

BEVRIEZINGSWARMTE ALS WARMTEBRON
VOOR WARMTEPOMPEN

door

Ir. J.W. Wormgoor
Dr. Ir. R. v.d. Welle



postbus 342
7300 AH apeldoorn

bezoekadres
laan van westenenk 501

telex 36395 tnoap
telefoon 055 - 77 33 44

Ref. nr. : 83-05084

Dossiernr.: 8725-50085

Datum : mei 1983

NP

„Voor de rechten en verplichtingen van de opdrachtgever met betrekking tot de inhoud van dit rapport wordt verwezen naar de Algemene Voorwaarden van TNO”.

Niets uit deze uitgave mag worden veeleenvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotocopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO. TNO aanvaardt geen enkele aansprakelijkheid met betrekking tot de inhoud en/of de vorm van deze uitgave.

<u>INHOUD</u>	<u>blz.</u>
SAMENVATTING	3
1. INLEIDING	4
2. CONVENTIONELE WARMTEBRONNEN	5
3. INVENTARISATIE EN MOGELIJKE TOEPASBAARHEID VAN VERSCHILLENDE BEVRIEZINGSPROCESSEN	8
3.1 Het vacuum vriesproces	8
3.2 Het proces met secundair vriesmiddel	10
3.3 Het absorptie vriesproces	12
3.4 Proces met vorming van plaatijs	13
4. VERGELIJKING BEVRIEZINGSPROCESSEN	16
5. BEVRIEZINGSWARMTEPOMP	17
5.1 Systeembeschrijving	17
5.2 Energieverbruik van de warmtepomp	17
5.3 Capaciteit	19
5.4 Opslagsysteem, uitvoering en kosten	20
6. KOUDEBENUTTING	24
6.1 Airconditioning	24
6.2 Vrieshuis	24
7. COMBINATIE MET WATERZUIVERING	26
8. ECONOMISCHE EVALUATIE	28
8.1 Uitgangspunten	28
8.2 Hoog rendement ketel	29
8.3 Warmtepomp systeem	29
8.3.1 Warmtezijdige aspecten	30
8.3.2 Koudezijdige aspecten	32
8.4 Kostenvergelijking	35
9. CONCLUSIES	36
10. REFERENTIES	37

SAMENVATTING

Bij toepassing van grootschalige warmtepompen binnen de gebouwde omgeving kan het vinden van een geschikte warmbron voor de verdamper problemen opleveren. In dit rapport wordt een warmtepomp systeem gepresenteerd waarin gebruik wordt gemaakt van een vacuumvriesverdamper die bevroeringswarmte van water benut. Het water en de daarin gevormde ijskristallen worden rondgepompt in een gesloten systeem met een reservoir voor seizoenopslag van het ijs. Op deze wijze is het mogelijk het gevormde ijs ook buiten het stookseizoen te benutten voor koeldoeleinden. Een andere optie is gebruik van het ijs, dat uit schoon water bestaat, voor de produktie van gezuiverd water door het ijs eerst van het brijn te scheiden en daarna te smelten. In het rapport wordt een overzicht gegeven van uit de literatuur bekende bevroeringsprocessen met het oog op bruikbaarheid voor een warmtepompverdamper. Er wordt een vergelijking gemaakt tussen de kosten van woningverwarming met hoogrendement gasketels en met een collectief gasmotor warmtepompsysteem met vacuumvriesverdamper en seizoenopslag van koude.

1. INLEIDING

De toepassing van middelgrote warmtepompen met een vermogen van enkele honderden kW voor collectieve verwarming (blok- of wijkverwarming, utiliteitsbouw e.d.) zou mogelijk belemmerd kunnen worden door het in onvoldoende mate beschikbaar zijn van een bruikbare warmtebron.

Het gebruik van conventionele warmtebronnen kan stuiten op bezwaren en/of kosten verbonden aan het grootschalig gebruik van deze bronnen.

Deze bezwaren zullen hoogstwaarschijnlijk belangrijk verminderd kunnen worden door gebruik te maken van de stollingswarmte die vrijkomt bij de omzetting van water in ijs. In vergelijking met de benutbare voelbare warmte is de bevroingswarmte per gewichtshoeveelheid water groot terwijl er tevens mogelijkheden zijn om de opgewekte koude te benutten voor koeling (door seizoens-opslag) en om als bijproduct gezuiverd water te leveren.

In dit verslag wordt gerapporteerd over de technische en economische feasibility met betrekking tot het gebruik van bevroingswarmte als warmtebron voor warmtepompen.

2. CONVENTIONELE WARMTEBRONNEN

Er zijn een aantal warmtebronnen die in aanmerking komen om gebruikt te worden voor grote warmtepompinstallaties. Bij nadere beschouwing blijkt toepassing van elk van deze bronnen voor grootschalige toepassingen problemen te geven op het gebied van beschikbaarheid, inpassing en/of kosten.

De volgende opties dienen in overweging te worden genomen:

. Buitenlucht

Voordeel: - altijd en overal beschikbaar.

Nadelen : - grote afmetingen en hoge kosten van de verdamper;
- geluidshinder van de verdamperventilatoren;
- eventuele overlast door afkoeling van de omgevingslucht;
- moeilijk in te passen in dicht bebouwde omgeving;
- ongewenste karakteristiek, capaciteit neemt af bij lagere omgevingstemperatuur (dus bij hogere warmtevraag);
- in verband met berijpen bij lage omgevingstemperaturen is ontdooivoorziening noodzakelijk.

. Oppervlaktewater

Voordeel: - betrekkelijke hoge gemiddelde temperatuur, door goede warmteoverdrachtscoëfficiënt in water-freon warmtewisselaar relatief kleine en goedkope verdamper, zeker indien watertemperatuur in verband met industriële activiteiten extra hoog is.

Nadelen : - beperkte beschikbaarheid, hoge leveringskosten als de transportafstand groot is;
- mogelijk een gebruikersheffing;
- tijdens een deel van het stookseizoen niet bruikbaar door te lage temperatuur (tenzij opgewarmd door afvalwarmte);
- mogelijke vervuiling van de warmtewisselaar.

. Grondwater

Voordeel: - constant hoge temperatuur dus hoge warmteverhouding van de warmtepomp, goedkope verdamper.

Nadeel : - wegens mogelijke verstoring van de grondwaterhuishouding is een hoge gebruikersheffing of een gebruiksverbod te verwachten bij toepassing op grote schaal. Het afgekoelde water zal weer teruggepompt moeten worden, de problemen die daarbij op zullen treden zijn nog niet volledig bekend.

. Afvalwater

Voordeel: - meestal betrekkelijk hoge temperatuur.

Nadelen : - beperkte beschikbaarheid;
- hoge leveringskosten indien de transportafstand te groot is;
- bij gebruik van vervuild water (bijvoorbeeld rioolwater) wordt de vervuiling van de warmtewisselaar een probleem. Bovendien is het ongewenst, water dat in een zuiveringsinstallatie biologisch gereinigd moet worden af te koelen aangezien deze reiniging bij lage temperatuur veel langzamer verloopt.
- de warmtegebruiker wordt afhankelijk van de afvalwaterproducent.

. Bodemwarmtewisselaar

Voordeel: - overal toepasbaar;
- indien systeem voldoende groot wordt opgezet is het gemiddelde temperatuur-niveau redelijk hoog.

Nadelen : - de benodigde grondoppervlakte is groot, voor groot-schalig systeem is dat zelfs bij een verticale bodemwarmtewisselaar het geval vanwege de randvoorwaarde dat de grond waaraan de warmte is onttrokken in de zomer weer voldoende in temperatuur moet stijgen;
- door het grote benodigde leidingnet zijn de aanlegkosten hoog.

Gezien bovenstaande problemen verbonden aan de conventionele warmtebronnen en/of de beperkte beschikbaarheid is het nuttig te onderzoeken of gebruik van de stollingswarmte, die vrijkomt bij de omzetting van water in ijs een goed alternatief kan vormen.

3. INVENTARISATIE EN MOGELIJKE TOEPASBAARHEID VAN VERSCHILLENDE BEVRIEZINGSPROCESSEN

Het ontstaan van ijs bij het bevriezen van water kan plaatsvinden op twee manieren, namelijk door het vormen van massief ijs (plaat-ijs) aan koude oppervlakken, dan wel door het vormen van kleine ijskristallen in een hoeveelheid water, die dan als slurrie verpompt kan worden. Het vormen van plaatijs op koude oppervlakken is een indirecte bevroezingsmethode, terwijl het vormen van ijskristallen optreedt bij direct contact warmteoverdracht met verdampend koudemiddel. Deze beide processen zijn niet nieuw, de vorming van plaatijs wordt toegepast bij ijsmachines, terwijl het directe contact proces wordt toegepast bij waterontziltling. Het directe contact proces kan nog worden onderscheiden in drie methoden, namelijk het vacuum vriesproces, waarbij het aanwezige water tevens koudemiddel is; het proces met secundair koudemiddel en het absorptie vriesproces.

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van bovenstaande vier processen, terwijl tevens de mogelijke toepasbaarheid van elk proces voor warmtelevering aan de verdamper van warmtepompen wordt besproken.

3.1 Het vacuum vriesproces

3.1.1 Beschrijving

De werking van dit proces berust op het gelijktijdig naast elkaar kunnen bestaan van de drie aggregatietoestanden van water: waterdamp, water en ijs, bij eenzelfde temperatuur en druk. Dit zogenoemde triple-punt van water, waarbij dus het kookpunt gelijk is aan het vriespunt, ligt bij een temperatuur van $0,01^{\circ}\text{C}$ en een druk van ± 6 mbar. Wanneer nu in een vacuumvat, waarin een druk < 6 mbar wordt onderhouden, water wordt toegevoerd, zal een gedeelte hiervan opkoken (flashen) waarbij de hiervoor benodigde verdampingswarmte aan het overige water zal worden onttrokken. Hierdoor ontstaan in het niet verdampte water fijn verdeelde ijskristallen.

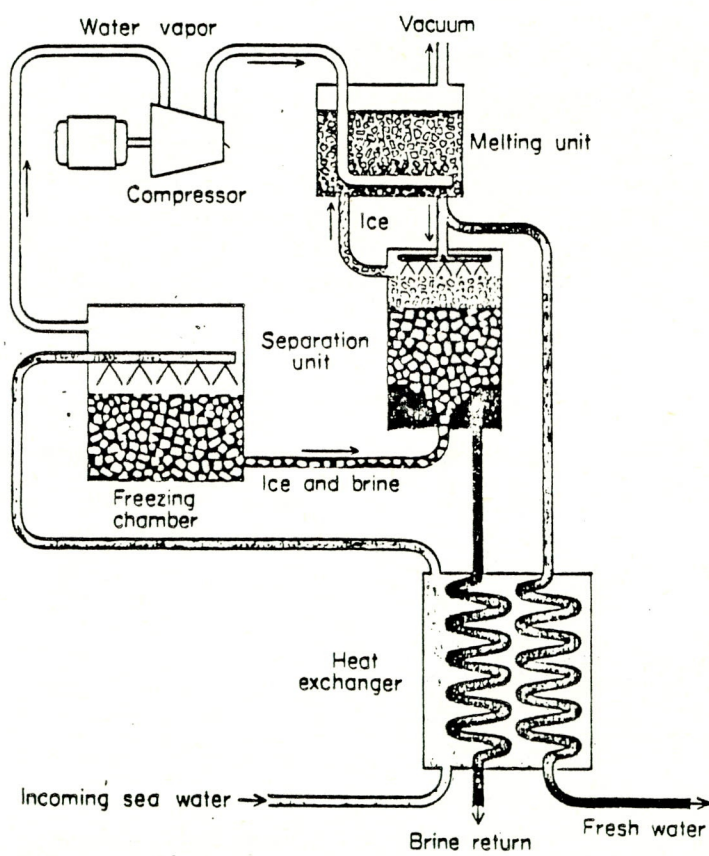


Fig.1 Vacuum vries-damp compressie methode (uit 11)

Aangezien de verdampingswarmte van water ongeveer 7,5 maal zo groot is als de smeltingswarmte van ijs zal per kg verdampt water 7,5 kg ijs ontstaan.

Dit proces wordt toegepast bij het ontzilten van zout water (zeewater) ten behoeve van (drink) waterproduktie, het staat bekend als het VFVC (Vacuum Freeze Vapor Compression) proces (zie figuur 1 en ref. [1], [2] en [3]). Bij dit ontziltingsproces worden de ijskristallen als een ijsslurrie met het brijn afgevoerd uit het bevroeringsvat en in een wastoren met behulp van een gedeelte van het reeds gezuiverde water van aanhangend zout gereinigd. Het gewassen ijs wordt vervolgens in een smeltvat gesmolten door het in contact te brengen met de uit het bevroeringsvat afgezogen en gecomprimeerde damp. Elke stap in dit ontziltingsproces (bevroering, waterdamp compressie, ijs wassen en smelten) kent specifieke problemen, waarvoor bepaalde oplossingen zijn gevonden. In dit geval is alleen het bevroeringsproces van belang, dit wordt sterk beïnvloed door de grootte van het dampvormend wateroppervlak. Stilstaand water zal aan de bovenzijde snel bevroeren, zodat agitatie noodzakelijk is. In [3] wordt een onderscheid gemaakt naar de methoden van agitatie, namelijk met behulp van:

- peddels;
- lepelvormige peddels, die water omhoog werpen;
- met nozzles geproduceerde fontein.

Het blijkt dat de specifieke capaciteit van het bevroeringsvat sterk toeneemt met toenemende agitatie, deze is in het laatste geval (met fontein) ongeveer $2,3 \times$ zo groot als voor het eerste (met peddels).

3.1.2 Toepasbaarheid

Bij toepassing van dit proces voor warmtelevering aan de verdamper van een warmtepomp kan minder goed gebruik gemaakt worden van compressie van de waterdamp voor afvoer en benutting van de condensatiewarmte hiervan. Dit wordt veroorzaakt door de combinatie van een groot volume aan damp bij een relatief hoge drukverhouding. Een andere benutting van de condensatiewarmte is mogelijk met behulp van desublimatie, dat wil zeggen het omzetten van waterdamp

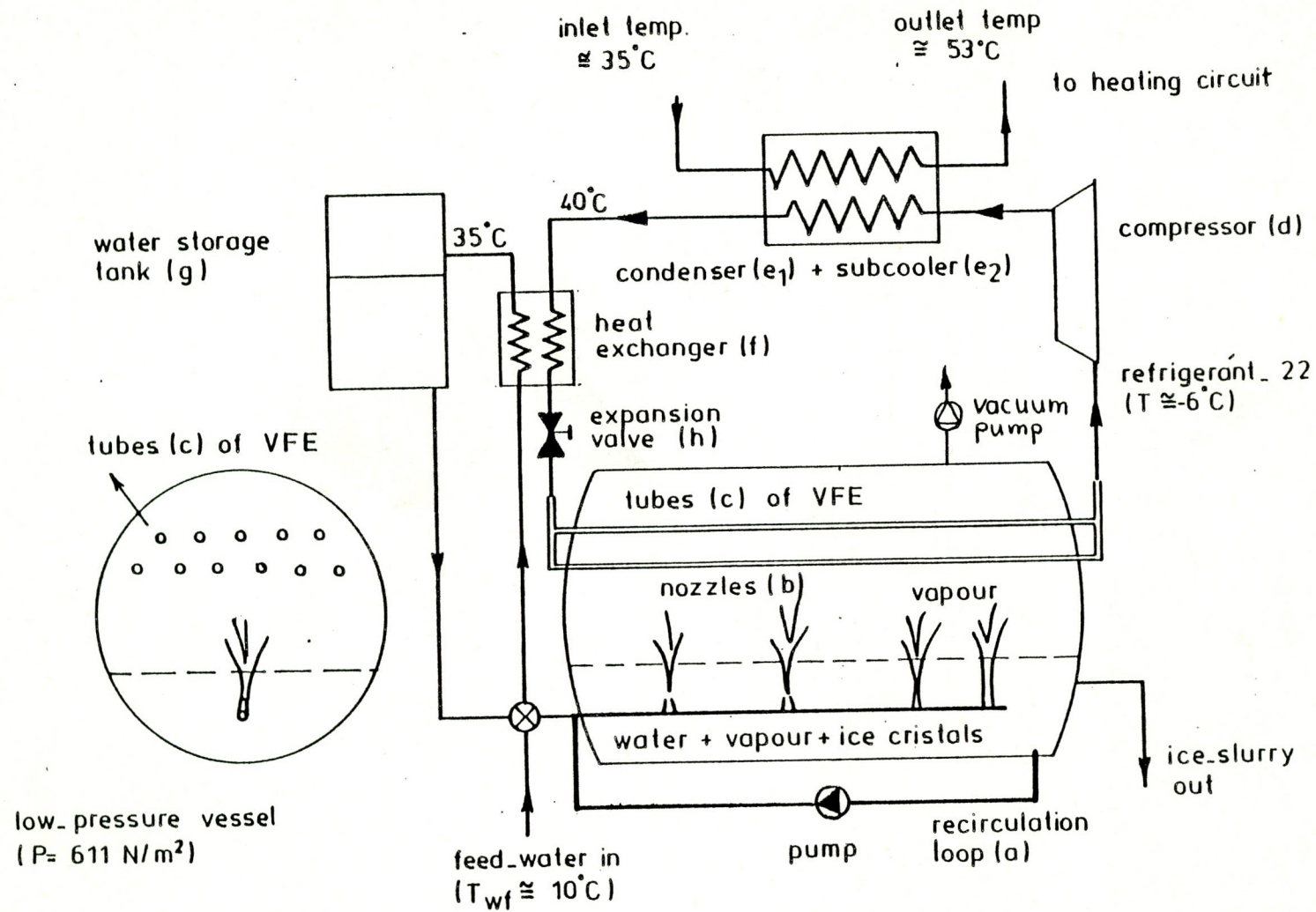


Fig. 2 Principe schema benutting bevroezingswarmte

in ijs. Daartoe worden in het bevroingsvat de verdamperpijpen van een warmtepomp aangebracht, waarop de waterdamp neerslaat en een ijslaag vormt (zie figuur 2). Het in de warmtewisselaarpijpen verdampende koudemiddel neemt dan een warmtehoeveelheid op, die gelijk is aan de som van de condensatie - en stollingswarmte van de waterdamp. Wegens de vorming van ijs op de verdamper is het proces niet continu; wanneer de ijslaag een zodanige dikte heeft bereikt dat de warmtedoorgang teveel wordt belemmerd, dient het ijs door smelten te worden verwijderd. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren door de ijsslurrie uit het bevroingsvat te verwijderen en water van 25 à 35°C toe te voeren. Hierdoor stijgt de dampdruk in het vat en smelt het ijs door de hierop condenserende waterdamp. Dit proces is uitgebreid beschreven in [4]; de technische haalbaarheid zal in een beproevingsopstelling onderzocht moeten worden. Het VFVC proces voor ontzilting van zout water is uitgebreid beproefd in een aantal pilot plants. Uit [2], [6] en [7] blijkt dat de complexiteit van het ontziltingsproces (bijvoorbeeld de onbekendheid met ijskristallisatie, het transport van ijsslurries, het wassen van de ijskristallen, hoge rendementseisen aan compressor, enz.) er de oorzaak van is, dat tot nu toe ([6] in 1980) geen grote commerciële ontziltingsinstallaties werkend volgens het VFVC proces zijn gebouwd.

3.2 Het proces met secundair vriesmiddel

3.2.1 Beschrijving

Bij dit proces wordt de bevroingswarmte aan het water onttrokken door het verdampen van in het water gesproeide druppeltjes met mengbaar koudemiddel. Evenals het VFVC proces wordt dit proces toegepast voor het onziltten van zeewater, het is in de literatuur bekend als het SRF (Secondary Refrigerant Freezing) proces; zie figuur 3 en ref. [1, 2, 5, 6]. Bij het SRF proces wordt in het algemeen gebruik gemaakt van butaan als koudemiddel. Evenals bij het VFVC proces wordt de ijsslurrie naar een wastoren gevoerd, waar het ijs wordt schoongewassen. Vervolgens wordt het gesmolten

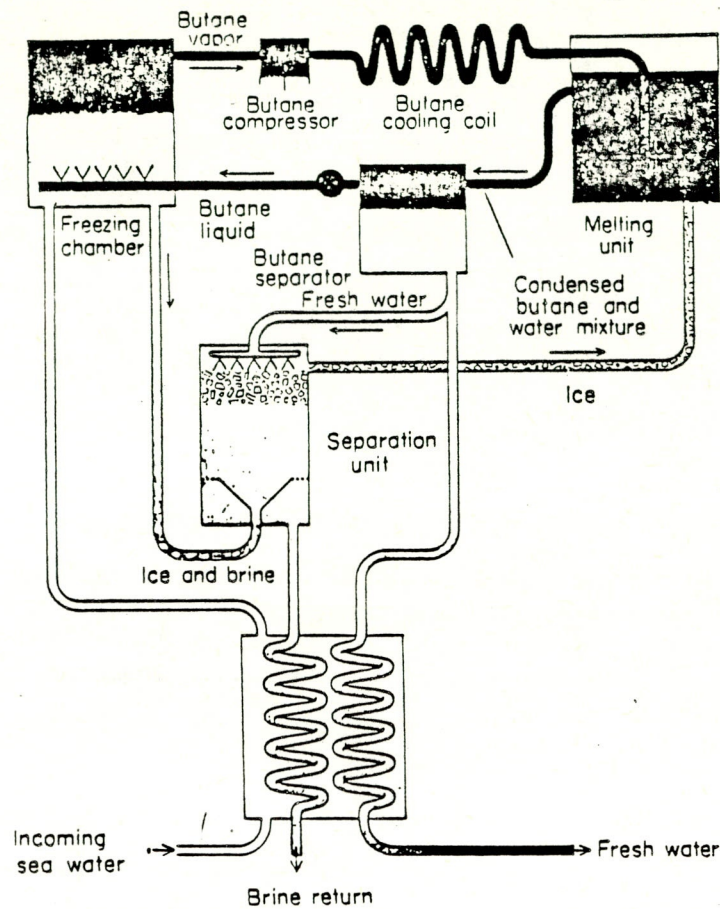


Fig. 3 Butaan methode (uit [1])

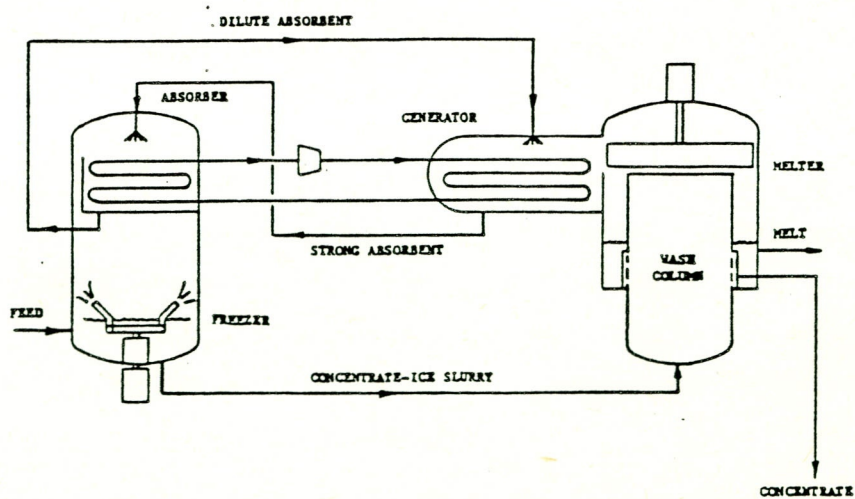


Fig.4 Principe schema absorptie vriesdampcompressie systeem (uit [1])

door de condensatiewarmte van de gecomprimeerde butaan. De vloeibare butaan wordt vervolgens van het water afgescheiden in een decanter en teruggevoerd naar het bevriezingsvat. Hoewel butaan nagenoeg onoplosbaar is in water zal deze afscheiding niet volledig genoeg zijn om het water drinkbaar te doen zijn en mogelijk explosiegevaar te voorkomen. In [6] wordt dan ook een ander scheidingsproces voorgesteld, dit bestaat uit vacuum flashing om de butaan terug te winnen, gevolgd door zg. "air stripping", waarmee de concentratie butaan kan worden verminderd tot beneden 1 ppm. Naast de noodzaak tot het afscheiden en terugwinnen van de butaan bestaat nog een ander probleem bij dit ontziltingsproces, zie [5], namelijk de mogelijke vorming van butaanhydraten die als een emulsie in de ijsslurrie voorkomen en daaruit zeer moeilijk zijn te verwijderen. Bovendien leidt dit tot verlies van butaan. Als nadeel wordt voorts nog genoemd de noodzaak tot gebruik van dampcompressoren met een grote capaciteit, nodig om grote volumes butaandamp met een geringe drukverhoging te comprimeren. Deze problemen zijn er waarschijnlijk de oorzaak van, afgezien van opschalingsproblemen, dat er tot nu toe geen ontziltingsinstallaties gebaseerd op een dergelijk principe op commerciële schaal zijn gebouwd (zie [6] en [7]).

3.2.2 Toepasbaarheid

De toepassing van het SRF proces voor warmtelevering aan warmtepompinstallaties vereist waarschijnlijk het gebruik van een ander koudemiddel dan butaan, bijvoorbeeld freon, om de grootte van de warmtepompcompressor binnen aanvaardbare grenzen te houden. Uiteraard blijft de noodzaak tot afscheiding van het koudemiddel van water bestaan, vooral wegens milieu-hygiënische redenen. Onbekend is of de vorming van hydraten zal afnemen, dan wel een nog groter probleem zal worden. Aangezien het SRF proces wegens de genoemde redenen nog niet op commerciële schaal voor zeewaterontziltiging is toegepast, is de toepasbaarheid voor warmtelevering aan warmtepompinstallaties waarschijnlijk gering.

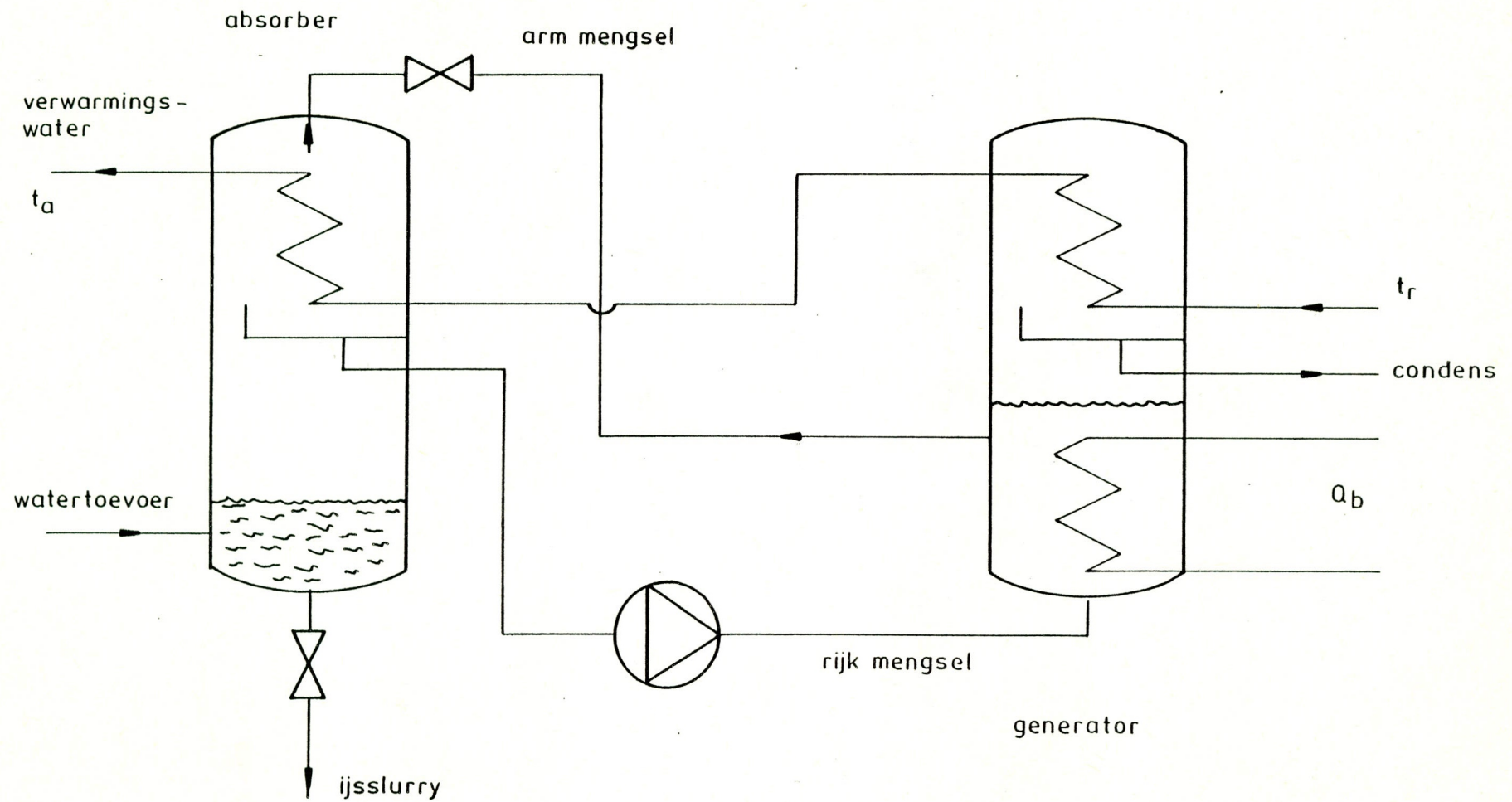


Fig. 5 Principe schema warmtepomp met absorptievriesproces

3.3 Het absorptie vriesproces

3.3.1 Beschrijving

In [1] en [7] wordt een proces beschreven voor ontzilting van zee-water, dat een variant is op het vacuum vriesproces (VFVC proces). Bij dit proces wordt de waterdamp uit de vriesruimte niet afgezogen door een compressor, maar geabsorbeerd door een geschikte absorbens, in dit geval NaCl. Dit proces wordt dan ook AFVC (Absorption Freezing Vapor Compression) proces genoemd, een schema hiervan is gegeven in figuur 4. Het verrijkte absorbens wordt naar een generator gepompt, die in verbinding staat met de gecombineerde wastoren/smeltvat. Regeneratie van de absorber vindt plaats met behulp van de absorptiewarmte uit de vriesruimte, die door een compressiewarmtepomp op het juiste niveau is gebracht. Als voordelen boven beide eerder genoemde processen wordt genoemd de afwezigheid van grote compressoren en van problemen, die optreden wanneer koudemiddel is vermengd met het produktwater.

3.3.2 Toepasbaarheid

De toepassing van dit proces voor warmtelevering aan warmtepompen lijkt o.a. mogelijk te zijn bij toepassing van een absorptiewarmtepomp volgens het schema van figuur 5. De wastoren met smeltvat is hier vervangen door de generator, waarin het rijke mengsel wordt verarmd door de toevoer van verbrandingswarmte. Bruikbare warmte wordt opgenomen door een warmtewisselaar in het generatorvat, waarop de uitgedreven waterdamp condenseert en door een warmtewisselaar in het bevroeringsvat die de absorptiewarmte hieruit onttrekt. Als stofpaar voor deze absorptiecyclus zou misschien water/lithiumbromide in aanmerking kunnen komen. Daar de temperatuur in het vriesvat ongeveer 0°C is met een bijbehorende dampdruk van ongeveer 5 mbar, blijkt uit het dampdrukdiagram voor waterige LiBr-oplossingen (zie figuur 6), dat de temperatuur waarbij de absorptiewarmte vrij komt tamelijk laag is, namelijk 30 à 40°C voor een oplossing met 40% water. Dit beperkt de toepasbaarheid van een dergelijk proces tot verwarmingssystemen met lage aanvoertemperatuur (bijv. vloerverwarming). Een dergelijke absorptiecyclus

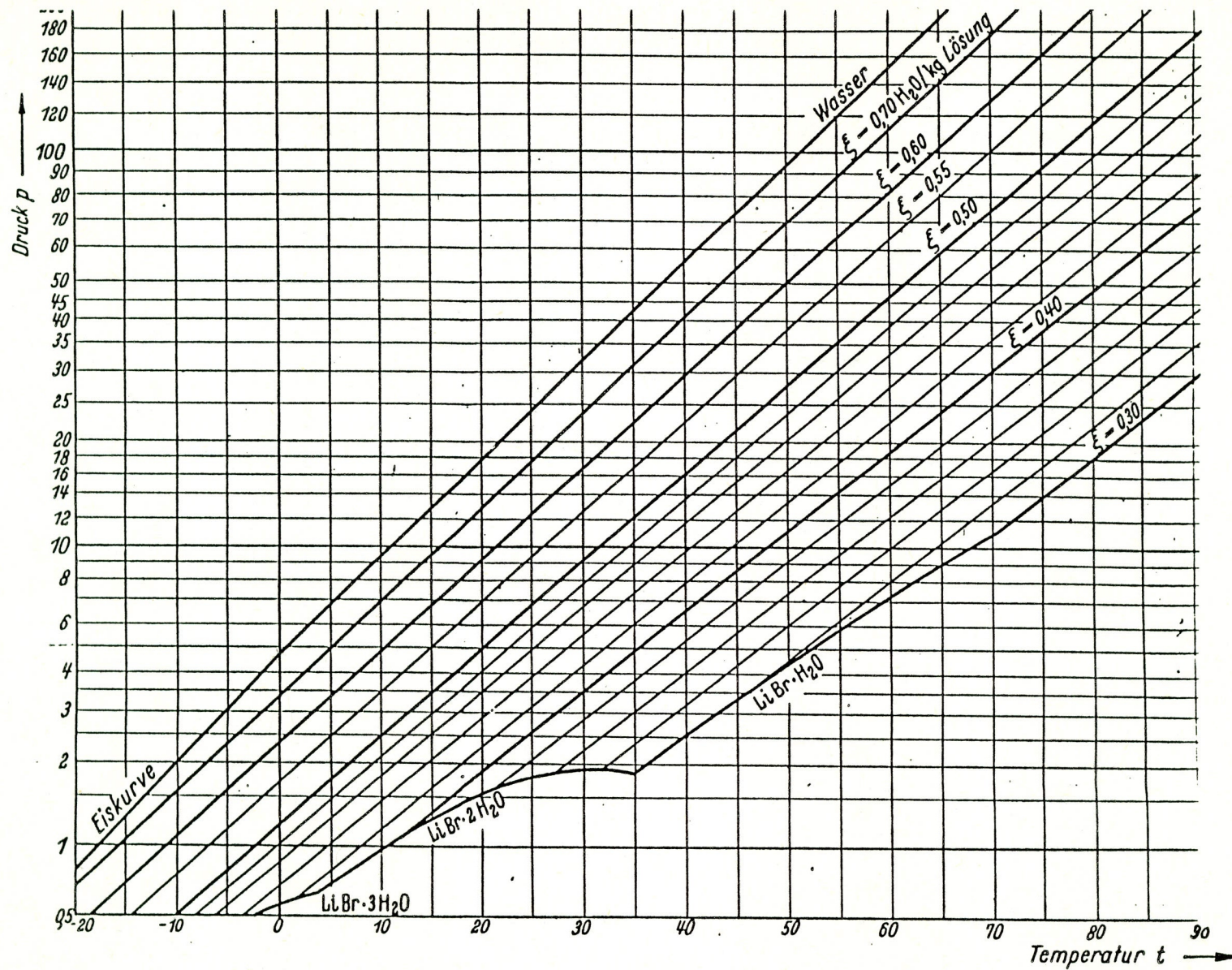


Fig.6 Gedeelte van het dampdruk diagram voor het stofpaar $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$

wordt ook voorgesteld in [8], waarbij gebruik wordt gemaakt van aparte apparaten voor bevriezen, absorberen, regenereren en condenseren, in plaats van twee gecombineerde apparaten. Het absorberen van deze cyclus is een mengsel van natrium- en kaliumloog. Het stofpaar water/loog heeft een iets gunstiger temperatuurtraject waarbij de absorptiewarmte vrij komt dan $H_2O/LiBr.$, namelijk 40 à 50°C. De technische haalbaarheid van het absorptieproces is dus in zekere mate afhankelijk van de beschikbaarheid van een goed stofpaar. De verwachte warmteverhouding van een dergelijke cyclus zal ongeveer gelijk zijn aan die van een normale absorptiecyclus en ongeveer 1,5 bedragen. Deze warmteverhouding is wat lager dan die welke bereikbaar is met gecombineerde warmte-kracht/warmtepomp-systemen, hetgeen echter geen afbreuk doet aan de toepasbaarheid van het absorptieproces voor de benutting van bevroeringswarmte. De technische realisatie van dit absorptieproces zou nog kunnen worden bemoeilijkt door corrosieproblemen, die worden veroorzaakt door het directe contact van in het water opgeloste gassen met de absorbens.

3.4 Proces met vorming van plaatijs

3.4.1 Beschrijving

In opdracht van het Department of Energy (DOE) in de Verenigde Staten heeft Argonne National Laboratory een onderzoeks- en ontwikkelingsproject uitgevoerd met betrekking tot de mogelijke energiebesparing bij het voorzien in de warmte- en koelbehoefte van huizen en gebouwen met behulp van warmtepompsystemen. Bij dit zogenaamde HP-ICES project (Heat Pump Centered Integrated Community Energy Systems) werden uit 25 voorstellen zeven systemen geselecteerd voor nader onderzoek (zie [9], [10] en [11]). Eén van deze systemen is een ontwerp van Honeywell Energy Resources Center (zie [10], [11] en [12]), waarbij warmtepompen worden toegepast, die onder meer gebruik maken van de bevroeringswarmte van water door het maken van (stukken) ijs. Figuur 7 geeft een schema van een dergelijk systeem, dat geschikt is voor verwarming, koeling en warmtapwatervoorziening van een individuele woning, aangesloten op een collectieve

water/ijs distributieleiding. Naast het gebruik van de bevroeringswarmte van water kan ook gebruik worden gemaakt van warmte uit een luchtkoelende verdamper. Om in alle opties te voorzien kent het systeem acht bedrijfstoestanden. De beschrijving hiervan zal beperkt worden tot de toestand waarbij latente warmte wordt onttrokken aan het water en ijs wordt gevormd. Aangezien het gevormde ijs regelmatig verwijderd moet worden is het vriesproces in principe niet continu, maar een continue warmtepompwerking wordt bereikt door de platen, waarop het ijs wordt gevormd, meervoudig uit te voeren (figuur 7 toont vier "ice plates"). Deze platen zijn hol en worden gekoeld door verdampend koudemiddel. Met behulp van de pomp (PIM in figuur 7) in het water/ijs reservoir wordt water opgepompt dat langs de buitenzijde van de platen afstroomt, waarbij het gedeeltelijk bevriest totdat een ijslaag van ongeveer 6 mm dik is verkregen. Het vormen van deze laag duurt ongeveer 5 minuten, vervolgens wordt het ijs verwijderd door het afsluiten van de watertoevoer en het wijzigen van de freon kringloop. Hierbij stroomt warm koudemiddel door de plaat, waardoor het ijs loslaat en als stukken in het reservoir valt. Met behulp van een logisch schakelsysteem worden de kleppen VH 1 t/m VH 4 en VW 1 t/m VW 4 zodanig bediend, dat steeds één plaat zich in de zogenaamde "hervesting mode" bevindt ("oogsten" van het ijs), en op de drie overige platen ijs wordt gemaakt. Op gezette tijden wordt de ijsslurrie uit het reservoir in de gemeenschappelijke distributieleiding gepompt, waaruit ook het benodigde water kan worden onttrokken. Het ijs kan zonodig worden opgeslagen voor koeling in perioden met hogere buitentemperaturen. Doordat veel verschillende gebruikers waaronder utiliteitsgebouwen op deze gemeenschappelijke leiding zijn aangesloten, neemt men aan dat een zeker evenwicht zal ontstaan tussen de leverantie en het gebruik van ijs. Sommige gebruikers zullen immers in perioden met lagere buitentemperaturen toch koeling nodig hebben door interne warmteontwikkeling door aanwezigheid van apparatuur en mensen. Dergelijke perioden zullen voornamelijk in het voor- en naseizoen optreden.

Een ander systeem, dat in het kader van het HP-ICES project is onderzocht, is ontworpen door Dubin-Bloome Associates (zie [19] en [11]). Het maakt eveneens gebruik van warmtepompen die ijs

maken op de hierboven aangegeven wijze. Deze warmtepompen zijn echter centraal opgesteld, het ijs wordt niet afgevoerd maar opgeslagen ten behoeve van koeling in de zomer (seizoenopslag). Door middel van een vierpijps geïsoleerd leidingsysteem wordt zowel warm als koud water geleverd ten behoeve van verwarming en koeling. Volgens Dubin-Bloome zou seizoenopslag van het ijs economisch onrendabel zijn. Bij de door hen uitgevoerde berekeningen is echter uitgegaan van een bovengronds reservoir met een betonnen afdekking. Verwacht mag worden dat de kosten van ijsopslag aanzienlijk kunnen worden verminderd door een goedkopere uitvoering van het reservoir, dit is nader uitgewerkt in § 5.4. Met het gereedkomen van de rapportage over de systeemontwikkelingsstudies is het HP-ICES project beëindigd, er zijn ten gevolge van beperking van de budgetten geen verdere activiteiten gepland, hoewel het oorspronkelijk de bedoeling was voor ieder van de verschillende systemen een demonstratieproject uit te voeren.

3.4.2 Toepasbaarheid

Het bovenbeschreven proces is het enige van de vier in § 2.1 t/m 2.4 genoemde processen, dat direct toepasbaar lijkt voor warmtelevering aan warmtepompsystemen. Daar voor beide systemen (Honeywell en Dubin-Bloome) alle componenten commercieel verkrijgbaar zijn, worden in [10] en [11] als punten van onderzoek alleen zaken genoemd, die betrekking hebben op het geïntegreerde systeem, zoals:

- onderzoek naar het verzamelen van het ijs ("harvesting process");
- onderzoek van de problemen die kunnen optreden bij het verpompen van een ijsslurrie door een pijpnet (verstoppingen en dergelijke).

Deze punten van onderzoek zijn niet onbelangrijk, aangezien de met deze methode geproduceerde ijsslurrie veel grotere stukken ijs bevat, dan met de andere vriesprocessen wordt verkregen.

4. VERGELIJKING BEVRIEZINGSPROCESSEN

Van de vier in beschouwing genomen systemen blijkt uit de in het voorgaande deel onder "Toepasbaarheid" reeds genoemde argumenten dat het proces met secundair vriesmiddel, en het absorptie vriesproces minder aantrekkelijk zijn als principe voor onttrekking van bevroezingswarmte ten behoeve van een warmtepomp.

Bij plaatijsmachines kan gebruik worden gemaakt van de bekende techniek van de in de handel zijnde (kleinere) ijsmachines [13], daar dient echter wel een maalmechanisme aan gekoppeld te worden om een te verpompen ijs/water-slurrie te verkrijgen. Dit betekent dus een uitbreiding met een mechanisch werkend en dus aan slijtage onderhevig deel dat tevens de kostprijs van de installatie verhoogt. De vacuumvriesverdamer lijkt gezien de beproevingsresultaten met betrekking tot waterontzilttingsinstallaties een technisch haalbare optie. Bij waterontzilttingsinstallaties vormen vooral de noodzakelijke compressor (eisen: zeer grote capaciteit, hoog rendement) en het wasproces problemen. In het geval dat de compressor is vervangen door de verdamperspiraal en het wassen/smelten niet hoeft plaats te vinden zijn deze problemen geëlimineerd. Potentieel is het dan vooral voor grootschalige toepassingen een relatief eenvoudige installatie om bevroezingswarmte aan water te onttrekken terwijl ook combinatie met waterzuivering mogelijk is zodat nader onderzoek gerechtvaardigd is.

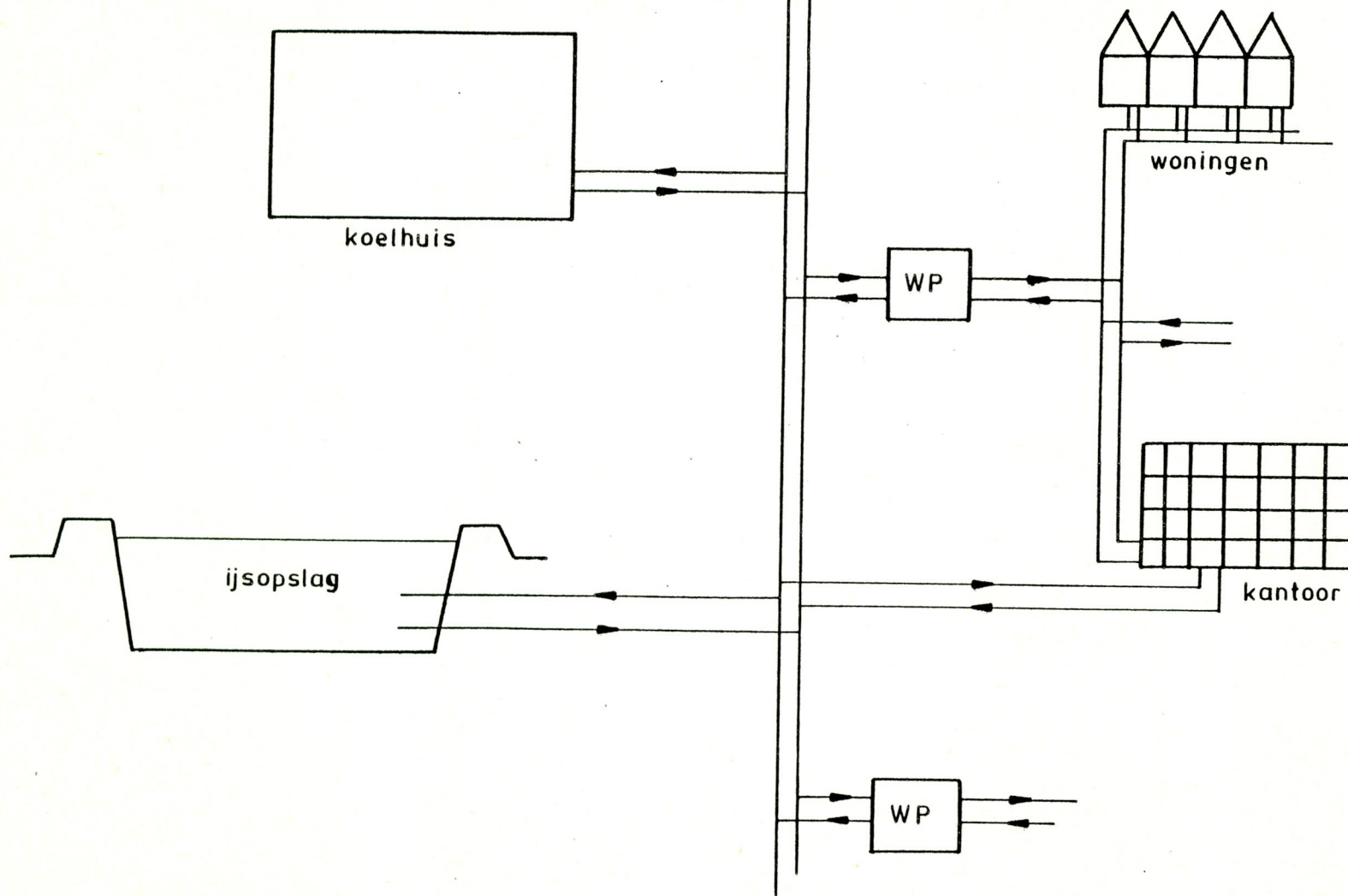


Fig. 8 Verwarmings/koelsysteem met bevroeringswarmtepompen

5. BEVRIEZINGSWARMTEPOMP

5.1 Systeembeschrijving

Hoofdonderdelen van het systeem zijn één of meer gasmotor- of gas-turbinegedreven grote warmtepompen met verdamper die bevroeringswarmte onttrekken aan een waterstroom. Het watercircuit kan in principe open of gesloten zijn.

In geval van een open systeem wordt de gevormde ijs/water slurrie geloosd. Het enige voordeel van dit systeem, vergeleken met onttrekking van voelbare warmte is dat in geval van benutting van bevroeringswarmte de waterhoeveelheid tot ongeveer 1/4 wordt gereduceerd, terwijl ook water van 0°C nog bruikbaar is. Daar staat een probleem tegenover met betrekking tot de lozing. Vanwege het uitgangspunt (beperkte beschikbaarheid van water) is lozing op een groot open water niet mogelijk en lozing op een riool is niet wenselijk vanwege de daarbij optredende temperatuurverlaging van het rioolwater.

In een gesloten systeem wordt het water onttrokken aan en de ijs/water slurrie teruggepompt naar een opslagfaciliteit die bestaat uit een groot (kunstmatig) vat of bassin. Er zijn twee opties die dit systeem extra aantrekkelijk kunnen maken nl. benutting van de geproduceerde koude en gebruik van het via een wasproces te verkrijgen gedemineraliseerde water.

In het vervolg van dit hoofdstuk wordt verder ingegaan op het gesloten systeem.

5.2 Energieverbruik van de warmtepomp

Voor berekening van het rendement van de warmtepompcyclus kan worden uitgegaan van een freonzijdige verdampertemperatuur van -6°C. De condensortemperatuur wordt gesteld op 45°C zonder tapwatervoorziening en 55°C met tapwatervoorziening. In het geval $T_c = 45^\circ\text{C}$ (watertemperatuur $\pm 42^\circ\text{C}$) levert dit een rendement volgens Carnot van $\frac{318}{51} = 6,23$.

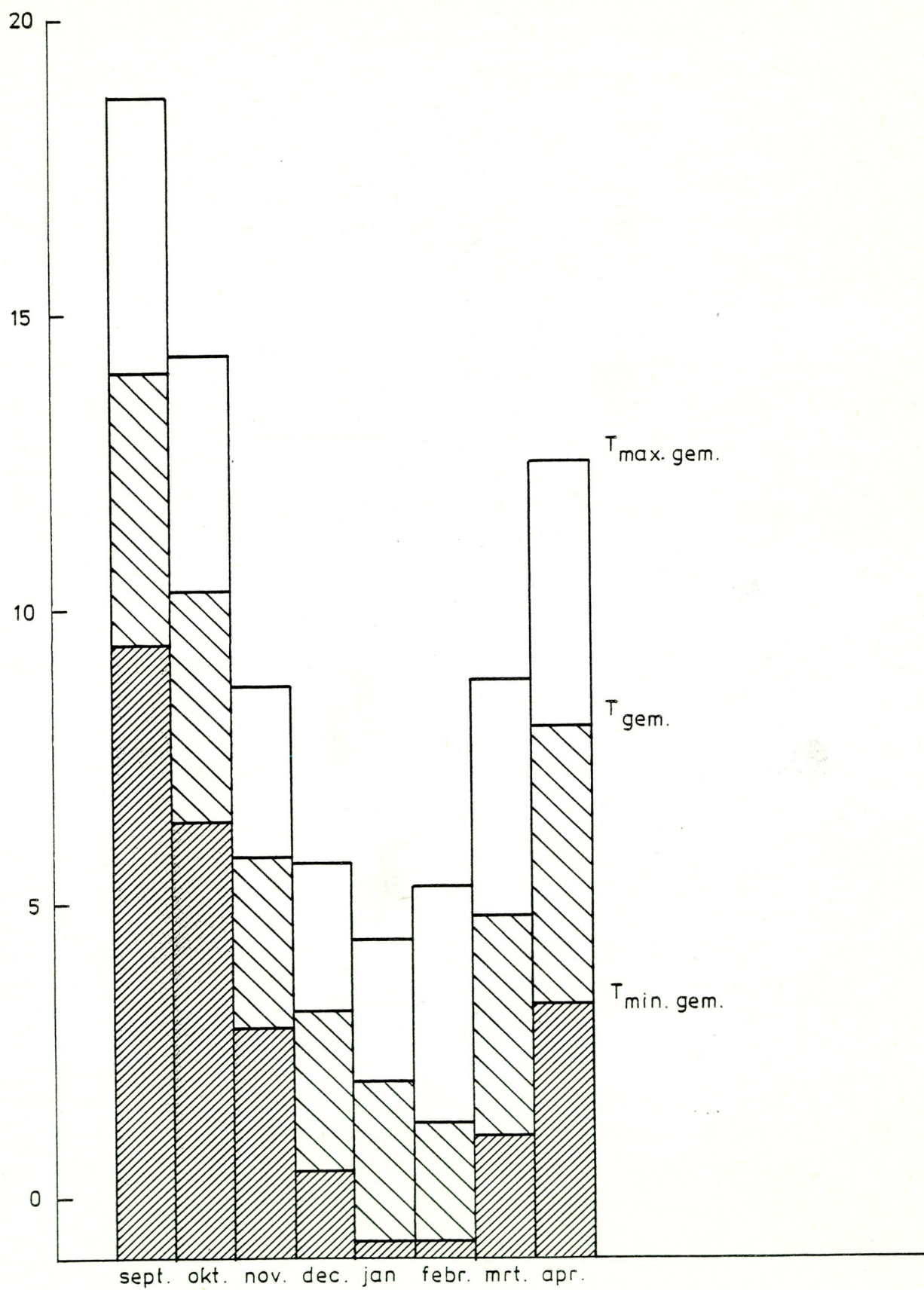


Fig. 9 Gemiddelde temperatuur gedurende stookseizoen
(KNMI gegevens, De Bilt 1951-1980)

Met een rendementsfactor van 0,65, maar zonder rekening te houden met de mogelijkheid van nakoeling levert dit een specifieke warmte-opbrengst $\varepsilon = 4,05$.

Met een gasmotorasrendement van 0,3 levert de warmtepomp bij een brandstoftoevoer van 100% dus 121% warmte.

De restwarmte van de gasmotor bedraagt gemiddeld 55%, hiermee wordt voor de totale installatie $\varepsilon = 1,76$.

Uitgaande van een systeem met tapwatervoorziening (en met nakoeling van de freon) wordt voor de warmtepomp $\varepsilon = 3,5$ en voor de installatie $\varepsilon = 1,6$.

In deze berekeningen is uitgegaan van momenteel haalbare waarden voor de componentrendementen, toekomstige ontwikkelingen bijvoorbeeld verbetering van het asrendement van de motor kunnen het totaal rendement nog verbeteren.

Uiteraard moet het verwarmingssysteem in de woning aan de lage wateraanvoertemperatuur aangepast zijn. Indien de motor zijn warmte afstaat aan het verwarmingscircuit na de warmtepomp wordt de aanvoertemperatuur (bij $\varepsilon = 1,75$) zonder pieklastketel maximaal $42 + \frac{55}{176} \Delta t = 42 + 6 = 48^\circ\text{C}$.

Ter vergelijking kan gekeken worden naar het energieverbruik van een warmtepomp waarvan de verdamper zijn warmte onttrekt aan de buitenlucht.

In het stookseizoen (november t/m maart) is de gemiddelde buitenluchttemperatuur tussen 8 en 20 uur ongeveer 4°C . Dit resulteert in een verdampertemperatuur van b.v. -1°C . Met $T_c = 45^\circ\text{C}$ wordt dan het rendement volgens Carnot 6,91 en voor de installatie $\varepsilon = 1,89$ dus 7,8% hoger dan met de bevroeringswarmteverdamer. Op deze verhouding moet nog een correctie worden toegepast in verband met het noodzakelijke ontdooien van beide verdampers. Voor luchtverdampers wordt het daarmee gepaard gaande verlies geschat op 3 - 5% [14], voor de stollingswarmteverdamer zal het ongeveer 1% bedragen. Aannemende dat de vereiste energie voor hulpapparatuur (pompen, ventilatoren) in beide gevallen gelijk is, resulteert hieruit een netto rendementsvoordeel onder Nederlandse omstandigheden van ongeveer 4% voor de luchtverdamer.

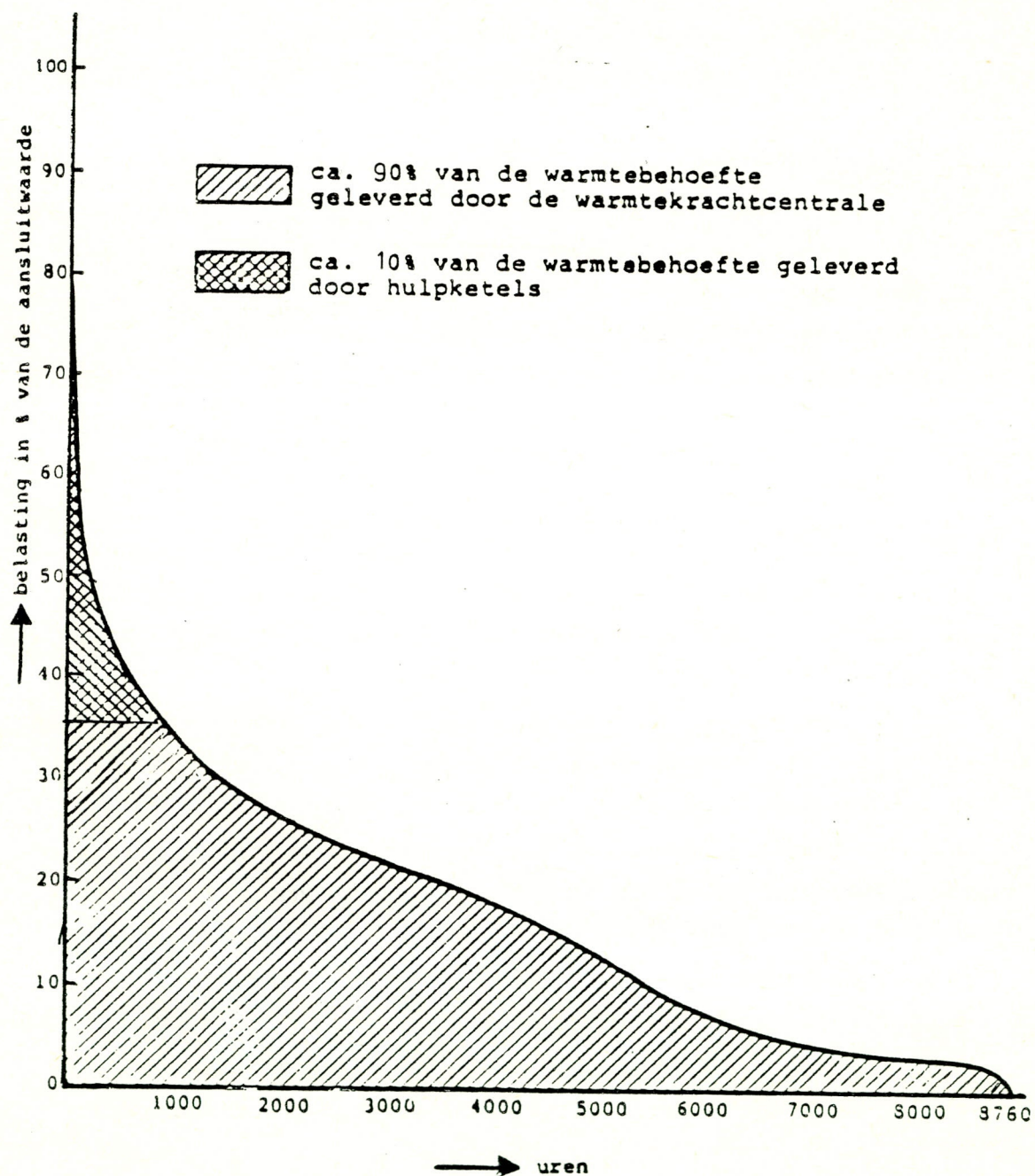


Fig. 10 Jaarbelastingduurkromme voor de warmtebehoefte

5.3 Capaciteit

Voor de bepaling van de capaciteit van de verschillende delen van het systeem is als uitgangspunt gekozen dat de gemiddelde warmtebehoefte per woning 49,2 GJ/jaar voor verwarming plus 7,5 GJ/jaar voor warm tapwater is, totaal dus 56,7 GJ/jaar. Dit is overeenkomstig isolatieklasse 2 voor een eengezinswoning volgens het CORV-rapport [15]. Afhankelijk van de wijze van bedrijfsvoering van de warmtepomp (mono-valent of parallel-bivalent) en de aan te nemen wijk grootte volgt hieruit de vereiste grootte van het opslagsysteem voor het ijs/water mengsel.

Op grond van hetzelfde rapport wordt het opgestelde vermogen voor verwarming gesteld op 9,1 kW per woning. Inclusief het vermogen voor warmwatervoorziening komt het totaalvermogen per woning op ongeveer 10 kW.

Uit een optimalisatiestudie voor een concreet project zal moeten volgen welk maximaal vermogen de warmtepompinstallatie moet kunnen leveren als gekozen wordt voor parallel-bivalent bedrijf. Beperking van de door de warmtepomp te leveren basislast tot 35% met een pieklastketelvermogen van 65% resulteert onder Nederlandse omstandigheden in levering van ongeveer 90% van de totale warmtebehoefte door de warmtepomp. Het vereiste vermogen van de warmtepomp bedraagt dus 3,5 kW per woning. In een gasmotorwarmtepompsysteem zoals hiervoor beschreven, met $\varepsilon = 1,76$ wordt 51,7% van de warmte via de verdamper onttrokken aan de warmtebron. Voor een warmtevraag van $0,9 \times 56,7 = 51$ GJ/jaar betekent dit dus dat de warmtebron ongeveer 26,5 GJ/jaar levert. Aan het water uit het reservoir kan bij een begintemperatuur van 10°C door bevriezing 380 kJ/kg warmte onttrokken worden. Per woning wordt dus per jaar 69 ton ijs geproduceerd om 26,5 GJ/jaar warmte aan de verdamper van de warmtepomp te leveren. Als vanwege de koudebehoefte zoveel mogelijk ijs opgeslagen moet worden moet het opslagvolume een capaciteit hebben van $69 \times f_s \times f_{kd}$ ton, waarin f_s een correctiefactor is voor het afsmelten van het ijs in het reservoir en in de leidingen en f_{kd} een correctiefactor voor gelijktijdige warmte en koudebenutting.

Op grond van de berekening zoals aangegeven in de Honeywell studie [12] bedraagt het koudeverlies via de bodem en de zijwanden van een reservoir van 200.000 m^3 (oppervlak 20.000 m^2) $20.000 \times 4,1 \times \Delta T$ kJ/uur. Bij een veronderstelde ΔT van 5°C komt dit neer op 3.500 GJ/jaar , f_s ligt dus in de ordegrrootte van $0,85$. Door de gelijktijdigheid van warmte en koudevraag in het voor- en naseizoen wordt in die periode geen ijs opgeslagen, verondersteld wordt dat f_{kd} in de ordegrrootte van $0,8$ ligt. In het reservoir zal het ijs naar boven drijven, het water naar de verdamper moet onder uit het reservoir aangezogen worden. De soortelijke massa van ontwaterde, niet aan elkaar gegroeide ijskristallen is ongeveer de helft van die van ijs dat is $0,5 \times 0,93 = 0,47$. Het maximaal benodigde ijsopslagvolume per woning is dus:

$$\frac{69 \times 0,85 \times 0,8}{0,47} = 100 \text{ m}^3.$$

Als uitgangspunt voor verdere berekeningen wordt de reservoirinhoud bij maximale koudebenutting gesteld op 100 m^3 per woning.

5.4 Opslagsysteem, uitvoering en kosten

Gezien de vereiste capaciteit van het opslagsysteem is het duidelijk dat de kosten van dit systeem van grote invloed zijn op de kosten van het totale verwarmingssysteem.

Voor de constructie zijn uit de literatuur een aantal oplossingen bekend, de meeste in het kader van opslag van warmte in stadsverwarmingssystemen [16, 17, 18]. In dat verband wordt in de eerste plaats een onderscheid gemaakt tussen opslag onder druk of onder atmosferische condities, de laatste kunnen dan weer onderscheiden worden in stalen of betonnen constructies ("vaten"), gegraven bassins en allerlei tussenvormen.

Voor ijsopslag liggen de ontwerpcriteria wat anders dan voor warmteopslag:

- Gezien het feit dat het gaat om seizoenopslag is het vereiste volume relatief groot.
- Het gemiddeld temperatuurverschil tussen het ijswatermengsel (0°C) en de omgeving (gemiddeld 15°C) is lager.
- Het systeem is altijd drukloos.

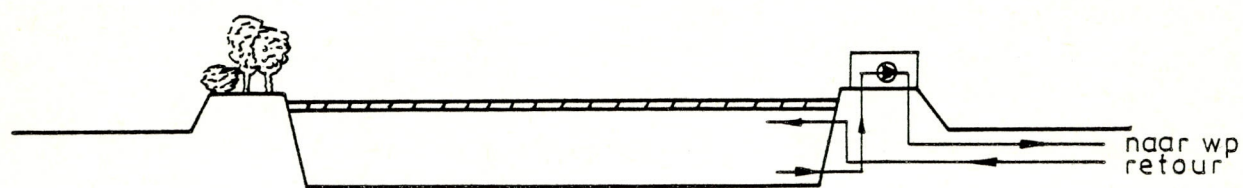


Fig.11 IJsopslagreservoir met oppervlakteisolatie

Gezien deze punten komt alleen een gegraven bassin in aanmerking dat gezien zijn oppervlak buiten de bebouwde omgeving gesitueerd zal moeten worden. Voor het water/ijs transport naar en van de warmtepomp(en) zal een leidingsysteem met pompen aangelegd moeten worden.

De kosten van het te graven bassin zijn afhankelijk van de schaal-grootte. Boven een volume van ongeveer 75.000 m^3 zijn de kosten per m^3 ongeveer constant. Onder gunstige omstandigheden (zandgrond) belopen de aanlegkosten van het bassin ongeveer f 10,--/ m^3 . Uitgangspunten zijn dan dat geen grond afgevoerd (en verkocht) wordt maar dat het uitgegraven zand benut wordt om een "dijk" rond het bassin te leggen en dat de bodem van het bassin afgedekt wordt met folie met daarover weer een laag zand. De waterspiegel ligt dus hoger dan de omgeving. Indien de omstandigheden minder gunstig zijn (veengrond) kunnen de kosten oplopen tot maximaal f 15,--/ m^3 .

De kosten voor bijkomende voorzieningen zoals elektriciteitsaansluiting (voor pompen), een hek rond het bassin, een pompgebouw worden geschat op f 100.000,--.

Voor aankoop van de grond bedragen de kosten (in buitengebied) ongeveer f 6,--/ m^2 . Voor een systeem van 200.000 m^3 (grondoppervlak $\pm 40.000 \text{ m}^2$) is dat dus f 240.000,--.

Kosten voor isolatie van het wateroppervlak (b.v. met drijvende kunststofschuimplaten, onderling verbonden) worden geschat op f 50,--/ m^2 , bij een waterdiepte van 10 m wordt dit dus f 5,--/ m^3 . Daarmee komen de kosten voor dit geïsoleerde bassin, met een capaciteit voor 2.000 woningen dus afhankelijk van de omstandigheden op $3,34$ tot $4,34 \cdot 10^6$ Hfl., d.w.z. f 1.670,-- tot f 2.170,-- per woning.

Het leidingsysteem naar en van de warmtepompen kan bestaan uit on-geïsoleerde leidingen. Indien de warmtepompen op maximale capaciteit draaien wordt per woning $0,51 \times 3,5 = 1,8 \text{ kW}$ bevroeiingswarmte gebruikt, daarvoor wordt $0,0054 \text{ kg}$ ijs per seconde gevormd. Voor 2.000 woningen is dit dus $10,8 \text{ kg/s}$. Gezien de vereiste ijs/water verhouding moet dus ongeveer 25 kg/s water toegevoerd worden. Bij een leidingdiameter van 140 mm betekent dat een stroomsnelheid van $1,6 \text{ m/s}$.

Voor water van 0°C is de viscositeit $\nu = 1,75 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. De drukval over een leidinglengte van 2.000 m wordt hiermee ($R_e = 2 \cdot 10^5$, $\xi = 0,015$) 2,7 bar. Rekening houdend met extra drukverlies voor appendages, bochten etc. wordt de vereiste pompdruk 3,5 bar. Het hiervoor benodigde pompvermogen is 8,8 kW, met een pomprendement van 80% is het gevraagde elektrisch vermogen dus ongeveer 12 kW. In de retourleiding stroomt een mengsel van water en ijskristallen, afhankelijk van de grootte van deze kristallen zal de drukval over deze leiding wat groter zijn dan in de toevoerleiding. Het totaal vereiste elektrisch vermogen voor de pompen zal dus 30 kW of iets meer bedragen. De per jaar per woning gebruikte elektrische energie bedraagt dus bij continu draaiende pompen 130 kWh.

De stroomsnelheid in de leidingen zou om een wat lagere drukval te krijgen wat lager gekozen kunnen worden, evenwel is dan de kans op verstoppingen (vooral in de retourleiding) groter geworden. Bij lage snelheid zullen de ijskristallen nl. eerder gaan samengroeien en zich eventueel boven in de leiding verzamelen door het verschil in soortelijk gewicht met het water. Mocht in een later stadium blijken dat dit probleem zich helemaal niet voordoet, dan kan gekozen worden voor een lagere snelheid wat zal resulteren in lager energieverbruik van de pompen (wat al snel opweegt tegen de duurdere leiding).

De leiding kan vanwege de betrekkelijk lage druk en de lage temperatuur zeer goed uit kunststof bestaan. Een zeer geschikt materiaal is polyetheen (HPE) dat voldoende drukbestendig is en tevens het voordeel heeft dat het in grote lengtes (170 m) vanaf een haspel verwerkt kan worden zodat het aantal verbindingen betrekkelijk gering is. De leidingsegmenten kunnen door lassen verbonden worden. De totale aanlegkosten voor een dubbele leiding (160 x 141,8 mm, max. 6 bar) zullen ongeveer f 250,--/m bedragen (prijs leiding + f 30,--/m). De kosten voor het leidingsysteem van 2 x 2.000 m zullen inclusief de pompen ongeveer $0,5 \cdot 10^6$ Hfl. bedragen.

De kosten van bassin + leidingsysteem bedragen dus $3,9$ tot $4,8 \cdot 10^6$ Hfl. voor een systeem voor 2.000 woningen, dit is f 1.850,-- tot f 2.400,-- per woning voor een systeem met een geïsoleerde opslag en maximale koudebenutting.

Indien de koude helemaal niet benut kan worden kan de opslagcapaciteit naar schatting tot $1/4$ teruggebracht worden en komt tevens de isolatie te vervallen. De kosten komen dan, rekenend met een prijs van f 15,--/ m^3 op totaal $1,45 \cdot 10^6$ Hfl., dus per woning f 725,--.

6. KOUDEBENUTTING

De in het gedurende het winterseizoen in het ijs geaccumuleerde koude kan in de zomer benut worden voor koeldoeleinden. Eén mogelijkheid is benutting van de koude ten behoeve van airconditioning van gebouwen of koeling van opslagruimten de andere is dat ijs/water slurrie wordt benut voor het koelen van de condensor van een koel- of vrieshuis waarin een temperatuur heerst die beneden het vriespunt ligt. In beide gevallen wordt op elektriciteit voor een koel- of vriesinstallatie bespaard.

6.1 Airconditioning

Voor een airconditioning installatie met een koelmachine kan een gemiddelde koudefactor van 3,8 aangenomen worden [20]. De koude die aan het ijsopslagsysteem maximaal kan worden onttrokken is $26,5 \text{ GJ} \times f_s$ per woning = $21,2 \text{ GJ/woning}$. Voor het opwekken van deze koude met een koelmachine zou $21,2/3,8 = 5,6 \text{ GJ} = 1550 \text{ kWh}$ elektriciteit nodig zijn. Bij de koudegebruiker vervalt indien ijs benut kan worden de investering voor de koelmachine, er is alleen een warmtewisselaar nodig en uiteraard een aansluiting op het distributienet.

6.2 Vrieshuis

In een koelinstallatie van een vrieshuis zijn de condities gemiddeld als volgt: verdampertemperatuur -25°C , de condensortemperatuur wordt vanwege regeltechnische aspecten steeds op ongeveer 40°C gehouden (door ventilatoren af of bij te schakelen). Het rendement van de installatie komt daarmee op $\frac{248}{65} = 3,8$ (Carnot), in de praktijk komt dit neer op een koudefactor van $3,8 \times 0,5 = 1,9$.

Indien gedurende het hele jaar ijs/water van 0°C beschikbaar is kan de condensortemperatuur teruggebracht worden tot bijvoorbeeld 8°C . Het rendement wordt in dat geval $\frac{248}{33} \times 0,5 = 3,8$. Het energieverbruik is hierdoor dus met 50% gedaald.

Het in de condensor af te voeren vermogen is $Q + W = Q + \frac{1}{3,8} \cdot Q = 1,26 Q$ (Q = koelvermogen, W = asvermogen compressor). De in het ijs geaccumuleerde koude is $21,2 \cdot \frac{335}{377} = 18,8$ GJ per woning, de mogelijke elektriciteitsbesparing is dus $0,5 \frac{18,8}{4,8} = 1,96$ GJ = 540 kWh.

Uit vergelijking van de besparingsmogelijkheden bij benutting van koudeopslag met ijs blijkt dus dat de besparingsmogelijkheden het grootst zijn indien deze koude direct kan worden benut b.v. voor airconditioning of koeling van opslagruimten.

7. COMBINATIE MET WATERZUIVERING

In de eerste hoofdstukken is al naar voren gekomen dat bij vorming van ijskristallen in water dat zouten bevat segregatie van het zuiver water en de opgeloste verontreinigingen optreedt. In beproevingsinstallaties die van dit principe gebruik maken voor waterontziltng worden de ijskristallen van de oplossing gescheiden in een was/smelt-toren.

Het lijkt mogelijk om het hiervoor beschreven opslagbassin voor de ijs/water slurrie voor hetzelfde doel te benutten. Aan het eind van het stookseizoen zal het reservoir vrijwel geheel gevuld zijn met ijskristallen waartussen zich het overgebleven water (het "brijn") bevindt. Om het ijs te scheiden van het brijn zal het reservoir gedraineerd moeten worden. Door tegelijkertijd de bovenste laag ijskristallen te laten smelten of door vanaf de bovenkant schoon water op het reservoir te sproeien kan het brijn onder uit het reservoir weggepompt worden. Hierbij gaat dus een deel van het afgesmolten ijs of schoon water verloren. Naar schatting zal daarna netto 80% van het oorspronkelijk aanwezige ijs overblijven [21]. Na smelten van dit ijs (eventueel met koudebenutting) ontstaat dus gedemineraliseerd water dat na behandeling (toevoeging van Mg en Ca voor bereiken van minimaal vereiste hardheid) bruikbaar is als drinkwater.

Indien daar gebruikers voor zijn kan het gedemineraliseerde water direct worden gebruikt (b.v. voor ketelvoedingwater). De transportleidingen moeten dan vanwege de lage pH van het water beslist in kunststof uitgevoerd zijn. Bij de gebruiker kan het water indien nodig voor de betreffende toepassing geconditioneerd worden.

Gezien het huidige prijsniveau van drinkwater voor de gebruiker dat in sommige streken al op f 2,35/m³ ligt kan aan het als bijprodukt van het bevroeringswarmtepompsysteem gewonnen drinkwater een waarde van ongeveer f 1,50 tot f 2,--/m³ toegekend worden. Bij een systeem met maximale opslag (50 m³ ijs/woning) betekent dat per woning extra baten van $0,8 \times 50 \times 2 = \text{f } 80,--/\text{jaar}$. Aannemende dat de prijsstijging 4% per jaar is (lage schatting) betekent dit

voor een projectduur van 25 jaar extra baten met een contante waarde van f 1.560,--.

Een factor waarmee rekening moet worden gehouden bij benutting van de mogelijkheid van waterzuivering tot drinkwater is dat waarborgen moeten worden geschapen dat het water nergens in contact kan komen met gevaarlijke stoffen (zoals sommige koelmiddelen). Dit zou kunnen inhouden dat directe warmteuitwisseling via enkelwandige componenten niet altijd mogelijk is.

8. ECONOMISCHE EVALUATIE

De verschillende varianten van het systeem met de bevezingswarmtepomp voor collectieve verwarming met seizoenopslag van het gevormde ijs zullen worden vergeleken met de kosten van individuele woningverwarming met aardgas gestookte Hoogrendement ketels. De varianten van het collectieve systeem onderscheiden zich van elkaar in de mate waarin de opgewekte koude wordt benut nl. maximaal, "minimaal" (gesteld op 1/4) of helemaal niet.

8.1 Uitgangspunten

In de berekeningen wordt uitgegaan van de volgende veronderstellingen:

- projectduur 25 jaar
- prijsstijging brandstof 4%/jaar
- prijsstijging elektriciteit 2%/jaar
- prijsstijging onderhoud 0%
- disconteringsvoet 4%
- aardgasprijs f 0,55/m³
- elektriciteitsstarief f 0,20/kWh.

In de investeringen is geen rekening gehouden met de kosten voor tapwatervoorziening die geacht worden in de verschillende gevallen gelijk te zijn. Indien componenten binnen 25 jaar vervangen moeten worden (b.v. ketel na 15 jaar) is daar rekening mee gehouden in de investering. In de toepassingen met het collectieve warmtepompsysteem zijn twee verschillende investeringsniveau's gehanteerd, nl. voor de huidige situatie en een toekomstige situatie waarin een aantal kosten vanwege te verwachten prijsdalingen lager zijn gekozen (b.v. distributieleidingen in huidige situatie in staal uitgevoerd, in toekomstige situatie in kunststof).

Voor het warmteverlies in het warmtedistributiesysteem is een post van 10% opgenomen in het basislast energieverbruik.

8.2 Hoogrendement ketel

Geen verschil tussen huidige en toekomstige situatie.

	Jaarlijkse kosten	Over periode van 25 jaar
<u>Investering</u>		
ketel	f 2.100,--	
voorzieningen (rookgas- afvoer, condensafvoer)	f 500,--	
vervanging na 15 jaar	<u>f 893,--</u>	
	f 3.493,--	f 3.493,--
<u>Onderhoud</u>		
6%	f 126,--	f 1.966,--
<u>Beheer</u>		
-		
<u>Brandstof</u>		
(rendement 90%)		
$\frac{56,7 \text{ GJ/jaar}}{0,9 \times 35,10 \cdot 10^{-3}} = 1.792 \text{ m}^3$	f 985,--	<u>f 24.644,--</u>
		f 30.103,--

8.3 Warmtepompsysteem

Warmtepompvermogen: 3,5 kW, pieklastketel 6,5 kW. In eerste instantie kijken we alleen naar het verwarmingsdeel. Voor de toekomstige situatie zijn de investeringen voor het warmtepompstation en de distributieleiding met 25% verminderd ten opzichte van de huidige situatie.

8.3.1 Warmtezijdige aspectenHuidige situatie

	Jaarlijkse kosten	Over periode van 25 jaar
<u>Investering</u>		
warmtepompstation 3,5 x f 900,--	f 3.150,--	
+ vervanging na 15 jaar	f 1.340,--	
distributieleiding	f 3.000,--	
huisinstallatie	<u>f 1.200,--</u>	
	f 8.690,--	f 8.690,--
<u>Onderhoud</u>		
warmtepompstation 4%	f 126,--	
distributiesysteem 2,5%	f 75,--	
huisinstallatie 4%	<u>f 48,--</u>	
	f 249,--	f 3.890,--
<u>Beheer</u>		
1% van investering	f 74,--	f 1.139,--
<u>Brandstof</u>		
warmtepomp $\frac{56,7 \times 0,9}{1,76 \times 0,9 \times 35,10 \cdot 10^{-3}} = 918 \text{ m}^3$		
pieklastketel $\frac{56,7 \times 0,1}{0,9 \times 35,10 \cdot 10^{-3}} = \frac{179 \text{ m}^3}{1096 \text{ m}^3}$	f 603,--	f 15.080,--
<u>Elektriciteit</u>		
(pompennergie) geschat 100 kWh	f 20,--	<u>f 392,--</u>
Totale kosten in 25 jaar		f 29.191,--

Toekomstige situatie

	Jaarlijkse kosten	Over periode van 25 jaar
<u>Investeringsen</u>		
warmtepompstation 3,5 x 700	f 2.450,--	
+ vervanging na 15 jaar	f 1.040,--	
distributiesysteem	f 2.250,--	
huisinstallatie	<u>f 1.200,--</u>	
	f 6.940,--	f 6.940,--
<u>Onderhoud</u>		
warmtepompstation 4%	f 98,--	
distributiesysteem 2,5%	f 56,--	
huisinstallatie 4%	<u>f 48,--</u>	
	f 202,--	f 3.150,--
<u>Beheer</u>		
1% van de investering	f 59,--	f 420,--
<u>Brandstof</u>		
warmtepomp $\frac{56,7 \times 0,9}{0,9 \times 1,76 \times 35,10 \cdot 10^{-3}} = 918 \text{ m}^3$		
pieklastketel $\frac{56,7 \times 0,1}{0,9 \times 35,10 \cdot 10^{-3}} = \frac{179 \text{ m}^3}{1096 \text{ m}^3}$		
	f 603,--	f 15.080,--
<u>Elektriciteit</u>		
(pompenenergie) geschat 100 kWh	f 20,--	<u>f 392,--</u>
Totale kosten over 25 jaar		f 25.982,--

8.3.2 Koudezijdige aspecten

Maximaal opslagvolume : 100 m³/woning.
 Minimaal opslagvolume : 25 m³/woning.
 Lengte aanvoer en retourleiding: 2 x 2000 m.

We onderscheiden maximale koudebenutting, minimale koudebenutting en geen koudebenutting. Door de bodemgesteldheid is een variatie van f 5,--/m³ voor de kosten van het opslagreservoir mogelijk, de laagste kosten (groot reservoir, zandgrond) bedragen f 15,--/m³, in een veengrond wordt dit f 20,--/m³. Isolatie van het bovenoppervlak kost f 5,--/m³.

Geen koudebenutting

Reservoir 25 m³/woning, ongeïsoleerd.

	Jaarlijkse kosten		Over periode van 25 jaar	
	hoog	laag	hoog	laag
<u>Investering</u>				
reservoir	f 500,--	f 375,--		
transportleiding	f 250,--	f 250,--		
aankoop grond	f 65,--	f 65,--		
voorzieningen bij reservoir	<u>f 50,--</u>	<u>f 50,--</u>		
	f 865,--	f 740,--	f 865,--	f 740,--
<u>Onderhoud/Beheer</u>				
3,5% van investering	f 30,--	f 26,--	f 470,--	f 405,--
<u>Elektriciteitsverbruik</u>				
130 x 7/12 = 75 kWh	f 15,--	f 15,--	<u>f 460,--</u>	<u>f 460,--</u>
Totale kosten over periode van 25 jaar			f 1795,--	f 1605,--

Minimale koudebenuttingReservoir 25 m³/woning, geïsoleerd.

	jaarlijkse kosten		Over periode van 25 jaar	
	hoog	laag	hoog	laag
<u>Investering</u>				
reservoir	f 625,--	f 500,--		
transportleiding	f 250,--	f 250,--		
aankoop grond	f 65,--	f 65,--		
voorzieningen bij reservoir	<u>f 50,--</u>	<u>f 50,--</u>		
	f 990,--	f 865,--	f 990,--	f 865,--
 <u>Onderhoud/Beheer</u>				
3,5% van investering	f 35,--	f 30,--	f 545,--	f 470,--
 <u>Elektriciteit</u>				
pompen 130 x 9/12 = 98 kWh	f 19,--	f 19,--		
besparing in koelsysteem:				
1/4 x 1550 = 388 kWh	- <u>f 77,--</u>	- <u>f 77,--</u>		
netto besparing	- f 58,--	- f 58,--	- <u>f 1130,--</u>	- <u>f 1130,--</u>
 Totale kosten over periode van 25 jaar			f 405,--	f 205,--

Maximale koudebenuttingReservoir 100 m³/woning, geïsoleerd.

	Jaarlijkse kosten		Over periode van 25 jaar	
	hoog	laag	hoog	laag
<u>Investerings</u>				
reservoir	f 2000,--	f 1500,--		
transportleiding	f 250,--	f 250,--		
aankoop grond	f 120,--	f 120,--		
voorzieningen bij reservoir	<u>f 50,--</u>	<u>f 50,--</u>		
	f 2420,--	f 1920,--	f 2420,--	f 1920,--
<u>Onderhoud/Beheer</u>				
3,5% van investering	f 85,--	f 67,--	f 1325,--	f 1050,--
<u>Elektriciteit</u>				
pompen 130 kWh	f 26,--	f 26,--		
besparing in koelsysteem				
1550 kWh	- <u>f 310,--</u>	<u>f 310,--</u>		
Netto besparing	- f 284,--	f <u>284,--</u>	- <u>f 5540,--</u>	<u>-f 5540,--</u>
Totale opbrengst over periode				
van 25 jaar			f 1795,--	f 2570,--

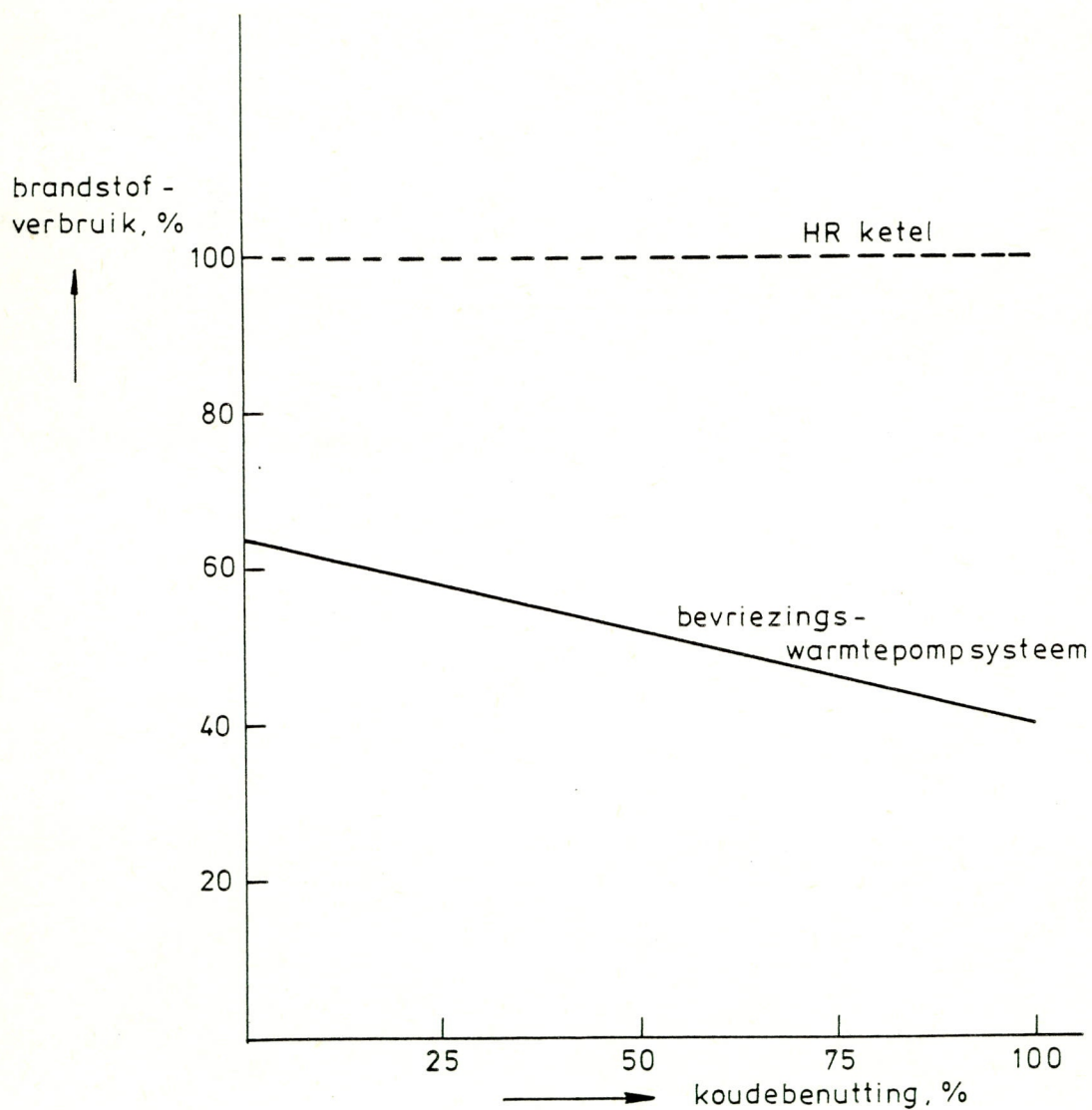


Fig. 12 Vergelijking brandstofverbruik van HR ketel en bevriezings warmtepompsysteem.

1 kWh electriciteit komt overeen met $0,285 \text{ m}^3$ aardgas

8.4 Kostenvergelijking

In onderstaande tabel zijn de totale projectkosten over een periode van 25 jaar voor de verschillende opties en de kosten/baten verhouding aangegeven. Uitgangspunten voor het bevroingswarmtepomp-systeem: investeringen op huidig kostenniveau, gunstige bodemgesteldheid voor graven van opslagreservoir.

	Investe- ring Hfl.	Onderhoud/ Beheer Hfl.	Brandstof + elektri- citeit Hfl.	Meerkosten/ Batenverhou- ding t.o.v. HR-ketel	Totale kosten over 25 jaar Hfl./%	
						incl. wa- terzuive- ring
HR-ketel	3490	1965	24645	-	30100/100	30100/100
Warmtepomp geen koude- benutting	9430	5435	15930	1,13	30800/102,5	30400/101
Warmtepomp mi- nimale koude- benutting	9555	5500	14340	0,90	29400/98	29000/96,5
Warmtepomp ma- ximale koude- benutting	10610	6080	9930	0,67	26620/89	25060/83,5

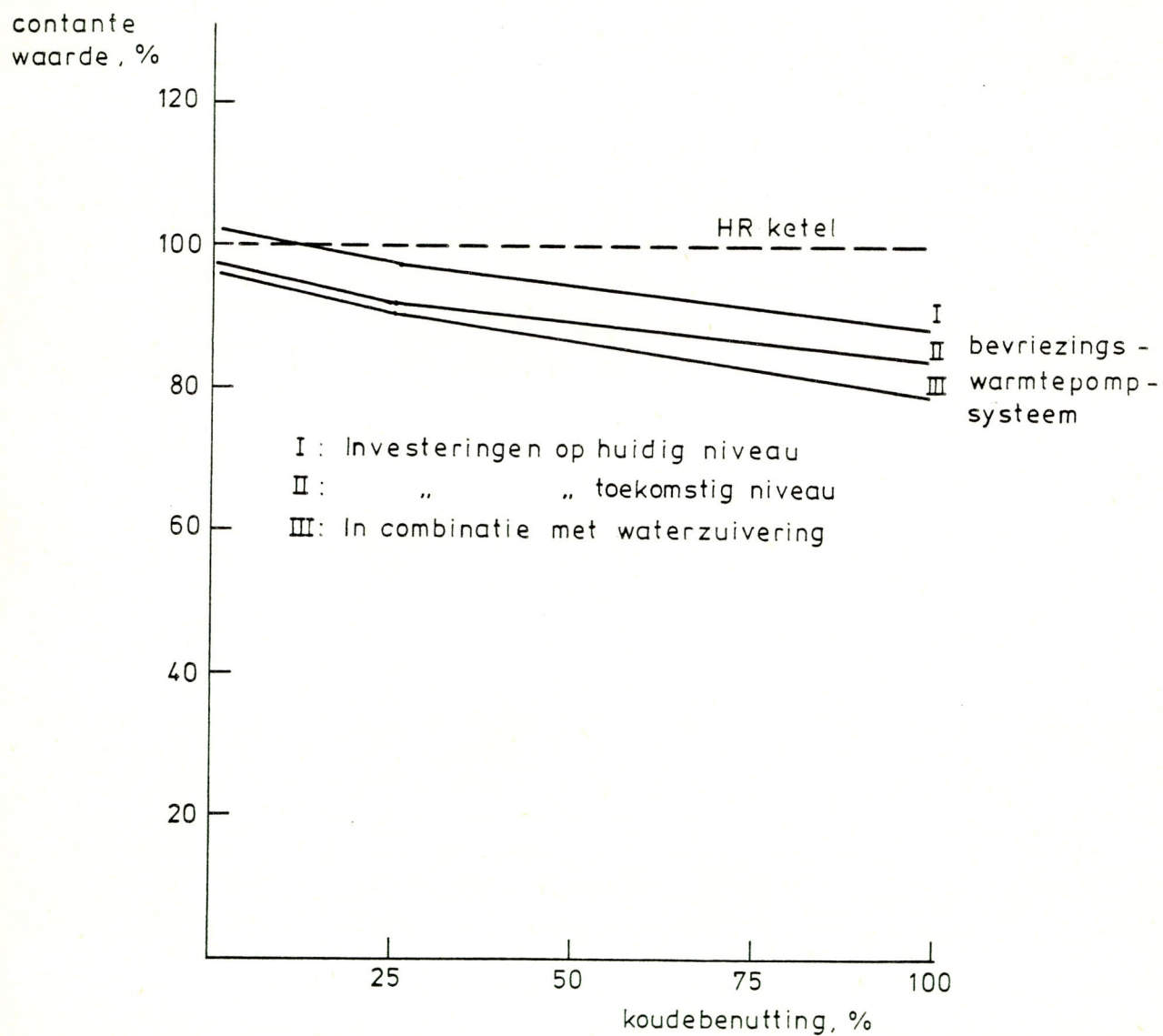


Fig. 13 Verhouding van contante waarden van kosten van systeem met HR - ketels en met bevroingswarmtepomp over periode van 25 jaar

9. CONCLUSIES

Gezien de in de literatuur beschreven ervaringen met proef-ontziltingsinstallaties werkend volgens het vacuumvriesproces lijkt toepassing van dit principe voor onttrekking van bevroezingswarmte van water in een verdamper van een grootschalige warmtepomp technisch haalbaar. Toepassing van het voorgestelde collectieve woningverwarmingssysteem met gasmotorgedreven warmtepompen met een vacuumvriesverdamper zonder gecombineerde koudebenutting en of waterzuivering leidt, in vergelijking met een HR-ketel tot een terugverdientijd voor de extra investering van ongeveer 25 jaar en een brandstofbesparing van 35%. Afhankelijk van de mate van koudebenutting via seizoenopslag van het ijs kan de berekende terugverdientijd teruglopen tot ongeveer 19 jaar bij investeringen op het huidige kostenniveau of 13 jaar bij investeringen op toekomstig kostenniveau. Door gelijktijdige benutting van het systeem voor waterzuivering wordt dit resp. 16 en 11 jaar. Gezien deze resultaten is het zinvol verder onderzoek te verrichten aan de in dit systeem toe te passen vacuumverdamper.

10. REFERENTIES

- [1] A.E. Snijder
Freezing methods; in: Principles of desalination ed.
K.S. Spiegler.
Academic Press, New York (1966).
- [2] P.L.T. Brian
Potential advantages and development problems in water
desalination by freezing.
The Chemical Engineer, May (1971).
- [3] M. Pachter and A. Barak
The vacuum freezing vapor compression (Zarchin) process,
present status and future trends.
Desalination, 2 (1967), pp. 358-267.
- [4] TNO, Den Haag
Octrooiaanvraag O.A. 82.00922 Ned., 5 maart 1982.
- [5] A.J. Barduhn
The state of the crystallization processes for desalting
saline waters.
Desalination, 5 (1968), pp. 173-184.
- [6] H.F. Wiegandt and R.W. von Berg.
Myths about freeze desalting.
Desalination, 33 (1980), pp. 287-297.
- [7] J.H. Fraser
Absorption freezing vapor compression-process selection,
pilot plant design, process economics.
Desalination, 33 (1980), pp. 85-98.
- [8] Gebrüder Sulzer Aktiengesellschaft, Winterthur (CH). Absorptions-
Wärmepumpenanlage.
Europäische Patentanmeldung, no. 78101197.8 (1978).

- [9] J.M. Calm
The DOE Heat-pump-centered integrated community energy systems project.
DOE Heat pump contractors 8 program integration meeting.
McLean, Virginia, June 1981.
- [10] J.M. Calm
HP-ICES, System development summary.
ANL/CNSV-7, February 1980.
- [11] J.M. Calm
HP-ICES, System development assessment.
ANL/CNSV-18, March 1981.
- [12] Anon., Honeywell Incorporated
HP-ICES, System development, final report.
ANL/CNSV-TM-18, November 1979.
- [13] C.E. Dorgan, W.F. Sharp, G.C. Nelson
Ice-maker heat pump performance.
Ashrae Journal, Sept. 1982.
- [14] H.U. v. Barby
Heissgass abtaueinrichtung bei Luft-wasser-wärmepumpen.
Ki Klima-Kälte-Heizung, 10/82.
- [15] Optimale ruimteverwarming in nieuwe woonwijken, fase 1,
uitgebracht door NEI aan Commissie optimalisatie ruimte-
verwarming, 1981.
- [16] U. Kaier
Energiespeicherung.
Brennstoff-Wärme-Kraft 33, April 1981.
- [17] W. Adä, V. Fritsche
Energiespeicherung.
Brennstoff-Wärme-Kraft 34, April 1982.

- [18] W. v. Ekeren, P. Margen
Economie van warmteopslag bij stadsverwarming.
De Ingenieur 49, december 1981.

- [19] Kostprijsschatting hr. Groenendijk, Heidemij.

- [20] Misset - Beheer en Onderhoud - nr. 43.
Koelmachines ten behoeve van luchtbehandeling, 1978.

- [21] H.M. Curran and C.P. Howard
Evaporative freezing process for water desalination.
Office of saline water-research and development progress
report no. 511, februari 1970.

