP (PER)
Buitenlucht/energiedak	3,6	1,8	1,6	3,4	1,7	1,5
Bodem	4,0	1,9	1,7	3,8	1,8	1,6
Grondwater	5,4	2,3	2,1	5,1	2,2	2,0
Oppervlaktewater	4,8	2,1	1,9	4,4	2,0	1,8
Grondwater met energie-opslag	5,5	2,4	2,2	5,2	2,3	2,1





## 4. “State of the Art” energiebesparende koelsystemen

State of the Art energiebesparende koelsystemen zijn gebaseerd op twee grondbeginselen:

- het beperken van de koudevraag door gebruik te maken van “natuurlijke koude”
- het (conventioneel) opwekken van koude met een zo laag mogelijk energiegebruik

Doorgaans worden beide aspecten (natuurlijke koude en efficiënte opwekking) in de systemen toegepast, en zijn daarbij niet onafhankelijk van elkaar. In dit hoofdstuk wordt eerst het energie-efficiënt opwekken van koude behandeld (daar dit op zichzelf staand kan worden beschouwd), en vervolgens worden de energiebesparende koelsystemen die gebruik maken van natuurlijke koude behandeld. Achtereenvolgens worden zo behandeld:

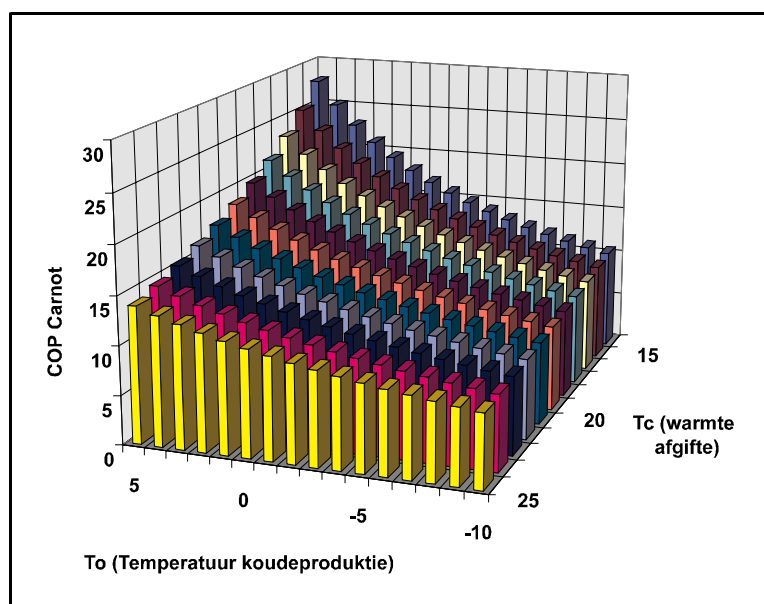
- Efficiënte opwekking: Hoge temperatuur koeling
- Efficiënte opwekking: Vollast versus deellast prestaties
- Benutting van condensorwarmte
- Combinaties van mechanische en vrije koeling
- Verdampingskoeling (adiabatische koeling)
- Korte termijn koude opslag (“Off Peak Air conditioning)
- Lange termijn koude-opslag
- Samengestelde koelmethoden

### HT (hoge temperatuur) koeling

De C.O.P. van een koelmachine is de verhouding tussen de geleverde koude (in Watt) en het opgenomen elektrische vermogen (in Watt) en is dus een dimensieloos getal. De maximumwaarde van de C.O.P. wordt bepaald door de wetten van de thermodynamica, en wordt de “Carnot koudefactor” genoemd. Deze Carnot koudefactor ( $\epsilon_{\text{Carnot}}$ ) is slechts afhankelijk van de temperaturen waarbij de koude wordt geproduceerd ( $T_o$ ) en waarbij de “afval”warmte via de condensor wordt afgegeven ( $T_c$ ):

$$(\epsilon_{\text{Carnot}}) = T_o / (T_c - T_o)$$

In de bovenstaande formule dienen de temperaturen te worden opgenomen als absolute temperaturen. De uitwerking van deze formule, voor praktische waarden van  $T_o$  en  $T_c$ , is gegeven in Figuur 18.



Figuur 18 De Carnot koudefactor als functie van warmte koudeproductie- en “afval” warmte afgifte temperatuur

De werkelijke efficiëntie van de koude opwekking (C.O.P.) is evenredig met de Carnot koudefactor; bij een hoge Carnot koudefactor kan ook een hoge C.O.P. worden bereikt.

Uit Figuur 18 blijkt dat de Carnot koudefactor - en daarmee de C.O.P. van de koelmachine - hoger wordt, naarmate de temperaturen van koude productie en warmte afgifte dichter bij elkaar liggen. Dit is de reden waarom moet worden getracht de temperatuur van de koude productie (ook wel de “verdampingstemperatuur” genoemd) altijd zo hoog mogelijk te kiezen.

In koudwateraggregaten kan door het “loslaten” van een vaste aanvoertemperatuur van gekoeld water (bijvoorbeeld gedurende perioden waarin de koelbehoefte niet maximaal is) worden volstaan met gekoeld water van een hogere temperatuur, waardoor de efficiëntie van de koude opwekking toeneemt (per graad Celcius temperatuurverhoging kan de C.O.P. met circa 3% toenemen). Om continu koude te kunnen leveren op een hoog temperatuurniveau, kan gebruik gemaakt worden van koelplafonds. Door het grote warmte-overdragend oppervlak van een koelplafond, is een minimaal temperatuurverschil (tussen koelwater en lucht) benodigd om toch reeds grote hoeveelheden warmte te kunnen afvoeren. Overigens is een (relatief) hoog temperatuurniveau bij koelplafonds niet alleen wenselijk uit het oogpunt van energie-efficiëntie, maar ook noodzakelijk om condensvorming op het koelplafond te voorkomen.

Om werkelijk voordeel te hebben van hoge temperatuur koeling, moet er wel voor worden gezorgd dat de koelmachine ook werkelijk op een hoger temperatuurniveau koude produceert. Dit zal bijvoorbeeld niet lukken, wanneer met hetzelfde

koelsysteem ook in de ontvochtigingsfunctie wordt voorzien - waarvoor toch weer een lage temperatuur (water 6 °C / 12 °C) benodigd is. In dit geval kan het uitkomst bieden om de koeling en de ontvochtiging te ontkoppelen (separate koelmachines), of om de ontvochtiging op een andere wijze dan door koeling te laten plaatsvinden (bijvoorbeeld door een sorptiesysteem).

De compressie warmtepomp werkt met hetzelfde principe als de compressie koelmachine. Ook hier moeten, voor een goede energie efficiëntie, de temperatuurniveaus van warmte-afgifte en warmte-onttrekking zo dicht mogelijk bij elkaar worden gekozen. Dit betekent dat de warmtepomp bij voorkeur moet worden uitgevoerd met een lage temperatuur afgifte systeem, zoals vloerverwarming of een klimaatplafond.

### **Deellast regeling**

Doorgaans worden de prestaties van koelmachines vergeleken bij “vollast” prestaties, dat wil zeggen dat de levering van de koelmachine maximaal is. Grotere koelmachines kunnen echter ook in “deellast” worden bedreven, dus met een lagere koudeproductie (ofwel “capaciteit”). In vrijwel alle gevallen daalt echter de C.O.P. bij deellast aanzienlijk ten opzichte van het vollastrendement; alleen bij koelmachines die zijn voorzien van toerenregeling neemt het rendement toe in deellast.

In de klimaattechniek wordt toerenregeling bij centrale systemen nauwelijks toegepast (uitzondering zijn de in hoofdstuk 6 behandelde multi-split DX systemen), en dient derhalve deellastbedrijf zo veel mogelijk voorkomen te worden. Dit kan gebeuren door middel van goed gedimensioneerde buffersystemen, die ervoor zorgen dat de machine uitsluitend in vollast produceert. Een alternatief, voor het geval deellastbedrijf niet door middel van een buffersysteem voorkomen kan worden, is het “parallel” schakelen van enkele kleinere koelcompressoren in plaats van het toepassen van één grote compressor. Op die manier kan de koelcapaciteit in stappen worden geregeld. “Slimme” parallel schakelingen maken gebruik van compressoren van verschillende grootte, bijvoorbeeld in de verhouding 1:2:4. Met een dergelijke combinatie kan de totale capaciteit in 7 stappen worden ingeschakeld.

### **Benutting van condensorwarmte**

De koelmachine onttrekt warmte aan het te koelen medium (doorgaans lucht of water), en geeft deze warmte af via de condensor van het koelsysteem. Doorgaans wordt deze warmte naar de buitenlucht afgevoerd. Wanneer echter sprake is van een warmtebehoefte op een laag temperatuurniveau (tijdens het koelbedrijf), dan kan daarvoor de condensorwarmte worden gebruikt. Alhoewel het geen besparing vormt op het energiegebruik voor koude opwekking, is toch sprake van een energiebesparing voor de klimaatinstallatie als geheel. Het is ook mogelijk om het

temperatuurniveau van de warmte-afgifte van het koelsysteem te verhogen (de condensatietemperatuur), daarbij treedt echter een verslechtering van het rendement van de koelmachine op. De “winst” door condensorwarmte benutting moet worden afgewogen tegen verlies aan efficiëntie van de koelmachine. Een koelmachine waarvan de condensorwarmte wordt benut, kan per definitie worden beschouwd als een warmtepomp.

## **Combinaties van mechanische en vrije koeling**

Bij gebouwen met een geringe koudevraag kan een elektrische koelmachine worden uitgespaard door gebruik te maken van vrije koeling; in andere gevallen kan vrije koeling worden benut om het aandeel van de koudelevering door mechanische koeling in de totale koudelevering te verkleinen. Van vrije koeling kan gebruik worden gemaakt op de volgende manieren:

- Buitenluchttoevoer door regelbare gevelroosters en te openen ramen, in combinatie met een thermisch-open plafond en mechanische afzuiging
- ‘s Nachts te ventileren
- ‘s Zomers de warme buitenlucht aan te voeren via een (kunststof) kanalenstelsel in de (koele) grond
- De combinatie verdampingskoeling (m.b.v. een koeltoren) en koelplafond

### *Regelbare ventilatieroosters*

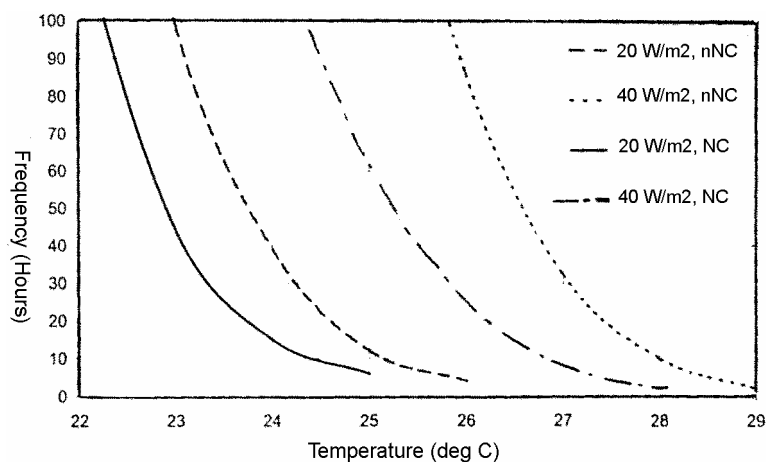
Vrije koeling met buitenlucht is toe te passen bij kantoorgebouwen met een lage interne warmtelast. Bij vrije koeling worden bij voorkeur thermisch-open plafonds toegepast en mechanische afzuiging. Luchttoevoer vindt plaats door regelbare gevelroosters en te openen ramen. Vaak is daarbij nachtventilatie noodzakelijk. De gevelroosters moeten in staat zijn overdag de ventilatielucht door te laten en ‘s nachts de nachtventilatie voor warmte-uitwisseling. Bij zeer warme dagen kan additionele mechanische koeling noodzakelijk zijn, om toch aan de comforteisen te kunnen voldoen. Dit is vanzelfsprekend afhankelijk van het in de comforteisen vastgelegde aantal uren dat een overschrijding van de gewenste temperatuur wordt toegestaan (GTO).

### *‘s Nachts ventileren*

Bij mechanisch geventileerde gebouwen kan overwogen worden het gebouw gedurende de warme perioden in de zomer, ook ‘s nachts mechanisch te ventileren. Natuurlijke ventilatie, waarbij geen ventilatoren nodig zijn, is een tweede optie. De massa van het gebouw zal dan enigszins afkoelen. Door accumulatie (SWM) zal de temperatuursverhoging overdag worden gedempt en op een later tijdstip optreden. Overdag is dan minder koeling vereist. Bij mechanische nachtventilatie moet de te behalen besparing worden afgewogen tegen het meerverbruik aan elektriciteit van de ventilatoren.

### a) *Mechanische nachtventilatie*

Door het 's nachts mechanisch ventileren van utiliteitsgebouwen gedurende de zomer kan het mechanisch koelen overdag sterk teruggedrongen worden. Belangrijke parameters zijn o.a. de warmtelast van het gebouw, de thermische massa en het ventilatievoud waarmee 's nachts geventileerd wordt. Britse onderzoekers hebben een aantal simulaties uitgevoerd om te kijken in hoeverre de temperatuur in een gebouw overdag verlaagd kan worden door mechanische nachtventilatie [50]. In Figuur 19 is een frequentieverdeling weergegeven van de temperatuur in een typisch kantoorgebouw in Engeland, zowel voor het geval waarbij men nachtventilatie toepast als voor het geval waarbij men geen nachtventilatie gebruikt. Hierbij heeft men gebruik gemaakt van weerdata van Londen Heathrow voor de maanden juni tot september. Men heeft de simulaties uitgevoerd voor twee interne warmtelasten van het gebouw (20 en 40 W/m<sup>2</sup>). Het ventilatievoud was zowel 's nachts als overdag gelijk aan 4 (bij de simulaties zonder nachtventilatie was het ventilatievoud overdag gelijk aan 4). Te zien is dat de temperaturen in het gebouw 1 à 1.5 °C lager liggen wanneer nachtventilatie toegepast wordt. Door 's nachts grotere ventilatievoud toe te passen zal de temperatuurreductie overdag groter worden. Ook bij gebouwen met een grotere thermische massa zal nachtventilatie effectiever zijn.



Figuur 19 Frequentieverdeling van de temperatuur in een kantoorgebouw indien wel en geen nachtventilatie toegepast wordt bij verschillende warmtelasten. NC = nachtventilatie, nNC = geen nachtventilatie

### b) *Natuurlijke nachtventilatie*

Uit een recent onderzoek [49] is gebleken dat het natuurlijk ventileren van gebouwen in de zomer zeer effectief kan zijn bij het terugdringen van de dagelijkse koellast. Voor een referentiejaar in Nederland zijn verschillende simulaties uitgevoerd. De meest effectieve vorm van natuurlijke ventilatie is kruisventilatie. Hierbij kan de buitenlucht door de gevelopeningen en via openingen in de gangwanden dwars

door het gebouw stromen. Voor middelzware gebouwen met niet meer dan 40% raamoppervlak is een effectieve opening van ten minste 2% van het vloeroppervlak gewenst (= 0.4 m<sup>2</sup> voor een standaard vertrek). Indien de interne warmtelast van het gebouw niet boven 25 W/m<sup>2</sup> komt, dan worden de jaarlijkse comforteisen ( $T_{\text{vertrek}} > 25.5$  °C niet meer dan 100 uur per jaar) niet overschreden. Voor zware gebouwen is dit 30 W/m<sup>2</sup>. Indien geen nachtventilatie toegepast zou worden wordt bij een interne warmtelast van 15 W/m<sup>2</sup> de comforteisen al overschreden.

#### *Luchttoevoer via (kunststof) buizen in de (koele) grond*

Bij gebouwen met een geringe koudevraag kan mechanische koeling worden voorkomen of worden beperkt door 's zomers de warme buitenlucht aan te voeren via een (kunststof) kanalenstelsel in de (koele) grond. Dit kanalenstelsel moet 's nachts weer worden afgekoeld. Dit kan door er frisse buitenlucht doorheen te voeren. Het geheel vereist weer extra ventilatorenergie. Een kosten-baten analyse moet uitsluitsel geven over de attractiviteit van het systeem per individuele toepassing.

Een praktijkvoorbeeld van een dergelijk systeem, zonder additionele mechanische koeling [10] geeft de informatie zoals vermeld in Tabel 11.

*Tabel 11 Verbetering van thermisch comfort met luchttoevoer via grondbuizen, overgenomen uit [10].*

	Referentiesysteem (geen koeling)	Luchttoevoer via grondbuizen
% werktijd; met binnentemperatuur > 25 °C	6,8%	3,2%
% werktijd; met binnentemperatuur > 28 °C	0,6%	0,0%

Systemen werkend met luchttoevoer door grondbuizen hebben vanzelfsprekend hoge investeringskosten. Terugverdientijden worden gemeld van circa 6 jaar (brandweerkazerne Deventer, [11]) tot 9 jaar [12].

#### *Natuurlijke koeling met tweede koeltoren*

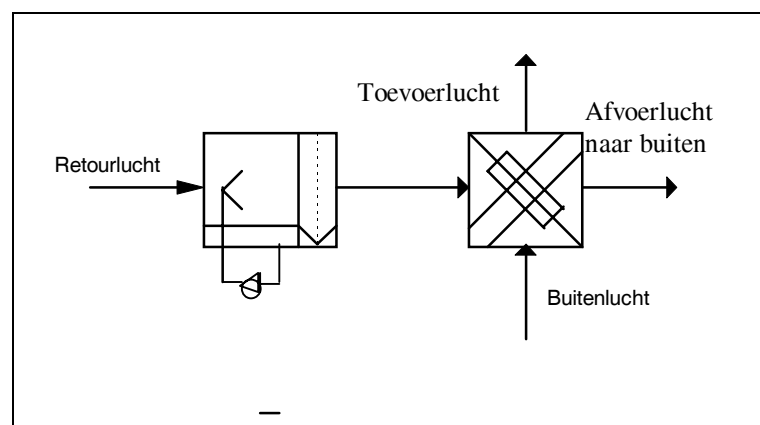
Met name in kantoren die ook bij lage buitentemperaturen nog gekoeld moeten worden, bijvoorbeeld vanwege een hoge interne warmtelast, kan het zinvol zijn het conventionele koelsysteem uit te breiden met een tweede koeltoren. Daarnaast is een vrij eenvoudige regeling nodig. Het gebouw kan dan met deze tweede koeltoren worden gekoeld in de periode dat de (natte bol) buitentemperatuur lager is dan de temperatuur waarbij de vertrekken gekoeld moeten worden, hetgeen energie voor de koelmachine uitspaart. De te bereiken besparingen zijn sterk afhankelijk van installatietechnische aspecten als het type koeltoren en het gewenste temperatuurniveau van het gekoelde water e.d.. Ook de mate waarin er een koudebehoefte van het gebouw bestaat bij lage buitentemperaturen, is sterk bepalend. De te bereiken besparingen kunnen dan ook uiteenlopen van 0 tot 70%

van het energiegebruik voor koeling [10]. Het spreekt voor zich dat voor een optimale benutting van deze vorm van vrije koeling een hoog temperatuurniveau moet worden gekozen voor de koude afgifte. Hierdoor komt met name het koelplafond als afgifte apparaat voor toepassing in aanmerking.

### Verdampingskoeling (Adiabatische koeling)

Verdampingskoeling is energetisch aanzienlijk gunstiger dan compressiekoeling. Bij adiabatische koeling of verdampingskoeling wordt de afvoerlucht uit een gebouw gekoeld door het vernevelen van water. Door de gedwongen verdamping van water wordt warmte onttrokken aan de afvoerlucht, waardoor deze ‘adiabatisch’ wordt gekoeld. De koude uit de afvoerlucht wordt vervolgens via een warmtewisselaar overgedragen aan de toevoerlucht. In de winterperiode doet de warmtewisselaar tevens dienst als warmteterugwinsysteem (Figuur 20) Bij deze techniek vindt de koude-opwekking plaats in het afvoertraject van de luchtbehandelingskast.

Adiabatische koeling kan in principe ook direct plaatsvinden door het vernevelen van water in de toevoerlucht met behulp van ultrasone of persluchtbevochtiging. Daarbij dient wel rekening gehouden te worden met de gestelde comforteisen, die een maximum kunnen stellen aan de toegestane relatieve luchtvochtigheid in de vertrekken.



Figuur 20 Principeschema verdampingskoeling (adiabatische koeling)

#### Grenzen aan het systeem

De afkoeling van de retourlucht bij bevochtiging en de daarmee samenhangende koeling van de toevoerlucht is sterk afhankelijk van de vochtigheid van de retourlucht. Hoe droger deze lucht is, hoe hoger de mate van bevochtiging zal kunnen zijn en hoe groter dus het afkoelingseffect van zowel de retour- als de toevoerlucht. Door de gebondenheid aan de klimatologische omstandigheden heeft dit adiabatische koelsysteem zijn grenzen: door bevochtiging van de retourlucht kan

de temperatuur van de toevoerlucht maximaal verlaagd worden tot de bij de retourlucht condities behorende natte bol temperatuur. Dit houdt in dat grotere temperatuursdalingen niet mogelijk zijn.

Bij hogere interne warmtelasten, bijvoorbeeld waarbij inblaastemperaturen gewenst kunnen zijn van 16°C of lager, kan het systeem worden uitgebreid met een (relatief klein) nakoelsysteem.

Om na te kunnen gaan of met enkel adiabatische koeling kan worden uitgekomen, is programmatuur in ontwikkeling (voor algemeen gebruik) en reeds ontwikkeld (in gebruik bij leveranciers). Aan de hand van de uitkomsten (eventuele temperatuuroverschrijdingen en het aantal uren hiervan) kan men beslissen om bijvoorbeeld het luchtdebiet op te voeren dan wel het systeem uit te breiden met een kleine mechanische nakoeling.

Adiabatische koeling zonder nachtventilatie of aanvullende koeling is toepasbaar tot een totale interne warmtelast van circa 20 W/m<sup>2</sup> vloeroppervlak [7].

#### *Voorwaarden voor toepassing*

Mits voldoende ruimte aanwezig, is toepassing in elk gebouw mogelijk als het koelvermogen per luchtbehandelingskast niet groter is dan circa 100 kW [6]. Het systeem is niet geschikt voor ontvochtigen en voor gebouwen met een hoge koellast.

#### *Energetische aspecten:*

Adiabatische koeling (30% energiegebruik t.o.v. conventionele koelmachine met C.O.P.=4) C.O.P. = 13

### **Korte termijn koude-opslag (Off Peak Air Conditioning)**

Bij “Off Peak Air Conditioning” (OPAC) wordt gebruik gemaakt van lage buitentemperaturen die ‘s nachts optreden om energie efficiënt (mechanisch) te koelen. De geproduceerde koude wordt opgeslagen - doorgaans in een ijsbuffer - en overdag gebruikt. Alhoewel ‘s nachts de warmte-afgifte temperatuur lager is dan overdag, is ook de koude productie temperatuur lager door gebruikmaking van een ijsbuffer; de energetische besparing is daardoor klein of zelfs negatief. De financiële besparing zit in het feit dat tijdens de zomermaanden als koeling nodig is ‘s nachts tegen een laag elektriciteitsstarief een voorraadbuffer wordt gevuld met koude. Overdag, als het elektriciteitsstarief hoog is, wordt de goedkoop opgewekte koude gebruikt voor koeling. Korte termijn koude-opslag is onder andere mogelijk in een zogeheten ijsbank. Tijdens de oplaadperiode vormt zich ijs aan de buitenkant van verdamper pijpen in een waterreservoir. Als koeling nodig is, wordt water door het reservoir geleid waarbij het ijs kou afstaat. De voordelen zijn:

- Het opslagsysteem kan de piekbelasting sterk terugdringen waardoor een kleinere koelmachine nodig is



- Door de koelmachine gedurende de nacht met nachtstroom te laten koelen, kan worden bespaard op elektriciteitskosten. Ondanks het grotere aantal draaiuren heeft dit een positief effect op de exploitatiekosten.
- Deellast bedrijf (lagere C.O.P.) wordt vermeden
- Besparing op elektrisch aansluitvermogen
- Minder starts en stops

De nadelen zijn:

- Benodigde beschikbare ruimte
- Investering van koelinstallatie met buffer meestal hoger

Korte termijn koude-opslag is vooral interessant als de bestaande koelinstallatie moet worden uitgebreid en de toepassing van extra koelmachines duur of praktisch onmogelijk is. Met name in Japan zijn ijsbuffers populair om redenen van bedrijfszekerheid van koelvermogen bij stroomuitval alsmede ter voorkoming van pieken in het elektrisch verbruik. Aldus zijn de voorwaarden voor toepassing:

- Bij grote pieken in de koellast
- Bij grote verschillen tussen dag- en nachttarief voor elektriciteit
- Bij noodzaak tot uitbreiding van de koelcapaciteit in bestaande situaties

*Energetische aspecten:*

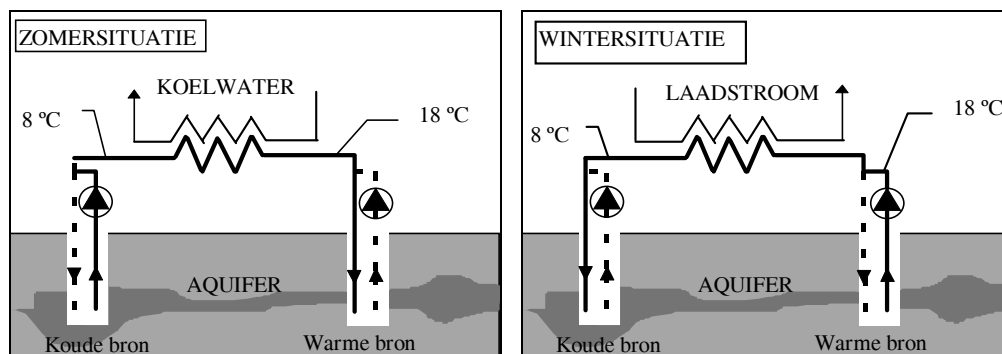
$C.O.P._{(OPAC)} \approx C.O.P.$  conventionele compressiekoelmachine

Korte termijn koude-opslag systemen worden doorgaans uitgevoerd als “all air” systeem, waarbij het ijswater in de luchtbehandelingskast wordt gebruikt. Dit voorkomt condensatie problemen in de afgifte apparaten, die zouden optreden bij een lucht/water systeem met zeer lage temperaturen. Het is mogelijk voor de koudedistributie gebruik te maken van lucht met een lage temperatuur (3 - 4 °C), met luchtmengkasten als afgifte apparaten.

In hoofdstuk 6 wordt een systeem beschreven dat gebruik maakt van Off Peak Air Conditioning met ijsopslag, gecombineerd met koudetransport door middel van een ijsslurrie.

### **Lange termijn koude-opslag in aquifer**

Bij lange termijn koude-opslag in aquifers wordt in de winterperiode grondwater onttrokken en na koeling aan de buitenlucht met een temperatuur onder de natuurlijke grondwatertemperatuur in de bodem geïnjecteerd. In de zomer wanneer er een koelbehoefte is wordt het gekoelde grondwater (8 à 10°C) onttrokken en na afgifte van de koude met een temperatuur boven de natuurlijke grondwatertemperatuur geïnjecteerd. Deze vorm van koude-opslag wordt met name voor utiliteitsgebouwen toegepast.



Figuur 21 Principe schema LTK - opslag. De "laadstroom" kan dienst doen als lage temperatuur warmtebron

Energieopslag in de bodem is een milieuvriendelijk en energiebesparend alternatief voor een conventionele koelinstallatie. Met behulp van een systeem van lange termijn koude-opslag in aquifers (waterhoudende gesteentelagen in de bodem) kan een gebouw in de zomer worden gekoeld met "gratis" koude die in de winter is verzameld en opgeslagen. Hierdoor wordt minder energie gebruikt; daartegenover staat dat er dure voorzieningen nodig zijn voor het systeem (met name de "putten" die nodig zijn om de aquifer te ontsluiten). Koude-opslag in de bodem kan voor grote gebouwen vanaf circa 6.000 à 8.000 m<sup>2</sup> BVO rendabel zijn. Andere voorwaarden zijn een minimum koelvermogen van 300 - 400 kW en een koelbehoefte van minimaal 300 MWh/jaar.[13].

ISSO-publicatie 39 Lange termijn koude-opslag in de bodem [13], 1997, beschrijft de verschillende onderdelen van een koude-opslaginstallatie. Daarnaast biedt de publikatie inzicht in het eerste deel van het realisatietraject, het haalbaarheidsonderzoek. Het haalbaarheidsonderzoek bestaat uit een quickscan, het formuleren van het Programma van Eisen, het selecteren van relevante systeemconcepten, het opstellen van het voorontwerp en het beoordelen van de haalbaarheid ervan. Ook wordt in de publikatie ruim aandacht besteed aan de benodigde vergunningen en de benodigde tijd voor de verschillende fasen in het onderzoek c.q. de realisering.

Conventionele koelinstallaties werken over het algemeen met koeltemperaturen van 6 tot 12°C. De wijze van distributie en de dimensionering ervan zijn ook op die lage koeltemperaturen afgestemd. Met energieopslag in de bodem is het moeilijk om een watertemperatuur van 6°C te bereiken, omdat de koude in de winter dan moet worden geladen bij een temperatuur lager dan 5°C. Toch is koudeopslag in deze bestaande situaties toepasbaar. Hiervoor zijn drie opties mogelijk:

### *Nakoeling met een conventionele koelmachine*

Een conventionele koelmachine kan de koude uit de koude bron nakoelen tot de gewenste temperatuur. Het aandeel van de opgeslagen koude wordt hierdoor echter kleiner. Bij renovatie of uitbreiding van bestaande koelinstallaties is dit meestal de optimale keuze.

### *Vergroting van de koelbatterijen*

Vergroting van de koelbatterijen in de luchtbehandelingskasten zorgt ervoor dat de ventilatielucht toch voldoende kan worden gekoeld ondanks een hogere watertemperatuur. Dit vraagt echter wel meer ruimte voor de batterijen in de luchtbehandelingskasten en brengt extra kosten met zich mee.

### *Aanpassing van het koudedistributie-systeem*

Het distribueren van koude door middel van water is uitermate geschikt voor toepassing van een koudeopslagsysteem omdat de aanvoertemperatuur van het gekoeld-watercircuit hoger mag zijn dan bij het distribueren van koude door middel van lucht, bijvoorbeeld 12°C in plaats van 6°C.

Lange termijn koude-opslag (LTK-opslag) kent verschillende varianten met elk hun eigen specifieke kenmerken en toepassingsgebieden [13]. Deze varianten verschillen in hoofdlijnen van elkaar door:

- uitvoeringsvorm van het opslag systeem (bijvoorbeeld opslag- of recirculatiesysteem, doublet- of monobronuitvoering)
- methode van koudelevering (bijvoorbeeld alleen levering van koude uit de LTK-opslag of een combinatie van levering uit de LTK-opslag en productie door een koelmachine)
- methode waarop de LTK-opslag 's winters wordt geladen (bijvoorbeeld met koelbatterijen in luchtbehandelingskasten, oppervlaktewater, warmtepompen)
- nuttig gebruik van gebufferde zomerwarmte (gecombineerde warmte- en koude opslag)

De systeemconcepten die goede technische en economische perspectieven hebben, zijn in ISSO-publikatie 39 [13] volgens een vast stramien uitgewerkt.

Argumenten voor de keuze van lange termijn koude-opslag zijn:

- Lage energiekosten in vergelijking met een installatie die bestaat uit compressiekoelmachines (het energiegebruik ligt circa 60% lager),
- Energieopslag in de bodem heeft invloed op de energieprestatiecoëfficiënt (EPC), er is immers minder energie nodig om te koelen. De EPC komt door het toepassen van energieopslag al snel 15 tot 20% lager uit
- Lage onderhoudskosten vanwege het geringe aantal bewegende delen in het systeem (alleen bronpompen, kleppen, afsluiters e.d.)

- De exploitatiekosten zijn gemiddeld 25% lager dan bij een conventionele installatie.
- Goede rentabiliteit
- Milieuvriendelijke en duurzame uitstraling
- De afwezigheid van milieu-onvriendelijke koudemiddelen als (H)CFK's

Bij lange termijn opslag is een bodemonderzoek in veel gevallen noodzakelijk om vast te stellen of een geschikte aquifer aanwezig is. Overigens neemt de kennis en ervaring op dit gebied snel toe, en kan tegenwoordig snel worden vastgesteld of bodemonderzoek nodig is.

#### *Koppeling van LTK-opslag met warmte/krachtinstallatie en absorptiekoelmachine*

Met behulp van de restwarmte van een warmte/krachtinstallatie kan een absorptiekoelmachine koude produceren die in de koude bron wordt geïnjecteerd. Dit verhoogt het rendement van de warmte/krachtinstallatie en tevens kan de overtollige warmte worden benut. Restwarmte kan ook direct in de warme bron worden opgeslagen voor later gebruik. (Zie voor een praktijkvoorbeeld de paragraaf 'Samengestelde koelmethode').

#### *Koppeling LTK - opslag met een warmtepomp*

De combinatie met warmtepompen leidt tot zeer efficiënte systemen. In eerste instantie levert het opslagsysteem de benodigde koude. Indien noodzakelijk springt de warmtepomp bij voor nakoeling. In de winter brengt de warmtepomp de temperatuur van het water uit de warme bron op een hoger niveau, zodat bijvoorbeeld verwarmingsplafonds, vloer- of wandverwarming kunnen worden gevoed. (Zie voor een praktijkvoorbeeld de paragraaf 'Samengestelde koelmethode').

#### *Knelpunten voor toepassing*

Een nadeel van energieopslag in de bodem is dat de regeltechniek meer aandacht vraagt dan bij een conventionele koelinstallatie. Dit komt door de druk in het ondergrondse systeem en doordat de richting waarin het koelwater stroomt moet kunnen worden omgedraaid. Een ander nadeel is dat de temperatuur van het opgeslagen koude water iets hoger is dan bij conventionele koelmachines. Dit kan inpassing in bestaande systemen bemoeilijken. Verder is een vergunning van de provincie (voor de bron) noodzakelijk. De aanvraag hiervoor moet vergezeld gaan van een technisch rapport. Deze procedure duurt 3 tot 6 maanden. De provincie eist ook periodiek debiet- en temperatuurmetingen.

In tegenstelling tot professionele opdrachtgevers/gebruikers, wreekt zich bij projectontwikkelaars / opdrachtgevers soms het feit dat degene die de investeringsbeslissing neemt, niet dezelfde is als degene die gedurende de

exploitatie van de economische voordelen van energie-opslag profiteert. Overigens hoeven de investeringskosten niet altijd hoger te liggen dan bij een conventioneel systeem, omdat bespaard wordt op de grootte van de koelmachine.

Ook bij het vaststellen van bestemmingsplannen en de uitgifte van grond wordt vaak onvoldoende rekening gehouden met de benodigde energie-infrastructuur in het algemeen en de mogelijkheid van energie-opslag in het bijzonder.

#### *Energetische aspecten [14]*

LangeTermijn koudeopslag in aquifer:

- |   |                  |                            |
|---|------------------|----------------------------|
| – Laden met koeltoren                               | C.O.P. = 7 - 11  |                            |
| – Laden met ventilatielucht                         | C.O.P. = 10 - 15 |                            |
| – LangeTermijn koudeopslag met absorptiekoelmachine | C.O.P. = 3       | (zie navolgende paragraaf) |
| – LangeTermijn koudeopslag met warmtepomp           | C.O.P. = 12 - 18 | (zie navolgende paragraaf) |

### **Samengestelde koelmethoden**

Het combineren van systemen voor koude-productie of het integreren van systemen voor energie-opwekking (elektriciteit, warmte) en koudeproductie biedt de mogelijkheid tot energiebesparing en kostenbesparing. Thermische energie-opslag speelt hierbij een belangrijke rol. Het gebruik van duurzame energiebronnen (zon, wind, koude buitenlucht, etc.) zal meer en meer toenemen. Opslagsystemen spelen daarbij een zeer belangrijke rol om wisselvalligheden in het klimaat en seizoensinvloeden op te vangen.

Voorbeelden van integrale benadering zijn:

- Warmtepomp in combinatie met lange termijn koude- en warmte-opslag
- Lange termijn koude-opslag in combinatie met door restwarmte gedreven absorptiekoelmachine
- Stadscooling: Combinatie van bronneninstallatie voor koude-opslag, een compressie-koelinstallatie en een koeltoreninstallatie
- Bivalent systeem: Absorptiekoeling (warmte uit warmtedistributienet) voor basislast en compressiekoeling voor pieklust

De bovengenoemde voorbeelden worden in het navolgende verder uitgewerkt. Dit is met nadruk slechts een aantal voorbeelden van “samengestelde koelmethoden” - of beter gezegd samengestelde technieken voor behoeften voorziening. In de recente literatuur staan dergelijke “slimme” combinaties momenteel volop in de aandacht. Doorgaans zijn de gebruikte techniek combinaties speciaal toegesneden op de voorhanden situatie, en is er geen kant en klaar recept te geven dat in alle situaties optimaal presteert. Met behulp van een energetische kosten/baten studie kan de, voor een bepaalde situatie, beste combinatie van technieken gekozen worden.

### ***Warmtepomp in combinatie met lange termijn energie-opslag***

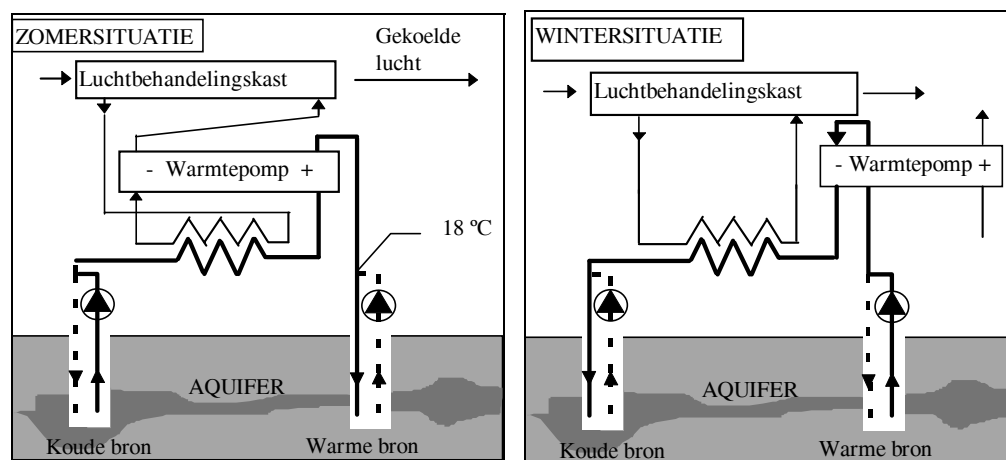
Een warmtepomp in combinatie met lange termijn energie-opslag is een energiezuinig en economisch interessant alternatief voor een installatie met koelmachines en gasgestookte ketels

In het systeem (Figuur 22) zijn de verwarmings- en de koelinstallatie in elkaar geïntegreerd, wat uit het oogpunt van investeringen voordelig is. Daar zowel via de koelbatterijen ('s winters benut voor voorverwarming van de koude buitenlucht) als de warmtepomp de warmte uit het opslagsysteem nuttig ingezet kan worden voor verwarmingsdoeleinden, is de te bereiken energiebesparing groot. Berekeningen wijzen uit dat het gebruik van primaire energie voor verwarmen en koelen circa 55% lager ligt dan voor een 'conventionele' installatie.

Een voorwaarde voor toepassing is dat de jaarlijkse koudevraag van het project groter is dan de warmtevraag.

In ISSO-publicatie 39 [13] is deze combinatie beschreven als variant 2E. Opslagsysteem en warmtepomp verzorgen beide de koudelevering. Het temperatuurtraject van het gekoeld-watercircuit bedraagt bijvoorbeeld 6/16°C of 8/18°C.

In de zomer levert in eerste instantie het opslagsysteem de benodigde koude. Als daarmee de gewenste aanvoertemperatuur niet kan worden bereikt, springt de warmtepomp (koelfunctie) bij voor nakoeling. De warmte die 's zomers bij de koeling van het gebouw en bij de condensor van de warmtepomp vrijkomt wordt met een gemiddelde temperatuur van 17 à 18°C in de warme bron geïnjecteerd. In de winter wordt de 's zomers opgeslagen warmte benut voor verwarmingsdoeleinden. De warmtepomp brengt deze lagetemperatuurwarmte op een hoger niveau (50 à 55°C), zodat bijvoorbeeld verwarmingsplafonds, vloer- of wandverwarming gevoed kunnen worden. Middels de koelbatterijen in de luchtbehandelingskast wordt de ventilatielucht voorverwarmd met warmte uit de warme bron. Het afgekoelde water wordt met een temperatuur van 8 à 9°C in de koude bron geïnjecteerd.



*Figuur 22 Warmtepomp met lange termijn koude- en warmte opslag. In de zomersituatie wordt gekoelde lucht geproduceerd, in de wintersituatie verwarmde lucht (LBK) en verwarmd water (WP)*

Het complex van de verzekeringsmaatschappij Anova uit Amersfoort is het eerste kantoorgebouw in Nederland met een installatie die bestaat uit een warmtepomp en lange termijn koude-opslag [15]. Ook in het nieuwe kantoorgebouw van de verzekeringsmaatschappij Zwitserleven is een soortgelijk systeem geplaatst [16]. In Zweden en Duitsland zijn al meerdere projecten gerealiseerd waarbij een dergelijk geïntegreerd systeem in de warmte- en koelvraag voorziet [17].

Ondanks de meerinvestering ten opzichte van een conventionele installatie heeft de toepassing van een warmtepomp in combinatie met lange termijn energie-opslag een goede rentabiliteit [9], [18].

### ***Lange termijn koude-opslag in combinatie met door restwarmte gedreven absorptiekoelmachine***

In ISSO-publicatie 39 [13] is de combinatie van een absorptiekoelmachine en een koudeopslagsysteem beschreven als variant 3G. Het bijzondere van een absorptie koelmachine is dat deze koude maakt met behulp van (rest)warmte met een temperatuurniveau van circa 80°C. Deze restwarmte kan bijvoorbeeld van een warmte/kracht-installatie of stadsverwarming afkomstig zijn. Het temperatuurtraject van het gekoeld-water circuit bedraagt bijvoorbeeld 6/16°C of 8/18°C.

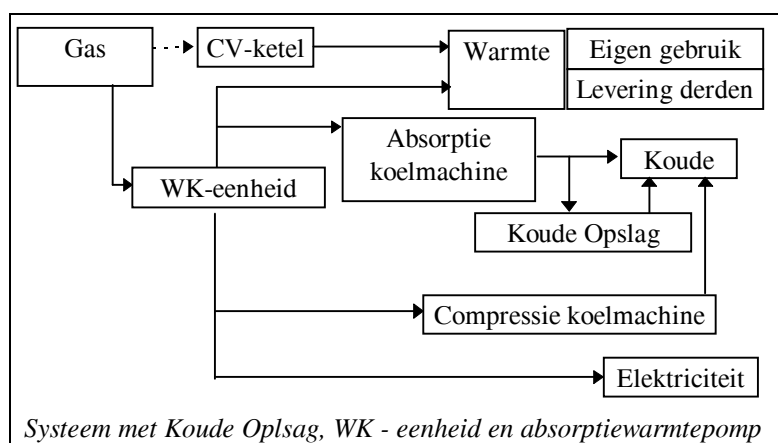
In de zomer wordt in eerste instantie het gekoeld-water circuit voorgekoeld met water uit de koude bron. De absorptiekoelmachine zorgt vervolgens voor de nakoeling.

In het voor- en najaar zal een W/K-installatie, bij een maximale dekking van de elektriciteitsvraag, warmtecapaciteit over hebben. De absorptiekoelmachine kan in deze periode het warmte overschot benutten voor het opladen van een koude opslagsysteem. De gemiddelde temperatuur is 7 à 8°C.

Enkele kenmerken van het systeem zijn [13]:

- De koudelevering door het koudeopslagsysteem dient minimaal 250 à 300 MWh per jaar te zijn;
- De besparing op primaire energie ten opzichte van ‘conventionele’ koelsystemen is gering;
- Indien een W/K-installatie de warmte levert, zal de te realiseren besparing op exploitatiekosten groot zijn als gevolg van de lage aardgasprijs.

In het St. Jansdal ziekenhuis te Harderwijk heeft bovengenoemde integratie plaatsgevonden [19]. De keuze voor dit systeem is voortgekomen uit de wens om de W/K installatie beter te benutten (een groter aandeel van zelf opgewekte elektriciteit in de totale elektriciteitsvraag), gekoppeld aan een behoefte om de koelcapaciteit uit te breiden. Uit een energie studie bleek dat lange-termijn koudeopslag, waarbij in het voor- en najaar koude geladen wordt met de aanwezige absorptiekoelmachine, een interessante optie is. Dankzij warmtelevering aan een nabijgelegen school kon de inzet van de warmte/kracht-eenheden ook in de winterperiode worden uitgebreid (figuur 23).



*Figuur 23 Integratie van systemen in St. Jansdal ziekenhuis (met externe warmtelevering)*

Zoals gezegd, is deze optie naar voren gekomen uit een energetische kosten/baten studie, en is specifiek toegespitst op de bestaande situatie bij het St. Jansdal ziekenhuis. Dit kenmerkt over het algemeen de “samengestelde koelmethoden”. Het denken “over systeemgrenzen heen” (hier in de vorm van externe warmtelevering aan het naastgelegen schoolgebouw) kan daarbij nieuwe mogelijkheden openen.

### **Stadskoeling: Combinatie van LTK-opslag, een compressie-koelinstallatie en een koeltoreninstallatie**

Het combineren van systemen voor koude-productie biedt de mogelijkheid tot energie-extensivering. In het project Stadskoeling in Den Haag zijn drie koude-



producerende systemen samengebracht, te weten: een bronneninstallatie voor koude-opslag, een (bestaande) compressie-koelinstallatie en een koeltoreninstallatie. Het project Stadskoeling in Den Haag betreft de drie grootste kantoorgebouwen uit het nieuwbouw- en renovatieproject 'de Resident' (het Cesar Pelli-gebouw, Castalia en Helicom) en het bestaande gebouw van het Ministerie van VROM.

Met de installatie voor Stadskoeling wordt centraal ongeveer 8.000 kW koude geproduceerd, die via een distributiesysteem naar de diverse afnemers wordt getransporteerd.

#### *Bronneninstallatie*

Het systeem voor koude-opslag bestaat uit een vijftal 'warme' en een vijftal 'koude' bronnen van ieder 110 m<sup>3</sup>/h. Met een temperatuurtraject van 8/14,5°C kan daarmee ongeveer 4.170 kW koeling worden geleverd, ongeveer de helft van het totale koelvermogen van de Stadskoeling. Het grondwater wordt weer in de bodem terug geïnjecteerd.

#### *Compressiekoelmachines*

In het bestaande VROM-gebouw waren reeds enkele koelmachines aanwezig, namelijk een luchtgekoelde zuigerkoelmachine van ongeveer 835 kW en twee watergekoelde centrifugaal-koelmachines van ongeveer 1.600 kW, in totaal goed voor het restant van het koelvermogen voor de Stadskoeling.

#### *Koeltorens*

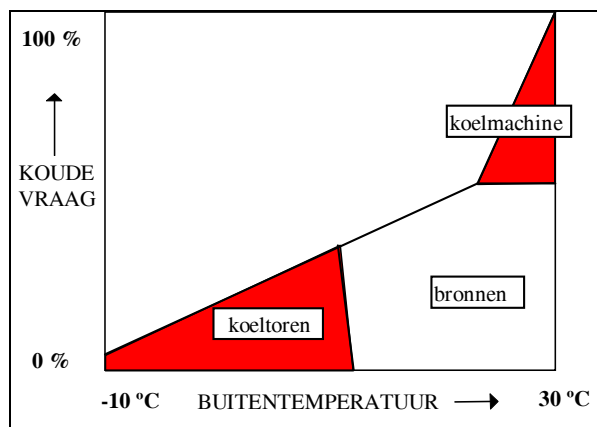
Het koelwater van de watergekoelde koelmachines (condensorkoeling) wordt met behulp van de (bestaande) koeltorens afgekoeld aan de buitenlucht. Daarnaast zijn deze koeltorens geschikt gemaakt om bij voldoende lage buitentemperaturen (onder ongeveer 10°C) direct koude in te kunnen vangen, zogenaamde vrije koeling. Bovendien worden de koeltorens gebruikt voor de invang van koude (uit de buitenlucht) ten behoeve van de LTK-opslag in de winter. Zodra de buitentemperatuur lager dan ongeveer 5°C is zal het koelvermogen, dat niet benodigd is voor koeling, worden gebruikt om de koude bronnen op te laden voor het volgende zomerseizoen.

#### *Globale regelstrategie*

De inzet van de diverse systemen is globaal als volgt (zie ook onderstaande figuur):

- omdat de bronneninstallatie de grootste energie-efficiëntie heeft (deze gebruikt de minste hoeveelheid primaire energie), wordt hiermee in principe de basislast geleverd;
- de koeltoreninstallatie doet voor de energie-efficiëntie echter niet veel onder voor de bronneninstallatie, ook uit oogpunt van exploitatie. De inzet hiervan wordt echter beperkt door de buitentemperatuur, zodat de koeltoreninstallatie indien mogelijk tezamen met of in plaats van de bronneninstallatie wordt ingezet;

- de koelmachine-installatie heeft de slechtste energie-efficiëntie bij koudelevering en heeft ook de hoogste exploitatiekosten, zodat hiermee in principe alleen de pieklast wordt geleverd.



Figuur 24 Overzicht inzet koudeproducenten in het project “Stadskoeling Den Haag”

Naast de hier genoemde globale regelstrategie gelden voor dit onderhavige geval nog een aantal extra randvoorwaarden, zie lit.[20].

#### Voor- en nadelen

Het nadeel is dat Stadskoeling (met koude-opslag) duidelijke randvoorwaarden stelt aan de inpassing in de planning van het project. Vooraf moet koude worden opgeslagen. De installatie moet (normaliter) een winter eerder gereed zijn dan dat er koeling benodigd is. Ook vergt de verdere combinatie met en afstemming op de gebouwinstallaties en het verzorgen van de benodigde vergunningen voldoende ruimte in de planning.

De participatie van het energiebedrijf heeft als belangrijkste voordeel dat door de Stadskoeling de problemen worden weggenomen, die zouden ontstaan wanneer meerdere gebouweigenaars gezamenlijk zouden investeren in een koelinstallatie (teneinde schaalvoordelen te behalen). Het energiebedrijf investeert immers en verkoopt alleen het eindproduct (gekoeld water) aan de verschillende klanten die geen onderlinge bemoeienis met elkaar hebben.

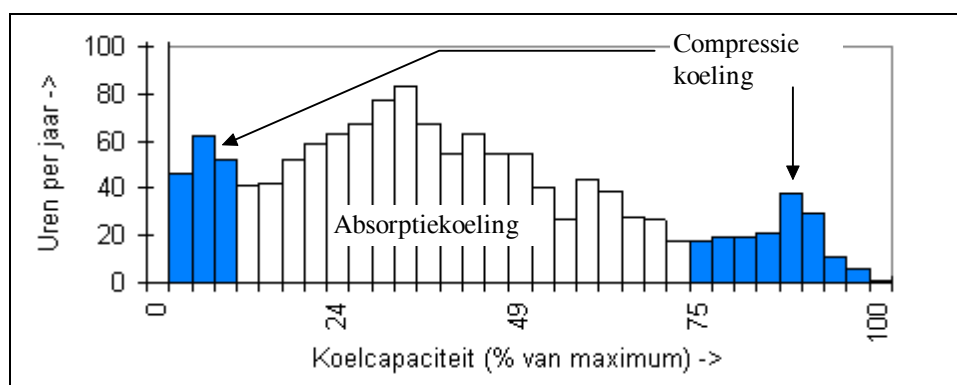
Doordat minder (elektrische) energie wordt gebruikt zijn de jaarlijkse kosten voor de productie van koeling lager. Hierdoor levert de totale exploitatie, bij vergelijkbare onderhoudskosten, jaarlijks een besparing op voor het energiebedrijf. De tariefstelling naar de klant is hierbij conform de formule ‘niet meer dan anders’, ondanks dat het energiebedrijf de meerinvestering voor zijn rekening neemt.

#### ***Bivalent systeem: Absorptiekoeling (warmtedistributienet) met compressiekoeling voor pieklast***

Als aan bepaalde technische voorwaarden voldaan kan worden, kan het een goede optie zijn om door middel van absorptiekoeling in de koelbehoefte van gebouwen te voorzien. De hiervoor benodigde warmte kan vanuit een warmtedistributienet geleverd worden. Eén van de bedoelde technische voorwaarden is dat de koelmachine ontworpen is voor een aanvoertemperatuur (t.b.v. de absorber) van hooguit 85 à 90°C. Warmtelevering voor absorptiekoeling is aantrekkelijk, omdat deze warmte voornamelijk in het zomerhalfjaar geleverd moet worden. Dat is een periode waarin er sprake is van overcapaciteit in het warmtenet (bijvoorbeeld de stadskoeling), door de afwezigheid van of geringe vraag naar warmte voor ruimteverwarming.

Absorptiekoeling vergt hogere investeringen dan het alternatief, compressiekoeling. Het voordeel van absorptiekoeling zit in het gebruik van laagwaardige energie die voor de aandrijving nodig is. De gunstige eigenschappen van de twee methoden kunnen in een zogeheten bivalent systeem gecombineerd worden.

Figuur 25 toont de bedoeling van zo'n systeem: de basiskoeling wordt geleverd door een absorptiekoelmachine en in de pieken van de koelvraag wordt door de compressiekoelmachine voorzien.



Figuur 25 Jaarbelastingduurkromme (voorbeeld), invulling behoefte met bivalent systeem

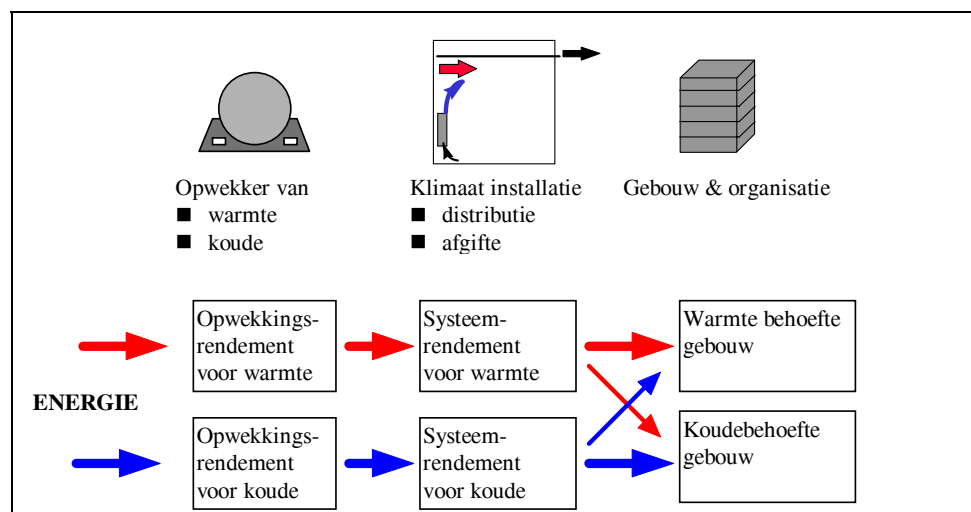
Met deze opstelling kunnen de investeringen beperkt blijven, terwijl toch in belangrijke mate profijt getrokken kan worden van de gunstige energetische eigenschappen van de absorptiekoelmachine. De goede regelbaarheid van de absorptiekoelmachine naar lage belastingen is daarbij nog een extra pluspunt. Alleen bij de allerlaagste belastingen zou weer op compressiekoeling overgegaan moeten worden (of men zou in die situatie geheel van koeling af moeten zien). Er zal uit optimalisatieberekeningen moeten blijken hoe groot het aandeel van de absorptiekoeling moet zijn. Er is nog te weinig praktijkervaring opgedaan om hierover veel informatie ten behoeve van haalbaarheidsberekeningen voor collectieve warmtedistributiesystemen te kunnen geven. Tabel 12 geeft enige richtwaarden waarmee de aansluiting van een kantoorgebouw bestudeerd kan worden. Bron: Handboek Warmtedistributie *Basisgegevens*, Novem, 1996 [21].

Tabel 12 Richtwaarden voor ontwerpcapaciteit en jaarlijkse warmte-afname voor absorptiekoeling in kantoorgebouwen.

<b>Interne warmtelast</b>	<b>Normaal</b>	<b>Hoog</b>
max. koelbehoefte	60 - 75 W/m <sup>2</sup>	90 - 100 W/m <sup>2</sup>
max. bijdrage absorptiekoeling	25 - 35 W/m <sup>2</sup>	35 - 45 W/m <sup>2</sup>
max. warmte-afname	40 - 55 W/m <sup>2</sup>	55 - 70 W/m <sup>2</sup>
vollasturen absorptiekoeling	400-500 hr/jr	600 hr/jr

## 5. Overzicht state of the art koelsystemen

In deze paragraaf worden de conventionele en de “state of the art” energiebesparende koelsystemen naast elkaar gezet, met een nadruk op energetische prestaties van de betreffende systemen. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de systematiek zoals die wordt aangereikt in de Energie Prestatie Normering (NEN 2916). Hierbij wordt het rendement van een klimatiseringssysteem onderverdeeld in een opwekkingsrendement en een rendement van het distributiesysteem plus afgifte apparaten (het systeemrendement). Een illustratie van deze aanpak is gegeven in Figuur 26. Daarnaast dient ten behoeve van de koudedistributie (bij centrale systemen) rekening gehouden te worden met het energiegebruik voor koudetransport (pompen, ventilatoren).



Figuur 26 Schematische weergave van gebouwbehoefte, klimaatinstallatie en opwekking

Het systeemrendement is een maat voor de energieverspilling die optreedt door het tegelijk verwarmen en koelen en de optredende energieverliezen door warmte- en koudetransport.

Systemen waarbij de koude wordt opgewekt en afgegeven op de plaats(en) waar die benodigd is (in het te koelen vertrek / de te koelen vertrekken) worden aangeduid als decentrale systemen. Doorgaans is voor deze systemen, zoals split systemen, raamkoelers en portable air conditioners, het systeemrendement gelijk aan 1,0 omdat er geen transportverliezen zijn, en bovendien gelijktijdige koude- en warmteproductie wordt voorkomen.

Systemen waarbij de koude “centraal” wordt opgewekt (bijvoorbeeld in de machinekamer / het ketelhuis), worden aangeduid als centrale systemen. De systeemrendementen van centrale systemen zijn afhankelijk van de wijze waarop

het transport van de koude (en de warmte) plaatsvindt, bijvoorbeeld via lucht of water, en de wijze waarop de vertrektemperatuur wordt geregeld.

Tabel 13 *Systeemrendementen voor koeling volgens NEN 2916:1994 [2], en de pré-norm NEN 2916:1998 [3].*

$f_{kb}$  = fractie koudebehoefte in de totale warmte- en koudebehoefte.

Koeltransport d.m.v.	Warmtetransport d.m.v.	Systeemrendement voor koeling (NEN 2916:1994)	Systeemrendement voor koeling (pr. NEN 2916:1998)	
			$f_{kb} = 1/2$	$f_{kb} = 1/3$
lucht	lucht	0,70	1,00	1,00
	water (of water en lucht)	0,45	1,00	1,00
water en lucht	lucht	0,60	0,83	0,76
	water (of water en lucht)	0,55	0,92	0,88
water	lucht	0,30	0,83	0,76
	water (of water en lucht)	0,75	0,92	0,88
koudemiddel	lucht en/of water	-	-	-
ijs-slurry	lucht en/of water	-	-	-

N.B: energiegebruik voor koude transport (pompen, ventilatoren) dient apart in rekening gebracht te worden.

Opwekkingsrendementen van koelsystemen worden doorgaans vermeld als C.O.P. (Coefficient Of Performance), ook wel “koudefactor” genoemd. De C.O.P. is de verhouding tussen geproduceerde koude (Q, in Watt) en het opgenomen vermogen (P, in Watt): de C.O.P. is daarom een dimensieloos getal.

Doorgaans wordt de C.O.P. bij vollast vermeld, dit is de bij de maximale “levering” van de koelmachine. In deellast presteren de meeste koude-opwekkers aanzienlijk slechter, alleen bij koelmachines voorzien van toerenregeling is de C.O.P. in deellast beter dan in vollast. Bij niet-toerengeregelde systemen is het belangrijk om deellast te voorkomen door een goed buffersysteem.

De C.O.P. is verder sterk afhankelijk van de temperatuur waarbij de warmte wordt opgenomen (ofwel de temperatuur van de “koudeproductie”), en de temperatuur waarbij de opgenomen warmte weer wordt afgegeven. Hoe dichter deze twee temperatuurniveaus bij elkaar liggen, des te beter de C.O.P. van het systeem. Om de C.O.P.’s van verschillende systemen te vergelijken, dienen ook altijd dezelfde temperatuurniveaus in beschouwing te worden genomen.

In Tabel 14 is voor verschillende systemen de C.O.P. en het opwekkingsrendement weergegeven. Voor compressiekoeling is onderscheid gemaakt in het type compressor dat in de koelcyclus toegepast wordt. Bij de absorptiekoelsystemen is onderscheid gemaakt tussen 1-traps en 2-traps absorptiekoeling. Bij 1-traps-absorptiekoeling is sprake van één cyclus bestaande uit verdamper, absorber, generator en condensor. Bij 2-traps-absorptiekoeling bestaan er twee cycli, waarbij de warmte die bij de absorber in de hoge temperatuurcyclus vrijkomt, toegevoerd wordt aan de verdamper en/of generator van de lage temperatuurcyclus. Zoals in de tabel is af te lezen, is het rendement van de laatstgenoemde systemen hoger dan bij 1-traps-absorptiekoeling.

Tabel 14 Jaargemiddelde C.O.P. en opwekkingsrendement ( $\eta_{\text{opwekking}}$ ) volgens NEN 2916. C.O.P.-waarden volgens ISSO 43 [6], met uitzondering van de cursief gedrukte waarden.

Koelsysteem	C.O.P. (koeling)	$\eta$ opwekking NEN 2916 (1994)	$\eta$ opwekking pr NEN 2916 (1998)	Opmerkingen
DX Split systeem	2,5 - 4,8	4,0	4,0	Decentraal, geen transportenergie
Zuiger compressor	2,0 - 4,7	4,0	4,0	Capaciteit 0,1 500 kW <sub>th</sub>
Schroefcompressor	2,0 - 7,0	4,0	4,0	Capaciteit 50 2000 kW <sub>th</sub>
Centrifugaalcompress	4,0 - 8,0	4,0	4,0	Capaciteit 300 30.000 kW <sub>th</sub>
Scrollcompressor	4,0 - 8,0	4,0	4,0	Capaciteit 10 50 kW <sub>th</sub>
Absorptie, 1-traps	0,7 - 0,8	-	0,7	Aangedreven met (rest)warmte
Absorptie, 1-traps	0,7 - 0,8	-	1,0	Aangedreven door W/K installatie
Absorptie, 2-traps	1,1 - 1,4	-	0,7	Aangedreven met (rest)warmte
Absorptie, 2-traps	1,1 - 1,4	-	1,0	Aangedreven door W/K installatie
Absorptie	1,6	-	-	Aangedreven met gasbrander
Warmtepomp	3,0 - 4,8	4,0	4,0	Koelfunctie
Absorptie WP	0,7 - 0,8	-	0,7 - 1,0	Koelfunctie (restwarmte - W/K)
OPAC	2,0 - 4,7	4,0	4,0	IJs productie 's nachts + opslag
LTK-opslag	7 - 16	-	12	Laden bron m.b.v. koeltoren
LTK-opslag	7 - 16	-	12	Laden bron met ventilatielucht
LTK-opslag	3	-	-	met absorptiekoelmachine
LTK-opslag	3	-	-	met absorptiekoelmachine en W/K
LTK-opslag	7 - 16	-	5	Combinatie met warmtepomp
Natuurlijke ventilatie	$\infty$	$\infty$	$\infty$	Energiegebruik transport lucht
Adiabatische koeling	$\infty$	$\infty$	$\infty$	Energiegebruik transport lucht





## **6. Alternatieve en innovatieve mechanische koelsystemen**

### **6.1 Inleiding**

De systemen voor koude opwekking zijn in deze studie ruwweg verdeeld in 3 groepen:

- conventionele systemen (hoofdstuk 3)
- “state of the art” energiebesparende koelsystemen (hoofdstuk 4)
- alternatieve en innovatieve systemen (hoofdstuk 6)

Niet in alle gevallen is het mogelijk om een duidelijk onderscheid te maken voor bovenstaande indeling. De indeling van een systeem (conventioneel, “state of the art” of innovatief c.q. alternatief) is voor wat betreft deze techniek inventarisatie vooral gemaakt op basis van de bekendheid van het systeem in de wereld van de utiliteitsbouw. De bekendheid met bepaalde systemen wordt niet alleen bepaald door “de hoeveelheid gerealiseerde projecten”, maar ook door de aandacht die in de literatuur en op lezingen aan de systemen is geschonken.

Omdat het overgrote deel (circa 98%) van de mechanische koeling in Nederland bestaat uit compressie installaties, wordt in paragraaf 6.2 eerst stilgestaan bij de ontwikkelingen op het gebied van de compressoren. In paragraaf 6.3 wordt vervolgens ook kort ingegaan op de ontwikkelingen op het gebied van de absorptie koelmachines.

Daarna wordt ingegaan op een aantal complete systemen voor mechanische koeling, waarbij de aandacht vooral uitgaat naar de energetische prestaties van deze alternatieve en innovatieve systemen - althans voorzover daar momenteel een waarde voor te geven is. Om de energetische prestaties te kunnen beoordelen, is het veelal niet zinvol om alleen naar het opwekkingsrendement te kijken, maar moeten ook distributieverliezen en energiebehoeften voor koude- en warmtetransport in de vergelijking betrokken worden. In paragraaf 6.4 worden ter ondersteuning daarvan een tweetal conventionele systemen als referentie beschreven. In de daaropvolgende paragrafen worden de volgende systemen beschreven:

- Thermosyphon systeem
- DX multisplit systeem
- Versatemp systeem
- Desiccative Evaporative Cooling (DEC)
- IJs slurry distributiesysteem
- Air Cycle
- Thermo Akoestische Koeling
- Met zonnewarmte aangedreven absorptiekoeling
- LTK - opslag met verticale bodemwarmtewisselaars

Per systeem wordt in de uitwerking aandacht geschonken aan de volgende aspecten:

- een korte beschrijving van de techniek
- huidige stadium van de ontwikkeling
- randvoorwaarden m.b.t. temperatuurniveaus en distributiesystemen.
- randvoorwaarden m.b.t. lokatie
- centraal/decentraal; eventueel minimale schaalgrootte
- integratie van gebruikersfuncties
- energetische (en eventueel milieu-) aspecten
- economie (aanschaf, exploitatie, onderhoud)

Per systeem worden aandachtspunten m.b.t. het Nederlandse energiebesparingsbeleid gegeven.

Verder zijn per systeem referenties opgegeven, en wordt aangegeven welke partij(en) in Nederland de “trekker” is (zijn) van het betreffende systeem.

## 6.2 Ontwikkelingen op compressor gebied

### *Beschrijving van de techniek*

Compressoren zoals die worden toegepast in conventionele koelmachines c.q. koudwater aggregaten kunnen primair worden onderscheiden in twee hoofdgroepen:

- verdringercompressoren;
- dynamische of turbo-compressoren

Bij de verdringercompressoren geschiedt het samenpersen van de damp door volumeverkleining van een afgesloten ruimte waarin zich een bepaalde hoeveelheid damp bevindt (wet van Boyle-Gay Lussac). Bij de dynamische compressoren wordt de hogere druk verkregen door de omzetting van kinetische energie in potentiële energie (wet van Bernoulli).

De verdringercompressoren kunnen worden onderscheiden naar:

- compressoren met een heen en weer gaande verdringer; zuigercompressor;
- compressoren met roterende verdringer(s); rolzuiger-, schotten- en schroefcompressoren;
- scroll compressor.

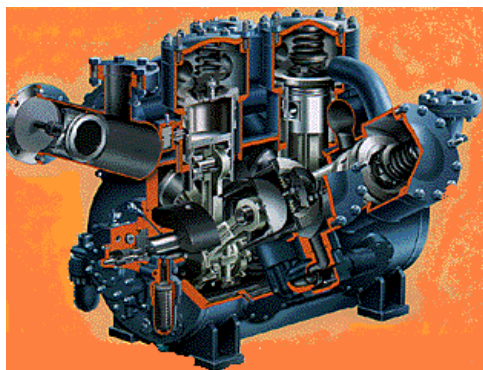
De zuigercompressor wordt veruit het meest gebruikt. De rolzuiger- en schottencompressor (rotary vane) zijn geschikt voor kleine (<10 kW) vermogens en worden in de koeltechniek relatief weinig gebruikt. Schroefcompressoren worden voornamelijk gebruikt in grote industriële installaties. De scroll compressor is, alhoewel het idee al uit 1886 stamt, een relatief nieuwe ontwikkeling. De dynamische of turbo-compressoren worden gebruikt bij zeer grote koelvermogens

bij niet te groot en weinig variërend temperatuurverschil tussen koudeproductie en warmte afgifte. Ze zijn dus zeer geschikt om in luchtconditioneringsinstallaties van grote gebouwen te worden gebruikt.

De ontwikkelingen op het gebied van compressoren voor de koudetechniek hebben zich vooral gericht op het verhogen van de efficiency en het aanpassen van de bestaande compressoren aan de “nieuwe” koudemiddelen. De verhoogde aandacht voor de inzet van warmtepompen heeft ertoe geleid dat de uitbreiding van het werkgebied van de compressoren naar hogere condensatietemperaturen ( $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) prioriteit krijgt. In hoeverre dit zal leiden tot de ontwikkeling van nieuwe compressoren en of compressietechnieken is op dit moment moeilijk in te schatten. Wanneer er besloten wordt tot de ontwikkeling van een nieuwe compressor zal het zeker enige jaren duren voordat deze commercieel verkrijgbaar is.

### Zuigercompressoren

De zuigercompressoren behoren tot de oudste compressorgeneratie en zullen in de loop van de tijd in een aantal gebieden (AC, warmtepompen, grote  $> 500\text{ kW}$  vermogens) verdrongen worden door andere compressortypen (scroll, schroef en schotten). Toch zijn er in de loop van de jaren ondermeer door de ontwikkeling van wiskundige rekenmodellen en nieuwe fabricagetechnieken talloze verbeteringen aangebracht of nog in ontwikkeling.



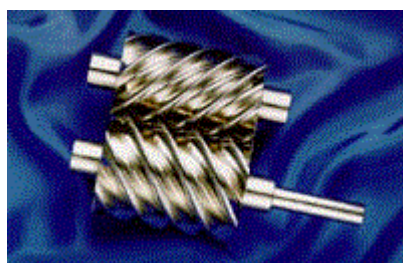
*Figuur 27 Zuigercompressor*

De volgende onderwerpen kunnen qua techniekontwikkeling worden genoemd:

- actieve klepsturing door middel van nokkenassen;
- het verminderen van de klepverliezen door het klepontwerp aan te passen aan de stoffeigenschappen van het te gebruiken koudemiddel;
- verkleinen van de schadelijke ruimte en het verbeteren van de stroming in de cilinder door de vorm van de zuiger en de kleppenplaat zo goed mogelijk op elkaar af te stemmen;
- het optimaliseren van de smering en het verminderen van de warmteontwikkeling door verlaging van de inwendige wrijving;
- de ontwikkeling van hoog temperatuur compressoren voor warmtepompen

## Schroefcompressoren

Compressoren met een enkelvoudige of een dubbele schroef worden sinds een jaar of 20 in de hogere capaciteitsregionen (500-1500 kW) toegepast. Ze kunnen worden gezien als een vervanger voor de grotere zuigercompressoren en een deel van de centrifugaalcompressoren. Het rendement en de betrouwbaarheid van de schroefcompressoren is in de loop van de tijd door toepassing van moderne productietechnieken aanmerkelijk verbeterd. Onderzoek wordt gedaan naar de wetmatige relatie tussen volume en rendement, de invloed van olie-injectie en drukverloop op het rendement bij hogere temperaturen. Door middel van computersimulatie is het mogelijk om te voorspellen bij welke bedrijfsomstandigheden het hoogste rendement wordt bereikt.

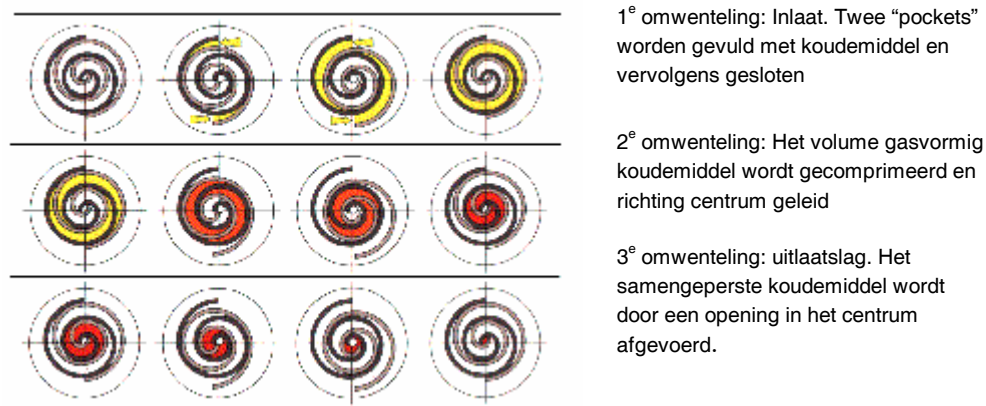


*Figuur 28 Rotorpaar van een schroefcompressor. Het koudemiddel wordt tussen de “schroeven” getransporteerd en samengeperst*

## Scroll-compressoren

De scrollcompressor is opgebouwd uit twee lichamen met evolvente armen die in elkaar grijpen en een ronddraaiende (geen roterende) beweging maken. De beweging wordt in principe opgewekt door een ingenieus ontworpen excentriek. De afdichting tussen de scrolls wordt verzorgd door een oliefilm en een gebalanceerde aanlegkracht. Door de ronddraaiende beweging wordt een hoeveelheid damp afgesloten en verder naar binnen gedrukt. De scrollcompressor behoort tot het type verdringingscompressoren en heeft dan ook een vast ingebouwde volumeverhouding.

De scrollcompressor is uitermate geschikt voor gebruik in middelgrote koelinstallaties (5-50 kW) waarbij de toepassing tot nu toe gericht is op de AC-installaties. De verwachting van de fabrikanten is dat het werkgebied van de scroll zich zal uitbreiden naar hogere en lagere capaciteiten en het lage temperatuurgebied en zowel in dit gebied als in de AC-installaties de zuigercompressor zal verdringen.



*Figuur 29 Werkingsprincipe scroll compressor. De compressor heeft twee "scrolls", waarvan één gefixeerd is en de tweede roteert. De spiraalvormen passen in elkaar*

Voordelen van de scroll compressor boven de zuigercompressor zijn:

- geringer trillingsniveau
- compactere bouwwijze
- geruisarmer werking
- minder gevoelig voor vloeistofslag en vuildeeltjes
- hogere C.O.P. bij buitenlucht temperaturen  $> 0^{\circ}\text{C}$ .

#### *Deellastgedrag van compressoren.*

Om het gedrag van compressoren bij deellast te kunnen beschrijven wordt eerst een overzicht gegeven van de per type compressor gehanteerde regelingen.

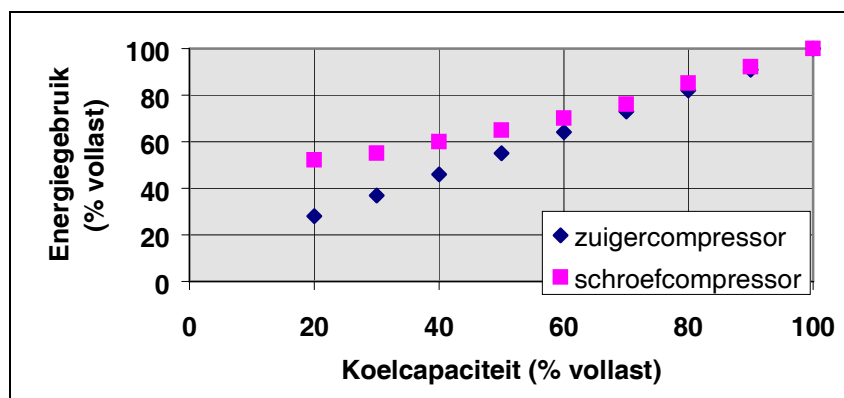
Bij compressoren worden de volgende specifieke regelingen in de praktijk gehanteerd:

- cilinderafschakeling bij zuigercompressoren (kleplichting of interne bypass)
- het terugvoeren van gecompriëerd gas naar de zuigzijde bij schroef- en scrollcompressoren plus het toepassen van een economiser (superfeed)
- bij alle typen compressoren continue toerentalverlaging door middel van een frequentieregeling of verlaging door middel van een twee toeren electromotor.

Bij deellastbedrijf bestaat er een aanzienlijk verschil in het energiegebruik van zuigercompressoren en schroefcompressoren vanwege de methode van capaciteitsregeling.

In Figuur 30 is een voorbeeld opgenomen van het verschil in energiegebruik van schroef- en zuigercompressoren bij een verdampingstemperatuur van  $-10^{\circ}\text{C}$  en een condensatietemperatuur van  $35^{\circ}\text{C}$ . Het verschil in deellast "rendement" wordt kleiner naarmate het temperatuurverschil tussen warmte onttrekking en warmte

afgifte kleiner wordt en groter bij een groter temperatuurverschil (in feite zijn niet de temperatuurverschillen maar de “drukverschillen” bepalend).



Figuur 30 Energiegebruik bij deellast voor een zuiger- en een schroefcompressor ( $NH_3$ ,  $-10^{\circ}C/+35^{\circ}C$ )

Het bedienen van schroefcompressoren bij deellasten kleiner dan 60% of de inzet in installaties met een sterk variërende capaciteitsvraag is dan ook af te raden. De keuze tussen de inzet van een schroefcompressor of zuigercompressor in een installatie kan alleen gemaakt worden op basis van een nauwkeurige analyse waarbij voor beide soorten de voor- en nadelen, de investerings- en de totale exploitatiekosten en het jaarlijkse energieverbruik tegen elkaar wordt afgewogen.

De scroll compressor is in principe een verdringingscompressor en zal zich voor wat het deellastbedrijf betreft gedragen als een schroefcompressor. Het voordeel van de scroll boven de schroef is dat er geen olie ingespoten wordt voor de afdichting van de scrolls onderling. Wel heeft de scroll een vaste volume verhouding en afhankelijk van de begintoestand van het gas een vaste drukverhouding waardoor de compressor in deellast een slechter rendement heeft dan de zuigercompressor. Om dit te verbeteren is een ontwikkeling gestart waarbij de compressor is voorzien van een toerengeregelde electromotor, een tussendruk (back-pressure) kamer en bypass-kleppen. Afhankelijk van het toerental en de drukverhouding zijn verbeteringen in het deellastgedrag van de scroll tot 20% mogelijk.

#### *Energetische verbeteringen compressoren*

De COP van een koelinstallatie wordt o.a. bepaald door het isentropisch rendement van de compressor alsmede het rendement van de elektromotor. Het totaalrendement is het product van deze rendementen. Het is de verhouding tussen het netto toegevoerd vermogen aan het koelmiddel en het elektrisch vermogen dat onttrokken wordt. Hoe hoger dit rendement, hoe meer elektrische energie nuttig gebruikt wordt en hoe hoger de COP van de koelinstallatie zal zijn.

In de praktijk zijn verschillende verbeteropties mogelijk. Uit een (markt)onderzoek [51] is gebleken dat wanneer een 4-cilinder semi-hermetische zuigercompressor met een koelvermogen van 70 kW en een verdamper en condensortemperatuur van resp. -7 en 25 °C als referentievoelinstallatie gebruikt wordt, de volgende verbeteringen mogelijk zijn (Tabel 15):

Tabel 15 *Verbeteropties die leiden tot een besparing van primaire energie.*

Verbeteropties	Meerprijs	Besparing	Toelichting
Open compressor	geen	10%	elektromotor is vrij te selecteren bij benodigd aandrijfvermogen compressor en draait op norm. vermogen
Open compressor op laag toerental	15%	10-20%	onderscheid mogelijk tussen inkoelen en bewaren; zonder dat dit ten koste gaat van rendement. Rendement van langzaam draaiende compressor is tevens hoger
Frequentieomvormer	100%	-20-20%	sterk afhankelijk van toepassing. Theoretisch is besparing mogelijk, metingen geven soms juist verlaging rendement
HR-compressor	10-20%	10-20%	hoger isentropisch rendement compressor
HR-elektromotor	10-20%	tot 30%	besparing vooral op deellast
Scroll i.p.v. zuiger	bepert	tot 15%	geen schadelijke ruimte
2 of 3 kleine compressoren	25%	40%	met goede regeling draaien compressoren op vollast. Hoge COP = 4 kan gehandhaafd blijven
zuigercomp. 6 cilinder met kleplichting	10%	40%	6 cilinders kunnen beter geschakeld worden dan 4 cilinders
modulload capaciteitsregeling	30%	10-40%	gelijkmatig vergroten van schadelijke ruimte, besparing afhankelijk van drukverschil

#### *Algemene constatering*

Computers spelen een steeds grotere rol bij het ontwerpen en fabriceren van compressoren. Nieuwe fabricagetechnieken maken het mogelijk om onderdelen steeds nauwkeuriger te maken en op elkaar af te stemmen. De scroll is hiervan een goed voorbeeld.

Daarnaast wordt de nodige aandacht besteed aan het verder verbeteren van de compressoren.

- De schroefcompressoren zullen in de hogere capaciteitsklassen veel gebruikt worden en voor een (groot) gedeelte de zuigercompressoren verdringen.
- De toerentallen van de rotatiecompressoren zullen verder worden verhoogd waardoor de compressie-efficiency wordt verhoogd.

- De inzet van intelligente besturingselectronica (variabele snelheids- en capaciteitsregeling, automatische service indicatie, automatische aanpassing per chip aan wisselende bedrijfsomstandigheden)
- De opkomst van computersimulatie modellen maakt het mogelijk om het ontwerp van complete koel- en air conditioningsinstallaties te optimaliseren.

### 6.3 Ontwikkelingen op het gebied van absorptie systemen

Op het gebied van absorptie koelmachines (en warmtepompen) zijn momenteel voor “air conditioning” toepassingen twee typen absorptiekoelmachines commercieel beschikbaar:

- LiBr/H<sub>2</sub>O absorptiekoelmachine
- H<sub>2</sub>O/NH<sub>3</sub> absorptiekoelmachine

De LiBr/H<sub>2</sub>O absorptiekoelmachines / warmtepompen kunnen alleen worden toegepast bij warmte-opname temperaturen hoger dan 4 °C, vanwege de aanwezigheid van water als koudemiddel (en dan met name vanwege het bevroeringsgevaar). De koelcapaciteiten van deze machines variëren van circa 100 kW tot enkele MW. Deze systemen worden aangedreven met stoom, heet water of directe verbranding.

Een nadeel van dit type systeem is dat het nodig is een vacuüm binnen het systeem te handhaven, waardoor tevens de noodzaak ontstaat tot regelmatig onderhoud (vacumeren). Voordelen van het systeem zijn de redelijke efficiency (C.O.P.  $\approx$  0.7 voor eentrapsmachines), en het kleine aantal bewegende delen in het systeem. Ook de investeringskosten voor deze systemen zijn relatief laag.

Water/ammoniak absorptiesystemen worden voornamelijk verkocht als koelmachines voor het koel- en vriestraject (-30 °C ... 0 °C), maar kunnen ook worden ingezet als warmtepomp met een afgifte temperatuur omtrent 60 °C. Naast de gebruikelijke grote systemen, zijn tegenwoordig ook kleinere systemen (8 ... 100 kW) leverbaar. In tegenstelling tot de LiBr/H<sub>2</sub>O absorptiekoelmachine, werkt de water/ammoniak met interne drukken tussen 0.1 en 2.5 MPa, waardoor de problematiek van het vacuüm niet aanwezig is en de onderhoudskosten dus lager zijn. Als nadelen ten opzichte van de LiBr/H<sub>2</sub>O machines gelden echter de hogere investeringskosten en het lagere rendement (C.O.P.  $\approx$  0.4 tot 0.5).

Nieuwe ontwikkelingen op het gebied van absorptiekoeling vinden plaats op de deelgebieden:

- diffusie absorptie systemen
- systemen werkend met omgekeerde rectificatie.

Diffusie absorptie systemen zijn reeds lange tijd bekend, en zeer wijdverbreid in gebruik: de meeste camping koelkasten en hotel-koelkasten werken volgens dit principe. Het grote voordeel van dit systeem is dat het absoluut geen bewegende



delen meer bevat, en daardoor een extreem onderhouds-ongevoelige techniek is. In de “normale” absorptie koelmachine zorgt een mechanische pomp voor het interne vloeistoftransport, bij de diffusie absorptie warmtepomp wordt het vloeistoftransport gerealiseerd met een zogenaamde “bellenpomp” (waarin opstijgende gasbellen vloeistof mee transporteren). Tot nu toe zijn diffusie-absorptie warmtepompen echter alleen gerealiseerd in kleine capaciteiten (tot 9 kW). De ontwikkelingen richten zich op het ontwerpen van een “bellenpomp” die grotere capaciteiten mogelijk maakt.

Omgekeerde rectificatie warmtepompen en koelmachines geven de mogelijkheid om nieuwe werkparen te gebruiken, anders dan water/ammoniak of LiBr / water. Ten opzichte van de gangbare principes voor absorptiekoeling onderscheidt de omgekeerde rectificatie zich door het gescheiden plaatsvinden van warmte- en stofoverdracht. Het systeem biedt perspectieven voor toepassing tot zeer grote vermogens (enkele MW koelcapaciteit), en biedt verder uitzicht op goedkopere absorptiemachines (ten gevolge van een grotere vrijheid in materiaalkeuze bij andere dan de conventionele stofparen). De techniek van omgekeerde rectificatie staat aan het begin van het ontwikkelingstraject.

In het algemeen richten de ontwikkelingen op het gebied van absorptiekoeling zich op drie aspecten:

- het goedkoper maken van de systemen
- het verhogen van de energetische prestatie (C.O.P.)
- het verlagen van de aandrijftemperatuur, om beter gebruik te kunnen maken van restwarmte, stadsverwarming en bijvoorbeeld zonne-energie.

## 6.4 Energetische referenties

Om energetische vergelijkingen mogelijk te maken van verschillende alternatieve en innovatieve mechanische koelsystemen, ten opzichte van elkaar en ten opzichte van conventionele systemen, is het zinvol om een tweetal referentie systemen te definiëren. Er is gekozen voor twee referentie systemen (een all air systeem en een lucht-water systeem), omdat sommige concepten beter te vergelijken zijn met een all air systeem, terwijl ander concepten beter te vergelijken zijn met een lucht water systeem. Voor de twee referentie systemen wordt gebruik gemaakt van de systemen, die in ISSO researchrapport 9 zijn uitgewerkt [22]. Deze referentie-systemen hebben, gezien de huidige stand van de techniek, betrekkelijk lage rendementen, met name voor warmte opwekking.

### Referentie all-air systeem: VAV systeem.

In een Variabel Volume (VAV) installatie wordt centraal voorbehandelde lucht via een hogedruk (700 à 1500 Pa overdruk) luchtkanalenstelsel toegevoerd aan de individuele

vertrekken. Het debiet van de toevoerlucht wordt afhankelijk van de vertrektemperatuur per vertrek geregeld (regelbereik 30 tot 100%).

De koeling wordt voor 100% door de toevoerlucht verzorgd.

De referentiesituatie heeft betrekking op een VAV systeem met dauwpuntsregeling en energierugwinning door middel van recirculatie. Het systeem is toegepast in een middelgroot, relatief ondiep (bestaand) kantoorgebouw voorzien van dubbel glas (40%) en binnenzonwering. Een gedetailleerde beschrijving van het gebouw is gegeven in [23].

Voor de referentiesituatie geldt het volgende energiegebruik:

Jaarlijkse warmtebehoefte: 95.600 kWh<sub>th</sub> (= 9.830 m<sup>3</sup> aeq/jaar)

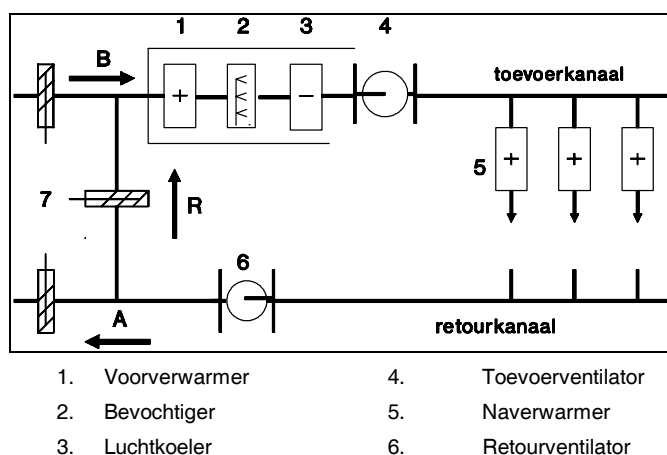
Jaarlijkse koudebehoefte: -207.200 kWh<sub>th</sub>

Energiegebruik warmte opwekking:		60.500 m <sup>3</sup> aeq/jaar
Energiegebruik transport:	104.700 kWh/jaar	32.600 m <sup>3</sup> aeq/jaar
- pompen	11.300 kWh/jaar	
- ventilatoren	93.400 kWh/jaar	
Energiegebruik koude opwekking:	119.500 kWh/jaar	37.300 m <sup>3</sup> aeq/jaar
- koelmachine	95.400 kWh/jaar	
- pompen koelmachine & koeltoren	24.200 kWh/jaar	

Uit bovenstaande waarden volgt: (systeemrendement \* C.O.P.) = 1,73

NEN 2916:1994 geeft: (systeemrendement \* C.O.P.) = 0,45 \* 4,0 = 1,80

NEN 2916:1998 geeft: (systeemrendement \* C.O.P.) = 1,00 \* 4,0 = 4,00



Figuur 31 Referentie VAV systeem (B = buitenlucht, A = afvoerlucht, R = recirculatie)

#### Referentie lucht-water systeem: Vierpijps-inductie systeem

In het Vierpijps-inductie (4pi) systeem wordt centraal voorbehandelde lucht met een constant debiet toegevoerd aan "inductie units", opgesteld in de individuele vertrekken.

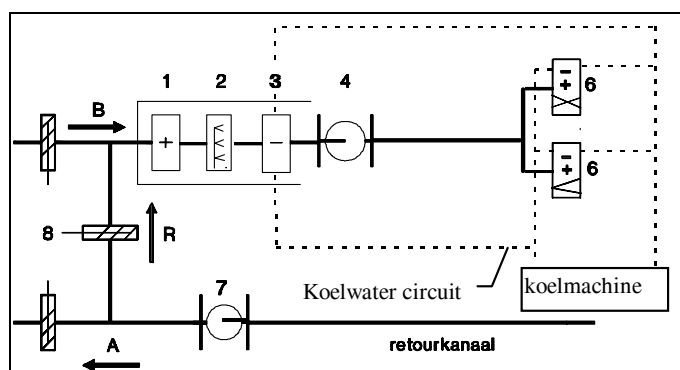
De inductie units bevatten twee warmtewisselaars, waar doorheen centraal gekoeld en verwarmd water wordt gevoerd. In de inductie units wordt de toevoerlucht (primaire lucht) door "nozzles" uitgeblazen, door de ejectiewerking wordt hierbij vertrekvlucht (secundaire lucht) meegezogen. Deze secundaire lucht wordt over de warmtewisselaar(s) geleid, waarbij warmteoverdracht plaatsvindt. De hoeveelheid secundaire lucht is gelijk aan twee à drie maal de hoeveelheid toegevoerde primaire lucht.

De referentiesituatie heeft betrekking op een 4pi systeem met dauwpuntsregeling en recirculatie, toegepast in een middelgroot, relatief ondiep (bestaand) kantoorgebouw voorzien van dubbel glas (40%) en binnenzonwering. Deze gebouwuitleiding is dezelfde als welke voor het VAV systeem is gebruikt, en is uitgebreid beschreven in [23]. Voor deze referentiesituatie gelden de volgende kentallen:

Jaarlijkse warmtebehoefte: 95.600 kWh<sub>th</sub> (9.830 m<sup>3</sup> aeq/jaar)  
 Jaarlijkse koudebehoefte: -207.200 kWh<sub>th</sub>

Energiegebruik warmte opwekking:		33.400 m <sup>3</sup> aeq /jaar
Energiegebruik transport:	86.300 kWh/jaar	26.900 m <sup>3</sup> aeq/jaar
- pompen	10.600 kWh/jaar	
- ventilatoren	75.700 kWh/jaar	
Energiegebruik koude opwekking:	95.900 kWh/jaar	29.900 m <sup>3</sup> aeq/jaar
- koelmachine	82.000 kWh/jaar	
- pompen koeltoren & aggregaat	14.000 kWh/jaar	

Uit bovenstaande waarden volgt: (systeemrendement \* C.O.P.) = 2,16  
 NEN 2916:1994 geeft (systeemrendement \* C.O.P.) = 0,75 \* 4,0 = 3,00  
 NEN 2916:1998 geeft (systeemrendement \* C.O.P.) = 0,93 \* 4,0 = 3,72



- |                  |                      |
|------------------|----------------------|
| 1. Voorverwarmer | 4. Toevoerventilator |
| 2. Bevochtiger   | 6. Inductie unit     |
| 3. Luchtkoeler   | 7. Retourventilator  |

Figuur 32 Referentie vierpijps-inductiesysteem (B = buitenlucht, A = afvoerlucht, R = recirculatielucht)

Voor zowel het VAV referentiesysteem als het vierpijps inductiesysteem blijkt dat de EPN systematiek een te hoge inschatting geeft van de efficiëntie van de systemen (zie Tabel 16).

*Tabel 16 Vergelijking berekende efficiëntie voor koeling (systeemrendement \* C.O.P.) en EPN waarden.*

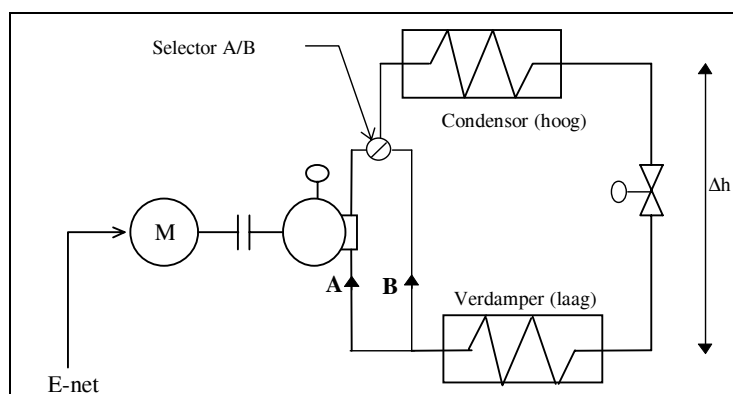
Referentie	VAV systeem		Vierpijps inductiesysteem	
Berekende efficiëntie m.b.t. koeling	1,73	(100%)	2,16	(100%)
Efficiëntie cf. NEN 2916:1994	1,80	(104%)	3,00	(139%)
Efficiëntie cf. NEN 2916:1998	4,00	(231%)	3,72	(172%)

## 6.5 Thermosyphon systeem

### Beschrijving van de techniek

In de gebruikelijke systemen met koude opwekking via een koud water aggregaat, wordt het water ook mechanisch gekoeld bij buitentemperaturen die lager zijn dan de gewenste water intrede temperatuur (doorgaans 6 °C). Om voldoende drukval te behouden over het expansie ventiel, wordt de condensatie temperatuur van de koelmachine ruim boven de verdampingstemperatuur gehouden, ook wanneer dat met het oog op de warmte-afgifte niet nodig is. Als alternatief kan vrije koeling van het water aan de buitenlucht worden toegepast, hetgeen echter grote warmtewisselende oppervlakken vraagt (gesloten systeem) of aanpassingen m.b.t. waterzuivering stelt (open systeem, koeltorens).

In een thermosyphon systeem wordt in deze gevallen (buitentemperatuur lager dan water- intrede temperatuur) de compressor buiten de koelkringloop geschakeld, en wordt overgeschakeld op het natuurlijke proces van verdamping (op een warme plaats) en condensatie (op een koude plaats) zonder tussenkomst van een compressor. Dit is in Figuur 33 geïllustreerd: normaal gesproken wordt de koudemiddeldamp via de zuigleiding "A" aangezogen door de compressor, en naar de condensor geperst. In de thermosyphon situatie verdampt het koudemiddel bij de verdamper (hoge temperatuur), en de damp stijgt - via leiding "B" - op naar de condensor (hier heerst een iets lagere druk). In de condensor gaat de damp over in vloeistof, en stroomt onder invloed van de zwaartekracht terug naar de verdamper. Hiervoor is het uiteraard noodzakelijk dat de condensor fysiek hoger is geplaatst dan de verdamper.



Figuur 33 Principe schema van een thermosyphon koelsysteem

In een thermosyphon systeem dient veel aandacht besteed te worden aan het minimaliseren van de drukverliezen in het koudemiddelcircuit, teneinde een minimale leidingweerstand en minimale temperatuurverschillen te bereiken in de thermosyphon situatie. Hiervoor worden onder andere speciaal uitgevoerde verdampers gebruikt met verbeterde verdampingseigenschappen, en bij voorkeur verdampingscondensors (dit zijn condensors waarvan het oppervlak nat wordt gehouden). Door toepassing van een verdampingscondensator kan in plaats van de droge bol temperatuur de natte bol temperatuur worden aangehouden als condensatietemperatuur, hetgeen vooral in droge klimaten enkele graden voordeel kan opleveren.

#### Randvoorwaarden m.b.t. temperatuurniveaus en distributiesystemen

Een thermosyphon systeem is alleen zinvol als verbeteroptie voor een systeem met koudetransport via water; in een systeem met koudetransport door middel van lucht kan op een veel directere manier gebruik worden gemaakt van lage buitentemperaturen (vrije koeling).

Het thermosyphon systeem levert een hogere (“gratis”) bijdrage in de totale koeling, naarmate er meer gebruik wordt gemaakt van koeling bij lage buitentemperaturen - dat wil zeggen in situaties met een hoge interne warmtelast. Het thermosyphon systeem is een alternatief voor het conventionele koudwater aggregaat. Het is mogelijk om non-packaged koudwater aggregaten om te vormen van conventioneel systeem naar thermosyphon systeem, alhoewel de veranderingen ingrijpend zullen zijn (tenzij reeds een goede verdampers en een verdampingscondensator aanwezig zijn).

Het voordeel van een thermosyphon systeem kan nog verdergaand worden uitgebreid, wanneer het temperatuurniveau van het koudwatersysteem kan variëren; dat wil zeggen dat bij een beperkte koudevraag een hogere watertemperatuur wordt aangehouden. Hierdoor kan het aantal uren dat het systeem in de thermosyphon situatie werkt, worden uitgebreid ten opzichte van een systeem met een vast ingestelde koudewatertemperatuur.

Naast een thermosyphon systeem dient een apart systeem voor ventilatie aanwezig te zijn, om aan de eisen voor luchtverversing te kunnen voldoen - zoals gebruikelijk is in klimatiseringssystemen met koude en/of warmte transport door middel van water.

#### Randvoorwaarden m.b.t. lokatie

Een thermosyphon systeem kan alleen worden toegepast, wanneer het mogelijk is de condensor fysiek hoger te plaatsen dan de verdamper van het koudwatersysteem.

#### Benodigde schaalgrootte

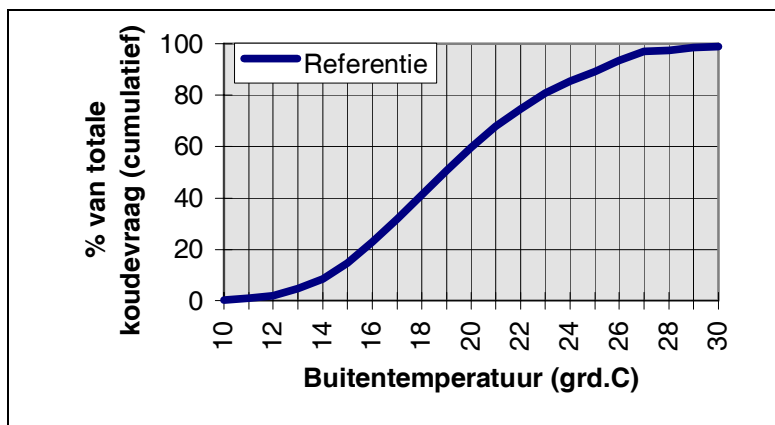
Thermosyphon systemen zijn niet gebonden aan een bepaalde schaalgrootte. Echter, in de aanbevolen uitvoering met verdampingscondensor, wordt de ondergrens van de schaalgrootte bepaald door de kleinst beschikbare verdampingscondensor. Doorgaans ligt deze op enkele tientallen kW condensorvermogen. Gezien de voorkeur voor het toepassen van een verdampingscondensor (die alleen in grotere capaciteiten geleverd wordt) zal het thermosyphon systeem vrijwel alleen in centrale installaties gebruikt worden.

#### Toepassingsgebieden op basis van gebruikersfuncties

Het thermosyphon systeem is inzetbaar als alternatief voor een koudwateraggregaat, en wordt dus ingezet in klimatiseringssystemen met koudetransport door middel van water of water en lucht. Alle gebruikersfuncties van dergelijke klimatiseringssystemen zijn te realiseren met een thermosyphon systeem in plaats van een conventioneel koudwateraggregaat.

#### Energetisch rendement in samenhang met mogelijke temperatuurniveaus

Het thermosyphon effect kan worden benut wanneer de buitentemperatuur lager is dan de koudwater intrede temperatuur, welke bij conventionele koudwater systemen doorgaans is vastgelegd op + 6 °C. In Figuur 34 is de koudevraag als functie van de buitentemperatuur weergegeven voor de referentie situatie.

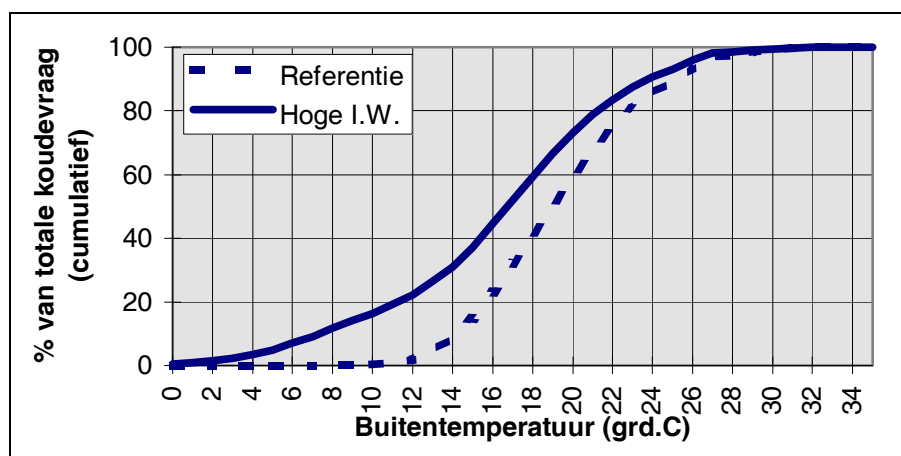


*Figuur 34 Verdeling van de koudevraag (kWh) als functie van de buitentemperatuur. Referentiesituatie*

Uit Figuur 34 volgt dat in de referentiesituatie geen koudevraag optreedt bij buitentemperaturen lager dan +10 °C. Daarom zal bij een conventioneel systeem met een koudwater intrede temperatuur van + 6 °C geen gebruik gemaakt kunnen worden van het thermosyphon effect.

Bij een systeem met een hogere koudwater intrede temperatuur, bijvoorbeeld een systeem voorzien van koelplafonds, kan wel gebruik gemaakt worden van het thermosyphon effect. Bij een koudwater intrede temperatuur van 15 °C zal in de referentie situatie (Figuur 34) bijvoorbeeld circa 15% van de benodigde koeling geleverd kunnen worden met behulp van het thermosyphon effect - dat wil zeggen zonder toevoer van elektrische energie aan de compressor.

Wanneer de interne warmtelast hoger is dan in de referentiesituatie, zal reeds bij een lagere buitentemperatuur koeling noodzakelijk zijn. Dit heeft een positieve invloed op het aandeel van de totaal benodigde koelenergie die door middel van het thermosyphon effect geleverd kan worden. In Figuur 35 is de koudevraag als functie van de buitentemperatuur uitgezet bij een verhoging van de interne warmtelast met 30 W/m<sup>2</sup> ten opzichte van de referentie situatie (referentie is 30 W/m<sup>2</sup>).



Figuur 35 Verdeling van de koudevraag (kWh) als functie van de buitentemperatuur. Situatie met een verhoogde interne warmtelast (+ 30 W/m<sup>2</sup> ten opzichte van de referentiesituatie)

Uit Figuur 35 volgt dat in de situatie met een verhoogde interne warmtelast (30 W/m<sup>2</sup> hoger dan in de referentie situatie) 5 a 10% van de totale koudevraag optreedt bij buitentemperaturen lager dan +6 °C, zodat bij een conventioneel systeem met een koudwater intrede temperatuur van + 6 °C voor dit aandeel gebruik gemaakt kan worden van het thermosyphon effect.

Bij een systeem met een hogere koudwater intrede temperatuur, bijvoorbeeld een systeem voorzien van koelplafonds, kan nog meer gebruik gemaakt worden van het thermosyphon effect. Bij een koudwater intrede temperatuur van 15 °C zal in de situatie met verhoogde interne warmtelast (Figuur 35) circa 35% van de benodigde koeling geleverd kunnen worden met behulp van het thermosyphon effect - dat wil zeggen zonder toevoer van elektrische energie aan de compressor.

#### Energiebesparingsmogelijkheden componenten.

Thermosyphon systemen worden niet als compleet pakket geleverd, maar worden opgebouwd uit componenten. Het is niet waarschijnlijk dat deze situatie zich in de nabije toekomst wijzigt. Met name het ontwerp van de verdamper is in het thermosyphon systeem cruciaal, omdat gestreefd moet worden naar een zo klein mogelijk verschil tussen koudwater intrede temperatuur en verdampingstemperatuur (De verdampingstemperatuur bepaalt de grenswaarde van de buitentemperatuur waarbij overgeschakeld kan worden op het thermosyphon effect).

Ontwikkelingen naar een hogere energiebesparing bij thermosyphon systemen zijn voornamelijk te vinden in de ontwikkeling van verdamper met een betere warmte overdracht, bijvoorbeeld door speciale oppervlaktebehandelingen van verdamper.



### Energetische vergelijking met conventionele systemen.

In Tabel 17 wordt een energetische vergelijking gegeven van een thermosyphon systeem, voorzien van koelplafonds voor de koude-afgifte, ten opzichte van het vierpijps inductie referentiesysteem (zie paragraaf 6.4). Omdat het Thermosyphon systeem alleen zinvol toe te passen is met koelplafonds (lucht - water systeem), is een vergelijking met het all air VAV referentiesysteem niet zinvol. Wel is naast het referentiesysteem, ook een aangepast referentiesysteem (koelplafonds in plaats van inductie units) beschouwd.

De in Tabel 17 vermelde energiegebruiken voor koude opwekking voor het systeem met koelplafonds en het thermosyphon systeem met koelplafonds zijn, via de opwekkingsrendementen, afgeleid van de waarden zoals vermeld bij het 4 pijps inductie systeem. De energiebesparingen ontstaan door het toepassen van hogere koelwater temperaturen (zie hoofdstuk 4)<sup>1</sup>. Het temperatuurverschil tussen ingaand en uitgaand gekoeld water bij het systeem met koelplafonds (15/21) is gelijk gesteld aan dat van het vierpijps inductie systeem (6/12), zodat de energiegebruiken ten behoeve van transport identiek blijven.

*Tabel 17 Energetische vergelijking (op basis van primaire energie) van Thermosyphon systeem (met koelplafonds) met het vierpijps inductie (4PI) referentiesysteem (paragraaf 6.4), en een systeem met koelplafonds zonder thermosyphon werking.*

<b>Energie (%):</b>	<b>4PI referentiesysteem</b>	<b>Systeem met koelplafonds</b>	<b>Thermosyphon + koelplafonds</b>
Koeling	33	20	17
Verwarming	37	37	37
Bevochtiging	-	-	-
Transport	30	30	30
Totaal	100	87	84

Uit Tabel 17 blijkt dat het thermosyphon systeem voorzien van koelplafonds ten opzichte van een 4 pijps inductie systeem circa 16% minder energie verbruikt. Echter, ten opzichte van een “normaal” systeem met koelplafonds is de energiebesparing beperkt (circa 3%). De besparingen van een thermosyphon systeem ten opzichte van een systeem met koelplafonds worden interessanter (10 - 20%) wanneer er sprake is van een zeer hoge interne warmtelast.

In de EPN (NEN 2916:1994 en pre-norm NEN 2916:1998) worden alle systemen voor koude opwekking in principe gelijk gehonoreerd (C.O.P. = 4.0); verschillen treden alleen op waar het gaat om de transport verliezen (systeem rendementen) en de benodigde energie voor het transport (pompen en ventilatoren). Voor de

<sup>1</sup> Referentiesysteem +1/+25 (verdamping/condensatie), systeem met koelplafond +10/+25

beoordeling van het thermosyphon systeem is uitgegaan van een systeem met koelplafonds voor koeling, verwarmen door radiatoren, naverwarmer of ventilator eenheid zonder centraal voorgekoelde/ontvochtigde luchttoevoer. De systeemrendementen volgens de EPN zijn vermeld in Tabel 18.

Tabel 18 Rendementen in de koelfunctie volgens de EPN (NEN 2916:1994 en pre-norm NEN 2916:1998).

	4PI referentiesysteem	Systeem met koelplafonds	Thermosyphon + koelplafonds
Opwekkings rendement	4.0	4.0	4.0
Systeem rendement (1994)	0,75	0,75	0,75
Systeem rendement (1998)	0,93	0,93	0,93

In de EPN wordt vrije koeling, anders dan door toevoer van verse buitenlucht, niet gewaardeerd. De toepassing van koelplafonds of het Thermosyphon systeem leveren daarom in termen van de EPN geen voordelen op, in tegenstelling tot de reële energiebesparingen van 13% (koelplafonds) c.q. 16 - 30% (Thermosyphon).

#### Milieu effecten.

Thermosyphon systemen hebben ten opzichte van conventionele systemen (koude opwekking m.b.v. een koudwater aggregaat) een gelijkblijvende koudemiddel inhoud. Indien bij het thermosyphon systeem gebruik wordt gemaakt van verdampingskoeling - hetgeen de mogelijke energiebesparing aanzienlijk verhoogt - zal rekening gehouden moeten worden met het bijbehorende watergebruik. GWP (Greenhouse Warming Potential) en TEWI (Total equivalent warming Impact) van een thermosyphon systeem - ten opzichte van een referentie compressie systeem - zullen uitsluitend qua indirect effect (gekoppeld aan het energiegebruik) veranderen.

#### Kostenaspecten.

De kosten aspecten betreffende het thermosyphon systeem (Tabel 19) zijn ontleend aan een publicatie [24], waarin verschillende systeem ontwerpen zijn beschouwd voor de National Westminster Bank (UK). Het gaat hier om een applicatie met een zeer hoge interne warmtelast, namelijk de koeling van de ruimte(n) waarin de centrale computers van de bank zijn opgesteld. Het koelvermogen van deze installatie bedraagt 2 \* 1800 kW.

Tabel 19 Vergelijking kostenaspecten thermosyphon systeem met conventioneel systeem [24].

Systeemtype	Centraal koudwater systeem	Thermosyphon systeem
Kapitaalkosten	100%	120%
Energiekosten	100%	43%
Onderhoudskosten	100%	100%

### Onderhoud.

Voorzover bekend, zijn de onderhoudskosten van een thermosyphon systeem vergelijkbaar met de onderhoudskosten van een conventioneel systeem. Daarbij moet worden opgemerkt dat bij toepassing van een watergekoelde (verdampings) condensor, de onderhoudskosten toenemen als gevolg van de extra kosten voor onderhoud van de condensor (ten opzichte van een luchtgekoelde condensor).

### Ontwerpbenadering.

Het thermosyphon systeem wordt in het ontwerp meegenomen als ware het een conventioneel - uit onderdelen opgebouwd - koudwater aggregaat. Als enige aanpassing dient erop gelet te worden, dat de condensor fysiek hoger wordt geplaatst dan de verdamper van het systeem, en dat (koudemiddel)leidingen met een laag drukverlies worden toegepast tussen de verdamper(s) en de condensor. Vanzelfsprekend dient men rekening te houden met het gebruik van koelplafonds en de toepassing van een verdampingscondensor, wanneer men de optimaal mogelijke energiebesparing wil bereiken.

### Aandachtspunten m.b.t. energiebesparingsbeleid

Mechanische compressie koelsystemen (> 95% van alle systemen in Nederland) zijn uitgevoerd als watergekoelde koelmachine (met koeltoren) of luchtgekoelde koelmachine (met luchtgekoelde condensor). Systemen met koeltoren kunnen gemakkelijk gebruik maken van vrije koeling, luchtgekoelde systemen kunnen dat niet. Luchtgekoelde systemen met koelplafonds kunnen worden “omgevormd” tot Thermosyphon systemen (met verdampingscondensoren), om gebruik te kunnen maken van vrije koeling.

In Nederland is tot nu toe geen expertise op het gebied van thermosyphon systemen aanwezig. Het verdient aanbeveling deze kennis op te pakken, met name in relatie tot bovengenoemde “omvorming” van luchtgekoelde systemen met koelplafonds naar thermosyphon systemen.

### Referenties.

Het thermosyphon systeem wordt in Europa op de markt gebracht door het Engelse bedrijf STAR refrigeration. Tussen 1986 en oktober 1995 zijn in Engeland 14 grote projecten gerealiseerd met thermosyphon systemen, met capaciteiten variërend van 750 kW tot 3600 kW.

In het Nederlandse onderzoek op het gebied van klimaatinstallaties is het thermosyphon systeem tot nu toe niet in de beschouwingen meegenomen. In contacten tussen TNO-MEP en STAR Refrigeration is gesproken over de wenselijkheid om de toepassingsmogelijkheden in Nederland te bestuderen.

### Literatuurverwijzingen Thermosyphon systemen.

- [24] Thermosyphon Cooling  
S.F. Pearson (Star Refrigeration Ltd)  
Institute of Refrigeration (UK), Proc. Inst. R. 1989-90. 6-1.
- [25] Savings with syphons  
Paul Haddlesey  
Heating & Air Conditioning (HAC), november 1991, p 30.

## 6.6 DX - systeem

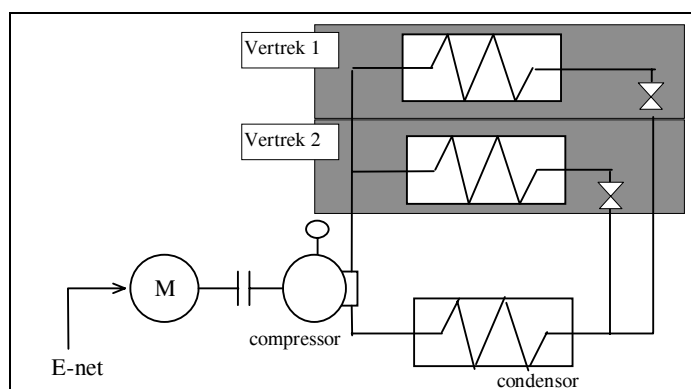
### Beschrijving van de techniek

In de gebruikelijke systemen voor klimatisering wordt gebruik gemaakt van de “media” lucht en/of water voor de distributie van warmte en koude (VAV systemen, Inductie systemen). Als alternatief voor de distributie van warmte en koude kan gebruik gemaakt worden van een “koudemiddel”. Bij een koudemiddel wordt de warmte opgenomen t.b.v. een (vloeistof - damp) fase overgang. Door de grote warmte opname capaciteit per kg (Tabel 20) heeft dit systeem een laag energiegebruik voor distributie.

Tabel 20 Warmte afvoer capaciteit van verschillende media.

Medium	Afvoer capaciteit (kJ/kg)
Lucht (15 °C / 24 °C) $\times = 9.3$ g/kg	9,2
Water ( 6 °C / 12 °C)	25,2
Koudemiddel (R22) bij +10 °C.	196,6

Een DX systeem is, in zijn meest eenvoudige vorm, een standaard koelmachine waarvan de verdamper (binnen - unit) in de te klimatiseren ruimte is geplaatst en de condensor - c.q. de condensing unit - buiten is opgesteld (“split” systeem). Veelal zijn meerdere verdampers gekoppeld aan één condensing unit (“multi-split” systeem). Een principe schema is afgebeeld in Figuur 36.



*Figuur 36 Principe schema van een DX systeem met meerdere binnen units in de vertrekken ("multi-split")*

Een belangrijke variant van het DX systeem, is de omkeerbare ("reversible") uitvoering. In dit geval kan de binnen unit ofwel als verdamp(er) (koel functie) ofwel als condensor (t.b.v. verwarming) optreden. In de configuratie voor verwarming is in feite sprake van een lucht - lucht warmtepomp. Bij "multi split reversible" systemen kan doorgaans elk van de binnen units ofwel koelen ofwel verwarmen, afhankelijk van de lokale behoefte. Zo kan een warmte overschot in één deel van het gebouw naar een ander gedeelte worden getransporteerd, waar een warmtevraag heerst.

In single split systemen wordt de capaciteit doorgaans geregeld door aan/uit schakeling van de compressor, in multi split systemen wordt de capaciteit doorgaans geregeld in stappen (meerdere compressoren) of door een toerenregeling op de compressor (de zogenaamde "inverter" systemen).

DX systemen in de beschreven variëteiten worden door verschillende firma's op de Nederlandse markt gebracht. Het gaat daarbij om systemen opgebouwd uit standaard modules.

#### Randvoorwaarden m.b.t. temperatuurniveaus en distributiesystemen

In een DX systeem zijn koude opwekking en koude afgifte geïntegreerd, zodat geen aansluiting plaatsvindt bij conventionele distributiesystemen bedreven met lucht en/of water.

Ten behoeve van een DX systeem dienen koudemiddel leidingen aangebracht te worden tussen de buiten unit (compressor en condensor) en de verschillende binnen units (expansieventiel en verdamp(er)). Door de toevoerleidingen stroomt vloeibaar koudemiddel, door de afvoerleidingen stroomt koudemiddel damp. In de aan- en afvoerleidingen heerst een overdruk. Bij een typisch DX multi split systeem met 16 binnen units wordt gewerkt met leidingmaten van 13 .. 30 mm

(damp) en 6 .. 13 mm (vloeistof). Voor een goede werking van het systeem is de verticale leidinglengte gebonden aan een maximum. Het is noodzakelijk dat alle koudemiddel voerende leidingen bereikbaar zijn, om eventuele koudemiddel lekkages op te kunnen sporen.

Doorgaans wordt geen informatie verstrekt over de temperatuur niveaus die intern in het DX systeem optreden. Desalniettemin is het niveau van de verdampingstemperatuur van belang voor het gedrag van het DX systeem m.b.t. ontvochtiging van de te klimatiseren vertrekken; een lagere verdampingstemperatuur geeft een grotere ontvochtiging. Informatie over ontvochtiging wordt wel verstrekt in de vorm van verhoudingsgetallen voor voelbare en latente warmte onttrekking bij verschillende binnen- en buitencondities.

Naast een DX systeem dient een apart systeem voor ventilatie aanwezig te zijn, om aan de eisen voor luchtverversing te kunnen voldoen.

#### Randvoorwaarden m.b.t. lokatie en schaalgrootte

Een DX systeem stelt geen specifieke eisen aan de lokatie. Als energiebron is elektriciteit benodigd; dit geldt ook voor de reversibele systemen in de warmtepompfunctie. De warmtebron - in de warmtepomp functie - wordt bij op de markt zijnde DX systemen (single split en multi split) gevormd door buitenlucht.

DX systemen zijn leverbaar in single split uitvoeringen (klimatisering van één vertrek, decentraal systeem) en multi split uitvoeringen, met tot 16 binnen units per buiten unit (centraal systeem). Voor grotere projecten worden meerdere multi split systemen naast elkaar geplaatst.

Voor zeer kleine projecten (enkele te klimatiseren vertrekken) zijn DX systemen doorgaans de enige realistische oplossing. In grotere systemen worden DX-systemen op dit moment nog weinig toegepast. Dit komt omdat men bij het toepassen van het relatief nieuwe systeem grote risico's wil vermijden. Hoe kleiner het systeem, hoe kleiner het financiële risico zal zijn. Op dit moment worden DX-systemen over het algemeen toegepast tot ongeveer 5000 m<sup>2</sup> BVO. Men verwacht dat in de nabije toekomst BVO's tot 10000 m<sup>2</sup> geklimatiseerd zullen gaan worden door DX-systemen.

#### Toepassingsgebieden op basis van gebruikersfuncties

Normale DX systemen verzorgen alleen de koelfunctie, als neveneffect treedt daarbij ontvochtiging op. Reversibele DX systemen verzorgen naast de koelfunctie ook de verwarmingsfunctie - op basis van het warmtepomp principe.

Naast het DX systeem zal doorgaans een ventilatiesysteem nodig zijn voor toevoer van verse lucht. Voor de functie “bevochtiging” (indien die wordt gewenst) is een apart systeem nodig, dat bij voorkeur aansluit op het ventilatiesysteem. Hetzelfde geldt voor de functie “ontvochtiging” - alhoewel een zekere ontvochtiging door het DX systeem wordt bereikt.

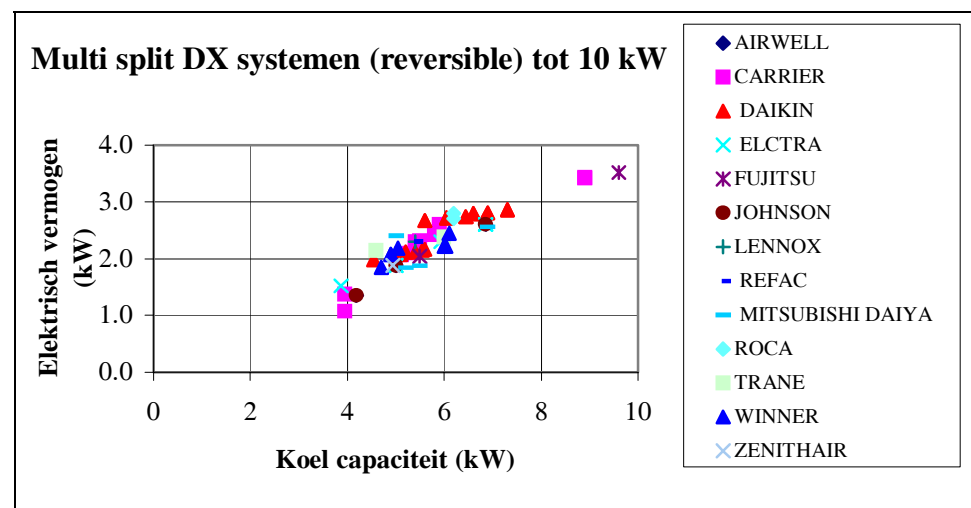
Reversibele DX systemen verzorgen de functies koeling en verwarming - beiden aangedreven door elektriciteit - hetgeen ten opzichte van conventionele verwarmingssystemen het voordeel heeft dat geen gas - aansluiting benodigd is.

### Energetisch rendement in samenhang met mogelijke temperaturniveaus

Prestaties van DX systemen (single en multi split) worden bij vollast gespecificeerd conform de Europese Normen EN 814 (voor koeling) en EN 255 (voor verwarming). Deze normen schrijven de (lucht)condities voor waarbij de prestaties bepaald worden.

Tabel 21 Beproevingcondities DX systemen.

	Koeling: EN 814	Verwarming: EN 255
binnen	27 °C	20 °C
buiten	35 °C	7 °C

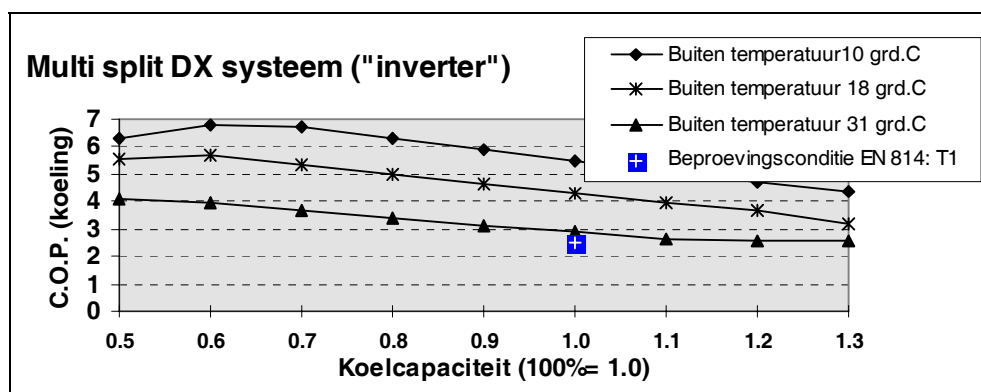


Figuur 37 Prestaties van Multi split systemen tot 10 kW (beproevingconditie EN 814: T1)

In Figuur 37 zijn de prestaties m.b.t. koeling van een aantal multi split DX systemen weergegeven bij de beproevingsconditie T1 volgens EN 814. De gemiddelde C.O.P. van de hier weergegeven (kleine) multi split DX systemen bedraagt 2,50.







Figuur 39 Deellast prestaties (C.O.P.) van een multi split DX “inverter” systeem

In Figuur 39 zijn de deellast prestaties van een multi split DX “inverter” (toerengeregeld) systeem afgebeeld, waarbij ook de prestatie bij vollast is afgebeeld. Duidelijk is dat de prestaties bij deellast ver boven de vollast prestatie uitstijgen, in tegenstelling tot de deellastprestaties van conventionele systemen.

#### Energiebesparingsmogelijkheden componenten.

DX systemen worden als compleet pakket geleverd, waarmee de mogelijkheid om componenten uit te wisselen voor energiebesparende alternatieven voor de installateur of gebruiker niet aanwezig is. Voor de fabrikant liggen er nog mogelijkheden tot energiebesparing door het benutten van het thermosyphon effect (zie “thermosyphon systemen”) of korte termijn koude opslag (waarbij het ijs wordt gebruikt voor onderkoeling van het koudemiddel voor expansie [26]). Wel is het, voor de gebruiker, mogelijk om uit het totale aanbod van DX systemen een energiezuinige keuze te maken. Dit wordt vergemakkelijkt door het op komst zijnde Europese energie label voor air conditioners en warmtepompen, waaronder ook de DX systemen zullen vallen. Met behulp van het energie label is in één oogopslag te zien hoe het systeem energetisch presteert ten opzichte van het marktgemiddelde.

#### Energetische vergelijking met conventionele systemen.

In Tabel 22 wordt een energetische vergelijking gegeven van een multi split DX systeem (inverter) in twee varianten: een normaal systeem (alleen koelen) en een reversibel systeem (koelen en verwarmen) ten opzichte van het vierpijps inductie referentiesysteem (paragraaf 6.4) Dit referentiesysteem lijkt qua koude- en warmtetransport meer op het DX systeem dan het VAV referentiesysteem.

Tabel 22 Energetische vergelijking (op basis van primaire energie) van het DX multi split systeem met het vierpijps inductie (4PI) referentiesysteem.

Energie (%):	4PI referentiesysteem	DX (koelen) + CV + ventilatie	DX (reversibel) + ventilatie
Koude opwekking	33	16	16
Verwarming	37	37	7
Bevochtiging	-	p.m.	p.m.
Transport	30	26	26
Totaal	100	79	49

Uit Tabel 22 blijkt dat voor wat betreft de koude opwekking en de warmte opwekking besparingen optreden bij toepassing van een DX systeem van 21% (“cooling only”) tot 51% (reversibel). Daartegenover staat dat een apart systeem voor bevochtiging en ontvochtiging nodig is (indien bevochtiging gewenst is), waar dit in de VAV en 4PI reeds is inbegrepen in de koude- en warmte opwekking. Voor het transport zijn bij het DX systeem dezelfde energie gebruiken aangehouden voor ventilatoren (ventilatielucht) als bij het 4PI systeem, het energiegebruik voor de koelwater en warmwater pompen blijft bij de DX systemen achterwege.

In het normblad NEN 2916 zijn systeem rendementen gegeven voor de verschillende voorkomende typen klimaatinstallaties, een systeem rendement voor DX systemen ontbreekt echter. Naar aanleiding hiervan is door TNO - MEP een systeem rendement bepaald voor een DX “inverter” systeem voor koeling, waarbij ook de C.O.P. voor koude opwekking van hetzelfde systeem is bepaald. De resultaten zijn vastgelegd in een “gelijkwaardigheidsverklaring” ten behoeve van de EPN.

Tabel 23 Rendementen in de koelfunctie volgens de EPN (NEN 2916:1994 en pre norm NEN 2916:1998) en de gelijkwaardigheidsverklaring (TNO-MEP R97-474)

	4PI referentie	DX “inverter”	DX reversibel
Opwekkings rendement	4.0	4.8	4.0
Systeem rendement (1994)	0.75	0.95	-
Systeem rendement (1998)	0.93	0.95	-

In de waardering volgens de EPN vinden we een besparing van 34% (1994) c.q. 18% (1998) op de koudevoorziening door het DX inverter systeem ten opzichte van het Vierpijps inductie referentiesysteem.

### Milieu effecten.

DX systemen hebben ten opzichte van conventionele systemen (koude opwekking m.b.v. een koudwater aggregaat) een grotere koudemiddel inhoud.

Volgens opgave van een fabrikant heeft een DX systeem een koudemiddel inhoud van circa 0,5 kg per kW koelvermogen, tegenover 0,3 kg/kW voor een 4PI systeem en 0,4 kg/kW voor een VAV systeem.

In de huidige generatie multi split DX systemen worden milieuvriendelijke koudemiddelen toegepast.

#### Aandachtspunten m.b.t. energiebesparingsbeleid

Vooraf voor kleinere projecten (8 - 16 afgifte units) en bij renovaties is het multi split DX systeem een zeer goede oplossing voor klimatisering; gebruikmakend van toerengeregelde reversibele warmtepompen. Ook voor situaties met gelijktijdige warmte- en koudevraag is het systeem een goede oplossing, die de mogelijkheid heeft warmte te transporteren van vertrekken met een overschot naar vertrekken met een warmtebehoefte. Naast goede opwekkings- en systeemrendementen, heeft het systeem het bijkomende voordeel dat geen energie voor warmte- en koudetransport benodigd is. In de huidige generatie systemen worden milieuvriendelijke koudemiddelen toegepast.

In de Nederlandse literatuur betreffende klimatisering en de bijbehorende hulpmiddelen wordt geen of weinig aandacht besteed aan multi split DX systemen. Een aandachtspunt in het energiebesparingsbeleid kan daarom zijn, om bij uit te voeren energiebesparingsstudies en in nieuwe hulpmiddelen (variantenboeken e.d.) plaats in te ruimen voor het multi split DX systeem als één van de mogelijke klimatiseringssystemen (naast all-air en lucht/water systemen).

#### Referenties.

Europees gezien speelt de organisatie van fabrikanten van koeltechnische apparatuur EUROVENT een centrale rol waar het gaat om DX systemen. Jaarlijks wordt door EUROVENT een “Directory of Certified Products” uitgegeven, waarin op een vergelijkbare basis de belangrijkste technische informatie van 95% van alle DX systemen op de Europese markt wordt gegeven. Met het EUROVENT certificatieprogramma wordt de juistheid van de gegevens gecontroleerd. Binnen de organisatie van EUROVENT houdt Werkgroep 6B zich met name bezig met airconditioning.

In Nederland is Daikin de marktleider op het gebied van DX multi split systemen (aangeduid als “VRV systemen”). Nederlands importeur is ITHO / Danfoss.

In de Nederlandse onderzoekpraktijk op het gebied van klimaatinstallaties komen de DX systemen veelal niet aan de orde (getuige de omissie van een systeemrendement voor DX systemen in de EPN). TNO-MEP heeft daarom, voor een fabrikant van dergelijke systemen, de energetische prestaties van DX multi split inverter systemen beoordeeld, met name in het kader van de waardering van DX systemen binnen de EPN.

### Literatuurverwijzingen DX systemen.

- [26] ijsopslag geïntegreerd in klimaatsysteem verhoogt koelcapaciteit  
N. Kusumoto  
Koude Magazine, oktober 1992, p.10
- [27] Directory of Certified Products, February 1, 1997 - January 31, 1998  
EUROVENT Certification Company, Paris (F).
- [28] Afleiding van het systeemrendement voor koeling bij klimaatinstallaties  
t.b.v. EN 2916  
- Systemen met koeltransport via koudemiddel - S.M. van der Sluis  
TNO-MEP rapport R 96/474 (december 1996)
- [29] Praktijk katern: Daikin introduceert  
M. Prummel  
Koude & Luchtbehandeling, jaargang 90 nr. 3 (maart 1997).
- [30] Energy labelling of residential air conditioners, heat pumps and  
dehumidifiers  
G.R. King, M. Mondot, J. Nyvad, P. Fahlén, H. Schiphouwer en  
S.M. van der Sluis  
TNO-MEP rapport R 97/498 (december 1997)

## 6.7 Versatemp systeem

### Beschrijving van de techniek

Het Versatemp systeem is niet zoals de eerder beschreven systemen een generiek type systeem, maar een handelsmerk van één (Engelse) firma<sup>1</sup>. Desalniettemin is het systeem interessant genoeg om als alternatief systeem nader te beschouwen. Bij een dergelijk systeem is in elk te klimatiseren vertrek een “Versa Temp Unit” aanwezig, waarin een “reversibele” warmtepomp is opgenomen. Alle units zijn aangesloten op een centraal waternet, waarin water van een constante temperatuur (circa 27 °C) gecirculeerd wordt.

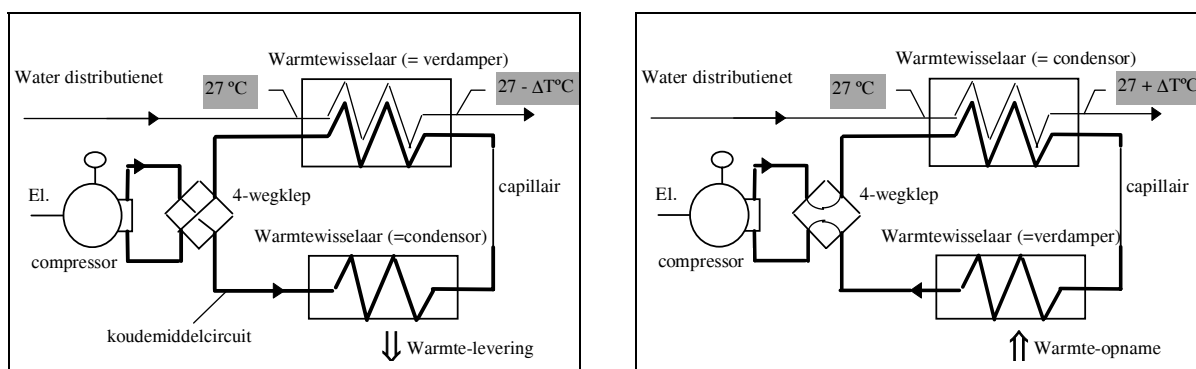
In de warmtepompfunctie levert de unit warmte aan het vertrek; als lage temperatuur warmtebron voor de elektrische warmtepomp wordt het waternet (27 °C) gebruikt.

---

<sup>1</sup> Inmiddell zijn ook andere bedrijven met soortgelijke systemen (alhoewel in een kleinschaligere uitvoering) op de markt gekomen.

In de “reverse mode”, ofwel de koelfunctie van de Versa Temp Unit wordt warmte uit het vertrek opgenomen, en door de elektrische koelmachine (omgekeerde warmtepomp) aan het waternet (27 °C) afgegeven.

Het omschakelen van de unit van warmtepompfunctie naar koelfunctie gebeurt met behulp van een 4-wegklep (Figuur 40). Ten opzichte van de conventionele koelmachine (of warmtepomp) is er een ander expansie-orgaan toegepast, het capillair (dit is bi-directioneel) in plaats van het expansieventiel.



Figuur 40 Versa Temp Unit, links in warmtepompfunctie, rechts in koelfunctie

Het centrale waternet wordt op een constante temperatuur van circa 27°C gehouden. Voor het winterbedrijf (de units leveren warmte) is een hulpbron (ketel, stadsverwarming of andere restwarmte) nodig om de warmte aan het net toe te voeren. Voor het zomerbedrijf (de units koelen, en leveren de opgenomen warmte aan het waternet) moet het waternet gekoeld worden, bijvoorbeeld met mechanische koeling of een koeltoren (open of gesloten). Ook een aquifer kan als koelbron dienen

Bij verschillende geveloriëntaties kan er (in de tussenseizoenen) gelijktijdig bij de ene gevel een overschot aan warmte zijn en bij een andere gevel juist een warmtevraag. Ook kunnen er gelijktijdig zônes met een koelvraag en andere zônes met een warmtevraag zijn. Via het waternet vindt dan intern warmteuitwisseling plaats, zonder hulpbronnen aan te spreken.

Om watervervuiling in het systeem te voorkomen dient men een gesloten systeem toe te passen. Via de gesloten of open koeltoren wordt de overtollige warmte afgevoerd. De Versatemptoestellen zorgen voor de recirculatie en de koeling of naverwarming van de apart naar de ruimten toe te voeren verversingslucht.

#### Temperatuurniveaus in het distributiesystemen

Inherent aan het Versatemp systeem is het waternet, waarin warmte- en koude distributie plaatsvindt. Wanneer in een praktijk systeem alle units koelen, zal een

temperatuurstijging van het waternet in de orde van 10 °C plaatsvinden; wanneer alle units verwarmen een temperatuurdaling in de orde van 7 °C.

### Toepassingsgebieden op basis van gebruikersfuncties

Naast het Versatemp systeem zal doorgaans een ventilatiesysteem nodig zijn voor toevoer van verse lucht. Voor de functie “bevochtiging” is een apart systeem nodig, dat bij voorkeur aansluit op het ventilatiesysteem. Hetzelfde geldt voor de functie “ontvochtiging” - alhoewel een zekere ontvochtiging door het Versatemp systeem wordt bereikt.

### Energetisch rendement

De units zijn uitgerust als reversibele warmtepomp, en werken met een vaste warmte- opname temperatuur (warmtepompfunctie) c.q. afgiftetemperatuur (koelfunctie) van 27 °C. De units bevatten roterende compressoren, om tegemoet te komen aan de eisen m.b.t. het geproduceerde geluidsniveau.

In de warmtepompfunctie bedraagt de C.O.P.H. volgens documentatie van de fabrikant 3,0 (vollast) en in de koelfunctie bedraagt de C.O.P. volgens opgave 2,1 (vollast). De units worden “aan/uit” geregeld, en zijn dus (nog) niet voorzien van toerenregeling.

Bij vollast moet verder nog rekening worden gehouden met de warmtelevering aan het waternet (warmtepompfunctie) of de warmte onttrekking aan het waternet (koelfunctie). Hiervoor bestaat de keuze uit een aantal systemen, waarbij de betreffende rendementen gehanteerd moeten te worden.

Wanneer alle units koelen, of alle units verwarmen, zal het totale systeemrendement laag zijn ten opzichte van conventionele systemen, vanwege de “tweetraps” benadering. Bij een gelijktijdige warmte- en koudebehoefte kunnen de bovenstaande C.O.P. waarden worden gehanteerd.

Een mogelijkheid tot energiebesparing die niet door de leverancier wordt genoemd, en voorzover bekend ook nog niet is toegepast, is het koppelen van het waternet aan een aquifer bronnen-doublet. In dat geval kan de toevoer van koude of warmte aan het waternet sterk worden gereduceerd, en is zelfs theoretisch gelijk aan nul wanneer de jaarlijkse warmtebehoefte gelijk is aan circa 2,2 maal de koudebehoefte ( $f_{kb} = 0,31$ ). Bij toepassing van een aquifer doublet zal de temperatuur van het waternet echter wel lager gekozen moeten worden (10 - 15 °C).

### Energetische vergelijking met conventionele systemen.

In Tabel 24 wordt een energetische vergelijking gegeven van een standaard Versatemp systeem (+koeltoren en verwarmingsketel) in twee varianten: een systeem zonder gelijktijdige warmte- en koudevraag, en een systeem met volledig gelijktijdige warmte- en koudevraag ten opzichte van het Vierpijps inductie referentiesysteem (paragraaf 6.4) Dit referentiesysteem lijkt qua koude- en

warmtetransport meer op het Versatemp systeem dan het VAV referentiesysteem. In de praktijk zullen systemen tussen de twee geschetste uitersten opereren.

*Tabel 24 Energetische vergelijking (op basis van primaire energie) van het Versatemp systeem (in twee varianten) met het vierpijps inductie (4PI) referentiesysteem.*

<b>Energie (%):</b>	<b>4PI referentiesysteem</b>	<b>Versatemp 0% gelijktijdigheid</b>	<b>Versatemp 100% gelijktijdigheid</b>
Koude opwekking	33	38	34
Verwarming	37	48	11
Bevochtiging	-	p.m.	p.m.
Transport	30	30	30
Totaal	100	116	75

Uit Tabel 24 blijkt het Versatemp systeem ten opzichte van het vierpijps inductie referentiesysteem een energiegebruik te hebben, dat afhankelijk van de optredende gelijktijdigheid tussen warmte- en koudebehoefte 16% meer (geen gelijktijdigheid) of 25% minder (volledige gelijktijdigheid) bedraagt.

Volgens de EPN systematiek moet het systeem aangemerkt worden als een systeem waarbij warmte- en koudetransport transport beiden worden verzorgd door water en lucht. Omdat - in de koelfunctie - de koeling wordt gerealiseerd met behulp van compressie koelsystemen (omgekeerde elektrische warmtepomp), dient een opwekkingsrendement van 4,0 gehanteerd te worden.

*Tabel 25 Rendementen in de koelfunctie volgens de EPN (NEN 2916:1994 en pre norm NEN 2916:1998) voor het standaard Versatemp systeem (+koeltoren en warmwaterketel).*

	<b>4PI referentie</b>	<b>Versatemp 0% gelijktijdigheid</b>	<b>Versatemp 100% gelijktijdigheid</b>
Opwekkings rendement	4.0	4.0	4.0
Systeem rendement (1994)	0.75	0.55	0.55
Systeem rendement (1998)	0.93	0.93	0.93

In de waardering volgens de EPN vinden we, in de huidige versie (1994) een energiegebruik voor koeling van het Versatemp systeem dat 27% hoger is dan dat van het 4PI referentiesysteem. In de pre-norm (1998) is er, qua energiegebruik voor koeling, geen verschil met het referentiesysteem.

#### Milieu effecten.

De koudemiddel inhoud van het systeem is verdeeld over een groot aantal kleine units, (omkeerbare warmtepompen). Daarbij is de kans op koudemiddellekkage - vanwege de statistiek - groter dan bij een centraal systeem, maar zijn de gevolgen

bij een lekkage aanzienlijk geringer. Overigens zijn de kansen op koudemiddel lekkages in seriematig vervaardigde kleine apparatuur (zoals bijvoorbeeld koelkasten) vrij gering.

### Ontwerp benadering.

De systemen zijn qua ontwerpsystematiek volledig te vergelijken met een lucht-water systeem. Het voordeel ten opzichte van een vierpijps systeem, is dat het hier om een tweepijps systeem gaat.

### Aandachtspunten m.b.t. energiebesparingsbeleid

De systemen leveren goede energetische prestaties wanneer er sprake is van een grote gelijktijdigheid in de warmte- en koudevraag van een gebouw. In dergelijke situaties wordt het systeem zonder of met minimale warmte- of koude-opwekking bedreven. Het Versatemp systeem is vergelijkbaar met het (reversibele) multi split DX systeem, maar is energetisch in het nadeel ten gevolge van het extra watercircuit. Dit watercircuit opent echter ook mogelijkheden, zoals het toepassen van Lange (en korte-) Termijn Koude opslag, en aandrijving met restwarmte.

Koppeling van het systeem met koude opslag, bijvoorbeeld in de vorm van verticale bodemwarmtewisselaars, is een energetisch interessante optie die de moeite waard is om nader te onderzoeken en eventueel tot ontwikkeling te brengen. Daarbij zal de aandacht moeten uitgaan naar het aanpassen van het temperatuurniveau van het centrale waternet (in het bestaande systeem 27 °C) naar een lagere temperatuur, aansluitend op opslagsystemen.

### Referenties.

Zoals reeds vermeld, is het Versatemp systeem een handelsmerk van een Engelse firma. Tegenwoordig zijn ook vergelijkbare systemen in kleinere omvang (vergelijkbaar met split- en multi split systemen) verkrijgbaar van andere fabrikanten. In Nederland wordt Versatemp apparatuur geleverd door IBK Compac.

### **Literatuur verwijzing Versatemp systemen**

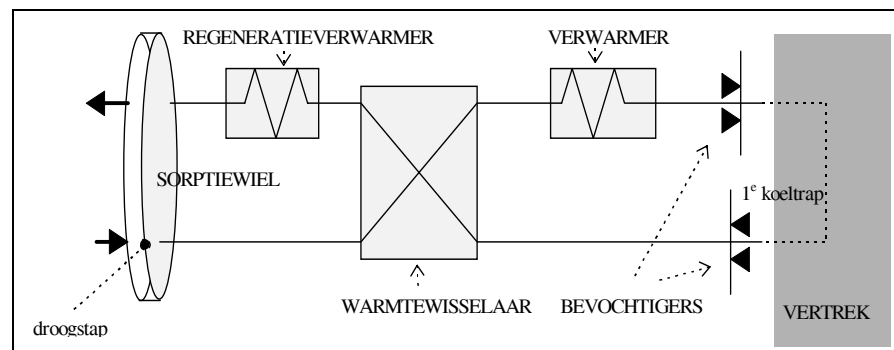
- [31] Het Versatemp warmtepomp comfort air conditioning systeem.  
Artikel/brochure van IBK Compac koudetechniek & airconditioning.



## 6.8 Desiccative Evaporative Cooling (DEC systeem).

### Beschrijving van het systeem

Desiccative Evaporative Cooling (DEC), ook bekend onder de naam “Cascadekoeling”, is a.h.w. een uitbreiding van adiabatische koeling (zoals behandeld in hoofdstuk 4) met een extra stap voor droging van de toevoerlucht. DEC is een proces van koeling van lucht door droging (ontvochtiging), warmte-uitwisseling en bevochtiging, die een sterker koelend effect oplevert dan adiabatische koeling alleen. In Duitsland en Zweden is deze wijze van luchtkoeling al in enkele tientallen projecten gerealiseerd. De gebruikers zijn tevreden, mede door de lagere exploitatiekosten [32].



Figuur 41 Principeschema Desiccative Evaporative Cooling

Het DEC-systeem kan worden toegepast in elk gebouw met een mechanisch ventilatiesysteem waar sprake is van koeling door middel van het inblazen van gekoelde lucht en waar de behandeling van de inblaaslucht in een centrale luchtbehandelingsruimte plaatsvindt.

De in hoofdstuk 4 beschreven adiabatische koeling vormt de eerste koeltrap van het DEC-systeem[32]. Bij adiabatische koeling wordt de lucht bevochtigd, waardoor de temperatuur daalt (door verdamping van het ingebrachte vocht, bij het verdampingsproces wordt warmte opgenomen). De bevochtiger (mate van waterverneveling) regelt de koelcapaciteit in de eerste koeltrap. In 50 tot 70% van de gevallen, waarbij sprake is van koudevraag voor ventilatielucht, is koeling van de toevoerlucht met de eerste koeltrap voldoende. De “eerste koeltrap” werkt op de uit het vertrek afgevoerde lucht (zie Figuur 41).

In situaties waar alleen topkoeling van de ventilatielucht vereist is, kan volstaan worden met deze eerste koeltrap. Bij een aanzuigconditie van 25°C/50% en een retourluchtconditie van 23°C/60% is bijvoorbeeld een inblaastemperatuur van 19°C realiseerbaar. Hierbij dient wel te worden opgemerkt dat het koelend vermogen tijdens warme en vochtige dagen laag is. Door de hoge vochtigheid neemt de afvoerlucht namelijk weinig vocht op, zodat de toevoerlucht slechts gedeeltelijk

wordt gekoeld. Bij een buitenconditie van 28°C/60% en een ruimteconditie van 26°C/70% wordt de lucht bijvoorbeeld afgekoeld tot slechts 24°C.

Door inschakeling van een tweede koeltrap wordt een sterker koelend effect verkregen. In deze situatie droogt het sorptiewiel de toevoerlucht (Figuur 41), waardoor de temperatuur toeneemt en het vochtgehalte daalt. De toevoerlucht wisselt hierna warmte uit met de adiabatisch bevochtigde afvoerlucht, en wordt dus gekoeld. Als de tweede koeltrap in bedrijf is, wordt de afvoerlucht maximaal bevochtigd (=gekoeld).

De regeneratieverwarmer in de retourstroom verwarmt de afvoerlucht (wanneer de tweede koeltrap is ingeschakeld). Vervolgens regenerereert de warme afvoerlucht het sorptiewiel. De regeneratieverwarmer is dus de drijvende kracht achter het droogproces. De regeneratieverwarmer regelt op de uitblaasenthalpie de koelcapaciteit door variatie van het verwarmingsvermogen. De bevochtiger in de toevoerlucht bevochtigt tot de gewenste inblaastemperatuur, die begrensd wordt door de maximaal toegestane inblaasluuchtvochtigheid.

Met de tweede koeltrap kan lucht van 28°C/55% worden gekoeld tot minimaal 14°C. De verhouding geleverde koude/toegevoerde warmte ligt bij de tweede trap, afhankelijk van de koelconditie, tussen de 0,6 en 1,0.

#### Randvoorwaarden m.b.t. temperatuurniveaus in het distributiesysteem

De werking van het DEC systeem is zeer afhankelijk van de temperatuur en het vochtgehalte van de toevoerlucht (doorgaans de buitenlucht). Inherent aan het systeem is bijvoorbeeld, dat de minimaal te bereiken inblaastemperatuur afhankelijk is van de condities van de toevoerlucht. Bij een toevoerluchtconditie van bijvoorbeeld 28 °C / 55% relatieve vochtigheid, is de minimum te bereiken inblaastemperatuur 14 °C.

#### Randvoorwaarden m.b.t. lokatie

Het DEC systeem wordt volledig geïntegreerd in de luchtbehandelingskast van de klimaatinstallatie. Hierdoor nemen de afmetingen en de vloerbelasting van de luchtbehandelingskast toe, maar daartegenover staat dat een koelmachine (en de daarbij behorende ruimte voor opstelling) uitgespaard wordt; het DEC systeem wordt immers met warmte gevoed.

Vanwege de toepassing van een warmtewiel tussen toevoer en afvoerlucht, is het noodzakelijk dat de luchttoevoer en de luchtafvoer fysiek naast elkaar geplaatst worden. Dit geldt overigens ook voor gewone warmte terugwinningseenheden en recirculatiesystemen, en is doorgaans geen groot bezwaar.

### Randvoorwaarden energievoorziening

Het DEC systeem wordt aangedreven door warmte (tweede koeltrap, in de regeneratieverwarmer) met een temperatuurniveau van 50 - 70 °C. Dit maakt het systeem zeer geschikt voor toepassing met bijvoorbeeld stadsverwarming, restwarmte of W/K koppeling. Elektrische energie is in zeer beperkte mate nodig voor de energievoorziening van de bevochtigers en rotatie van het warmtewiel.

### Energetische aspecten

Bij bedrijf van alleen de eerste koeltrap is het DEC systeem gelijk aan een systeem voor verdampingskoeling (vrije koeling), en heeft slechts een zeer gering energiegebruik t.b.v. de bevochtigers (energiegebruik voor koeling eerste trap heeft een "C.O.P."  $\approx 100$ ). De tweede trap echter is qua energiegebruik vergelijkbaar met een absorptiekoelmachine, met een C.O.P. tussen 0,6 en 1,0. Hierdoor is het "overall" rendement voor koude opwekking lager dan bij een conventionele compressie koelmachine.

In de wintersituatie, wanneer het DEC systeem voor verwarming wordt ingezet, heeft het systeem een goede warmteterugwinning (rendement 80 - 90%). Hierdoor is het systeem in de wintersituatie efficiënter dan conventionele verwarmingssystemen met warmteterugwinning.

In Tabel 26 wordt een energetische vergelijking gegeven van een DEC systeem ten opzichte van het VAV referentiesysteem (paragraaf 6.4). Dit referentiesysteem lijkt qua koude- en warmtetransport meer op het DEC systeem dan het Vierpijps inductie referentiesysteem. De luchtbehandelingskast van een VAV systeem kan in gedachten vervangen worden door een DEC luchtbehandelingskast.

Tabel 26 *Energetische vergelijking (op basis van primaire energie) van het DEC systeem met het VAV referentiesysteem.*

Energie (%):	VAV referentiesysteem	DEC systeem
Koude opwekking	29	61
Verwarming	46	9
Bevochtiging	-	-
Transport	25	25
Totaal	100	95

Uit Tabel 26 blijkt het DEC systeem ten opzichte van het VAV referentiesysteem een energiegebruik te hebben, dat over het geheel genomen 5% lager ligt. In de literatuur worden hogere waarden voor de besparing genoemd (In referentie [32] bijvoorbeeld wordt een overall besparingspercentage van 15% genoemd). De reden voor deze verschillen ligt met name in de verhouding warmtebehoefte / koudebehoefte. Hoe groter de fractie warmtebehoefte ( $f_{wb}$ ) in de totale warmte- en koudebehoefte is, hoe groter de energiebesparing. In het in dit rapport gebruikte

VAV referentiesysteem is de fractie warmtebehoefte circa 0,33 en in referentie [32] circa 0,83 - hetgeen de verschillen in de opgegeven besparingen verklaart. Volgens de EPN systematiek moet het DEC systeem aangemerkt worden als een systeem waarbij warmte- en koudetransport beide worden verzorgd door lucht. NEN 2916:1994 voorziet niet in absorptiekoeling. NEN 2916:1998 voorziet in absorptiekoeling op stadsverwarming of WKK.

*Tabel 27 Rendementen in de koelfunctie volgens de EPN (NEN 2916:1994 en pre norm NEN 2916:1998) voor het DEC systeem, in vergelijking met het VAV referentiesysteem.*  
( $\eta_{el}$  = rendement elektriciteitsvoorziening;  $\eta_{warmte}$  = rendement voor warmtelevering door derden).

	VAV referentie	DEC systeem
Opwekkings rendement	$4.0 * \eta_{el}$	$0.7 * \eta_{warmte}$
Systeem rendement (1994)	0.45	0.45
Systeem rendement (1998)	1.00	1.00

In de waardering volgens de EPN vinden we voor het DEC systeem in koelbedrijf ten opzichte van het VAV systeem alleen een meerverbruik vanwege het verschil in opwekkingsrendementen. Hieruit volgt (voor koeling) een meerverbruik van het DEC systeem met circa een factor 2.

#### Milieu aspecten.

Het DEC systeem maakt geen gebruik van koudemiddelen, zodat Ozone Depletion en Direct Greenhouse Warming ten gevolge van koudemiddelen vermeden worden. Wel is er sprake, voor koeling althans, van een verhoging van het energiegebruik hetgeen leidt tot een hogere indirecte bijdrage aan Greenhouse Warming. Door de afwezigheid van een koelmachine, is er ook geen sprake van eventuele geluidsoverlast door condensor- of koeltoren ventilatoren.

#### Kostenaspecten.

De droogrotor (2<sup>e</sup> trap koeling) is momenteel nog een duur onderdeel van het DEC systeem. Economische afwegingen zijn moeilijk te maken, omdat nog weinig gegevens bekend zijn over de levensduur van de droogrotor. Tegenover de extra kosten voor de droogrotor staat dat er geen investeringen gedaan hoeven te worden voor een koelmachine. Bovendien zijn de onderhoudskosten laag (voorzover nu in te schatten), en zijn de totale energiekosten (warmte + koudelevering) lager dan bij een conventioneel systeem.

Verder komt het DEC systeem voor verschillende subsidies in aanmerking [32].

### Aandachtspunten m.b.t. energiebesparingsbeleid

DEC systemen hebben onlangs op de Nederlandse markt hun intrede gedaan. Een groot voordeel van het systeem is, dat het, zowel voor warmte- als koudelevering, alleen met warmte wordt aangedreven - hetgeen combinaties met WKK, stadsverwarming en eventueel zonne-energie mogelijk maakt. DEC systemen “scoren” energetisch gezien het best in systemen met een grote warmtebehoefte ten opzichte van de koudebehoefte.

Gezien het toenemende belang van warmtegedreven systemen (stadsverwarming, WKK) verdient het aanbeveling het DEC systeem door te ontwikkelen. Daarbij zal aandacht moeten worden besteed aan de prijs/prestatie van de absorptierotor, en aan mogelijke combinaties van DEC systemen met andere energiebesparende systemen (zoals zonne-energie benutting).

### Referenties

In Nederland wordt het Desiccative Evaporative Cooling (DEC) systeem gepromoot door DWA Installatie- en Energieadvies te Bodegraven. DWA en NOVEM zijn betrokken bij het realiseren van de toepassing van een DEC systeem voor kantoorcooling, aangedreven door restwarmte [32].

- [32] Desiccative Evaporative Cooling - koeling van lucht door ontvochtiging, warmte-uitwisseling en bevochtiging.  
R.C.A. Schilt  
TVVL magazine 12/97 (december 1997), p. 8
- [33] Koelen door verdampen - alternatief bij koelen van lucht onder het dauwpunt  
L.N.F.M. Goossens  
TVVL magazine 12/97 (december 1997), p. 14
- [34] Onderzoek toepassing DEC-systeem, met en zonder warmtepomp, in de utiliteitsbouw  
Rapportage t.b.v. NOVEM, contractnummer 3382.20/119.6  
DWA installatie- en Energieadvies, Bodegraven, 1 juli 1996

## **6.9 IJsslurrie koude distributie systemen**

### Beschrijving van de techniek

In klimatiseringssystemen worden voor de distributie van koude meestal de media lucht en water toegepast. Een andere mogelijkheid is de toepassing van een medium dat een fase-overgang (vloeistof-damp of vast-vloeibaar) ondergaat tijdens

de opname van warmte. Bij gebruikmaking van een fase overgang kan de temperatuur van het medium in principe gelijk blijven bij warmte-opname. Bij een ijsslurrie, bestaande uit een mengsel van water met zeer fijne ijsdeeltjes, treedt de fase overgang op bij het smelten van de ijsdeeltjes. De warmte-afvoercapaciteit per kg is voor media met een faseovergang veel groter dan voor media zonder fase-overgang (Tabel 28). Dit betekent dat bij toepassing van een ijsslurrie de leidingen, de warmtewisselaars en de pompcapaciteit van het distributiesysteem veel kleiner, en dus goedkoper, zijn dan bij toepassing van koudwater. De warmte afvoer capaciteit van een ijsslurrie kan worden vergroot door ook gebruik te maken van “normale” opwarming nadat alle ijsdeeltjes zijn gesmolten.

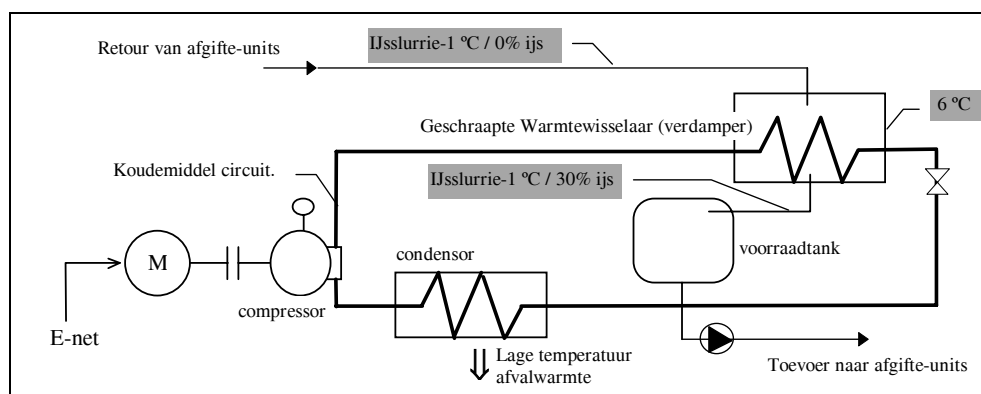
De ijsslurrie bestaat uit water met een toevoeging. Als toevoegingen worden alcoholen, zouten of suikers gebruikt. Afhankelijk van de soort en de hoeveelheid toevoeging is het mogelijk ijskristallen te produceren bij een temperatuur van  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  tot  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Tabel 28 Warmte afvoer capaciteit water en ijsslurrie.

Medium	Afvoer capaciteit [kJ/kg]
Water ( $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	25
Ijsslurrie ( $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 20% ijs)	134
Ijsslurrie ( $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 25% ijs)	83

Een ijsslurrie distributiesysteem bestaat in principe uit een opslagvat met ijsslurrie waaruit de ijsslurrie naar de diverse koudegebruikers (warmtewisselaars) en weer terug wordt gepompt, analoog aan een koudwater distributiesysteem. Omdat voor klimatiseringssystemen in de utiliteitsbouw minimaal een koudwater temperatuur van  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  wordt gehanteerd, is het Flo-Ice systeem energetisch nadelig omdat een “watertemperatuur” onder  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  nodig is. Dit probleem wordt opgelost wanneer het systeem deels of geheel gebruik wordt als korte termijn koude opslag systeem (OPAC) met gebruikmaking van een vergroot opslagvat. Lage buitentemperaturen ‘s nachts worden dan benut om de ijsbuffer te laden bij een laag elektriciteitsstarief. De productie van de ijsslurrie kan ruwweg op twee manieren gebeuren.

Het eerste systeem voor ijsslurrie productie werkt als een conventionele koelinstallatie, waarvan de verdamper is vervangen door een ijsgenerator (meestal in de vorm van een geschraapte warmtewisselaar). De warmtewisselaar bestaat uit een dubbelwandige buis waarin het koudemiddel tussen de binnen- en de buitenbuis verdampt en hierbij de koudedragers zodanig afkoelt dat er ijsvorming optreedt aan de binnenkant van deze warmtewisselaar. De ijslaag wordt continu van de wand verwijderd door een aantal schrapers.



Figuur 42 Principe schema ijslurrie systeem (geschraapte wisselaar) met korte termijn opslag

Bij het tweede systeem wordt water als koudemiddel gebruikt. In een vacuümvat verdampt water waardoor warmte wordt onttrokken aan het aanwezige water. De warmteonttrekking resulteert in de vorming van ijskristallen in de vloeistof. De vorming van de ijskristallen vindt plaats onder tripel-punt condities (evenwichtsconditie vaste, vloeibare en dampvormige fase), voor water is dit 6 mbar en 0 °C. De waterdamp kan via compressie en condensatie (direct systeem) of door sublimatie op een sublimatie warmtewisselaar (indirect systeem) worden afgevoerd. De sublimatiewarmtewisselaar is de verdamer van een conventionele koelinstallatie.

#### Randvoorwaarden m.b.t. temperatuurniveaus en distributiesystemen

Toepassing van een ijslurrie betekent dat de temperatuur waarmee het medium aan het distributiesysteem wordt toegevoerd, maximaal -1 tot -0,5 °C bedraagt. De afvoertemperatuur is niet gebonden aan een bepaald temperatuurniveau, maar is afhankelijk van het niet of juist wel gebruik maken van de voelbare warmte (temperatuurverhoging) van het water na het volledig gesmolten zijn van de ijskristallen.

In de meeste gevallen wordt in combinatie met ijsopslag een VAV systeem toegepast, met een toevoer van koud water (1 - 2 °C) aan de luchtbehandelingskast. Er kan dan gekozen worden voor een luchtdistributiesysteem met “normale” luchttemperaturen, of voor een “koude lucht” (3 - 4 °C) luchtdistributiesysteem (met gebruikmaking van kleinere luchtkanalen). In het laatste geval wordt in de afgifte unit de lucht gemengd (fan coil unit), om condensatieproblemen te voorkomen.

Bij het flo-ice systeem ligt de uitdaging echter in de mogelijkheid gebruik te maken van de goede distributie-eigenschappen van de ijslurrie (distributieleidingen met kleine diameter) tot aan de afgifte units. Het distributiesysteem is dan in principe gelijk aan dat voor koudwater. De dimensies van de diverse componenten, met

name de leidingdiameters en de warmtewisselaars, en het benodigde pompvermogen kunnen bij toepassing van een ijsslurrie veel kleiner worden gekozen. Het probleem dat bij dit systeem overkomen moet worden, is de vorming van condens (of rijp) op de warmtewisselaar van de afgifte unit. Hiervoor zijn twee oplossingen denkbaar:

- warmtewisselaar tijdens kantooruren onder vriespunt, waardoor rijpvorming optreedt (in plaats van vloeibaar condenswater). Na kantoortijd wordt op natuurlijke wijze ontdooid (vocht afvoer door ventilatielucht). Indien de warmtewisselaars niet alleen voor koeling maar ook voor verwarming worden gebruikt, moet een optimalisatie plaatsvinden voor beide gebruikstypen.
- toepassing van een secundair watercircuit in de afgifte unit, waarvan de temperatuur hoger wordt gekozen (bijvoorbeeld 6 / 12 °C). Bij deze oplossing vervalt het voordeel van het ijsslurrie systeem van de kleinere afmeting van warmtewisselaars in de afgifte unit (de leidingdiameters blijven echter wel klein).

#### Randvoorwaarden m.b.t. lokatie

Een ijsslurriesysteem stelt op zich geen bijzondere voorwaarden aan de lokatie. Gezien het feit dat toepassing in de utiliteit alleen energetisch gunstig is wanneer gebruik gemaakt wordt van korte termijn koude opslag, worden de mogelijkheden voor toepassing bepaald door de mogelijkheid om ijsslurrie opslag tanks te plaatsen. Per 100 kW benodigde koelcapaciteit moet gerekend worden op circa 10 - 15 m<sup>3</sup> opslag capaciteit. Vanwege de hoge vloerbelasting verdient plaatsing van de opslag in de kelder van het gebouw de voorkeur.

#### Benodigde schaalgrootte

Ijsslurriesystemen zijn alleen geschikt voor klimatiseringssystemen waarbij de koude centraal wordt opgewekt. De systemen zijn vergelijkbaar met koudwatersystemen. De schaalgrootte wordt bepaald door de capaciteit, het ruimtebeslag en de economische aspecten van de ijsslurrie producerende units. De geschraapte warmtewisselaar wordt door één firma onder de naam FLO-ICE op de Nederlandse markt gebracht. Er is sprake van een standaardeenheid, waarvan er meerdere parallel kunnen worden geschakeld tot een koelcapaciteit van 50 à 60 kW.

Vacuümijs geproduceerd onder vacuum wordt voornamelijk toegepast bij zeer grote capaciteiten (> 1 MW) en daar waar bijvoorbeeld overtollige stoom aanwezig is voor de aandrijving van een ejecteur ter compressie van de grote volumina af te voeren waterdamp.

Vacuümijs vervaardigd volgens het sublimatieprincipe verkeert in de fase van een pilotplant. De beoogde koelcapaciteiten liggen tussen de 200 en 3000 kW.



### Toepassingsgebieden op basis van gebruikersfuncties

Ijsslurriesystemen zorgen alleen voor de koeling van de ruimtelucht. Bijkomend gevolg is het optreden van ontvochtiging. Door een in het algemeen lagere temperatuur van de ijsslurrie in de warmtewisselaar dan bij gebruik van koudwater, zal de ontvochtiging tijdens koelbedrijf bij ijsslurrie groter zijn.

Voor de toevoer van verse lucht zal meestal een apart ventilatiesysteem nodig zijn. Bevochtiging en aanvullende ontvochtiging dienen via een apart systeem, in samenhang met het ventilatiesysteem, te worden geregeld. De eventueel gewenste verwarmingsfunctie dient via een ander systeem te worden gerealiseerd, waarbij zonodig gebruik kan worden gemaakt van de aanwezige warmtewisselaars.

### Energiebesparingsmogelijkheden componenten

Geschraapte warmtewisselaar (FLO-ICE) installaties worden als complete unit geleverd. De mogelijkheid bestaat om als installateur of gebruiker specifieke wensen op tafel te leggen. Het uitwisselen van componenten door energiebesparende alternatieven of het aanbrengen van energiebesparende voorzieningen zal altijd in overleg met of door de leverancier moeten plaatsvinden teneinde ongewenste gevolgen voor het functioneren van de installatie te voorkomen. Door het momenteel geringe aanbod van leveranciers van ijsslurrie-installaties is het kiezen van een energiezuinige optie niet aan de orde. Het is wenselijk om geschraapte warmtewisselaars (of alternatieven daarvoor) te ontwikkelen met een grotere capaciteit en minder hulpenergiebehoefte.

### Energetische vergelijking met conventionele systemen

De toepassing van ijsslurrie in vergelijking met koud water betekent door de inherent lagere temperatuur van de ijsslurrie ten opzichte van koudwater dat een lagere verdampingstemperatuur van de koelinstallatie aan de orde is. Dit betekent een lager rendement van de koelinstallatie, tenzij door gebruik van een opslagsysteem gebruik gemaakt wordt van de nachtelijke temperatuurdaling (hetgeen de lagere verdampingstemperatuur compenseert). Hierdoor kan bovendien gebruik worden gemaakt van het lage elektriciteitsstarief. De lagere temperatuur van de ijsslurrie opent de mogelijkheid om leidingdiameters, warmtewisselende oppervlakken en pompvermogen te reduceren. De te installeren koelcapaciteit van de installatie kan door gebruik te maken van koude-opslag veel kleiner zijn.

Tabel 29 Technische vergelijking koudwater- en ijsslurrie systeem (bij ongeveer gelijk pompenergiegebruik).

	Koudwater	Ijsslurrie	Eenheid
Maximale inzetbare koelcapaciteit	100	100	kW
Afvoertemperatuur	12	12	°C
Aanvoertemperatuur	6	- 4	°C
Ijsafsmelting	circa -	20	%
Te installeren koelcapaciteit	100	24	kW

Elektrisch aansluitvermogen	circa	28	7,5	kW
Volume voorraadvat	circa	-	12	m <sup>3</sup>
Stromingssnelheid in pijp	gekozen	1	1	m/s
Volume	totaal	14,3	2,7	m <sup>3</sup> /uur
Pijpdiameter hoofdleiding		71	30	mm
Drukval totale installatie	circa	0,6	2,9	bar

In Tabel 30 wordt een energetische vergelijking gegeven van een ijsslurrie systeem met en zonder korte termijn koude opslag ten opzichte van het Vierpijps inductie referentiesysteem (paragraaf 6.4). Dit referentiesysteem lijkt qua koude- en warmtetransport meer op het ijsslurrie systeem dan het VAV referentiesysteem.

*Tabel 30 Energetische vergelijking (op basis van primaire energie) van het ijsslurrie systeem (met en zonder korte termijn koude opslag) met het Vierpijps inductie referentiesysteem.*

Energie (%):	4PI referentiesysteem	Ijsslurrie systeem zonder opslag	Ijsslurrie systeem met koude opslag
Koude opwekking	33	44	34
Verwarming	37	37	37
Bevochtiging	-	p.m.	p.m.
Transport	30	30	30
Totaal	100	111	101

Uit Tabel 30 blijkt het ijsslurrie systeem ten opzichte van het Vierpijps referentiesysteem een hoger energiegebruik te hebben, tenzij korte termijn koude opslag wordt toegepast. De besparing voor de gebruiker ligt niet in het feit dat energie bespaard wordt, maar in het feit dat de elektriciteit tegen een lager tarief (nachttarief) ingekocht kan worden.

De EPN systematiek geeft geen systeemrendementen voor koudetransport met behulp van een ijsslurrie. Het opwekkingsrendement voor de ijsslurrie systemen is identiek aan dat van conventionele systemen, omdat met een gewone compressie koelmachine wordt gewerkt. Korte termijn opslag wordt niet gehonoreerd in de EPN.

*Tabel 31 Rendementen in de koelfunctie volgens de EPN (NEN 2916:1994 en pre norm NEN 2916:1998) voor het ijsslurrie systeem (met en zonder koude opslag), in vergelijking met het Vierpijps inductie referentiesysteem.*

	4PI referentie	Ijsslurrie systeem zonder opslag	Ijsslurrie systeem met koude opslag
Opwekkings rendement	4.0	4.0	4.0
Systeem rendement (1994)	0.75	-	-
Systeem rendement (1998)	0.93	-	-

## Milieu-effecten

De koudemiddelinhoud van de koelinstallatie voor het produceren van een ijsslurrie ligt in dezelfde ordegroute als die voor het produceren van koudwater. Alleen in het geval dat gewerkt wordt met een direct systeem voor het produceren van vacuümijs heeft het koudemiddel, zijnde water, geen enkel nadelig effect op het milieu. Echter deze systemen zijn voor de benodigde capaciteiten niet commercieel verkrijgbaar.

De gebruikelijke media voor het vervaardigen van een ijsslurrie zijn water met toevoegingen. De bij FLO-ICE gebruikte toevoegingen zijn niet toxisch. FLO-ICE wordt eveneens gebruikt voor het direct koelen van bijvoorbeeld groenten. Hierbij worden de produkten besproeid met of ondergedompeld in de ijsslurrie.

### Kosten aspecten

De kosten per kW van in de handel verkrijgbare geschraapte warmtewisselaars zijn in vergelijking met conventionele warmtewisselaars hoog. Ook de opslagtank met roerwerk vormt een kostenverhogend onderdeel. Hier staat tegenover dat bij gebruikmaking van korte termijn koudeopslag het geïnstalleerd vermogen veel geringer is. De energiekosten zullen door het feit dat gebruik kan worden gemaakt van perioden met een lager tarief (plus een lagere piekvermogen-aansluiting) geringer zijn dan bij een koudwatersysteem.

De onderhoudskosten zijn waarschijnlijk iets hoger, met name tengevolge van het gebruik van geschraapte warmtewisselaars (met bewegende delen).

### Ontwerpbenadering

Het ontwerp van een ijsslurriesysteem kan voor wat betreft de koudebehoefte op dezelfde manier geschieden als voor een koudwatersysteem. De eigenschappen van de ijsslurrie ten opzichte van die van koudwater maken dat in de uitvoering een aantal veranderingen ten opzichte van een koudwatersysteem nodig zijn (zoals componentgroottes, condenswaterproblematiek, etc). Dit betreft zowel het distributiesysteem als de koudeopwekkingskant. De verandering in de koudeopwekkingskant heeft voornamelijk te maken met de toepassing van korte termijn koudeopslag. De veranderingen aan het distributiesysteem hebben voornamelijk betrekking op de dimensionering.

### Aandachtspunten m.b.t. energiebesparingsbeleid

Ijsslurrie systemen worden gekenmerkt door kleine afmetingen van de distributiesystemen, vanwege de hoge warmte-opname capaciteit van de ijsslurrie per kg. Ijsslurrie systemen zijn met name interessant in combinatie met korte termijn koude opslag (Off Peak Air conditioning, OPAC), waar het voordeel voor de gebruiker eerder uit de energiekosten (nachttarief) dan uit de energiebesparing wordt gehaald. Vanwege de kleinere capaciteiten van de componenten kunnen ook de investeringskosten lager zijn. Ijsslurrie systemen worden in de commerciële

koeling (supermarkten) reeds toegepast, voor toepassing in klimatiseringssystemen in de utiliteit zullen geschikte afgifte systemen ontwikkeld moeten worden.

Het is niet ondenkbaar dat het ijsslurrie systeem de komende jaren zijn intrede doet in de (kleine) utiliteitsbouw, zeker wanneer de elektriciteitskosten stijgen. In dat geval is het aan te bevelen nu reeds het systeem energetisch te optimaliseren, zodat toepassing naast een energiekostenbesparing ook een energiebesparing oplevert. Aandachtspunten bij deze ontwikkeling zijn de systemen voor ijsslurrie productie (nu voornamelijk geschraapte warmtewisselaars) en lage temperatuur afgifte systemen. De koude opslag gaat gepaard met kleinere koelcapaciteiten dan bij systemen zonder opslag, hetgeen goede mogelijkheden opent voor experimenten met NH<sub>3</sub> of koolwaterstoffen als koudemiddel.

### Referenties

In Nederland worden op commerciële schaal ijsslurrie-installaties van het type geschraapte warmtewisselaar (FLO-ICE), geleverd door Inham Refrigeration B.V. Deze firma is voor de FLO-ICE systeem licensiehouder van de Duitse firma Integral GmbH. Een vacuümijsinstallatie van het sublimatietype verkeert momenteel in de pilotfase en is gereed voor marktintroductie.

### **Literatuurverwijzingen ijsslurriesystemen**

- [35] Introduction of FLO-ICE and Binary Ice technology as energy efficient and environmentally benign working fluids in the field of refrigeration and air conditioning  
M. Verwoerd, R.C.A. Smeets, R.J.M. van Gerwen  
TNO-MEP rapport R96/465 (december 1996)
- [36] Flo-ice en vacuümijs voor indirecte systemen  
R. Smeets, R. Beismann  
Koude & Luchtbehandeling jaargang 91 nr.5 (mei 1998)
- [37] Auslegung von Kälte-anlagen mit Binäreis (FLO-ICE) als Kühlmittel  
J. Paul  
Ki Luft- und Kältetechnik 2/1996
- [38] Flo-Ice as a carrier for cold  
J. van Bael  
CADDET Energy Efficiency, Newsletter No. 4 1996

## **6.10 Air Cycle Systeem**

### Beschrijving van de techniek

Een air cycle is een milieuvriendelijk alternatief voor conventionele koelmachines en warmtepompen vanwege het gebruik van lucht als werkmiddel. Hoewel er verschillende uitvoeringsvormen mogelijk zijn, bestaat een air cycle altijd uit een combinatie van een of meer compressoren, turbines en warmtewisselaars.

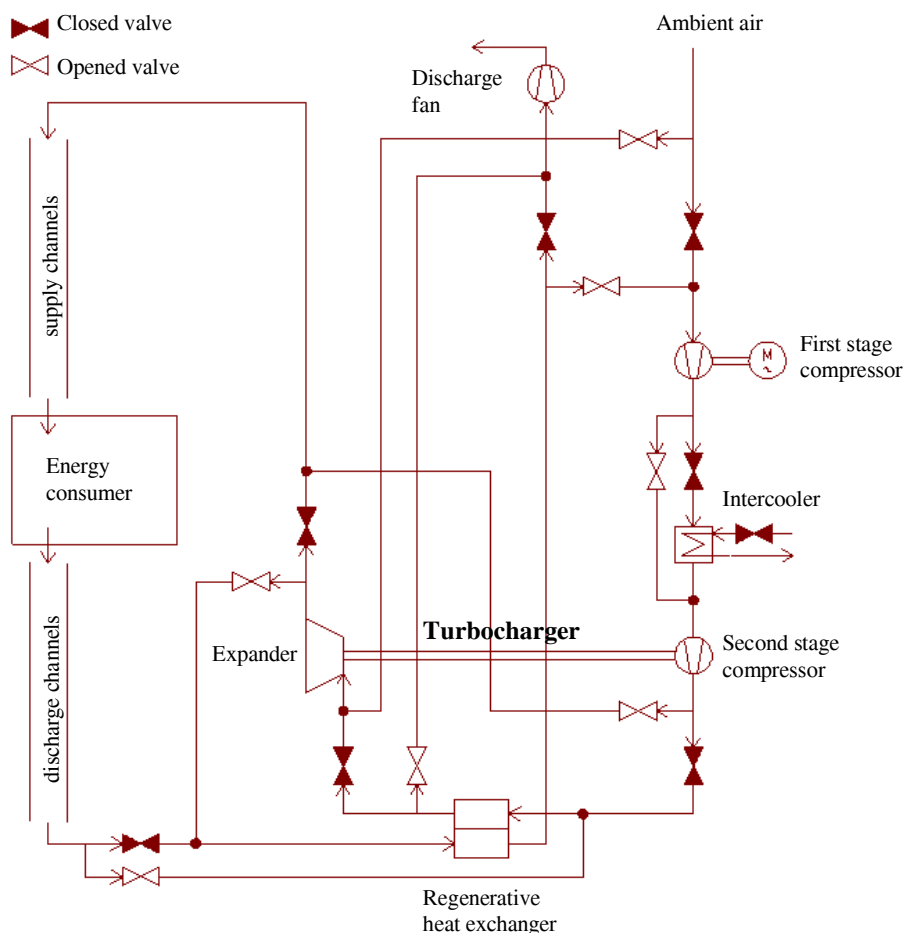
De werking van een air cycle, functionerend als koelmachine, komt in het kort op het volgende neer. Lucht wordt gecomprimeerd en vervolgens gekoeld, bijvoorbeeld tegen omgevingslucht. De lucht expandeert tenslotte in een turbine. Door deze expansie daalt de temperatuur en wordt de gevraagde koelcapaciteit verkregen. De air cycle technologie wordt al tientallen jaren ingezet voor klimatiseringsdoeleinden (vliegtuigen en helikopters).

In Figuur 43 is een configuratie getoond, die het meest geschikt is voor toepassing als systeem voor gebouwklimatisering. De compressie van de lucht wordt in twee stappen uitgevoerd. De eerste compressor is elektrisch aangedreven. De tweede compressor wordt aangedreven door een expander (turbine); deze combinatie is vanuit de techniek van verbrandingsmotoren bekend als een turbocharger. Het systeem wordt gecompleteerd door enkele warmtewisselaars, waarvan de zgn. regeneratieve warmtewisselaar nadere toelichting verdient. Wanneer de air cycle als koelmachine werkt, opereert deze warmtewisselaar tussen de tweede compressor en de expander. In deze warmtewisselaar geeft de warme, gecomprimeerde lucht warmte af aan de afgezogen lucht die inmiddels zijn koelfunctie heeft vervuld. De condities van beide luchtstromen kunnen dusdanig zijn, dat de warme lucht zover afkoelt dat het dauwpunt wordt onderschreden. In dat geval wordt naast voelbare warmte ook latente warmte overgedragen. De testopstelling, die TNO-MEP in het kader van een Europees onderzoeksproject heeft gebouwd, heeft aangetoond dat deze gecombineerde warmte- en vochtoverdracht uitstekend tot stand kan worden gebracht door twee afzonderlijke bedden, die beurtelings worden doorstroomd door de warme, gecomprimeerde lucht en de koude retourlucht.

Door de expansie in de expander zal nog meer waterdamp condenseren. Het condensaat dient te worden afgevoerd.

De intrinsieke eigenschap van een als koelmachine opererende air cycle, dat de lucht zowel wordt gekoeld als ontvochtigd, sluit goed aan bij het feit dat onder zomercondities klimatiseringsinstallaties niet alleen moeten koelen, maar dat ook ontvochtiging gewenst kan zijn.

Onder wintercondities zal de air cycle als warmtepomp moeten werken. In dat geval zal de aangezogen omgevingslucht eerst de expander doorstromen. Door de temperatuurverlaging is de lucht in staat warmte op te nemen in de regeneratieve warmtewisselaar. Bovendien zal de lucht uitgecondenseerde waterdamp opnemen. Door de twee achtereenvolgende drukverhogingsstappen zal de lucht verder in temperatuur toenemen. De lucht is nu in staat zijn verwarmingsfunctie te vervullen. Onder wintercondities zal de air cycle ervoor zorgen dat de lucht zowel wordt verwarmd als bevochtigd. Ook dit sluit goed aan op het gegeven dat in de winter naast verwarming ook bevochtiging gewenst kan zijn..



Figuur 43 Omschakelbare air cycle voor klimatisering (bedrijf onder wintercondities)

Air cycles worden voor klimatiseringsdoeleinden al tientallen jaren toegepast in de luchtvaart. De beslissing van de Duitse spoorwegen om de nieuwste hogesnelheidstreinen uit te rusten met air cycle systemen voor de klimatisering, kan een echte doorbraak worden genoemd. De air cycle als klimatiseringsinstallatie in de utiliteitsbouw bevindt zich echter nog in het ontwikkelingstraject.

#### Randvoorwaarden m.b.t. temperatuurniveaus en distributiesystemen

De air cycle produceert lucht met de gewenste temperatuur en vochtigheid. Deze lucht dient nog gedistribueerd te worden door het gebouw. Eén-kanaals all-air systemen sluiten hier het best op aan. Bij dergelijke systemen wordt op een centrale plaats lucht van een bepaalde (seizoensafhankelijke) temperatuur en met een bepaalde vochtigheid geproduceerd. De gewenste ruimtetemperatuur wordt bereikt door de luchtstroom te regelen tussen 30 en 100%. Dergelijke systemen staan bekend als VAV-systemen (Variabel Volume).

### Randvoorwaarden m.b.t. locatie

De air cycle produceert in vergelijking met een normale koelmachine meer geluid, bij een hogere frequentie. Er zullen daarom geluidsisolerende maatregelen moeten worden genomen (rondom de compressoren) bij het toepassen van de air cycle in de utiliteitsbouw. De air cycle is een systeem waarbij koude en warmte wordt getransporteerd door middel van lucht, hetgeen dezelfde eisen aan de locatie stelt die gebruikelijk zijn bij conventionele VAV systemen. Een air cycle stelt verder geen specifieke eisen aan de locatie.

### Benodigde schaalgrootte

In principe kan de air cycle worden ontworpen voor elk willekeurig vermogen vanaf enkele kW. Men is echter sterk afhankelijk van de beschikbaarheid van met name de stromingsmachines (eerste compressor en turbocharger). Momenteel zijn kleine turbocompressoren beschikbaar vanuit de automobiel industrie, deze machines hebben echter een (te) laag rendement om energetisch te kunnen concurreren met alternatieve technologieën. Grotere machines zijn beschikbaar vanuit de vliegtuigindustrie, met een voldoende hoog rendement - deze machines zijn echter niet toegesneden op het gebruik in de air cycle systemen. Opschaling van het air cycle systeem is mogelijk door systemen of alleen bepaalde componenten parallel te schakelen.

### Toepassingsgebieden op basis van gebruiksfuncties

Eén van de aantrekkelijkste eigenschappen van air cycles voor gebouwklimatisering is de intrinsieke integratie van de koel-, ontvochtigings- en transportfuncties (zomercondities) resp. de verwarmings-, bevochtigings- en transportfuncties (wintercondities).

Het air cycle systeem voorziet niet in de situaties “koelen + bevochtigen” en “verwarmen + ontvochtigen”. In de eerste situatie, ofwel de situatie waarin de bevochtigingsfunctie ontoereikend is, kan waterinjectie in of achter een compressor worden overwogen. In de tweede situatie (verwarmen + ontvochtigen) kan eventueel met naverwarmers worden gewerkt; deze situatie zal bij hoge uitzondering optreden (in het referentiejaar ‘64/’65 komt deze situatie in het geheel niet voor).

### Mogelijkheden voor centrale en/of decentrale toepassingen

De techniek van de air cycle laat - in principe - zowel centrale als decentrale toepassingen toe; vanwege het hoge geluidsniveau van de compressoren is echter een decentrale toepassing op korte termijn niet zeer waarschijnlijk, en zullen centrale toepassingen de voorkeur genieten. Bovendien zullen, omdat air cycle systemen nog niet in standaardgroottes worden aangeboden, centrale systemen vooralsnog economisch het aantrekkelijkst zijn.

### Benodigde infrastructuur

Air cycle systemen worden gevoed met elektriciteit. Indien voor het omschakelen van de luchtstromen door de regeneratieve warmtewisselaar gekozen wordt voor pneumatisch bediende kleppen, dient perslucht beschikbaar te zijn.

### Energetisch rendement in samenhang met mogelijke temperatuurniveaus

Eén van de eigenschappen van air cycle systemen is het feit dat de C.O.P. van de installatie veel minder afhankelijk is van het gewenste temperatuurniveau en de belastingsgraad dan bij conventionele koelmachines en warmtepompen het geval is. Het air cycle systeem heeft met andere woorden een aantrekkelijk gedrag in deellast - een situatie die in de praktijk zeer veelvuldig voorkomt.

De C.O.P. van een geoptimaliseerde air cycle met de hierboven getoonde configuratie, zal onder zomercondities (koeling & ontvochtiging) in de orde grootte van 0,5 zijn. Men dient dan wel te bedenken dat de lucht zowel de juiste temperatuur als de juiste vochtigheidsgraad heeft, en reeds op snelheid is. Deze C.O.P. mag dus niet zonder meer vergeleken worden met de C.O.P. van een conventionele koelmachine, die alleen voor de koelfunctie zorgt.

De C.O.P.(heating) van een dergelijke air cycle onder wintercondities (warmtepompfunctie & bevochtiging) zal in de orde grootte van 2 zijn.

### Energiebesparingsmogelijkheden componenten

De air cycle bevindt zich deels in het ontwikkelingsstadium. Uit modelberekeningen is gebleken dat voor een energetisch optimaal ontwerp een thermodynamisch geoptimaliseerde turbocharger essentieel is. Deze zijn momenteel bij een Duits bedrijf in ontwikkeling.

Ook voor de overige componenten (regeneratieve warmtewisselaars, kleppen, intercooler, afgifte-eenheid) ligt een verdere optimalisering nog in het verschiet.

### Energetische vergelijking met conventionele systemen

In 1996 heeft TNO-MEP een globale studie uitgevoerd naar de haalbaarheid van air cycle systemen voor gebouwklimatisering [40]. Hierbij is de air cycle vergeleken met het VAV-systeem uit ISSO researchrapport 9. Modelberekeningen toonden aan dat een besparing op primair energiegebruik van ongeveer 15% mogelijk is. Ook hieruit blijkt dat de C.O.P. van een als klimatiseringsinstallatie werkende air cycle niet vergeleken kan worden met de C.O.P. van een koelmachine of warmtepomp, met name omdat in het air cycle systeem de transportfunctie en de bevochtiging / ontvochtiging functie reeds zijn geïntegreerd in de koude - opwekking en de warmte - opwekking.



*Tabel 32 Energetische vergelijking (op basis van primaire energie) van Air Cycle systemen met het VAV referentie systeem (paragraaf 6.4)*

<b>Energie (%):</b>	<b>VAV</b>	<b>Air Cycle systeem</b>
Koude opwekking	29	99
Verwarming	46	11
Bevochtiging	-	-
Transport	25	-
Totaal	100	110

Uit Tabel 32 blijkt dat voor wat betreft de koude opwekking de energiegebruiken relatief hoog zijn, maar voor warmte opwekking relatief laag. Dit betekent, dat de Air Cycle in systemen met een relatief grote warmtebehoefte ten opzichte van de koudebehoefte, beter tot zijn recht komt (vergelijkbaar met de situatie voor het DEC systeem). De air cycle heeft verder het voordeel, dat het energiegebruik voor transport gehalveerd is, daar de lucht in het systeem onder druk staat en uit eigen beweging naar de vertrekken stroomt.

In het normblad NEN 2916 ‘Energieprestatie van Utiliteitsgebouwen’ worden alle systemen voor koude opwekking in principe gelijk gehonoreerd (uitgegaan wordt van een compressie koelmachine met een jaargemiddelde C.O.P. = 4.0); verschillen treden alleen op waar het gaat om de transport verliezen (systeem rendementen) en de benodigde energie voor het transport (pompen en ventilatoren).

In het normblad NEN 2916 zijn systeem rendementen gegeven voor de verschillende voorkomende typen klimaatinstallaties, een systeem rendement voor air cycle systemen ontbreekt. De air cycle kan worden beschouwd als een systeem met koude- en warmtetransport door middel van lucht (systeemnummer 7). Hierdoor wordt de air cycle beter gewaardeerd dan in werkelijkheid het geval is; immers de C.O.P. (voor opwekking) van het air cycle systeem is niet bijzonder goed. De air cycle komt in de Energie prestatie Normering zelfs voordeliger uit de bus dan het VAV systeem, omdat de transport energiebehoefte lager is voor de air cycle dan voor het VAV systeem. Ook het feit dat de warmte opwekking plaats vindt volgens het warmtepomp principe, is in het voordeel van de air cycle.

*Tabel 33 Vergelijking van VAV referentie systeem en air cycle systeem binnen de EPN systematiek (NEN 2916:1994 en NEN 2916:1998).*

	<b>VAV referentie systeem</b>	<b>Air Cycle</b>
Opwekkings rendement (koeling)	4.0	4.0
Systeem rendement koeling NEN 2916:1994	0.45	0.70
Systeem rendement koeling NEN 2916:1998	1.00	1.00
Opwekkings rendement verwarming NEN 2916:1994	0.80	1.00
Opwekkings rendement verwarming		

NEN 2916:1998		
Systeem rendement verwarming	0.65	0.90
NEN 2916:1994		
Systeem rendement verwarming	0.80	0.74
NEN 2916:1998		
Energiegebruik Transport	100%	50%

In de EPN (1994) wordt de Air Cycle qua koeling 35% energiezuiniger ingeschaald dan het VAV systeem, in de ontwerp versie van 1998 is dit verschil verdwenen. Qua verwarming wordt de Air Cycle in de EPN ook energie zuiniger ingeschaald dan het VAV systeem, 42% in de versie van 1994 en 13% in de ontwerp versie van 1998.

### Milieu-effecten

Omdat de air cycle gebruik maakt van lucht als werkmiddel, is de GWP verwaarloosbaar. De TEWI wordt daarom bijna volledig bepaald door het elektriciteitsverbruik.

De geluidsproductie van air cycles wordt bepaald door de toegepaste typen stromingsmachines. In een geoptimaliseerd ontwerp kunnen (HD-)ventilatoren toegepast worden voor de eerste compressiestap. Toepassing van standaard geluidsisolatie is dan voldoende.

### Kosten-aspecten

Air cycles staan aan het begin van de marktintroductie. De kostprijs is dan nog gebaseerd op enkelstuksfabricage, en daardoor momenteel zeer hoog. Gebruik van reeds in grotere series vervaardigde componenten uit de automobiel- of vliegtuig industrie leidt weliswaar tot relatief lagere kosten, maar dit gaat ten koste van het energetisch rendement.

### Onderhoudsaspecten

De betrouwbaarheid en geringe onderhoudsbehoefte zijn de belangrijkste redenen waarom air cycle systemen in de luchtvaart de concurrentieslag hebben gewonnen ten opzichte van wat men nu aanduidt als “conventionele” systemen.

### Ontwerpbenadering

Air cycle systemen kunnen los van het te klimatiseren gebouw ontworpen worden. Het systeem dat de geproduceerde lucht moet distribueren over de vertrekken, hangt uiteraard wel af van het ontwerp van het gebouw.

### Te verwachten ontwikkelingen

De Air Cycle is pas recent in de belangstelling komen te staan als systeemconcept. De eerste demonstratie installaties zijn gebouwd, met het doel ervaringen met het systeem op te doen. De volgende fase in deze hernieuwde interesse zal zijn het optimaliseren van de verschillende systeemcomponenten, met name compressoren en expanders. Anderzijds kan ook aandacht besteed worden aan “slimme” configuraties van het systeem in de utiliteitsbouw, zoals bijvoorbeeld het gebruik van luchtkanalen als regeneratieve warmtewisselaars. Ook de studie van integratie met andere technieken (zie hoofdstuk 4) kan nog nieuwe interessante mogelijkheden bieden.

#### Aandachtspunten m.b.t. energiebesparingsbeleid

Air Cycle systemen zijn eenvoudige, goed regelbare systemen voor volledige klimatisering door middel van lucht. Qua opwekkingsrendement (koel- en warmtepompfunctie) zijn de systemen in het nadeel ten opzichte van conventionele systemen, hier staat echter tegenover dat het systeemrendement voor distributie 100% is, en het bijbehorende energiegebruik voor distributie nihil. Air cycle systemen zijn op dit moment nog in ontwikkeling (waarbij vooral de verbetering van rendementen van turbocompressoren en expanders in de belangstelling staat); de mogelijkheden voor energetische optimalisaties zijn nog nauwelijks benut.

Het verdient aanbeveling om de ontwikkeling van de air cycle voor klimatiseringsdoeleinden te volgen, en waar mogelijk extra aandacht aan de mogelijke energiebesparende opties te schenken. Daarbij zijn zeker ook combinaties met systemen voor vrije koeling (bijvoorbeeld aanzuiging door grondbuizen) de aandacht waard.

#### Referenties

Diverse onderzoeksinstituten richten zich op de ontwikkeling van air cycles voor verschillende toepassingsgebieden. In Nederland is TNO-MEP de trekker. Uit het eerdere Europese onderzoeksproject [39] is een samenwerking met HCG Industrieservice (Rijswijk) voortgekomen, gericht op de commercialisatie van air cycles voor invriestoeepassingen in de voedings- en genotmiddelenindustrie. In een tweede Europees onderzoeksproject, dat naar verwachting medio 1998 zal worden gecontracteerd, zal de air cycle verder worden ontwikkeld voor toepassing in klimatiseringssystemen voor nieuwe en bestaande gebouwen.

Buiten Nederland zijn vooral de Universiteit van Bristol (Engeland) en het Duitse FKW, waarmee TNO-MEP een samenwerkingsrelatie is aangegaan, actief op het gebied van onderzoek aan, en ontwikkeling van air cycle systemen.

#### **Literatuur air cycle systemen**

- [39] Gerwen, van, R.J.M. e.a.  
Environmentally benign air cycle heat pumps and refrigeration systems  
Eindrapport van EG-project (contract JOU2-CT92-0078), december 1995.
- [40] Gerwen, van, R.J.M. en M.J.E. Verschoor  
Feasibility of Air Cycle Systems for Building Air Conditioning Systems  
IIR/IIF-conferentie “Applications for Natural Refrigerants”, 3-6 september  
1996, Aarhus, Denemarken
- [41] Gerwen, van, R.J.M. en M.J.E. Verschoor  
Air as Refrigerant - Prospects and Challenges  
IEA Annex 22 Workshop “Compression Systems with Natural Working  
Fluids”, 2-3 oktober 1997, Gatlinburg, U.S.A.
- [42] Gigiel, A., R. Gibbs, D. Butler en D. Holder  
Air Cycle Technologies for Building Services  
IIR/IIF-conferentie “Applications for Natural Refrigerants”, 3-6 september  
1996, Aarhus, Denemarken
- [43] Butler, D.J.G.  
Air Cycle Refrigeration in Buildings  
REHVA Newsletter, September 1996

## 6.11 Thermo-akoestische koeling

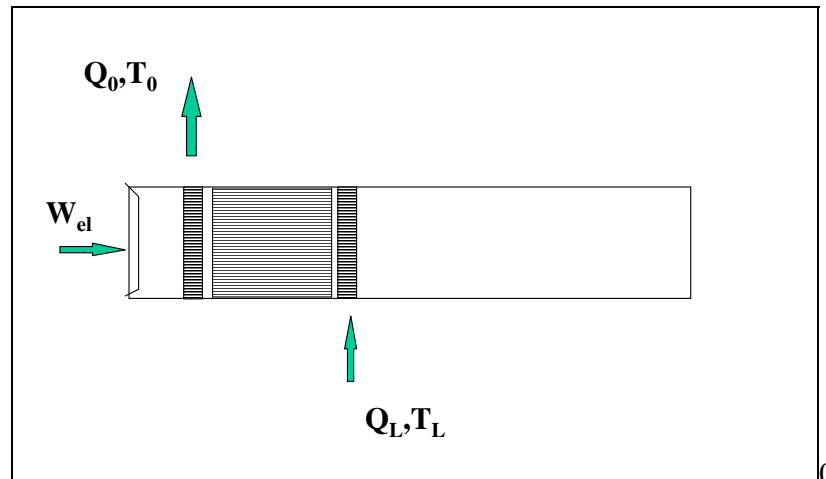
Thermo Akoestische koeling is een innovatieve manier van koude opwekking. In vergelijking tot de eerder behandelde alternatieve en innovatieve systemen gaat het hierbij niet zozeer om een alternatief systeem voor klimatisering, maar meer om een alternatieve koude-opwekker, die in alle voorkomende systemen kan worden ingezet. De ontwikkeling van de Thermo Akoestische Koeler staat nog in de kinderschoenen.

### Beschrijving van de techniek

Een elektrisch aangedreven thermo-akoestische koeler is een variant op een meertraps Stirlingkoeler en kan schematisch worden voorgesteld zoals in Figuur 44. De koeler bestaat uit een buis die aan een zijde gesloten is (in de figuur de rechterzijde). Aan het andere uiteinde bevindt zich een “luidspreker” waarmee akoestische golven worden gegenereerd. In de buis bevinden zich verder nog twee warmtewisselaars (een warme aan de kant van de luidspreker en een koude aan de gesloten zijde) die door middel van een regenerator of stack van elkaar gescheiden zijn.

De longitudinale akoestische golven zorgen voor een heen en weer gaande beweging van gas-elementen in de buis. Bij de naar links gaande beweging vindt

compressie van gaselementen plaats, waarbij ook een temperatuurverhoging optreedt. Daardoor stijgt de temperatuur van een gaselement tot boven de omgevingstemperatuur. In de meest linkse (warme) warmtewisselaar wordt het element gekoeld. Bij de naar rechts gaande beweging vindt expansie van het gaselement plaats. In de rechtse (koude) warmtewisselaar daalt de temperatuur van het element zover, dat warmte onttrokken kan worden aan de omgeving.



Figuur 44 Elektrisch gedreven thermo-akoestische koeler

#### Thermodynamische analyse

De thermo-akoestische koeler is al vergeleken met een meertraps Stirlingkoeler. De ideale Stirlingcyclus bestaat uit vier stappen:

Isentrope compressie: volledig reversibele compressie zonder warmte-uitwisseling met de omgeving. Het gas stijgt in temperatuur en druk.

Isochore afkoeling: Bij constant volume wordt warmte afgestaan aan de omgeving. De druk en temperatuur dalen iets.

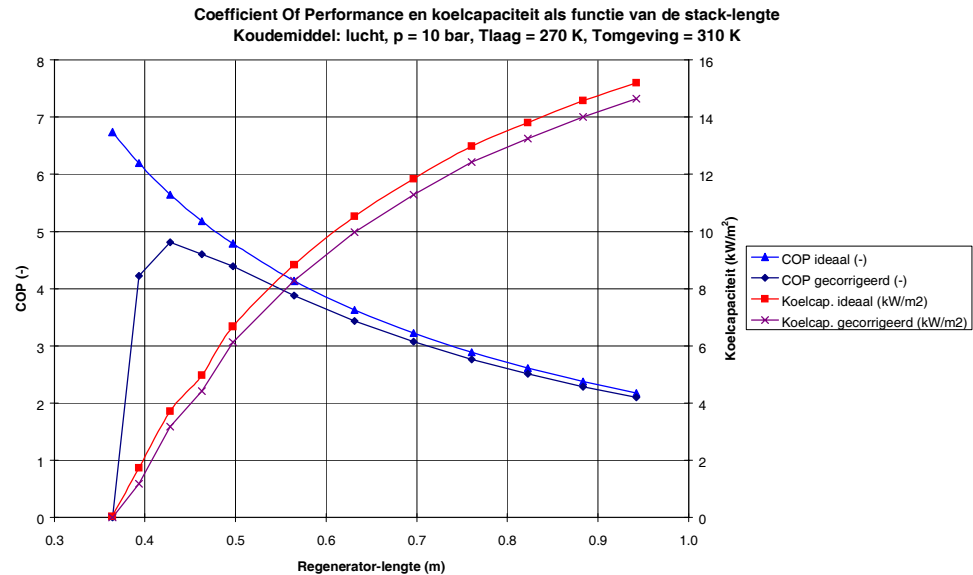
Isentrope expansie: volledig reversibele expansie zonder warmte-uitwisseling met de omgeving. De arbeid die vrijkomt wordt aangewend ten behoeve van de compressie in stap 1. Druk en temperatuur dalen.

Isochore opwarming: Bij constant volume wordt warmte opgenomen uit de te koelen ruimte. De druk en temperatuur stijgen iets.

Als gevolg van wrijvingsverliezen en thermische effecten tijdens compressie en expansie, alsmede temperatuurverschillen die nodig zijn voor warmteoverdracht, zal de ideale cyclus nooit gerealiseerd kunnen worden. De waarde van de theoretisch ideale cyclus is gelegen in het feit, dat op grond daarvan de reële prestaties van een koelkringloop beoordeeld kunnen worden. Het theoretisch haalbare rendement van een thermo-akoestische koeler is gelijk aan de Carnotfactor.

In de praktijk hangt het haalbare rendement van een thermo-akoestische koeler samen met de koelcapaciteit per m<sup>2</sup> doorsnede en de drukken binnenin het apparaat. Hoe hoger het rendement is, des te lager is de koelcapaciteit bij een gegeven druk. Een hoger rendement gaat derhalve ten koste van een groter of zwaarder geconstrueerd apparaat. Met behulp van een spreadsheet-programma is de invloed van de stacklengte bepaald. Daaruit komt het hierboven gesignaleerde verband tussen C.O.P. en capaciteit duidelijk naar voren (zie Figuur 45). Dit verband geldt overigens alleen voor de technologie waarbij van staande golven gebruik wordt gemaakt. Bij de technologie met lopende golven is de stack-lengte veel kleiner, namelijk in de orde van enkele centimeters.

Reëel haalbare waarden voor de Coefficient of Performance (C.O.P., rendement voor koude opwekking) liggen op dit moment in de orde van 4. Het is niet op voorhand duidelijk tot welke hoogte deze waarde nog kan stijgen door middel van verbeteringen aan componenten en optimalisatie van het apparaat als geheel. Naar verwachting zal de thermo-akoestische koelmachine op lange termijn beter voor de dag komen dan de conventionele koelmachine, omdat de verliezen die inherent zijn aan het proces kleiner zijn.



Figuur 45 Invloed van de stack-lengte op C.O.P. en capaciteit

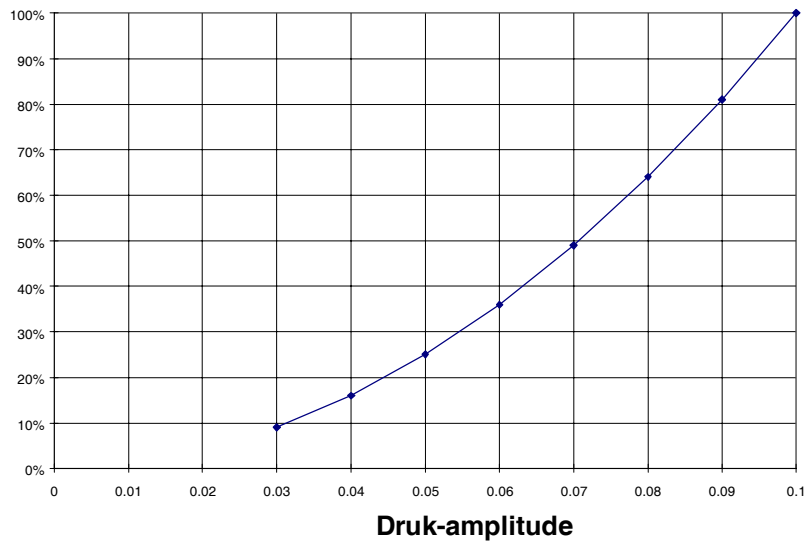
### Voor- en nadelen TAK koelsysteem

De meest elementaire thermo-akoestische koeler bestaat uit een stuk pijp met daarin twee warmtewisselaars en een regenerator. Aan één van de uiteinden wordt verder een luidspreker geplaatst. De basisconfiguratie is daarmee eenvoudiger dan die van een conventioneel koelsysteem (compressor, twee warmtewisselaars, expansie-orgaan).

Als koudemiddel voor een thermo-akoestische koeler kan lucht of Helium gebruikt worden. In de literatuur worden ook mengsels met andere edelgassen als Argon en Xenon gevonden. Bij toepassing in het temperatuurbereik van klimaatkoeling bieden de edelgassen nauwelijks specifieke voordelen boven lucht (al presteren ze wel beter bij cryogene toepassingen), zodat toepassing van lucht voor de hand ligt.

De capaciteit van een thermo-akoestische koeler is afhankelijk van de absolute druk in de koeler, het toegepaste gas en de drukamplitude. De eerste twee grootheden zijn na installatie in feite niet meer regelbaar. De drukamplitude - die door de luidspreker wordt opgelegd - is echter eenvoudig én traploos regelbaar. De koelcapaciteit is evenredig met het kwadraat van de amplitude (zie Figuur 46). Dit staat in contrast met de conventionele koelmachine die doorgaans alleen aan/uit geregeld wordt. Doordat een goede capaciteitsregeling mogelijk is, kan de temperatuur waarbij warmte onttrekking plaatsvindt binnen nauwe grenzen geregeld worden.

### Koelcapaciteit (%)



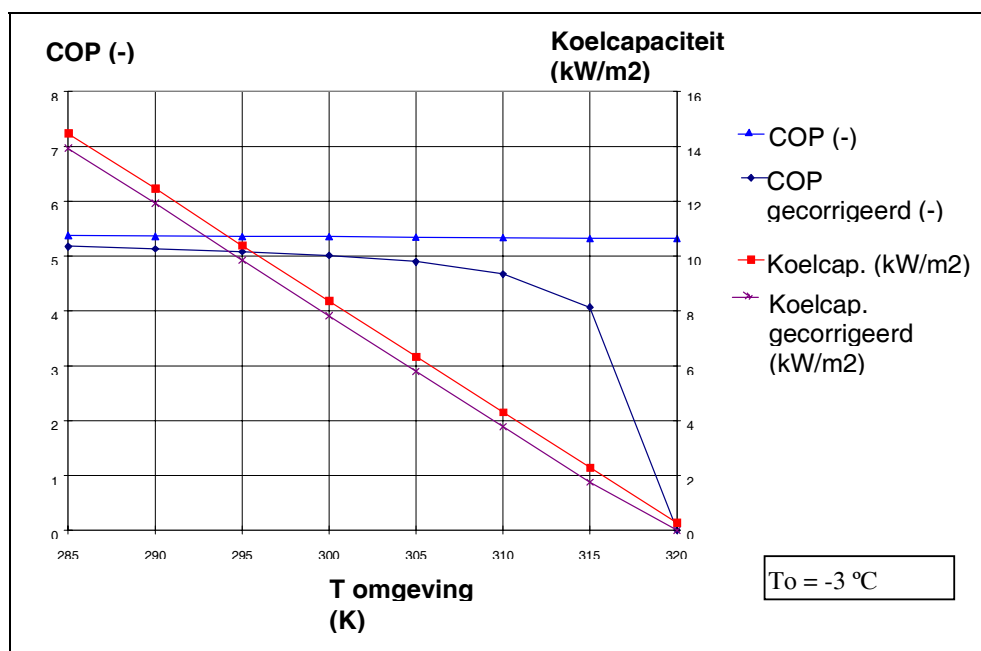
*Figuur 46 Koelcapaciteit als functie van de drukamplitude*

Van de reactiesnelheid van een thermo-akoestische koeler zijn nog geen experimentele gegevens bekend. Zodra het apparaat aangezet wordt, beginnen echter de gaselementen direct te trillen met een frequentie van bijvoorbeeld 40 Hz. Als de constructie licht wordt uitgevoerd zal tamelijk snel koeling geleverd worden. Naar verwachting hebben conventionele koeling en thermo-akoestiek een reactiesnelheid die in dezelfde orde van grootte ligt.

### Energie-efficiency

Bij een uitgekiend ontwerp is een hoge energie-efficiency haalbaar. Bovendien is deze vrijwel onafhankelijk van de capaciteit. Dat betekent dat ook bij lage capaciteiten nog goede prestaties bereikt worden. Zoals uit Figuur 47 blijkt is de Coefficient of Performance (en daarmee de energie-efficiency) afhankelijk van de energiedichtheid (koelcapaciteit per m<sup>2</sup>). Bij het ontwerpen van een thermo-akoestische koeler zal een evenwicht gevonden moeten worden tussen deze twee grootheden.





Figuur 47 C.O.P. en koelcapaciteit als functie van de omgevingstemperatuur

Met behulp van een spreadsheet-model is onderzocht wat de invloed is van de condensor- of omgevingstemperatuur op de prestaties van de thermo-akoestische koeler. Voor de condities 270 K verdampertemperatuur (= -3°C) en 310 K condensortemperatuur is de energiedichtheid (capaciteit) op 100% gesteld. Het ontwerp is zodanig, dat de C.O.P. onder die condities 5.34 bedraagt (waarbij natuurlijk een aantal verliezen buiten beschouwing is gebleven). Figuur 47 laat zien dat de C.O.P. nauwelijks verandert bij verhoging of verlaging van de condensatietemperatuur. De capaciteit verandert ongeveer lineair met de condensortemperatuur.

#### Technologische aandachtspunten

Tot nu toe worden luidsprekers vooral geproduceerd voor het maken van geluid van goede kwaliteit. De toepassing ervan in koelkringen is een geheel nieuwe, zodat er behoefte is aan nieuw te ontwerpen luidsprekers met heel andere specificaties.

Het ontwerp van de warmtewisselaars is een tweede aandachtspunt. Omdat in een thermo-akoestische koeler wordt gewerkt met lucht, is de warmteoverdracht slechter dan bij een conventionele koelkringloop. Daarnaast moet de warmte nog van de te koelen ruimte naar de thermo-akoestische koeler worden overgebracht. Hetzelfde geldt voor het warmtetransport van de koeler naar de omgeving. Dat alles moet bij een zo klein mogelijk temperatuurverschil en in een zo compact mogelijk apparaat.

De buitencilinder van een thermo-akoestische koeler moet voldoende sterk zijn om de interne drukken en drukvariaties in het apparaat te kunnen opvangen. Daarnaast

is een goede isolatiewaarde in de lengterichting een vereiste om te voorkomen dat teveel warmte van de warme naar de koude kant terugstroomt.

Op dit moment heeft TNO MEP een eenvoudig model van een thermo-akoestische koeler. Voor het optimaliseren van een ontwerp is dit echter niet voldoende. Binnen de randvoorwaarden (energie-efficiency, ruimtebeslag, koelcapaciteit, kosten) moet een optimaal apparaat ontworpen worden.

De technologische aandachtspunten lijken alle oplosbaar binnen een termijn van vijf jaar.

### Referenties

Thermo-akoestische koeling is een principe waaraan sinds de jaren '60 gewerkt wordt, vooral op het gebied van de cryogenie (= koeling bij zeer lage temperaturen). Een partij die internationaal een vooraanstaande rol speelt, is Los Alamos National Laboratory in de Verenigde Staten. Op basis van de kennis die daar is ontwikkeld, heeft het Amerikaanse bedrijf Cryenco een 40 kW thermo-akoestische koeler gemaakt voor het vloeibaar maken van aardgas. Verder is de toepassing van thermo-akoestische koeling voornamelijk nog beperkt tot proefopstellingen in het laboratorium. Daarnaast wordt ook het nodige fundamentele onderzoek gedaan om de achterliggende fysische principes te doorgronden om op die manier verbeteringen te kunnen aanbrengen.

Nederlandse partijen die zich richten op onderzoek aan thermo-akoestische koelers zijn V.o.f. ASTER, TU Eindhoven en TNO.

De overlap tussen de verschillende partijen is gering, omdat elk zich richt op andere toepassingen cq. technieken.

#### *Los Alamos National Laboratory, Cryenco, TU Eindhoven*

- Thermo-Acoustically Driven Orifice Pulse Tube Refrigerator (TADOPTR): combinatie van een thermo-akoestische motor en een pulsbuskoeler. Een buffer met restrictie is toegevoegd om faseverschuivingen tussen druk- en snelheidsprofiel te krijgen en op die manier de prestaties te verbeteren.

#### *Vof ASTER:*

- Elektrisch gedreven thermo-akoestische koeler (TAK). Met behulp van een lineaire motor of een hoog-rendement luidspreker worden drukgolven opgewekt, waarmee een koeler kan worden aangedreven. Eind 1997, begin 1998 wordt een proefopstelling gebouwd met een vermogen van circa 5 kW<sub>thermisch</sub>.

*TNO MEP:*

- In het kader van een opdracht voor een groot oliewinnend bedrijf is - in samenwerking met TU Eindhoven - onderzoek gedaan naar een Thermo-Acoustically Driven Thermo-Acoustic Refrigerator (TADTAR). De thermo-akoestische koeler is hier direct gekoppeld aan een thermo-akoestische motor.
- In het voorjaar van 1998 wordt een door ASTER gebouwde thermo-akoestische koeler door TNO beproefd.

Eén belangrijk onderscheid in de diverse thermo-akoestische technieken dient hier expliciet genoemd te worden: de staande versus de lopende golven. In de voorgaande paragrafen is een beschrijving gegeven van een thermo-akoestische koeler op basis van staande golven. Dit is ook de technologie die in de studie voor het oliewinnend bedrijf is beschouwd. Vof ASTER heeft zijn apparaat gebaseerd op lopende golven. Dit heeft voornamelijk gevolgen voor de uitvoeringsvorm: de technologie met lopende golven biedt wat meer vrijheid ten aanzien van de vormgeving.

Aandachtspunten m.b.t. energiebesparingsbeleid

Thermo Akoestische Koeling verkeert in een experimentele fase. De huidige ontwikkelingen richten zich nog niet op een specifieke toepassing. Vanuit het toepassingsgebied van de klimatisering is het van belang, om bij de ontwikkeling ook aandacht te schenken aan toepassingen met “hoge” verdampingstemperaturen (boven 0 °C).

**6.12 (Mede) Door zonne-energie aangedreven koeling**

Gebruik maken van zonne-energie voor het opwekken van koude lijkt een goede optie, omdat bij gebouwen de behoefte aan koeling toeneemt op het moment dat de zon schijnt. In principe komen hiervoor de volgende systemen in aanmerking:

1. Absorptiekoelsysteem (met water als koudemedium en LiBr als absorptiemiddel of ammoniak als koudemedium en water als absorptiemiddel)
2. Adsorptiekoelsysteem (met water als koudemedium en silicagel als absorptiemiddel)
3. DEC-systeem, Desiccative Evaporative Cooling, koeling van lucht door een combinatie van droging (ontvochtiging), warmte-uitwisseling en bevochtiging. Bij dit systeem kan zonne-energie worden benut voor het regenereren van het regeneratiewarmtewiel (zie paragraaf 6.9)
4. Electrisch (foto-voltaïsch, PV) gedreven compressiekoelmachine.

N.B. De keuze tussen, ofwel het verschil tussen, de koelmachines en het DEC-systeem wordt bepaald door het feit of de warmtelast in het gebouw wordt opgenomen door water (koelmachines) of door lucht (het DEC-systeem).

Het is meer dan een decennium geleden dat onderzoek is verricht naar zonnekoeling. Sinds die tijd hebben zich technische verbeteringen voorgedaan, met name op het gebied van collectoren (hoger rendement/hogere temperatuur) en absorptiekoeling (lagere uitdrijftemperatuur). De huidige stand van zaken op het gebied van zongedreven koeling wordt het best weergegeven door een recentelijk gehouden internationale workshop in het kader van een mogelijk nieuwe taak binnen het International Energy Agency Solar Heating & Cooling (SH&C) Programme. Het door TNO opgestelde rapport over deze workshop [44] geeft de volgende tussenstand:

#### Ontwikkelingen en activiteiten:

- Fraunhofer: rekenstudie DEC + zonnekoeling (vlakke plaat collector)
- ILK Dresden: ontwikkeling kleine DEC (2,5 - 3 kW)
- Frankrijk: SolarClim (absorptie, vacuümbuizen) voor koelen wijnopslag (zonder buffer)
- Israël: 700 kW absorptie/zonne-energie systeem voor ziekenhuis (enkelglas collectoren, 85°C)
- VS: Solar Cooling Roadmapping Program (rapport verschijnt binnenkort, kan goede input zijn voor Taak; moet tot handboek leiden)
- Duitsland: diverse projecten (absorptie of DEC in kantoren)
- Zweden: DEC voor lage temperaturen (55°C)
- Diverse landen: projecten geweest maar geen follow-up (geprobeerd, doch het bleek te duur)

#### Resultaten en conclusies:

- Op de markt beschikbare absorptiekoelmachines zijn niet ontworpen voor zongedreven toepassing. (bijna geen producten beschikbaar in de lagere vermogens-range, alleen enkele direct gasgestookte apparaten; warmtewisselaars zouden verbeterd moeten worden teneinde lagere uitdrijftemperaturen toe te kunnen staan)
- Adsorptiekoelmachines zouden een interessante optie voor de toekomst kunnen zijn. Momenteel zijn slechts een paar producten op de (Japanse) markt, die bovendien relatief zwaar en groot zijn.
- Van de verschillende desiccant technologieën (vaste stof/vloeistof sorbent, vast bed/roterende adsorbers) schijnt het vaste stof systeem met roterende ontvochtiger (zoals Roto-cool van Verhulst) de hoogste relevantie in de markt te hebben. Dit systeem sluit aan bij de prestatie van vlakke plaat collectoren, watergekoeld of zelfs luchtgekoeld. Zonbijdragen voor koeling van 70 tot 80% zouden bereikbaar zijn zonder overdimensioneren van de collector.
- Ondanks een aantal aansprekende voordelen is het DEC-systeem (nog) niet eenvoudig te introduceren op de (Europese) markt; in combinatie met zonnecollectoren zou dit nog moeilijker zijn.
- In de workshop werd opgemerkt dat de zonnetechnologie een niveau had bereikt van producten met hoge kwaliteit, lange levensduur en geringe degradatie door veroudering

- Ook werd duidelijk dat systemen niet alleen gebruikt zouden moeten worden voor koeling, maar ook voor verwarmingsdoeleinden
- Er werd gesteld dat, speciaal bij grote gebouwen, de combinatie van verschillende systemen veel meer belovender zou zijn dan oplossingen gebaseerd op slechts één technologie. Een voorbeeld kan zijn zongedreven sorptieve ontvochtiging in combinatie met afvoeren van voelbare koellast middels bijv. gekoelde plafonds.
- Er is ook toegevoegd dat de belangrijkste onderzoekstaken zouden moeten liggen op het gebied van de interface tussen het zonnestelsel en het koelsysteem. Op deze interface kunnen complexe interacties worden verwacht die door regelstrategieën beheerst moeten worden, al dan niet met bufferopslag.

#### Technische vooruitzichten

- Aanpassing van de technologie van absorptiekoeling voor het benutten van zonne-energie. Dit omvat verbeterde backup systemen (bijv. dubbel traps of 1-2-effect machines met 1-effect als zongedreven en 2-effect als back-up gedreven door ketel resp. een elektrisch gedreven compressiekoelmachine). De industrie moet worden gevraagd deze ontwikkelingen ter hand te nemen.
- Adsorptiekoeling, bijv. gebaseerd op het stoffenpaar silicagel-water, met relatief lage uitdrijftemperaturen (Japan).
- DEC-systemen, gebruik makend van zonnewarmte verkregen met eenvoudige vlakkeplaat collectoren of luchtcollectoren. Aandacht moet gegeven worden aan het primair energiegebruik (verhoogd elektriciteitsgebruik door verhoogde drukvallen over warmtewisselaars). De industrie is in dit concept geïnteresseerd en zou activiteiten in deze moeten ondersteunen.
- De hoofdaandacht zou moeten vallen op gecombineerde systemen, d.w.z. systemen gebaseerd op verschillende koeltechnieken. Zoals (zongedreven) sorptieve ontvochtiging, (conventioneel gedreven) koeling van voelbare warmtelast en systemen met zonne-fracties < 1. Dit kan verschillen met de vele activiteiten uit de jaren 80. Daar lag de hoofdaandacht op de koelmachines en minder op de 'overall system performance'.
- Het is in alle opzichten interessant dat de systemen de mogelijkheid bieden niet alleen voor koeling te worden gebruikt maar ook voor andere doeleinden zoals verwarming en eventueel warmwaterbereiding (integratie van gebouwbehoeften). Ook dit kan een andere invalshoek zijn als die in de jaren 80.
- Een ander voorstel tijdens de workshop was om zich te richten op *één toepassingsgebied*, d.w.z. alleen systemen te beschouwen die geïnstalleerd zouden worden in één toepassing zoals hotels of ziekenhuizen.

De argumenten daarvoor waren:

- de geselecteerde toepassing zou gunstige voorwaarden voor zonnekoeling moeten laten zien
- zonnekoeling zou dan een marktintroductie kunnen beginnen in een gunstig geselecteerde niche-markt

- algemene kennisopbouw (bijv. regeling van het systeem, ontwerp e.d.) zou dan verkregen kunnen worden op basis van een goed gedefinieerde standaard
- demonstratieprojecten zouden een goed vergelijkbare basis hebben

#### Aandachtspunten m.b.t. het Nederlandse energiebesparingsbeleid

Zongedreven koeling is een tot de verbeelding sprekende techniek, waarbij “gratis” koeling wordt verkregen op juist die momenten dat koeling gevraagd wordt. Voor het tot ontwikkeling komen van zongedreven koeling is het noodzakelijk dat de afgifte temperatuur van de zonnecollector verhoogd wordt, en anderzijds de aandrijf temperatuur voor absorptiekoeling verlaagd wordt. Het laatste geldt zowel voor de “conventionele” absorptiekoeling, als ook voor DEC systemen. Het is zelfs aannemelijk, dat toepassing in DEC systemen eerder tot ontwikkeling kan komen dan toepassing bij absorptiekoelmachines.

Met betrekking tot het energiebesparingsbeleid ligt hier een nieuwe uitdaging, om de tot nu toe gescheiden kennisgebieden met betrekking tot klimaatinstallaties en zonnecollectoren bijeen te brengen.

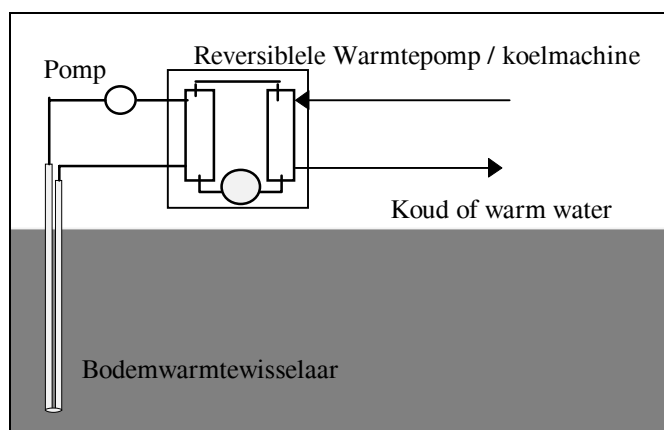
### **6.13 Warmtepompsystemen met bodemwarmtewisselaars voor koeling en verwarming**

Bij lange termijn koude opslag wordt doorgaans gebruik gemaakt van watervoerende lagen (aquifers) in de diepe ondergrond. Voor het oppompen en terugpompen van water in deze lagen dienen putten geslagen te worden, hetgeen hoge kosten met zich meebrengt. Hierdoor zijn systemen voor lange termijn koude opslag pas interessant bij grotere jaarlijkse koudevragen (minimale jaarlijkse koudevraag circa 250 - 300 MWh).

Bodemwarmtewisselaars vormen een alternatief dat vooral bij kleinere koudevragen interessant kan zijn; verticale bodemwarmtewisselaars voor verwarming (in combinatie met een warmtepomp) worden momenteel toegepast in de woningbouw, waarbij doorgaans één systeem per woning wordt toegepast.

Bodemwarmtewisselaars maken gebruik van het feit dat de temperatuur in de nabije ondergrond (tot 100 meter diepte) een temperatuur van circa 10 °C heeft. De verticale bodemwarmtewisselaar (VBWW) is doorgaans een PE buis die in een U-vorm in de grond wordt geplaatst, tot een diepte van 15 - 100 meter (Figuur 48). Door de buis stroomt een medium (water/glycol) dat de warmte uit de omliggende grond opneemt (warmtepompbedrijf) of warmte aan de grond afstaat (koelbedrijf). De VBWW buis kan ook in heipalen geïntegreerd worden. In vergelijking met LTK - opslag zijn er twee in het oog springende verschillen:

- de verticale bodemwarmtewisselaar is een gesloten systeem, er vindt geen water-onttrekking of afgifte aan de bodem plaats, er wordt alleen warmte uitgewisseld.
- de verticale bodemwarmtewisselaar maakt in principe gebruik van één put, in tegenstelling tot het (duobron) aquifer systeem waarbij het systeem werkt met één bron en één “sink”. Overigens worden in een installatie met bodemwarmtewisselaars doorgaans meerdere warmtewisselaars geplaatst.



*Figuur 48 Verticale Bodemwarmtewisselaar (VBWW) met omkeerbare warmtepomp*

In warmtepompbedrijf zal bij een gemiddelde warmte-onttrekking (circa 25 Watt/meter) de mediumtemperatuur circa 5 °C bedragen. Bij een koudevraag die kleiner is dan de warmtevraag, kan in de zomer koude aan de bodem onttrokken worden bij een temperatuurniveau (medium) van rond 10 °C. Het koude medium kan gebruikt worden om over een warmtewisselaar het koudwatersysteem van het gebouw te voeden. Daarbij zijn vooral systemen met koelplafonds in te zetten, vanwege het relatief hoge watertemperatuurniveau. Als alternatief (voor het bereiken van lagere koud-water temperaturen) kan de omkeerbare warmtepomp worden gebruikt als koelmachine, met warmte-afgifte op een laag niveau - hetgeen de energie efficiëntie van de koelmachine gunstig beïnvloedt.

Voor toepassing in de (kleine) utiliteitsbouw [45] zullen een groot aantal verticale bodemwarmtewisselaars in de bodem gebracht worden, op onderlinge afstanden van 3 - 5 meter. De thermische eigenschappen van bodemwarmtewisselaars / bodem zullen in dergelijke gevallen vooraf bestudeerd moeten worden. Hiervoor zijn verschillende berekenings- en simulatie programma's voor de PC beschikbaar, zoals EED (Earth Energy Designer), HST2D / HST3D en Bodemtix. Deze programma's moeten worden aangepast voor het rekenen aan “velden” met vele warmtewisselaars die elkaar onderling beïnvloeden.

### Milieu aspecten

Van belang bij grootschalige toepassing van VBWW's, is de vraag of de daarbij optredende afkoeling van de bodem geaccepteerd wordt. Zoniet, dan zal in de winter regeneratie moeten plaatsvinden.

Verder is nog weinig kennis aanwezig over de milieu-effecten van lekkages van glycol uit het systeem naar de bodem.



## 7. Overzicht alternatieve en innovatieve koelsystemen

Koelsystemen in de utiliteitsbouw in Nederland zijn voor het merendeel opgebouwd met een compressie koelaggregaat voor de koude opwekking. Op het gebied van de compressiekoeling zijn geen radicale veranderingen te verwachten op korte termijn, de ontwikkelingen richten zich op verbeterde zuigermachines en schroefcompressoren. De scroll compressor gaat meer en meer zijn intrede doen. Voor wat betreft de absorptiekoeling zullen naast verbetering van LiBr/water en water/NH<sub>3</sub> machines, omgekeerde rectificatie machines worden ontwikkeld. Verder wordt getracht de absorptie/diffusie machine op te schalen naar grotere vermogens.

### Thermosyphon systemen

Mechanische compressie koelsystemen (> 95% van alle systemen in Nederland) zijn uitgevoerd als watergekoelde koelmachine (met koeltoren) of luchtgekoelde koelmachine (met luchtgekoelde condensor). Systemen met koeltoren kunnen gemakkelijk gebruik maken van vrije koeling, luchtgekoelde systemen kunnen dat niet. Luchtgekoelde systemen met koelplafonds kunnen worden “omgevormd” tot Thermosyphon systemen (met verdampingscondensors), om gebruik te kunnen maken van vrije koeling.

In Nederland is tot nu toe geen expertise op het gebied van thermosyphon systemen aanwezig. Het verdient aanbeveling deze kennis op te pakken, met name in relatie tot bovengenoemde “omvorming” van luchtgekoelde systemen met koelplafonds naar thermosyphon systemen.

### Multi split DX systemen

Vooraf voor kleinere projecten (8 - 16 afgifte units) en bij renovaties is het multi split DX systeem een zeer goede oplossing voor klimatisering; gebruikmakend van toerengeregelde reversibele warmtepompen. Ook voor situaties met gelijktijdige warmte- en koudevraag is het systeem een goede oplossing, die de mogelijkheid heeft warmte te transporteren van vertrekken met een overschot naar vertrekken met een warmtebehoefte. Naast goede opwekkings- en systeemrendementen, heeft het systeem het bijkomende voordeel dat geen energie voor warmte- en koudetransport benodigd is. In de huidige generatie systemen worden milieuvriendelijke koudemiddelen toegepast.

In de Nederlandse literatuur betreffende klimatisering en de bijbehorende hulpmiddelen wordt geen of weinig aandacht besteed aan multi split DX systemen. Een aandachtspunt in het energiebesparingsbeleid kan daarom zijn, om bij uit te voeren energiebesparingsstudies en in nieuwe hulpmiddelen (variantenboeken e.d.) plaats in te ruimen voor het multi split DX systeem als één van de mogelijke klimatiseringssystemen (naast all-air en lucht/water systemen).

### Versatemp systeem

Versatemp systemen leveren goede energetische prestaties wanneer er sprake is van een grote gelijktijdigheid in de warmte- en koudevraag van een gebouw. In dergelijke situaties wordt het systeem zonder of met minimale warmte- of koude-opwekking bedreven. Het Versatemp systeem is vergelijkbaar met het (reversibele) multi split DX systeem, maar is energetisch in het nadeel ten gevolge van het extra watercircuit. Dit watercircuit opent echter ook mogelijkheden, zoals het toepassen van Lange (en korte-) Termijn Koude opslag, en aandrijving met restwarmte.

Koppeling van het Versatemp systeem met koude opslag, bijvoorbeeld in de vorm van verticale bodemwarmtewisselaars, is een energetisch interessante optie die de moeite waard is om nader te onderzoeken en eventueel tot ontwikkeling te brengen. Daarbij zal de aandacht moeten uitgaan naar het aanpassen van het temperatuurniveau van het centrale waternet (in het bestaande systeem 27 °C) naar een lagere temperatuur, aansluitend op opslagsystemen.

### DEC systemen

DEC systemen hebben onlangs op de Nederlandse markt hun intrede gedaan. Het grote voordeel van het systeem is, dat het, zowel voor warmte- als koudelevering, alleen met warmte wordt aangedreven - hetgeen combinaties met WKK, stadsverwarming en eventueel zonne-energie mogelijk maakt. DEC systemen “scoren” energetisch gezien het best in systemen met een grote warmtebehoefte ten opzichte van de koudebehoefte.

Gezien het toenemende belang van warmtegedreven systemen (stadsverwarming, WKK) verdient het aanbeveling het DEC systeem door te ontwikkelen. Daarbij zal aandacht moeten worden besteed aan de prijs/prestatie van de absorptierotor, en aan mogelijke combinaties van DEC systemen met andere energiebesparende systemen (zoals zonne-energie benutting).

### Ijsslurrie systemen

Ijsslurrie systemen worden gekenmerkt door kleine afmetingen van de distributiesystemen, vanwege de hoge warmte-opname capaciteit van de ijsslurrie per kg. Ijsslurrie systemen zijn met name interessant in combinatie met korte termijn koude opslag (Off Peak Air conditioning, OPAC), waar het voordeel voor de gebruiker eerder uit de energiekosten (nachttarief) dan uit de energiebesparing wordt gehaald. Vanwege de kleinere capaciteiten van de componenten kunnen ook de investeringskosten lager zijn. Ijsslurrie systemen worden in de commerciële koeling (supermarkten) reeds toegepast, voor toepassing in klimatiseringssystemen in de utiliteit zullen geschikte afgifte systemen ontwikkeld moeten worden.

Het is niet ondenkbaar dat het ijsslurrie systeem de komende jaren zijn intrede doet in de (kleine) utiliteitsbouw, zeker wanneer de elektriciteitskosten stijgen. In dat

geval is het aan te bevelen nu reeds het systeem energetisch te optimaliseren, zodat toepassing naast een energiekostenbesparing ook een energiebesparing oplevert. Aandachtspunten bij deze ontwikkeling zijn de systemen voor ijslurrie productie (nu voornamelijk geschraapte warmtewisselaars) en lage temperatuur afgifte systemen. De koude opslag gaat gepaard met kleinere koelcapaciteiten dan bij systemen zonder opslag, hetgeen goede mogelijkheden opent voor experimenten met NH<sub>3</sub> of koolwaterstoffen als koudemiddel.

### Air Cycle systemen

Air Cycle systemen zijn eenvoudige, goed regelbare systemen voor volledige klimatisering door middel van lucht. Qua opwekkingsrendement (koel- en warmtepompfunctie) zijn de systemen in het nadeel ten opzichte van conventionele systemen, hier staat echter tegenover dat het systeemrendement voor distributie 100% is, en het bijbehorende energiegebruik nihil. Air cycle systemen zijn op dit moment nog in ontwikkeling (waarbij vooral de verbetering van rendementen van turbocompressoren en expanders in de belangstelling staat); de mogelijkheden voor energetische optimalisaties zijn nog nauwelijks benut.

Het verdient aanbeveling om de ontwikkeling van de air cycle voor klimatiseringsdoeleinden te volgen, en waar mogelijk extra aandacht aan de mogelijke energiebesparende opties te schenken. Daarbij zijn zeker ook combinaties met systemen voor vrije koeling (bijvoorbeeld aanzuiging door grondbuizen) de aandacht waard.

### Thermo Akoestische Koeling

Thermo Akoestische Koeling (koude opwekking met behulp van geluidsgolven) verkeert in een experimentele fase. De huidige ontwikkelingen richten zich nog niet op een specifieke toepassing. Vanuit het toepassingsgebied van de klimatisering is het van belang, om bij de ontwikkeling ook aandacht te schenken aan toepassingen met “hoge” verdampingstemperaturen (> 0 °C).

### Zongedreven koeling

Zongedreven koeling is een tot de verbeelding sprekende techniek, waarbij “gratis” koeling wordt verkregen op juist die momenten dat koeling gevraagd wordt. Voor het tot ontwikkeling komen van zongedreven koeling is het noodzakelijk dat de afgifte temperatuur van de zonnecollector verhoogd wordt, en anderzijds de aandrijf temperatuur voor absorptiekoeling verlaagd wordt. Het laatste geldt zowel voor de “conventionele” absorptiekoeling, als ook voor DEC systemen. Het is zelfs aannemelijk, dat toepassing in DEC systemen eerder tot ontwikkeling kan komen dan toepassing bij absorptiekoelmachines.

Met betrekking tot het energiebesparingsbeleid ligt hier een nieuwe uitdaging, om de tot nu toe gescheiden kennisgebieden met betrekking tot klimaatinstallaties en zonnecollectoren bijeen te brengen.

#### Verticale bodemwarmtewisselaars.

Verticale bodemwarmtewisselaars vormen een alternatief systeem voor aquifer systemen voor Lange termijn koude opslag, met name in projecten met een kleine omvang. Vanuit de woningbouw is reeds veel kennis voorhanden, extra studie is nodig voor de dimensionering van “velden” warmtewisselaars die elkaar onderling beïnvloeden. De beschikbare simulatieprogrammatuur dient hierop te worden aangepast.

#### Energetische vergelijking van alternatieve en innovatieve systemen met conventionele referentie systemen.

Tabel 34 geeft een overzicht van de energetische prestaties van de alternatieven voor koude opwekking ten opzichte van conventionele systemen (een vierpijps inductiesysteem of een VAV systeem, al naar gelang het distributie medium). Verder is de waardering van het alternatief in de Energie Prestatie Normering (pre norm NEN 2916:1998) gegeven, ten opzichte van het conventionele systeem.

Tabel 34 Energetische prestaties en waardering in de EPN van de systemen.

Stelsel benaming	Distributie-medium	Energiegebruik (totaal stelsel) t.o.v. referentie	Waardering EPN 98 (alleen koelfunctie) t.o.v. referentie	Opmerkingen
Thermosyphon	water	84%	100%	In combinatie met koelplafonds
DX multisplit	koudemiddel	79%	82%	Toerengeregeld (inverter)
DX multisplit Reversibel (WP)	koudemiddel	51%	-	Toerengeregeld (inverter)
Versatemp zonder gelijktijdigheid	water 2 pijps	116%	100%	Conventionele koude- en warmtelevering
Versatemp met gelijktijdigheid	water 2 pijps	75%	100%	Evenwicht warmte- en koudevraag ( $f_{kb} = 0,31$ )
DEC	lucht	95%	≈ 200%	Besparing voornamelijk op energiegebruik verwarming
Ijsslurrie zonder opslag	vloeibaar ijs	111%	-	Minimaal ruimtebeslag distributie stelsel
Ijsslurrie met opslag (OPAC)	vloeibaar ijs	101%	-	Energie kosten besparing (nachttarief)
Air Cycle	lucht	122%	100%	Laag energiegebruik voor transport
TAK	water of lucht	?	-	Alternatief stelsel voor koude opwekking
Zonnewarmte	water of lucht	< 100%	100%	Bron voor WP, DEC en absorptiestelsels.
VBWW met WP (geen koelbedrijf)	water of lucht	40%	33%	Alternatief voor LTK - opslag in aquifers

Alhoewel de EPN niet is bedoeld als bepalingsmethode voor het energiegebruik, worden opties in de praktijk desalniettemin afgewogen op “prestaties in de EPN”. Het is daarom wenselijk om de geschetste alternatieve en innovatieve systemen binnen de EPN meer te waarderen in overeenstemming met de werkelijke optredende energiebesparing (of het meergebruik!). Wanneer dit niet geschiedt, kan de EPN in de weg komen te staan voor energiebesparende nieuwe systemen voor klimatisering - hetgeen averechts op de goede bedoeling van de EPN staat.



## 8. Literatuur

- [1] Koeling in gebouwen. Een overzicht van de stand van zaken in Nederland.  
H.C. Blom  
KEMA rapport nr. 43033 - T&D - 92-927, december 1992.
- [2] NEN 2916  
Energieprestatie van utiliteitsgebouwen. Bepalingsmethode.  
Nederlands Normalisatie Instituut. NEN 2916, 1<sup>e</sup> druk september 1994.
- [3] Ontwerp NEN 2916:1998  
Energieprestatie van utiliteitsgebouwen. Bepalingsmethode.  
Nederlands Normalisatie Instituut. Ontwerp NEN 2916, februari 1998.
- [4] TNO Bouw rapportnummer 98-BBI-R0382  
Bepalingsmethode systeemrendementen NEN 2916; onderbouwing en  
afleiding van de getalswaarden  
Ing. P.A. Elkhuisen e.a.; Delft, maart 1998
- [5] Praktijkhandboek duurzaam bouwen. B 140.10 Warmtepompsystemen  
Peter Oostendorp  
Praktijkhandboek duurzaam bouwen, NOVEM / PWP.
- [6] ISSO-publicatie 43. Standaard concepten voor klimaatinstallaties.  
ISSO, Rotterdam, april 1998.
- [7] Klimaatinstallaties in kantoren.  
RGD  
Rijks Gebouwen Dienst publicatie. Juni 1997
- [8] Havenaar, D.  
Compressoren en vloeistofkoelmachines met ammoniak.  
TVVL Magazine 8/97, p.20-24.
- [9] ISSO-publicatie 38.  
Handboek Warmtepompen voor de gebouwde omgeving.  
ISSO, Rotterdam, januari 1996.
- [10] ISSO-SBR publicatie 213.  
Ontwerpen van energie-efficiënte kantoorgebouwen; Integratie van gebouw  
en installatie.  
ISSO, Rotterdam, januari 1994.

- 
- [11] Meetprogramma bodemwarmte installatie brandweer Deventer  
Eco-Engineering B.V, Velp, 1991
- [12] Inlet of air through a ground pipe  
Wiksten, M. Virtanen  
Valtion teknillinen Tutmuskeskus, Espoo (Finland), 1985
- [13] ISSO-publicatie 39.  
Lange termijn koude-opslag in de bodem; van concept naar  
haalbaarheidsstudie.  
ISSO, Rotterdam, april 1997.
- [14] Deerns R.I. rapport  
Waardering van lange-termijnopslag in NEN 2916 “Energieprestatie van  
utiliteitsgebouwen”  
Ir. K.C.J. Nobel Rijswijk, juni 1995
- [15] Brochure ‘Nuttig gebruik restkoude en restwarmte met warmtepomp plus  
energie-opslag’.  
Integratie van de verwarmings- en koelinstallatie in gebouw Anova te  
Amersfoort.  
Novem ref.nummer DV1.3.95 96.07. (1996). Ook in TVVL Magazine 3/98,  
p.6-11.
- [16] Brochure ‘Energieprestaties van kantoorgebouwen’.  
Acht praktijkvoorbeelden van EP<sup>+</sup> kantoorgebouwen.  
Novem ref.nummer DV1.3.90 96.05. (1996)
- [17] Johansson, S SAS Frösundavik  
An office heated and cooled by groundwater,  
Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden, 1992, ISBN  
91-540-5423-0.
- [18] Rapport ‘Perspectieven van lange termijn energie-opslag in combinatie met  
een warmtepomp’,  
Novem rapportnummer 147.300-213.1.
- [19] Bolscher, G.H.ten en J. van Rijssel.  
Integratie van energieopwekkers bij Ziekenhuis St. Jansdal.  
Verwarming en Ventilatie, februari 1998, p. 175-181.
- [20] Ingen, M.A. van en L.H.F. van den Boogaard.  
Stadskoeling door het energiebedrijf.  
TVVL Magazine 9/97, p.26-30.



- [21] Novem Handboek Warmtedistributie, Basisgegevens, mei 1996.
- [22] Energiebewust ontwerpen van comfortkoelinstallaties.  
P.A. Elkhuisen, S.M. van der Sluis en H.C. Peitsman  
ISSO researchrapport 9, Rotterdam (september 1993)
- [23] Onderzoek over het energiegebruik en over de mogelijkheden van energiebesparing bij utiliteitsgebouwen.  
TPD-TNO rapport nr. 500.244-1 (augustus 1976)
- [24] Thermosyphon Cooling  
S.F. Pearson (Star Refrigeration Ltd)  
Institute of Refrigeration (UK), Proc. Inst. R. 1989-90. 6-1.
- [25] Savings with syphons  
Paul Haddlesey  
Heating & Air Conditioning (HAC), november 1991, p 30.
- [26] IJsopslag geïntegreerd in klimaatsysteem verhoogt koelcapaciteit  
N. Kusumoto  
Koude Magazine, oktober 1992 (p. 10)
- [27] Directory of Certified Products, February 1, 1997 - January 31, 1998  
EUROVENT Certification Company, Paris (F).
- [28] Afleiding van het systeemrendement voor koeling bij klimaatinstallaties t.b.v. EN 2916  
- Systemen met koeltransport via koudemiddel -  
S.M. van der Sluis  
TNO-MEP rapport R 96/474 (december 1996)
- [29] Praktijk katern: Daikin introduceert  
M. Prummel  
Koude & Luchtbehandeling, jaargang 90 nr. 3 (maart 1997).
- [30] Energy labelling of residential air conditioners, heat pumps and dehumidifiers  
G.R. King, M. Mondot, J. Nyvad, P. Fahlén, H. Schiphouwer en S.M. van der Sluis  
TNO-MEP rapport R 97/498 (december 1997)
- [31] Het Versatemp warmtepomp comfort air conditioning systeem.  
Artikel/brochure van IBK Compac koudetechniek & airconditioning.

- [32] Desiccative Evaporative Cooling - koeling van lucht door ontvochtiging, warmte-uitwisseling en bevochtiging.  
R.C.A. Schilt  
TVVL magazine 12/97 (december 1997), p. 8
- [33] Koelen door verdampen - alternatief bij koelen van lucht onder het dauwpunt  
L.N.F.M. Goossens  
TVVL magazine 12/97 (december 1997), p. 14
- [34] Onderzoek toepassing DEC-systeem, met en zonder warmtepomp, in de utiliteitsbouw  
Rapportage t.b.v. NOVEM, contractnummer 3382.20/119.6  
DWA Installatie- en Energieadvies, Bodegraven, 1 juli 1996
- [35] Introduction of FLO-ICE and Binary Ice technology as energy efficient and environmentally benign working fluids in the field of refrigeration and air conditioning  
M. Verwoerd, R.C.A. Smeets, R.J.M. van Gerwen  
TNO-MEP rapport R96/465 (december 1996)
- [36] Flo-ice en vacuümijs voor indirecte systemen  
R. Smeets, R. Beismann  
Koude & Luchtbehandeling jaargang 91 nr.5 (mei 1998)
- [37] Auslegung von Kälte-anlagen mit Binäreis (FLO-ICE) als Kühlmittel  
J. Paul  
Ki Luft- und Kältetechnik 2/1996
- [38] Flo-Ice as a carrier for cold  
J. van Bael  
CADDET Energy Efficiency, Newsletter No. 4 1996
- [39] Gerwen, van, R.J.M. e.a.  
Environmentally benign air cycle heat pumps and refrigeration systems  
Eindrapport van EG-project (contract JOU2-CT92-0078), december 1995.
- [40] Gerwen, van, R.J.M. en M.J.E. Verschoor  
Feasibility of Air Cycle Systems for Building Air Conditioning Systems  
IIR/IIF-conferentie "Applications for Natural Refrigerants", 3-6 september 1996, Aarhus, Denemarken

- [41] Gerwen, van, R.J.M. en M.J.E. Verschoor  
Air as Refrigerant - Prospects and Challenges  
IEA Annex 22 Workshop “Compression Systems with Natural Working Fluids”, 2-3 oktober 1997, Gatlinburg, U.S.A.
- [42] Gigiel, A., R. Gibbs, D. Butler en D. Holder  
Air Cycle Technologies for Building Services  
IIR/IIF-conferentie “Applications for Natural Refrigerants”, 3-6 september 1996, Aarhus, Denemarken
- [43] Butler, D.J.G.  
Air Cycle Refrigeration in Buildings  
REHVA Newsletter, September 1996
- [44]. Mogelijk nieuwe IEA SH&C Taak 25 ‘Solar Assisted Cooling Systems for Air Conditioning of Buildings’,  
Ree B G C van der en M.Rolloos  
TNO-rapport 98-BBI-R0840, 25 mei 1998
- [45] Ground-coupled heat pumps for commercial buildings  
S. Kavanaugh  
ASHRAE Journal, September 1992, p.30
- [46] Methodology of monitoring energy consumption in dispersed buildings  
J.L. Stoops  
Proceedings International Conference, Amsterdam, The Netherlands 21-23 september 1998
- [47] Installatie-arme concepten, ja of nee?  
R.W. van der Plas  
TVVL Magazine 12/98, p. 39-41
- [48] Onderzoek energiebesparingsmogelijkheden door middel van absorptiekoeling  
H.J.P. Boerboom e.a.  
HOST Hengelo & NOVEM Utrecht, juli 1996, p. 25-27
- [49] Control of night cooling with natural ventilation  
A.H.C. van Paassen, TU Delft  
19<sup>th</sup> anual AIVC Conference, Oslo, Norway, 28-30 september 1998
- [50] Summer Cooling with night ventilation for office buildings in moderate climates  
M. Kolokotroni e.a.  
Energy and Buildings 27, 1998, p. 231-237

- [51] De Nederlandse Compressormarkt  
E3T-Consult B.V., juni 1998

## 9. Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

NOVEM  
Catharijnesingel 59  
3503 RE Utrecht

Namen en functies van de projectmedewerkers:

S.M. van der Sluis	TNO-MEP
M. Rolloos	TNO Bouw

Met medewerking van:

P.A. Elkhuizen	TNO Bouw
G. Kuipers	TNO-MEP
J.P. van der Stoel	TNO-MEP
M. Verwoerd	TNO-MEP
M.J.E. Verschoor	TNO-MEP

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:

n.v.t.

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

januari - juni 1998

Ondertekening:

Goedgekeurd door:

Ir. S.M. van der Sluis  
projectleider

Ir. R.J.M. van Gerwen  
afdelingshoofd