

TNO-rapport
TNO-MEP – R 98/528

**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

Inventarisatie bronsystemen voor warmtepompen

Eindrapport

Datum
december 1998

Auteur(s)
**C.P.J.M. Geelen
P.A. Oostendorp**

Projectnummer
28488

NOVEM-projectnummer
221517.0614

Bestemd voor
NOVEM

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar
gemaakt door middel van druk, foto-
kopie, 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 onder-
zoeksopdrachten aan TNO, dan wel
de betreffende terzake tussen de
partijen gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het
TNO-rapport aan direct belang-
hebbenden is toegestaan.

© 1998 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

Dit rapport beoogt een globaal overzicht te geven van de belangrijkste aspecten die kenmerkend zijn voor specifieke eigenschappen van de verschillende warmtepompbronnen.

De prestaties van een warmtepomp zijn sterk afhankelijk van het systeem waarin ze zijn opgenomen.

De temperatuur waarbij warmte aan de warmtepomp wordt geleverd is in hoge mate bepalend voor de te behalen COP van de warmtepomp.

Het onderzoek richt zich op bronnen voor warmtepompen voor zowel individuele woningsystemen als kleincollectieve systemen bij toepassing in nieuwbouw-ééngezinswoningen. Bij de inventarisaties is uitgegaan van elektrisch aangedreven compressie-warmtepompen toegepast in een monovalent systeem gecombineerd met een laag temperatuur afgiftesysteem.

De inventarisatie van de zon-gerelateerde bronnen is uitgevoerd door Brouwer Energie Consult.

De volgende warmtebronnen zijn onderwerp van onderzoek geweest:

1. Buitenlucht
2. Ventilatielucht
3. Grondwater
4. De bodem (via verticale of horizontale bodemwarmtewisselaars)
5. Massieve absorbers
6. Energiedaken
7. Zonnecollectoren.

Van deze bronnen zijn de volgende aspecten geïnventariseerd:

1. Kosten
2. Ruimtebeslag
3. Prestaties (kwalitatief)
4. Operationele aspecten
5. Randvoorwaarden
6. Acceptatie door de markt

De inventarisatie is op belangrijke punten kwalitatief van aard. Zelfs waar harde kostprijsinformatie werd verkregen wordt deze zacht, wanneer de bijbehorende systeemprestatie niet hard is.

T.a.v. de afzonderlijke bronnen kunnen de volgende conclusies getrokken worden. *Ventilatielucht* is (bij compressie warmtepompen) alleen geschikt als bron bij warmtapwaterbereiding.

Grondwater is qua temperatuurniveau zeer geschikt, echter vanwege de hoge basis investering vooral interessant bij toepassing in collectieve systemen.

Buitenlucht is overal beschikbaar, kampt echter met een hoog hulpenergieverbruik en met lage verdampingstemperaturen tijdens het stookseizoen.

Bodemwarmte scoort beter dan buitenlucht mits het onttrekkingssysteem zodanig is gedimensioneerd dat de mediumtemperaturen aanzienlijk hoger zijn dan de buitenluchttemperatuur.

Rendabele toepassing vereist echter nog een aanzienlijke kostprijsverlaging.

Zonnewarmte is aantrekkelijk wanneer gebruik gemaakt wordt van goedkope collectoren(energiedak), die ontworpen zijn om bij lage mediumtemperaturen optimaal te presteren, bij voorkeur in combinatie met een bodemsysteem.

Inhoudsopgave

	Samenvatting.....	2
1.	Inleiding	6
2.	De warmtebronnen.....	10
3.	Belangrijkste eigenschappen per type bron	11
3.1	Algemeen.....	11
3.2	Buitenlucht.....	11
3.2.1	Algemeen	11
3.2.2	Kosten.....	12
3.2.3	Ruimtebeslag.....	12
3.2.4	Prestaties (kwalitatief).....	12
3.2.5	Operationele aspecten	13
3.2.6	Randvoorwaarden.....	13
3.2.7	Acceptatie door de markt	14
3.3	Ventilatielucht	14
3.3.1	Algemeen	14
3.3.2	Kosten.....	15
3.3.3	Ruimtebeslag.....	15
3.3.4	Prestaties (kwalitatief).....	15
3.3.5	Operationele aspecten	16
3.3.6	Randvoorwaarden / onderhoud	16
3.3.7	Acceptatie door de markt	16
3.4	Grondwater	16
3.4.1	Algemeen	16
3.4.2	Kosten.....	17
3.4.3	Ruimtebeslag.....	17
3.4.4	Prestaties (kwalitatief).....	17
3.4.5	Operationele aspecten	18
3.4.6	Randvoorwaarden.....	18
3.4.7	Acceptatie door de markt	19
3.5	De bodem (via verticale of horizontale bodemwarmtewisselaars)	19
3.5.1	Algemeen	19
3.5.2	Kosten.....	20
3.5.3	Ruimtebeslag.....	21
3.5.4	Prestaties (kwalitatief).....	21
3.5.5	Operationele aspecten	22
3.5.6	Randvoorwaarden.....	22
3.5.7	Acceptatie door de markt	23

3.6	Zonnewarmte via massieve absorbers	23
3.6.1	Algemeen	23
3.6.2	Kosten.....	25
3.6.3	Ruimtebeslag.....	26
3.6.4	Prestaties (kwalitatief).....	26
3.6.5	Operationele aspecten	26
3.6.6	Randvoorwaarden.....	27
3.6.7	Acceptatie door de markt	27
3.7	Zonnewarmte via energiedaken.....	27
3.7.1	Algemeen	27
3.7.2	Kosten.....	28
3.7.3	Ruimtebeslag.....	28
3.7.4	Prestaties (kwalitatief).....	28
3.7.5	Operationele aspecten	29
3.7.6	Randvoorwaarden.....	29
3.7.7	Acceptatie door de markt	30
3.8	Zonnecollectoren	30
3.8.1	Algemeen	30
3.8.2	Kosten.....	32
3.8.3	Ruimtebeslag.....	32
3.8.4	Prestaties (kwalitatief).....	32
3.8.5	Operationele aspecten	33
3.8.6	Randvoorwaarden.....	33
3.8.7	Acceptatie door de markt	33
4.	Overzicht bronsystemen.....	34
5.	Conclusies en aanbevelingen	36
6.	Referenties	39
7.	Verantwoording	41
Bijlage 1	Bijzondere situaties en opmerkingen terzijde	

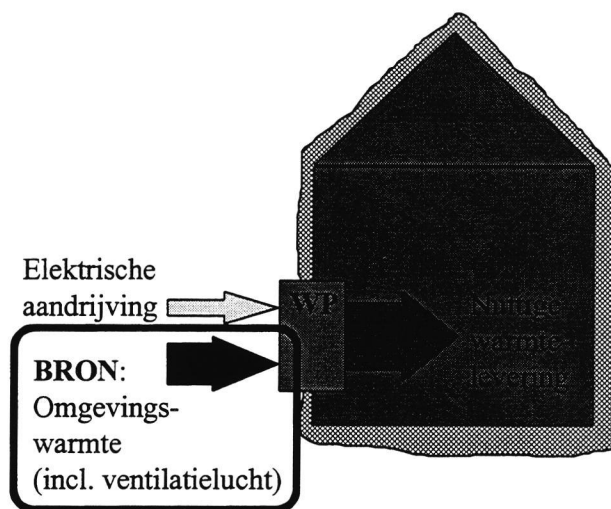
1. Inleiding

De prestaties van een warmtepomp zijn sterk afhankelijk van het systeem waarin ze zijn opgenomen. Zowel voor het afgiftesysteem als voor het bronsysteem (figuur 1) zijn een aantal aspecten zoals dimensionering op het goede temperatuurniveau, hydraulische schakeling, regeltechniek, etc. van groot belang.

In [1] worden aanbevelingen gegeven voor warmtepompsysteem-ontwerpen, waarbij de nadruk ligt op het afgiftesysteem.

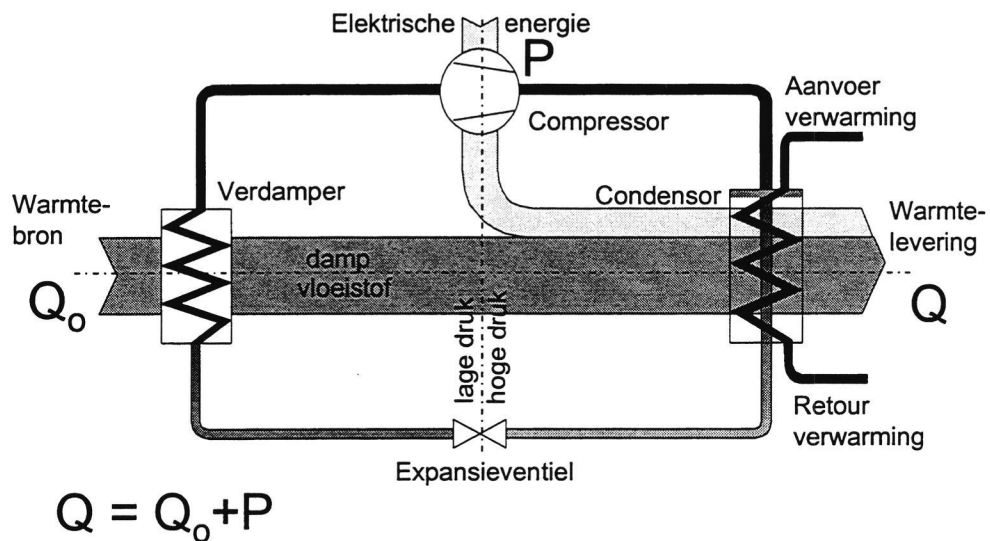
Dit rapport beoogt een globaal overzicht te geven van de belangrijkste aspecten die kenmerkend zijn voor specifieke eigenschappen van de verschillende warmtepompbronnen.

Voor warmtepompen is de keuze van een warmtebron uitermate belangrijk. Niet alleen vormt de bron een kostenpost van betekenis, ook is de temperatuur waarbij warmte aan de warmtepomp wordt geleverd in hoge mate bepalend voor de te behalen COP van de warmtepomp en dus voor de ermee te bereiken energiebesparing en CO₂-emissiereductie

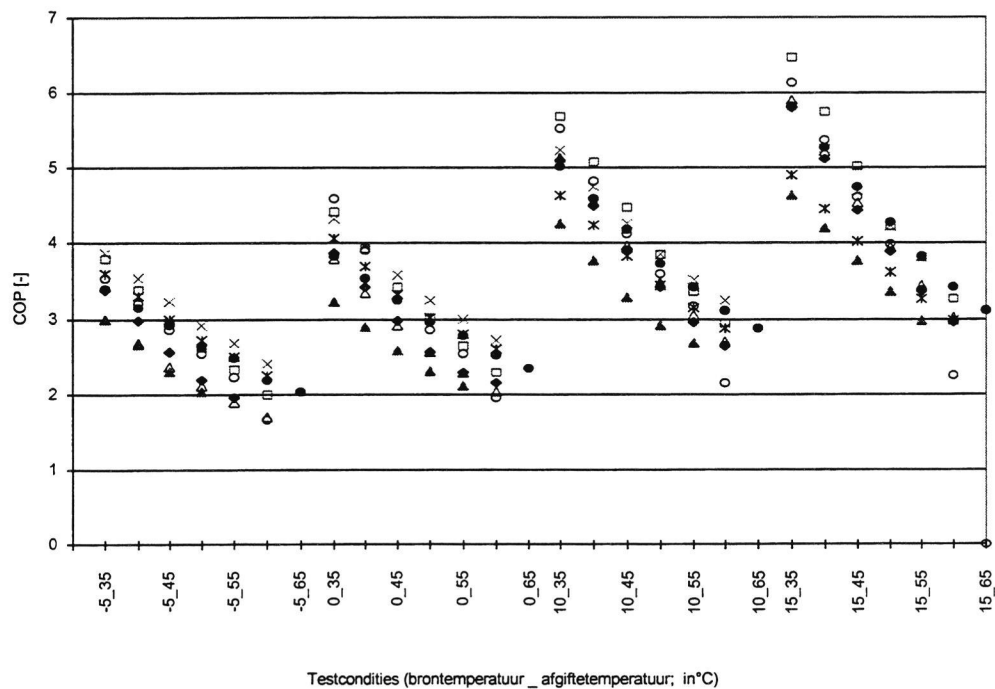


Figuur 1

De werking van de warmtepomp en het effect van de brontemperatuur op de COP is geïllustreerd in figuur 2 en 3. Hierin is duidelijk te zien dat een hogere brontemperatuur een verlaging van de compressie-energie tot gevolg heeft en dat daarmee een hogere COP wordt bereikt. Dit laatste geldt in nog sterkere mate indien aan afgifte zijde een Laag Temperatuur Verwarmingssysteem (LTV) wordt toegepast. Immers, de COP van de warmtepomp is ongeveer omgekeerd evenredig is met de temperatuurlift, en is dus gevoeliger voor de verdampertemperatuur, naarmate de temperatuurlift kleiner is.



Figuur 2 Principe van een warmtepomp



Figuur 3 Meetresultaten van enkele warmtepompen bij verschillende combinaties van bron- en afgiftetemperatuur.

In tabel 1 is de gevoeligheid van de COP weergegeven voor een verandering van 1 K in de brontemperatuur bij diverse combinaties van afgifte- en brontemperatuur.

Tabel 1 Gevoeligheid van COP voor Tbron.

Tafgifte	$dCOP/dT_o = 0,5 \cdot T/(T-T_o)^2$				
	T afgiftetemperatuur T _o brontemperatuur				
	T _{bron}				
	-5	0	5	10	15
20	0,23	0,37	0,65	1,47	5,86
25	0,17	0,24	0,37	0,66	1,49
30	0,12	0,17	0,24	0,38	0,67
35	0,10	0,13	0,17	0,25	0,39
40	0,08	0,10	0,13	0,17	0,25
45	0,06	0,08	0,10	0,13	0,18
50	0,05	0,06	0,08	0,10	0,13
55	0,05	0,05	0,07	0,08	0,10
60	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
65	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
70	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06

Om helderheid te verschaffen in de van belang zijnde eigenschappen van mogelijke warmtebronnen voor warmtepompen, heeft Novem aan TNO opdracht gegeven deze onderling vergelijkbaar te inventariseren.

De inventarisatie van de zon-gerelateerde bronnen is uitgevoerd door Brouwer Energie Consult.

Om met name de aspecten m.b.t. de uitvoeringsdetails en kostprijs te inventariseren is een enquête onder de leveranciers gehouden; de respons hierop was in beperkte mate bruikbaar.

Het onderzoek richt zich op bronnen voor warmtepompen voor zowel individuele woningsystemen als kleincollectieve systemen bij toepassing in nieuwbouw-ééngezinswoningen. Bij de inventarisaties is uitgegaan van elektrisch aangedreven compressie-warmtepompen toegepast in een monovalent systeem gecombineerd met een laag temperatuur afgiftesysteem.

Hiermee ligt de grootte van de warmtepomp, zijn jaargemiddelde COP en daarmee de benodigde capaciteit van de bron vast (zie tabel 2).

In dit onderzoek zijn de prestaties van de bronsystemen grotendeels kwalitatief meegenomen.

Tabel 2 *Bronvermogens (kW).*

Toepassing	Verwarmingsvermogen Warmtepomp		Bronvermogen	
	1 woning	10 woningen	1 woning	10 woningen
Ruimteverwarming (COP = 4)	6 kW	50 kW	4,5 kW	37,5 kW
Warmtapwater (COP = 3)	1,5 kW	12 kW	1,0 kW	8 kW

De COP voor warmtapwater is relatief hoog verondersteld om te voorkomen dat, mede met het oog op de toekomstverwachting, een te klein bronvermogen wordt geselecteerd.

2. De warmtebronnen

De volgende warmtebronnen zijn onderwerp van onderzoek geweest:

1. Buitenlucht
2. Ventilatielucht
3. Grondwater
4. De bodem (via verticale of horizontale bodemwarmtewisselaars)
5. Massieve absorbers
6. Energiedaken
7. Zonnecollectoren.

Van deze bronnen zijn de volgende aspecten geïnventariseerd:

1. Kosten
2. Ruimtebeslag
3. Prestaties (kwalitatief)
4. Operationele aspecten
5. Randvoorwaarden
6. Acceptatie door de markt

T.a.v. de kosten dient de lezer zich te realiseren dat dit rapport een moment opname is (1998). Met name de kosten voor bodemwarmtesystemen zijn in ontwikkeling.

3. Belangrijkste eigenschappen per type bron

3.1 Algemeen

Een aantal zaken geldt voor alle bronnen:

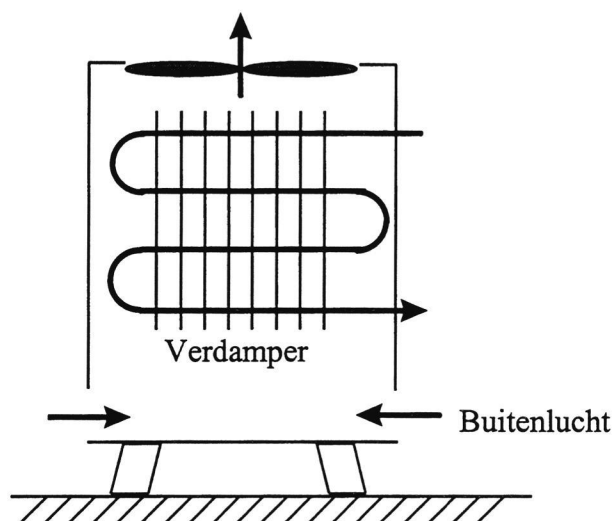
1. Indien de warmtepomp is uitgerust met een toerengeregelde compressor, is het aan te bevelen om ook de pompen/ventilatoren aan de warmtebronzijde modulerend te regelen. Door het deellastbedrijf is het aantal bedrijfsuren veel groter dan het aantal vollasturen (vergelijk aan/uit bedrijf). Als de hulpapparatuur dan op volvermogen door zou blijven draaien, stijgt het hulp energieverbruik onevenredig sterk.
2. Het toepassen van een tussenmedium (in de meeste gevallen water met antivries) om de omgevingswarmte te transporteren naar de verdamper levert een extra verlaging van de verdampingstemperatuur op die niet altijd noodzakelijk is.
3. Bij gebruik van een tussenmedium wordt veelal water met antivries toegepast. Het meest gebruikelijke antivries is mono-ethyleen-glycol. In Scandinavië wordt steeds meer het milieuvriendelijke ethanol toegepast.
4. Houdt rekening met het feit dat de bronbelasting stijgt met stijgende COP. Natuurlijk staan er in de toekomst alleen goede warmtepompsystemen (voor slechte bestaat geen markt), het bronsysteem moet dus *conservatief* worden gedimensioneerd op *hoge* COP-waarden.

3.2 Buitenlucht

3.2.1 Algemeen

Buitenlucht kan gebruikt worden als bron door (meestal naast de woning) een luchtkoeler op te stellen. Hierbij wordt altijd een ventilator toegepast om een luchtstroom door de koelbatterij te forceren. De koelbatterij wordt meestal gevormd door de verdamper zelf in een "finned tube"-uitvoering (zie figuur 4). De buitenlucht koelt tijdens de passage door de luchtkoeler af en geeft zo warmte af aan de koudere verdamper. Specifieke eigenschappen en aandachtspunten zijn:

1. Buitenlucht is overal en onbeperkt beschikbaar;
2. Het hulpenergiegebruik van de ventilator kan aanzienlijk zijn; zeker bij deze bron is terugregeling van de ventilator in deellast zeer wenselijk;
3. De geluidsproductie van de ventilator vereist de nodige aandacht;
4. Het berijpen van de ventilator wanneer de temperatuur onder het vriespunt komt en het dan noodzakelijke ontdooien; het ontdooien vindt bij vrijwel alle fabrikanten plaats d.m.v. de te prefereren persgasmethode;
5. Het noodzakelijke onderhoud (ventilator en reiniging van de koelbatterij).



Figuur 4 Buitenlucht als bron.

3.2.2 Kosten

De kosten van de verdamper worden niet afzonderlijk opgegeven omdat deze systemen vaak als totaal “split-system” worden geleverd. Naar schatting kost een afzonderlijk verdamperblok voor een individuele woning ca. fl. 2000,--.

3.2.3 Ruimtebeslag

De verdamper is uitgevoerd als luchtkoeler. Deze staat buiten. Daar neemt hij ruimte in waarbij het esthetisch effect vaak als negatief wordt ervaren. Het ruimtebeslag loopt sterk uiteen, en is vooral afhankelijk van de (door de leverancier op te geven) benodigde vrije ruimte rondom de verdamper. In principe is voor een laag geluidsniveau een laag ventilatortoerental vereist. Dit gaat gepaard met een lage luchtsnelheid door de koelbatterij en vereist daarmee een groot warmteoverdragend oppervlak en dus een relatief grote koelbatterij. Deze relatie tussen ruimtebeslag, ventilatorvermogen en geluidsproductie blijkt echter niet uit de leveranciers-gegevens. De netto benodigde ruimte bedraagt voor één woning ca. $0,4 \text{ m}^3$; de bruto ruimte loopt uiteen van 1 tot 16 m^3 .

3.2.4 Prestaties (kwalitatief)

De gemiddelde buitenluchttemperatuur tijdens het stookseizoen lag tot enige jaren geleden rond 5°C . Omdat de stookgrens (de buitenluchttemperatuur waaronder men de woning moet gaan verwarmen) door warmtevraagbeperkende maatregelen

(isolatie) steeds lager wordt, wordt het stookseizoen steeds korter: het concentreert zich steeds meer rond de koudste maanden. Daarmee wordt de gemiddelde buitenluchttemperatuur tijdens het stookseizoen dus steeds lager (zie tabel 3).

Tabel 3 Jaargemiddelde buitenluchttemperatuur als functie van de lengte van het stookseizoen.

Stookseizoen	Jaargemiddelde ¹⁾ buitenluchttemperatuur	Jaargemiddelde ¹⁾ verdampertemperatuur
september t/m april	4,7 °C	-2 °C
oktober t/m maart	3,7 °C	-3 °C
november t/m februari	3,1 °C	-4 °C

1) Jaargemiddelde temperatuur gewogen naar warmtelevering door warmtepomp

Wanneer een gangbaar logaritmisch temperatuurverschil tussen lucht en verdampend koudemiddel wordt gehanteerd van 7°C, resulteren de eveneens in Tabel 3 genoemde verdampertemperaturen. Hiermee is buitenlucht uit energetisch oogpunt (relatief grote temperatuurlift en daarmee lagere COP) een minder aantrekkelijke warmtebron voor warmtepompen. Dit wordt nog versterkt door het feit dat de ventilator vergeleken met andere bronnen, relatief veel hulpenergie gebruikt.

3.2.5 Operationele aspecten

In veel gevallen zal de warmtepomp een split-unit zijn, dat wil zeggen, dat de verdamper buiten staat en dat binnen een unit met daarin de overige componenten is opgesteld, onderling verbonden met koudemiddelleidingen. Dit vraagt tijdens de installatie koudetechnische handelingen en een installateur die daartoe bevoegd is (STEK-erkenning). Het alternatief is om de warmtepomp in "compacte uitvoering" te installeren, hetgeen betekent dat de wp in zijn geheel buiten staat. Dit eist warmwater-terreinleidingen die tot extra verliezen leiden en heeft vanwege de buitenopstelling tevens tot gevolg dat de warmteverliezen van de warmtepomp nooit nuttig kunnen zijn.

3.2.6 Randvoorwaarden

Door een aantal leveranciers wordt een stoffilter toegepast. De geluidsproductie loopt uiteen van 20 tot 70 dB(A). Afhankelijk van de opstelling zullen waarden hoger dan ca. 50 dB(A) in een woonomgeving zeker niet acceptabel zijn; in dat geval zullen extra akoestische maatregelen getroffen moeten worden.

3.2.7 Acceptatie door de markt

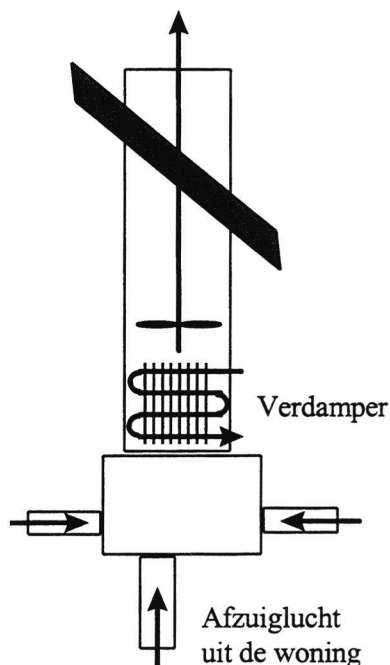
Er is veel leveranciers-informatie beschikbaar voor deze warmtepompbron. Dit vindt zijn oorzaak mogelijk in de uitgebreide omgekeerde toepassing t.b.v. koelinstallaties. Desondanks vindt toepassing bij Nederlandse woningen, in tegenstelling tot bijvoorbeeld Duitsland, nauwelijks plaats. Een mogelijke oorzaak hiervan kan enerzijds gelegen zijn in het esthetisch aspect en benodigde ruimte in de tuin, anderzijds kan de vereiste STEK-erkenning een belemmering zijn voor een cv-installateur.

3.3 Ventilatielucht

3.3.1 Algemeen

Vrijwel alle nieuwbouwwoningen worden uitgerust met mechanische ventilatie. Wanneer hierbij geen warmteterugwinning plaatsvindt, kan de warmte in deze lucht op dezelfde wijze als bij buitenlucht gebruikt worden als bron voor de warmtepomp. Essentieel verschil met buitenlucht is enerzijds de constant hoge temperatuur (15 - 22 °C) van de ventilatielucht en anderzijds het beperkte debiet.

Principieel is ventilatielucht alleen voldoende om de *ventilatie*verliezen van een woning te compenseren. Daarom is deze bron ongeschikt (wegens te kleine capaciteit) voor een warmtepomp voor ruimteverwarming. Zou men de capaciteit van deze bron vergroten door hem verder uit te koelen, dan zou de verdampertemperatuur lager worden dan die bij buitenlucht als bron. Daarmee zou buitenlucht dan een meer aantrekkelijke optie zijn (zie ook bijlage 1, opmerking 2). De beste bestemming voor de warmte die aanwezig is in ventilatielucht is volgens de auteurs warmteterugwinning via gebalanceerde ventilatie. Indien dat niet mogelijk of niet gewenst is, komt ventilatielucht gebruik als bron voor een warmtepompboiler in aanmerking (zie figuur 5).



Figuur 5 Ventilatie als bron.

3.3.2 Kosten

De meerkosten om het ventilatiesysteem aan te passen voor een warmtepompboiler zijn in een nieuwbouwsituatie nihil. Voor de warmtepomp boiler variëren de kosten tussen fl. 2500,-- en ruim fl. 5000,--

3.3.3 Ruimtebeslag

Wanneer de installatie van een warmtepompboiler vanaf het begin van het bouwkundig proces wordt meegenomen is het extra ruimtebeslag voor de luchtkanalen verwaarloosbaar. Inclusief vrije ruimte rondom neemt een warmtepompboiler zelf ca. 1,5 m³ ruimte in.

3.3.4 Prestaties (kwalitatief)

Tapwater warmtepompen hebben, afhankelijk van de feitelijke tapwatervraag, een seizoensgemiddelde COP van 1,9-2,4 (opgave leveranciers); in de praktijk zullen deze waarden mogelijk lager zijn vanwege de relatief hoge stilstandsverliezen van het voorraadvat. Hierbij dienen we te bedenken dat het rendement van een indirect gestookte conventionele boiler ca. 50% is.

3.3.5 Operationele aspecten

Voor de individuele systemen was vroeger de geluidsproductie een belangrijk knelpunt. Bij de huidige generatie warmtepomp-boilers bedraagt de geluidsproductie ca. 40 dB(A).

3.3.6 Randvoorwaarden / onderhoud

Door de meeste leveranciers wordt regelmatige inspectie van het stoffilter aanbevolen/vereist.

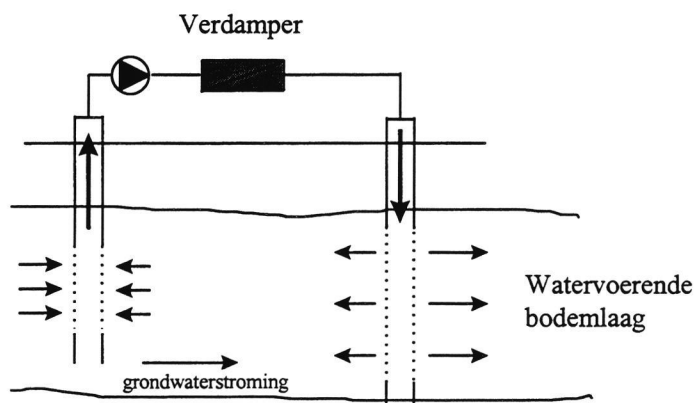
3.3.7 Acceptatie door de markt

Afgezien van het achterhaalde vooroordeel t.a.v. geluidsoverlast, lijkt onbekendheid (ook bij installateurs) de enige blokkade in de markt te zijn.

3.4 Grondwater

3.4.1 Algemeen

Om grondwater als warmtepompbron te kunnen benutten, dient dit opgepompt te worden uit een watervoerende bodemlaag. Daarbij is het van belang dat de doorlatendheid van de betreffende bodemlaag voldoende groot is om de vereiste hoeveelheid grondwater te kunnen onttrekken. Het grondwater wordt opgepompt, door de warmtepomp geleid, daarbij enkele graden afgekoeld en vervolgens enkele tientallen meters verder weer in dezelfde bodemlaag ingebracht. Onttrekken en injecteren vindt plaats met zgn. filters. Dit zijn buizen met perforaties ter plaatse van de watervoerende bodemlaag (zie figuur 6). Grondwater is uit energetisch oogpunt verreweg de beste bron voor warmtepompen. De temperatuur is over het jaar vrijwel constant en hoog (10-12 °C). Dit leidt tot jaargemiddelde verdamper-temperaturen van 4-6 °C.



Figuur 6 Grondwater als bron.

3.4.2 Kosten

Voor een individueel systeem bedragen de kosten fl 4000 tot fl 5000. Voor een kleincollectief systeem van 10 woningen zullen de kosten ca. fl 10.000 bedragen. Bovenstaande bedragen betreffen een lage schatting.

Een hoge schatting in de kosten ligt ca. een factor 3 hoger; hierbij zou de kwaliteit van het bronsysteem (zekerheid omtrent het op peil blijven van de volumestroom grondwater) beduidend hoger zijn.

3.4.3 Ruimtebeslag

Ruimtebeslag van deze bron is minimaal. Normaal gesproken is voor beide putten elk ca. 1 m² grondoppervlak benodigd.

3.4.4 Prestaties (kwalitatief)

Grondwater levert jaargemiddeld de hoogste verdampertemperaturen (circa 5 °C) en daarmee de hoogste COP van de warmtepomp. Er zit een addertje onder het gras ten aanzien van het hulpenergiegebruik van de bronpompen. Wanneer het water na afkoeling weer wordt teruggevoerd in een tweede (injectie-)put, kan de hydraulische opvoerhoogte en daarmee het energieverbruik van de pomp beperkt zijn. Wanneer het afgekoelde water op het riool wordt geloosd, zal het pompenergiegebruik groter zijn.

3.4.5 Operationele aspecten

Technisch is het van groot belang om te garanderen dat het grondwater niet met lucht in aanraking komt. Omdat het vaak ijzerhoudend is zou contact met zuurstof leiden tot het uitvlokken van ijzer met als gevolg het verstopt raken van de retourput. Er zijn leveranciers die hierom, en ook om hun verdamper te beschermen tegen mogelijk corrosief grondwater, pleiten voor een scheidingswarmtewisselaar. Anderen vinden dit niet nodig: immers het probleem wordt niet opgelost, maar verplaatst naar die scheidingswarmtewisselaar. Omdat die ook nog leidt tot “temperatuurverlies” delen de auteurs het standpunt van de laatste.

Om luchttoetreding te voorkomen kan het systeem continu op een lichte overdruk (van bijv. 0,2 bar) worden gehouden. Ter voorkoming van corrosie is het aan te bevelen de waterkwaliteit periodiek te monitoren.

In principe is onttrekking en lozing of injectie (weer terugvoeren in de bodem) van grondwater altijd aan een vergunning gebonden. Per regio bestaan in de uitwerking hiervan grote verschillen. Zo volstaat in een aantal provincies een melding, ten minste wanneer de onttrekking kleiner is dan 10 m³/uur en indien er *geen* sprake is van directe lozing op het rioleringsstelsel. Er is dus een vergunning nodig. Omdat het gebruik van grondwater als warmtebron voor warmtepompen nog nauwelijks grootschalig is toegepast, is de regelgeving hier nog onvoldoende op afgestemd en nog volop in ontwikkeling. Vooral wanneer de toepassing uitgebreid (in termen van grote aantallen) zou gaan plaatsvinden, maken de verantwoordelijke autoriteiten zich bezorgd om een mogelijke extra daling van de grondwaterstand of, wanneer dit laatste wordt voorkomen door re-injectie van het afgekoelde water, voor verontreinigingen van dit water, dat in Nederland een belangrijke rol speelt bij de drinkwatervoorziening. Het zijn vooral deze aspecten, die de warmtepompwereld richting bodemwarmtewisselaars gedreven hebben. In een toekomst met grootschalige toepassing van grondwater als warmtebron moet men rekening houden met de te verwachten verplichting om afgekoeld water te injecteren in de laag waaruit het afkomstig is en met strenge maatregelen ter voorkoming van milieu-problemen.

3.4.6 Randvoorwaarden

- Het filter in de persput dient 1,5 tot 2 maal zo groot te zijn als dat in de bronput.
- Dimensionering dient op een proefboring gebaseerd te zijn
- Luchttoetreding kan worden voorkomen door het systeem op overdruk te houden
- De onttrekkings- en injectieput dienen op enige afstand van elkaar geprojecteerd te worden om “kortsluiting” in de watervoerende laag te voorkomen; de injectieput dient stroomafwaarts in de grondwaterstroming geplaatst te worden.

3.4.7 Acceptatie door de markt

Vanwege het provinciale vergunningen stelsel verloopt toepassing soms moeizaam.

Door de hoge initiële kosten is toepassing voor een collectiefsysteem aantrekkelijker.

3.5 De bodem (via verticale of horizontale bodemwarmtewisselaars)

3.5.1 Algemeen

De bodem kan als warmtebron worden gebruikt door een leidingstelsel in de grond aan te brengen waarin vloeistof circuleert met een temperatuur lager dan die van de bodem. De vloeistof warmt op (onttrekt warmte aan de bodem) en geeft deze warmte af in de verdamper van de warmtepomp.

Doordat de bodem ter plaatse van de leidingen afkoelt gaat warmte uit de omringende bodem naar de koudere plaatsen “stromen”. Na een aantal jaren ontstaat een evenwichtssituatie. De tijd nodig om tot een evenwichtssituatie te komen hangt af van een aantal factoren zoals: lay-out van het leidingsysteem in de bodem, grondwaterstroming, warmtevraagpatroon. Er zijn twee hoofduitvoeringsvormen van het bodemwarmtesysteem: horizontaal en verticaal.

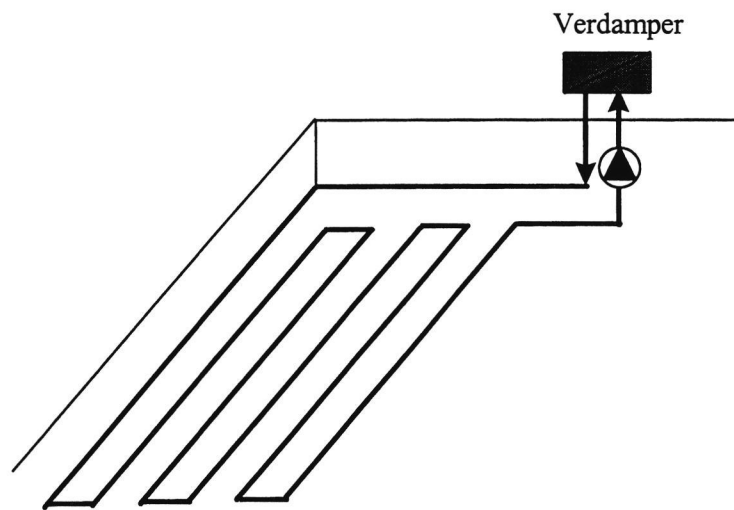
Het horizontale systeem bestaat uit een enkelvoudige leiding die in lussen ca. 1,5 m onder het maaiveld wordt gelegd (zie figuur 7).

Het verticale systeem bestaat uit U-vormige buizen, sondes genoemd, die in enkele of dubbele uitvoering in de bodem worden ingebracht (zie figuur 8).

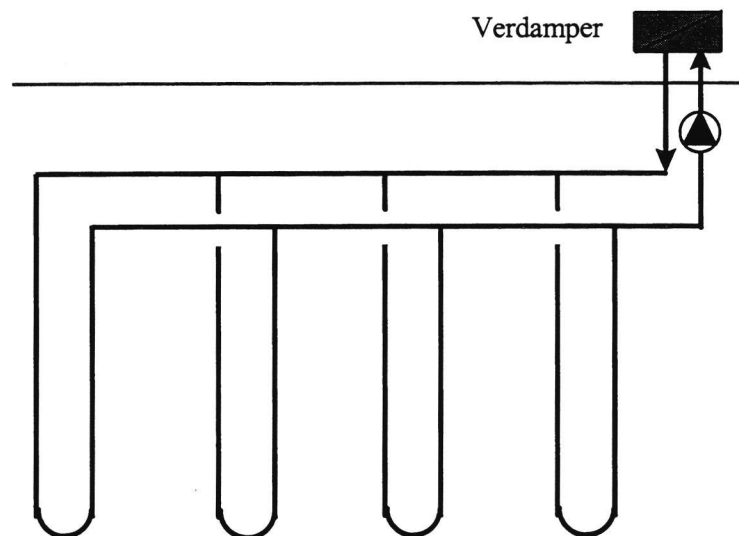
Voor het materiaal van de leidingen wordt vrijwel uitsluitend PE of HDPE toegepast.

De vloeistof in het leidingsysteem is water of een water-antivries mengsel. Sporadisch wordt de toepassing van “directe expansie” gemeld; hierbij zijn de leidingen van koper (of een legering) en stroomt het koudemiddel van de warmtepomp door het bodemsysteem: de verdamper is direct in de bodem geplaatst.

Een bijzondere uitvoeringsvorm die momenteel in opkomst is, is de “energiepaal”. Dit is een heipaal met twee geïntegreerde U-buizen.



Figuur 7 Horizontale bodem-warmtewisselaar.



Figuur 8 Verticale bodem-warmtewisselaar.

3.5.2 Kosten

De kosten voor het aanbrengen van de buizen van een horizontaal systeem bedragen ca. fl 15 tot fl 20 per strekkende meter (ca. 300 m per woning) wanneer van efficiënte technieken gebruik wordt gemaakt (vergelijkbaar met het leggen van kabels waarbij in één gang een sleuf wordt gemaakt, de leiding aangebracht en de sleuf weer wordt gedicht); voor het totale systeem bedragen de kosten globaal fl 6000,--

Voor het verticale systeem zijn de kosten eveneens afhankelijk van de inbrengmethode. Bij diepten vanaf 20 m dienen technieken zoals intrillen, spoelboren,

avegaarboren of pulsbooren te worden toegepast, waarbij de kosten voor het boren uiteenlopen van fl. 30,-- tot fl. 60,-- per meter boorgat [4]. Daarbij komen de kosten voor de PE-leidingen (ca. fl. 1,-- per strekkende meter; bij een dubbele U-buis dus * 4).

De totale kosten zijn daarnaast ook nog afhankelijk van de uitvoeringsvorm van de verbindingstukken (de U-vormige koppeling onderaan de buis en de verbindende leidingstukken aan de oppervlakte), en lopen daarbij uiteen van ca. fl. 40,-- tot fl. 100,-- per meter diepte.

De meerkosten van een “energiepaal” t.o.v. een gewone heipaal zijn ca. fl. 200,-- per paal (excl. bovengrondse verbindingen).

Tevens dient rekening gehouden te worden met de kosten voor het afpersen en (eventueel) vullen met antivries; deze bedragen fl. 2000,-- tot fl. 3000,-- per systeem.

Voor korte sondes (tot een diepte van ca. 20 m) zijn relatief eenvoudige (en goedkope) technieken toepasbaar vergelijkbaar met sondeermethoden.

3.5.3 Ruimtebeslag

De horizontale variant vraagt tamelijk veel ruimte: 1 à 2 maal het verwarmde oppervlak van de woning, de buizen liggen dan op ca. 1,5 m diepte en op een onderlinge afstand van 1 meter. Om deze reden valt deze optie vaak af in Nederland.

Bij de verticale uitvoering dienen de sondes minimaal 5 meter uit elkaar te worden geplaatst per sonde is dus 25 m² grondoppervlak nodig. Het tuinoppervlak van een (referentie) eengezinswoning zal normaal gesproken slechts ruimte bieden aan 2 à 4 sondes.

3.5.4 Prestaties (kwalitatief)

De bereikbare COP hangt af van de totaal aangebrachte lengte aan sondes. Bij verticale systemen is voor een (referentie) rijtjes eengezinswoning circa 120 tot 150 m buis nodig om bevvriezng van de bodem te voorkomen. De jaargemiddelde verdampertemperatuur bedraagt dan ca. -1°C. Wil men een redelijke mediumtemperatuur van jaargemiddeld 7°C om een verdampertemperatuur van gemiddeld 3°C te krijgen dan dient ongeveer 2 maal zoveel buis te worden aangebracht. (Tabel 3).

Voor een collectief systeem voor een rijtje woningen geldt dat de gemiddelde totale sondelengte per woning ca. 20% minder kan zijn. Door de ongelijktijdigheid in warmtevraag wordt in dit geval de bodem(warmtewisselaar) namelijk meer gelijkmatig belast, hetgeen bij constante warmteontrekking hogere mediumtemperaturen oplevert.

Vinex-locaties vragen speciale aandacht bij de toepassing van bodemwarmte als bron. Vanwege de vaak hoge bebouwingsdichtheid is de natuurlijke regeneratie van de bodem beperkt tot de boven en onderzijde van het blok aarde waarin de

sondes zich bevinden, immers de burens voor, achter, links en rechts onttrekken eveneens warmte aan de bodem. In deze situatie zijn grotere totaallengten vereist [3].

3.5.5 Operationele aspecten

Het aanbrengen van een bodemwarmtewisselaar heeft, letterlijk, nogal wat voeten in de aarde. Bij horizontale systemen wordt vaak het gehele oppervlak afgegraven, de nieuwste methoden gaan uit van het graven van sleuven.

Het aanbrengen van verticale sonden dieper dan ca. 20 m vraagt zware apparatuur. De techniek moet in dit opzicht nog verder ontwikkeld worden, een grotere marktvraag zal hierbij stimulerend werken..

Bij de toepassing van “energiepalen” is men zeer beducht voor de vorming van ijs aan de buitenkant van de paal omdat daardoor de “kleef” en daarmee de draagkracht van de heipaal gevaar zou kunnen lopen. Deze ijsvorming kan worden voorkomen door het bronsysteem van een beveiliging te voorzien waarmee de vloeistoftemperatuur in de leidingen niet langdurig onder 0 °C kan komen. Deze beveiliging heeft als bijkomend effect dat het maximaal te onttrekken vermogen lager is dan bij “losse” sondes.

Een ander operationeel aspect betreft de lektheid van het leidingsysteem in de bodem. De toepassing van milieu-onvriendelijke vriespuntverlagende middelen maakt een goede controle en garantie op de lektheid van het bodemsysteem onontbeerlijk. Mogelijke uitwegen hierbij zijn het toepassen van milieuvriendelijke antivries-soorten (zoals alcohol) of het gebruik van puur water. Bij het gebruik van water zonder toevoegingen geldt in sterkere mate dezelfde opmerking als bij de “energiepalen”: het aan de bodem te onttrekken vermogen is lager; het gunstige neveneffect hierbij is uiteraard dat de jaargemiddelde COP positief wordt beïnvloed.

Een hoge stroomsnelheid door de sondes in de bodem, heeft een licht positief effect op het te onttrekken vermogen of de mediumtemperatuur. Hiervoor is echter ook in sterk toenemende mate extra pompvermogen voor nodig, waarmee de benodigde hulpenergie en het totale systeemrendement negatief wordt beïnvloed. Bij de dimensionering van het systeem dient men dus bedacht te zijn op het toepassen van te hoge stroomsnelheden (en een overdreven voorstelling van het positieve effect hiervan).

3.5.6 Randvoorwaarden

Globaal moet voor een maximaal mogelijke onttrekking van bodemwarmte uitgegaan worden van 15 - 40 W/m_{diepte} [1], [2]. De precieze waarde is afhankelijk van:

- de laagst toelaatbare mediumtemperatuur

- het onttrekkingspatroon gedurende het jaar (hierbij is zowel het vermogen (kW) als de jaarlijkse warmtehoeveelheid (kWh) van belang)
- de onderlinge afstand van de sondes
- de mate waarin de bodem, al dan niet actief, wordt geregenereerd
- het grondwaterpeil
- de grootte en richting van de grondwaterstroming
- de samenstelling van de grond

Dubbele U-buizen leveren 15 tot 35% meer vermogen dan enkele U-buizen. Bij horizontale systemen is de maximale onttrekking 10 - 20 W/m enkele leiding

3.5.7 Acceptatie door de markt

Voor de Nederlandse situatie wordt bodemwarmte als een van de kansrijke opties gezien.

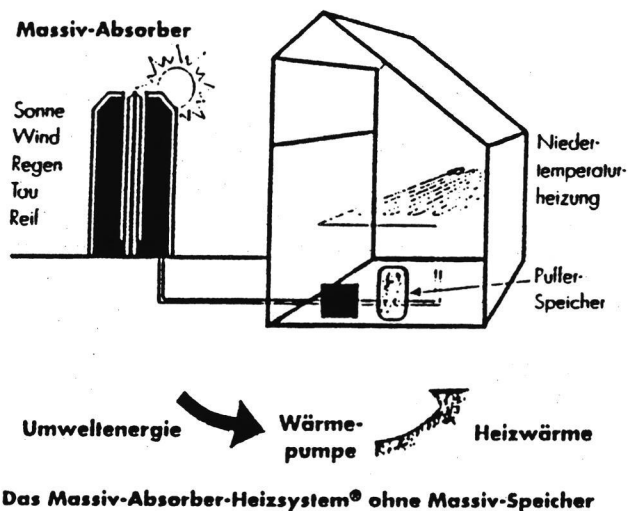
De tot nu toe relatief hoge prijs staat een brede marktintroductie in de weg. Prijsverlaging is mogelijk door verbetering van inbreng- en installatiemethoden en door toename van het aantal projecten (schaaleffect).

3.6 Zonnewarmte via massieve absorbers

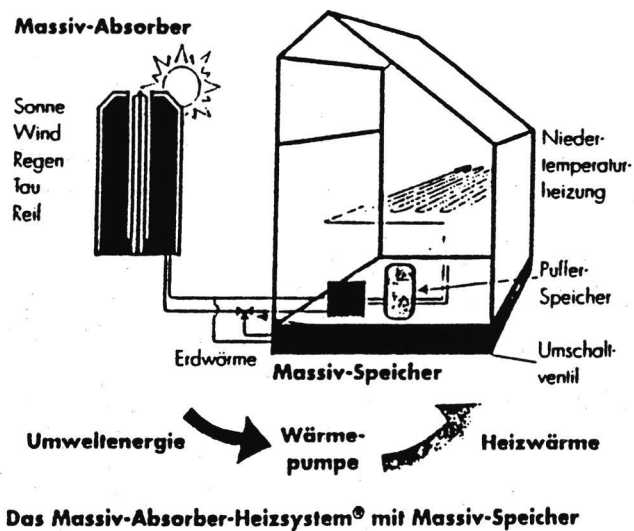
3.6.1 Algemeen

Deze warmtepompbron bestaat uit een op de zon gerichte betonconstructie [7]. Leidingen opgenomen in het door de zon opgewarmd beton onttrekken de warmte aan het beton voor de warmtepomp. Deze Massiv-Absorbers zetten zowel de geabsorbeerde zonnewarmte als warmte uit de buitenlucht om in een warmtebron voor de warmtepomp. Zonnewarmte kan echter pas goed worden benut als er sprake is van een windbeschutte opstelling van de absorber. Door de goede warmteaccumulatie vormt het beton tevens buffer aan de verdamperzijde van de warmtepomp (b.v. ten behoeve van de dag-, nacht functie). Eventueel kan een extra warmteopslag b.v. betonvloer op zand worden toegevoegd, waarbij warmte wordt onttrokken aan de onderliggende zandbodem. Zie figuren 9 en 10. De kleur en de afwerking aan de buitenzijde bepalen sterk de zonnewarmtebenutting. Daarnaast spelen samenstelling van de constructie, leidingverdeling, vloeistofstroming e.d. een belangrijke rol bij de netto te onttrekken warmte. Toepassingen worden gevonden in Duitsland, Zwitserland en Oostenrijk.

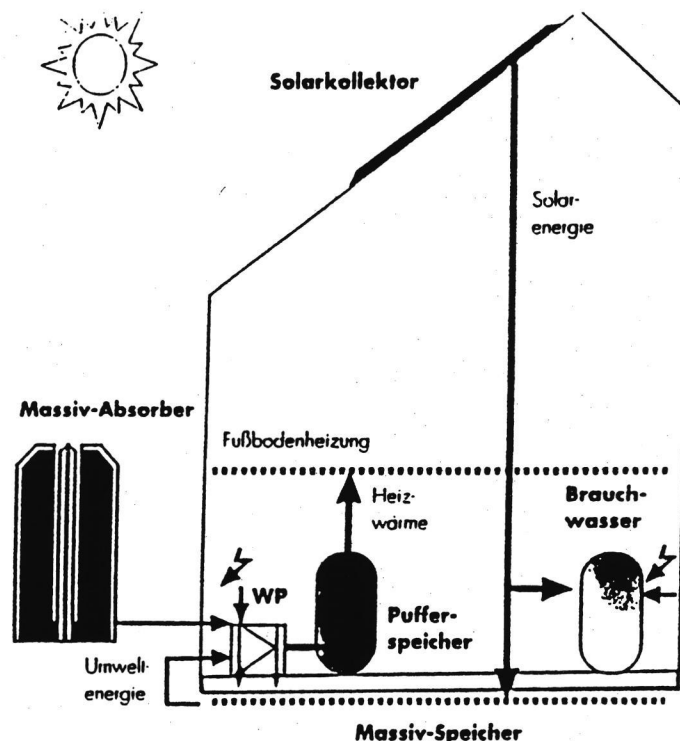
In [8] is een studie opgenomen van een omvangrijk meetprogramma voor warmtepomp-installaties met verschillende Massiv-Absorber in 4 woningen. Daarbij is de efficiency van dit type installatie gemeten. Vervolgens is met een simulatieprogramma een parameterstudie en een optimalisatie van absorber/warmtepomp combinatie uitgevoerd. Diverse toepassingen zijn daarbij geanalyseerd.



Figuur 9 *Massiv-Absorber*



Figuur 10 *Massiv-Absorber met extra warmte-opslag (beton)*



Figuur 11 Massiv-Absorber gecombineerd met zonnecollectoren

De Massiv-Absorber bestaat in verschillende uitvoeringen. Enkele voorbeelden zijn: vrijstaande betonconstructies, garagewanden, gevelwanden, daken, speciaal gevormde dak- of gevelconstructies, ombouwen, tuinmuren. In [9], [10] en [11] zijn enkele voorbeelden van deze toepassingen beschreven. Door de lage temperaturen in de winter zal in het leidingcircuit een antivries vloeistof als warmteoverdrachtmedium worden toegepast. In het algemeen zijn de aangekoppelde warmtepomp-installaties bivalent.

In combinatie met Massiv-Absorber kunnen ook zonnecollectoren worden toegepast (zie figuur 11). Zonne-energie wordt toegevoegd aan b.v. de warmteopslag aan de koude zijde, waardoor de COP van de warmtepomp wordt verhoogd, of aan de warmteopslag aan de warme zijde van de warmtepomp, waardoor de warmtepomp minder bedrijfsuren heeft. Zie ook hoofdstuk 3.8.

In tabel 6 zijn de hierna besproken eigenschappen samengevat.

3.6.2 Kosten

De kosten van Massiv-Absorbers lopen zeer uiteen. Enerzijds is dit vanwege het ontwikkelingsstadium (de prijzen zijn nog in beweging), anderzijds is dit afhankelijk van de wijze waarop de Massiv-Absorbers in de bouwkundige constructie geïntegreerd zijn. Bij een losse opstelling heeft de specifieke locatie, vanwege een eventuele fundering, ook invloed op de kosten.

3.6.3 Ruimtebeslag

Tenzij ze bouwkundig geïntegreerd zijn (als bijvoorbeeld gevelement), nemen Massiv-Absorbers door hun opslagfunctie veel ruimte in beslag. Bovendien zal de opstelling voldoende vrij moeten worden opgesteld om eventuele beschaduwning te voorkomen en om voldoende luchtcirculatie rondom te waarborgen. De componenten kunnen echter een tweede doel hebben, b.v. sieraad in de tuin, schutting, wand, dak. Begroeiing zal echter een negatieve invloed hebben op de energie-onttrekking.

3.6.4 Prestaties (kwalitatief)

Massiv-Absorbers kunnen vanwege hun bouwkundige constructie als zeer duurzaam worden beschouwd. Het temperatuurniveau van de beschikbare warmte hangt in belangrijke mate af van de zonabsorptie, de soortelijke massa, de dichtheid, de afmetingen en de soortelijke geleiding van de absorber, de isolatie, maar ook van de plaats van de warmtetransport leidingen, het aantal leidingen en de vloeistof-flow door de leidingen. De exergie van de ingestraalde zonnewarmte zal echter door de capacitieve eigenschappen van de Massiv-Absorber aanzienlijk worden verlaagd. Voor de warmteonttrekkingscapaciteit voor de warmtepomp van een gevel Massiv-Absorber van 3 x 6 m kan een waarde van 1,9 kW worden aangehouden (zie [7] en [8]). Afhankelijk van de uitvoering kan per m² een onttrekkingscapaciteit van 100 tot 150 W worden aangehouden. Eventueel kan de Massiv-Absorber worden uitgebreid met een betonlaag (incl. leidingen) onder de woning. Dit deel zal enige warmte onttrekken aan de grond; aan de bovenzijde moet de absorber goed worden geïsoleerd, om thermische kortsluiting en koude bruggen naar de woning te voorkomen. De temperatuur van de absorber varieert van +70 tot -10 °C (zomer/winter).

Door het toevoegen van zonnecollectoren kan regeneratie van de absorber plaats vinden, waardoor de efficiency van de warmtepomp wordt verbeterd.

3.6.5 Operationele aspecten

Massiv-Absorbers hebben door hun massatraagheid een ander regelgedrag tot gevolg dan de snel reagerende energiedaken en zonnecollectoren. Bij Massiv-Absorber is de regeling eenvoudig omdat het hier gaat om een warmtelevering met een langzaam variërend temperatuurniveau.

3.6.6 Randvoorwaarden

Massiv-Absorbers kunnen vrijstaand opgesteld worden (bij voorkeur op een windluwe plaats), ze kunnen ook als bijvoorbeeld gevelelement worden opgenomen in de bouwkundige constructie.

3.6.7 Acceptatie door de markt

Massiv-Absorber zijn bekend in de Duitse, Zwitserse en Oostenrijkse markt, hiervoor is voorzover nu bekend slechts één Duitse Fabrikant/leverancier [7]. In Nederland is deze toepassing tamelijk onbekend. De acceptatie van dit type warmte-onttrekking moet dan ook nog als nihil worden beschouwd.

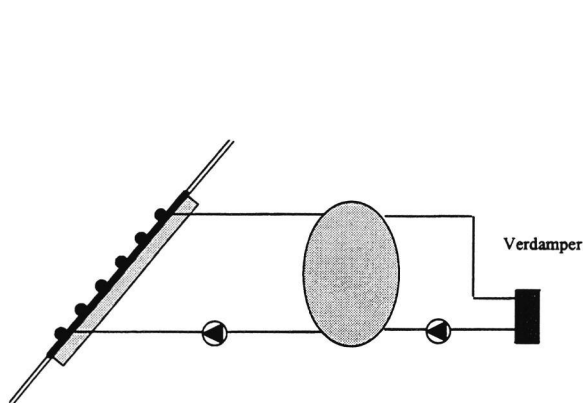
3.7 Zonnewarmte via energiedaken

3.7.1 Algemeen

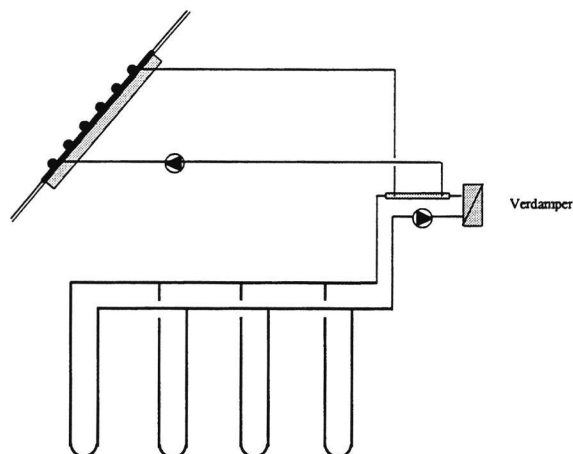
Energiedaken bestaan meestal uit metalen platen die georiënteerd zijn op de zon en die direct in contact staan met de buitenlucht. Door de kanalen die in de platen zijn opgenomen stroomt een antivriesvloeistof waarmee de zonnewarmte wordt afgevoerd en (afhankelijk van de temperatuur van vloeistof en buitenlucht) energie aan de buitenlucht wordt onttrokken ten behoeve van de verdamper van de warmtepomp. Het energiedak is dus vergelijkbaar met een zonnecollector, echter de glasafdekking aan de voorzijde en de bakconstructie ontbreken (eenzijdige beluchting). Vaak ontbreekt ook de isolatie aan de achterzijde. Dan staat de absorberplaat ook aan de achterzijde in contact met de buitenlucht (tweezijdige beluchting) [12, 13]. Voorbeelden zijn gegeven in [12] en [13]. Het energiedakcircuit kan ook als direct verdampercircuit fungeren [13]. In figuur 12 is een systeemconcept weergegeven.

In recente (hernieuwde) ontwikkeling is een systeem waarbij de retourlucht van de woning langs de absorberplaat wordt gevoerd [14]

Door de fluctuerende warmtelevering uit de bron is een 'koude'buffer (verdamperszijde) gewenst. De warmtepomp kan door warmte-onttrekking de temperatuur in de koude buffer aanzienlijk doen verlagen, zodat ijs kan ontstaan. Bij deze temperaturen verkrijgt een energiedak een hogere energieopbrengst.



Figuur 12a Energiedak met buffer.



Figuur 12b Energiedak met bodemsysteem.

3.7.2 Kosten

De kosten van energiedaken zijn relatief laag, immers de constructie is zeer eenvoudig. De belangrijkste eisen die aan energiedaken worden gesteld zijn:

- in het geval van dak- of gevelintegratie: traditionele dak- en gevel-eigenschappen als regendichtheid, veiligheid, weersbestendigheid, corrosie enz.
- vrijstaande constructie: windbelasting, corrosie enz.

De kosten van een energiedak variëren globaal van f 200,-- tot f 400,--/m².

3.7.3 Ruimtebeslag

Energiedaken bestaan in diverse uitvoeringen. In het geval van dak- of gevelintegratie is er nauwelijks sprake van ruimtebeslag. Bij een vrijstaande constructie is er wel sprake van ruimtebeslag. In dit geval zijn energiedaken b.v. opgesteld op platte daken of op bouwconstructies. Energiedakpanelen kunnen shedgewijs worden opgesteld, waarbij voldoende afstand moet worden gehouden i.v.m. beschaduwing.

3.7.4 Prestaties (kwalitatief)

Energiedaken zijn zeer eenvoudige, meest installatietechnische componenten. Doordat zij voortdurend aan de buitenlucht aan alle klimaattypen zijn blootgesteld worden er hoge eisen gesteld aan de duurzaamheid. Er zijn van de warmtepompinstallaties uit de jaren tachtig dan ook relatief veel installaties ontmanteld doordat de energiedaken in bijzondere mate waren gecorrodeerd [15]. De uitvoering is nogal verschillend. Energiedaken kunnen enkelzijdig belucht zijn (voorzijde) of

dubbelzijdig. Energiedaken kunnen ook deel uitmaken van de gebouwhuid. De te behalen capaciteit verschilt dan ook sterk. Bij situaties zonder opvallende zonnestraling kan de onttrekking 100 tot 200 W/m² bedragen, met zonnestraling kan de onttrekking tot wel 800 W/m² oplopen. De werkelijk in de praktijk haalbare opbrengst hangt onder meer af van de warmtevraag, de dimensionering van de componenten en de temperatuur condities en ligt in de orde van zo'n 200 kWh/m² energiedak op jaarbasis bij directe warmtebenutting. Als warmtepompbron in combinatie met een bodemsysteem kan de jaaropbrengst ca. 600 kWh/m² zijn. Deze waarde is zeer sterk afhankelijk van de mediumtemperatuur.

Het voordeel van het energiedak t.o.v. de Massiv-Absorber is dat het energiedak sneller reageert, waardoor hogere temperaturen in het vloeistofcircuit zullen optreden (hogere exergiewaarde). Bovendien kan 's nachts het energiedak worden uitgeschakeld zodat geen afkoeling van de warmte-opslag aan de koude zijde kan optreden.

Bij een energiedak kan ook lucht als warmtetransportmedium worden gebruikt. Door de zon opgewarmde buitenlucht kan via een warmtewisselaar worden toegevoerd aan de warmtepomp. Hier treden dezelfde temperaturen op als bij de vloeistof-energiedaken. Door de warmtewisselaar zal echter aan de warmtepomp een iets lagere temperatuur worden aangeboden.

3.7.5 Operationele aspecten

Energiedaken hebben door de dubbele benuttingsfunctie (zonnewarmte en buitenluchtwarmte) een geheel ander regelgedrag dan zonnecollectoren (alleen zonnewarmtebenutting). De regeling bij energiedaken is ingewikkelder omdat juist de combinatie van zonnewarmte en buitenluchtwarmte tot een bepaalde warmte(bron)capaciteit leiden. Het is van belang om juist op basis van de eigenschappen van elke onttrekkingsbron de regelcriteria samen met het hydraulisch ontwerp (debiet) te optimaliseren. Hierbij behoort ook de samenstelling van of het type warmtetransportmedium. Zo zal bij warmte-onttrekking onder 0°C een antivriesvloeistof in plaats van water moeten worden gebruikt, maar zal ook de viscositeit van het medium niet te hoog mogen zijn om toch een voldoende warmte-overdracht te behouden.

3.7.6 Randvoorwaarden

De energiedaken moeten vrij staan opgesteld, niet worden beschaduwd en op het zuiden worden georiënteerd.

3.7.7 Acceptatie door de markt

Energiedaken zijn in Nederland bekend geweest in de jaren tachtig, vooral doordat er vele inspanningen in Duitsland op dit gebied waren. Op dit moment is er weinig bekend over nieuwe toepassingen (ook in Duitsland). Van deze toepassing is dan ook weinig acceptatie in de markt aanwezig. Energiedaken zouden een product kunnen zijn van leveranciers van zonnecollectoren. In Nederland is mede gezien de overheid- en nutsbedrijf-inspanningen een versterkte vraag naar de realisatie van zonneboilers. Hierdoor is de interesse voor de fabricage van de veel goedkopere, ongesubsidieerde energiedaken vanuit de zonne-energiesector nihil.

3.8 Zonnecollectoren

3.8.1 Algemeen

Zonnecollectoren zijn in principe ontworpen om op een relatief hoog temperatuur-niveau warmte te leveren (bijv. t.b.v. (voorverwarming van) warm tapwater).

In vergelijking met een energiedak is een zonnecollector geïsoleerd (achterzijde en zijkanten) en aan de voorzijde voorzien van een zo goed mogelijk lichtdoorlatende (glas-)plaat. Door deze constructie is het rendement van de zonnecollector t.o.v. een energiedak minder afhankelijk van het verschil tussen buitentemperatuur en medium temperatuur. Dit effect werkt anderzijds ook in het nadeel van de collector wanneer de buitenluchttemperatuur hoger is dan de medium temperatuur; ten opzichte van een energiedak kan dan minder warmte aan de buitenlucht worden onttrokken.

Wanneer het temperatuurverschil tussen medium en buitenlucht klein is, zal het rendement van een zonnecollector iets lager zijn dan dat van een energiedak, omdat de glasplaat een deel (10-20 %) van het zonlicht reflecteert.

Collectoren kunnen fabrieksmatig worden vervaardigd maar kunnen ook op de bouw worden samengesteld. De fabrieksmatig vervaardigde collectoren voldoen aan nationale, EG (CEN) of internationale (ISO) normen.

Zonnecollectoren met lucht als warmtetransportmedium worden in Nederland nauwelijks fabrieksmatig op de markt gebracht, hoewel dit in het verleden wel het geval was. Toepassingen zijn echter in de bouw wel aanwezig op basis van architectonische ontwerpen.

Uitvoeringsvormen

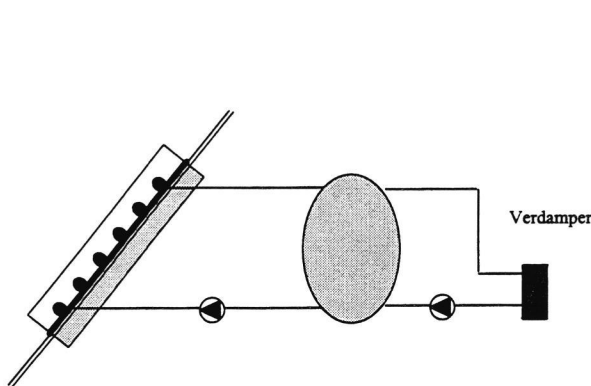
– Luchtcollectoren

In vergelijking met de vloeistofcollectoren worden luchtcollectoren slechts door enkele fabrikanten geleverd [17]. De energieprestatie behoeft slechts weinig onder te doen voor vloeistofcollectoren. Het voordeel van een lucht-

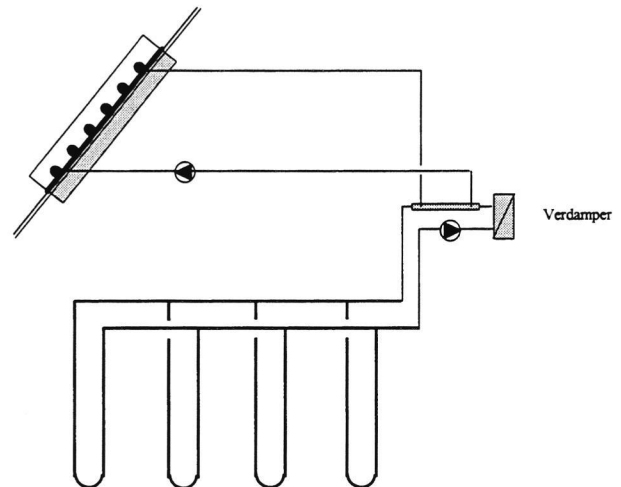
gekoelde collector is dat er geen bevroeringsproblemen zijn. Nadelen zijn echter dat wanneer vloeistof moet worden verwarmd b.v. bij ruimteverwarming en bij tapwaterverwarming, maar ook bij warmte-opslag in water, dat door de benodigde lucht-water warmtewisselaar de energieprestatie wordt verlaagd. In principe gelden, inclusief de eventuele warmtewisselaars, dezelfde systeemconcepten als bij vloeistofcollectoren en energiedaken.

– *Zonnecollectoren in combinatie met andere warmtebronnen*

Zonnecollectoren kunnen ook worden toegepast in combinatie met bijvoorbeeld warmtebenutting uit afgevoerde lucht of met bodemwarmtebenutting [15, 16, 19]. Vaak wordt dan eerst de zonnewarmte (bij de laagst optredende temperatuur) benut en vervolgens de warmte uit de andere warmtebronnen. De combinatie van (goedkope) collectoren met bodemwarmte-onttrekking is interessant, omdat hierbij de zon de regeneratie van de bodem kan verzorgen; met name bij VINEX-locaties omdat daar bodemwarmte-onttrekking kritisch wordt bij een hoge toepassingsdichtheid van warmtepompen [3]. In figuur 13 is een voorbeeld van een systeemconcept gegeven.



Figuur 13a Zonnecollector met buffer.



Figuur 13b Zonnecollector met bodemsysteem.

– *Combinatie met directe warmtelevering*

Omdat zonnecollectoren gemaakt zijn om hoge temperaturen te leveren is het mogelijk om, bij voldoende hoge zoninstraling, ook rechtstreeks warmte aan het afnamesysteem te leveren.

De zonnecollector fungeert dan niet meer als warmtepompbron maar als directe leverancier van warmte. Enerzijds maakt deze koppeling het totale systeem regeltechnisch moeilijk bestuurbaar, anderzijds komt in deze situatie de rentabiliteit van óf de zonnecollector óf van de warmtepomp in het geding.

– *Zonnewarmtepompboilers*

Door toevoeging van zonnecollectoren aan een conventionele warmtepompboiler kan m.b.v. zonnewarmte het tapwater worden voorverwarmd [13], [18]. De warmtepomp die warmte onttrekt aan de retourlucht zal voor de naverwarming zorgen.

Door de toevoeging van zonnewarmte zal het energiegebruik voor warm tapwater minder worden. De warmte-opslag zal echter moeten worden vergroot en de COP van de warmtepomp wordt lager vanwege de hogere gemiddelde tapwatertemperatuur. Ook hier geldt het rentabiliteits-aspect van twee warmteleveranciers die elkaar economisch “beconcurreren”.

3.8.2 Kosten

De kosten van voor standaardcollectoren (geschikt voor directe benutting van zonnewarmte) bedragen f 500-600 per m².

De kosten voor een luchtcollectorsysteem zijn hoger vanwege een lagere serie-grootte, minder concurrentie en de toevoeging van luchtkanalen.

3.8.3 Ruimtebeslag

Zonnecollectoren zijn aanzienlijk kleiner van afmeting dan massieve absorbers. Er zijn diverse uitvoeringen. In het geval van dak- of gevelintegratie is er sprake van ruimtebeslag in de orde van 10 cm dikke panelen. Bij een vrijstaande constructie is er wel sprake van ruimtebeslag. Zonnecollectoren worden dan b.v. opgesteld op platte daken of op bouwconstructies. De panelen kunnen shedgewijs worden opgesteld, waarbij met voldoende afstand (beschaduwning) moet worden rekening gehouden. Bij platdakopstelling zijn ondersteuningsconstructies benodigd.

In combinatie met bodemwarmteonttrekking is voor volledige regeneratie 8 à 12 m² collector nodig (uitgaande van 24 GJ/a bron warmtevraag).

3.8.4 Prestaties (kwalitatief)

Van zonnewarmtecollectoren is door de wijdverbreide toepassing in de laatste jaren een aanzienlijke ervaring opgedaan. De duurzaamheid mag langer dan 20 jaar worden verondersteld. Zowel de kwalitatieve als de kwantitatieve prestaties zijn aanzienlijk verbeterd en er is een veelheid aan marktproducten. Het verschil in capaciteiten varieert niet veel per product. De capaciteiten liggen tussen de 100 en 800 W/m², echter zonnecollectoren benutten in tegenstelling tot energiedaken voornamelijk zonnewarmte. De warmte-opbrengst is bij zonnecollectoren 400 tot 500 kWh/m², deze waarde geldt echter bij gebruik voor directe warmtelevering. Bij toepassing als warmtepompbron is systeemtemperatuur lager en kan de opbrengst tot ruim 700 kWh/m² oplopen. Het temperatuurniveau van het uitgaande collectormedium varieert tussen de 10 °C tot wel 90 °C (met begrenzing). Voor de warmtepomp-verdamperzijde levert deze hoge temperatuur problemen op. Een deel-oplossing hiervoor kan gevonden worden in het vergroten van het debiet door de collector, daarnaast dient buffering van zonnewarmte plaats te vinden (bijvoorbeeld in de bodem).

Bij luchtcollectoren treden dezelfde temperaturen op als bij de vloeistof-zonnecollectoren. Door de warmtewisselaar zal echter aan de warmtepomp een iets lagere temperatuur worden aangeboden. De efficiency zal ca. 20 % lager zijn dan bij vloeistof zonnecollectoren.

3.8.5 Operationele aspecten

Van zonnecollectoren is de regeling eenvoudig en tevens goed genoeg bekend door de opgedane ervaringen in zonnewarmtesystemen, t.w. een temperatuurverschilregeling met maximumtemperatuurbeveiliging en een constant vloeistofdebiet.

3.8.6 Randvoorwaarden

Hoge temperaturen vanuit het collectorcircuit naar de verdamper moeten worden voorkomen.

De collectoren mogen niet worden beschaduwd en moeten op het zuiden worden georiënteerd.

Vanwege het onvoorspelbare aanbod van zonnewarmte is een opslagsysteem noodzakelijk; bij combinatie met bodemwarmte kan de bodem als buffer fungeren.

3.8.7 Acceptatie door de markt

Zonnecollectoren worden in Nederland veel toegepast voor o.a. zonneboilers. Weinigen leggen echter op dit moment een verband tussen collectoren en warmtepomp.

Toch kan zonnewarmte wel degelijk een rol spelen bij integratie met andere bron-systemen. Het meeste voor de hand liggend is de combinatie met bodemwarmte-ontrekking omdat dan tevens een opslagsysteem beschikbaar is.

4. Overzicht bronsystemen

Tabel 4 Kosten niet-zongerelateerde bronnen.

	Kosten per woning	Ontwikkelpotentieel t.a.v. kostprijsverlaging
Buitenlucht	ca. 2000	--
Ventilatielucht	vrijwel nihil	--
Grondwater		
• individueel	4000 - 10000	+/-
• collectief	1000 - 3000	-
Bodem-horizontaal	ca. 6000	+
Bodem-verticaal	6000 - 15000	++

Bovenstaand overzicht dient met enige voorzichtigheid gebruikt te worden, omdat de vermelde kosten niet zonder meer vergelijkbaar zijn. De verschillende brontypen verkeren namelijk elk in een ander stadium van ontwikkeling (zie de tweede kolom). De onttrekkingssystemen voor buitenlucht zijn vrijwel uitontwikkeld, zodat daar nauwelijks verdere kostprijsverlaging is te verwachten. Het tegenovergestelde is het geval bij verticale bodemwarmtewisselaars, met name voor wat betreft de inbrengtechnieken.

De overige aspecten zijn kwalitatief weergegeven in tabel 5.

Tabel 5 Overige aspecten niet-zongerelateerde bronnen.

	Ruimte- beslag	Prestaties	Operationele aspecten	Randvoorwaarden/ aandachtspunten	Markt- acceptatie
Buitenlucht	+	-	-	geluid	-
Ventilatielucht	+	+/-	+	mechanische vent.	++
Grondwater	++	++	-	luchttoetreding	+/-
Bodem-horizontaal	-	+	+	beschikbaar opp.	+/-
Bodem-verticaal	+/-	+	+	mediumtemperatuur	+

+ = gunstig

- = ongunstig

Bovenstaande tabel dient in samenhang met de omschrijving van de genoemde aspecten in hoofdstuk 3 te worden gezien.

In tabel 6 is een overzicht van de zongerelateerde bronsystemen gegeven.

Tabel 6 Zongerelateerde bronnen.

	Kosten/m ²	Ruimte	Prestaties (kwalitatief)	Operationele aspecten	Rand- voor- waarden	Markt- acceptatie
Massiv-Absorber	zeer verschillend	geïntegreerd of bouw- k. element	++	goed regel- baar	locatie, gewicht	niet in Nederland
Energiedaken		geïntegreerd	+	behoeft nader onderzoek, medium		onbekend
- eenzijdig	fl. 400,-	of shed- opstelling				
- tweezijdig	fl. 200,-					
Zonne-collectoren (voor directe benutting)	fl. 500,- tot fl. 600,-	geïntegreerd of shed- opstelling	++	goed regel- baar		goed

5. Conclusies en aanbevelingen

De hier beschreven inventarisatie van warmtepompbronnen is op belangrijke punten kwalitatief van aard. Zelfs waar harde kostprijsinformatie werd verkregen wordt deze zacht, wanneer de bijbehorende systeemprestatie niet hard is. Niettemin is het mogelijk in een aantal conclusies een eerste vergelijking tussen de verschillende warmtebronnen voor warmtepompen te maken. Een vervolgonderzoek kan, op nog nader vast te stellen onderdelen, gericht worden op een verdere onderbouwing en verificatie van deze conclusies. Samenvattend kunnen de volgende vergelijkende conclusies uit het onderzoek afgeleid worden.

1. **Ventilatielucht** is niet geschikt als warmtebron voor warmtepompen voor ruimteverwarming. Alleen de ventilatieverliezen kunnen ermee worden gecompenseerd. Onttrekt men meer warmte dan vindt een zodanige uitkoeling plaats (mede ten gevolge van het lage debiet), dat de temperatuur van de bron lager wordt dan de buitenluchttemperatuur. Buitenlucht zou in zo'n geval dus beter zijn.

De geschiktheid van ventilatielucht als warmtebron *voor ruimteverwarming* wordt vaak beargumenteerd vanuit hoog ingeschatte bijdragen van passieve zonne-energie en interne warmtelast. Jaarrond zou dat best kunnen kloppen, maar men heeft hier te maken met random bijdragen die niet of nauwelijks geregeld kunnen worden: momentaan veroorzaakt dat dus, eveneens random, warmtetekorten en warmte-overlast. Een en ander is uitvoering in [5] beschreven aan de hand van het KEMA-METRO warmtepomp-concept. Een tweede argument wat men vaak hoort is het grote succes van dit principe in Zweden. Dit wordt verklaard door het feit dat daar, met elektrische weerstandsverwarming als referentie, 30% elektrische bijstook acceptabel is. Dat is in Nederland niet het geval.

2. **Buitenlucht versus bodemwarmte.** Buitenlucht blijft lastig te beoordelen. De beschikbaarheid overal is een sterk punt, maar qua temperaturen behoort deze bron tot de minst aantrekkelijke. De afweging zal dus op economische gronden moeten plaatsvinden, maar dan rijst het probleem, dat de alternatieven stuk voor stuk minder uitontwikkeld zijn, en dat juist in die uitontwikkeling nog van alles met de kostprijs kan gebeuren. Eind jaren '70, begin jaren '80 werd buitenlucht vrij algemeen als de warmtebron voor warmtepompen beschouwd en met name in Duitsland werden de meeste systemen ermee uitgerust. Gezien de thermodynamische nadelen (lage temperatuur en de berijpings- en ontdooiproblematiek) ontstond in die tijd behoefte aan alternatieven. Eerst waren dat horizontale bodemwarmtewisselaars, daarna kwamen de verticale. Monitoring van projecten die al in bedrijf zijn zal duidelijk maken of met deze systemen de verwachte doorbraak bereikt kan worden. Nu langzamerhand eensgezindheid ontstaat over de aanpak van de dimensioneringsvraagstukken, is vooral de prijsstelling bepalend geworden. Niet zozeer de materiaalkosten per meter zijn

hierbij belangrijk als wel de kosten om de systemen te installeren. Tot nu toe worden algemene boor- en andere technieken gebruikt die niet zijn toegespitst op een specifiek programma van eisen voor het aanbrengen van bodemwarmtewisselaars. Zodra de markt zo aantrekkelijk wordt dat specifiek geoptimaliseerde aanbrengtechnieken worden ontwikkeld kan gesproken worden over een betrouwbare prijsindicatie die vergelijking met bijvoorbeeld buitenlucht mogelijk maakt. Onze intuïtie zegt ons dat, zeker voor nieuwbouwprojecten waar bodemwarmtewisselaars en massa kunnen worden aangebracht, de techniek concurrerend kan zijn ten opzichte van buitenlucht.

We willen met nadruk stellen dat wanneer, zoals meer en meer gebruikelijk wordt, bodemwarmtewisselaars ontworpen worden op het criterium “geen permafrost in de bodem”, de prestaties van de warmtepomp vergelijkbaar worden met de situatie waarin buitenlucht als bron wordt gebruikt.

3. **Grondwater** is energetisch zeer aantrekkelijk. Wanneer echter een retourput verplicht wordt gesteld is de techniek voor individuele toepassing duurder dan een bodemwarmtewisselaar. Aantrekkelijk zou kunnen zijn om bij dicht bij elkaar staande woningen voor de *individuele* warmtepompen een **collectieve** bron te gebruiken die via niet-geïsoleerde leidingen gedistribueerd kan worden. Voor deze bron kan grondwater goedkoper zijn dan bodemwarmte, omdat de aanvoer- en retourput per kW goedkoper worden en omdat de benodigde beveiliging tegen verontreiniging van grondwater en tegen luchtinlek goedkoper en beter grootschalig kan worden opgelost.

4. **Zonne-energie** is aantrekkelijk als bron voor warmtepompen wanneer de (meer)investering laag is bij een grote lage-temperatuur warmtelevering. Het **energiedak** lijkt daarbij voorsnog de meest aantrekkelijke uitvoeringsvorm, tenminste indien dit goedkoop is (hetgeen mogelijk is door een combinatie van functies: water- en winddichtheid, geluids- en thermische isolatie en eventueel voorverwarmen van buitenlucht) en de mediumtemperatuur inderdaad significant boven de buitenluchttemperatuur wordt verhoogd.

Zonnewarmte kan worden benut voor regeneratie van de bodem. De bodem kan tevens de vereiste bufferfunctie voor zonnewarmte verzorgen. Door regeneratie kan de benodigde lengte aan bodemwarmtewisselaars lager zijn (de mate waarin is afhankelijk van de situatie). Met name voor VINEX-locaties waar gekozen wordt voor een hoge toepassingsdichtheid van warmtepompen (en bodemwarmteontrekking), zal regeneratie m.b.v. zonnecollectoren een interessante optie zijn.

Voor volledige regeneratie van de bodem bij een woning met een warmtebehoefte van 32 GJ/a is ca. 8 à 12 m² collectoroppervlak vereist.

Zodra men in de verleiding komt om voor een hoge (en dure) kwaliteit zonnecollector te kiezen (waarmee in hoofdzaak direct bruikbare warmte kan worden geleverd), ontstaat een systeem waar de warmtepomp een hulpstookstelsel wordt voor de zonne-collector of omgekeerd. Daarvoor zijn beide te duur en in

dat geval hebben we te maken met het probleem van een verminderde meeropbrengst.

5. De onbekendheid m.b.t. de mogelijkheden, uitvoering, energieprestaties van energiedaken en zonnecollectoren in combinatie met warmtepompen is een belangrijke bottleneck voor de verdere introductie van dit type warmtebronnen voor warmtepompen.

6. Referenties

- [1] Traversari, A.A.L. , P.A. Oostendorp en C.P.J.M. Geelen
Aanbevelingen voor warmtepompsysteemontwerpen - Eindrapport van het project "Adviseren van adviseurs"
TNO-rapport R98-447, november 1998
- [2] Geelen, C.P.J.M.,
Berekeningen aan verticale bodemwarmtewisselaars voor het plassegebied in Reeuwijk
TNO-rapport R98-209, juni 1998
- [3] Geelen, C.P.J.M. en M. Verwoerd
Bodemtixberekeningen voor een fictieve VINEX-locatie,
TNO-rapport R99-083, maart 1999
- [4] Snijders, A.L., R.G.A. Wennekes en A.J. van Gelder
Vertikale bodemwarmtewisselaars voor warmtepompen- deel 2,
Verwarming en Ventilatie, februari 1998
- [5] Wit, J.B. en A.A.L. Traversari
Toepassing van elektrisch gedreven warmtepompen voor integrale en gebufferde verwarming en warm tapwatervoorziening van individueel verwarmde VINEX-woningen
TNO-rapport R95-292, oktober 1995
- [6] Geelen, C.P.J.M. en P.A. Oostendorp
Wärmequellen für Wärmepumpen in sanierten Heizungssystemen
FKW-seminar 19, 30 oktober 1997, Hannover
- [7] Massiv-Absorber, die Wärmequelle für die Wärmepumpe.
Handbuch Sonnenheiztechnik, Betonbau.
- [8] Jastrow, R.
Optimierung eines Wärmepumpen-Heizsystems mit Betonabsorbern.
VDI Fortschritt-Berichte nr. 104, mei 1997.
- [9] Massiv-Absorber Heizsysteme. Referenz-anlagen.
Initiativkreis Wärmepumpe Munchen.
- [10] Jastrow, R.
Bausubstanz als Wärmequelle für Wärmepumpen.
Solartec, september 1997, Würzburg.

- [11] Ven, H.v.d.
Dutch study heat pump promotion abroad.
IEA Heat pump centre no 2/1997.
- [12] Rekstad, J.
Olympic Solar Energy in Lillehammer.
Renewable Energy Newsletter Caddett, juni 1994.
- [13] Heat pumps utilizing the solar heat.
HPTCJ Maart 1995.
- [14] TU Eindhoven beproeft bivalente warmtepomp met energiedak.
E&M 10-97.
- [15] Brouwer, G.B. en C.P.J.M. Geelen
Inventarisatie bestaande warmtepomp-projecten en het gebruik van zonne-energie bij warmtepompen in de woningbouw.
MHP Maarn. augustus 1997.
- [16] Brouwer, G.B.
REMU Milieu balans woning, juni 1995.
- [17] Vielfalt in der Anwendung. Luftkollektoren Solarwall International.
Sonnenenergie 2/97.
- [18] Zepelin, A. von
Optimierte Solarenergienützung, Warmwasserwärmepumpen und Solarenergie.
Solartec, september 1997, Würzburg.
- [19] Schaap, A.B., en E.E. Gramsbergen
Zonnecollector en Warmtepomp voor de minimum energiewoning.
Nederlandse Duurzame Energie Conferentie, september 1997, Ede.

7. Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

NOVEM

Namen en functies van de projectmedewerkers:

C.P.J.M. Geelen

P.A. Oostendorp

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

Brouwer Energie Consult te Apeldoorn

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

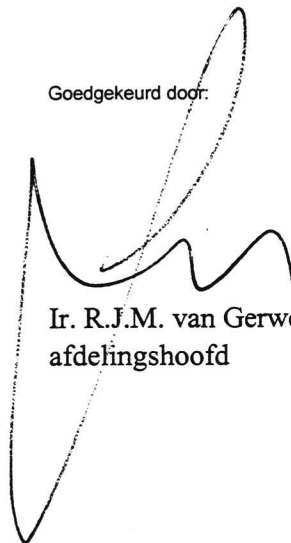
oktober 1997 - december 1998

Ondertekening:



Ir. C.P.J.M. Geelen
projectleider

Goedgekeurd door:



Ir. R.J.M. van Gerwen
afdelingshoofd

Bijlage 1 Bijzondere situaties en opmerkingen terzijde

1. Te allen tijde moet men bij warmtepomptoeepassingen zich goed oriënteren op bijzondere omstandigheden. Voorbeelden hiervan zijn:
 - Aanwezige bronbemalingen om het grondwaterpeil lokaal voldoende laag te houden. Dit is dus een ideale en gratis bron voor een eventuele wp-toepassing.

De noodzaak tot heien geeft ook een mogelijkheid om functies kostenbesparend te combineren. Er zijn heipalen in ontwikkeling met ingegoten slangen. Een restrictie is dat de bodem rond de palen niet mag bevriezen, omdat door het afwisselend bevriezen en ontdooien de palen hun draagvermogen verliezen.

Beschikbaarheid van oppervlaktewater. Een mooi voorbeeld hiervan is het Provinciehuis in Maastricht, waar Maaswater wordt gebruikt als bron voor een warmtepomp. De industriële lozingen in Frankrijk en België zorgen voor een watertemperatuur die niet onder de 17 °C schijnt te komen.
2. Wanneer goede en goedkope absorptiewarmtepompen beschikbaar komen voor individuele woningverwarming, die op zolder opgesteld moeten worden naast of in plaats van de bestaande CV-ketel kan het aantrekkelijk zijn om deze als compacte unit uit te voeren, waarbij de verdamper door een opening in het dak naar buiten steekt. Daarmee is bovendien de ventilatie naar buiten veiliggesteld (belangrijk bij systemen met ammoniak). Het voordeel is hier gelegen in het feit dat buitenlucht bij zolderopstelling de gemakkelijkst bereikbare bron is. Bovendien vergen gasgestookte warmtepompen slechts kleine broncapaciteiten (50% in vergelijking met elektrische warmtepompen), zodat de kosten relatief minder zwaar wegen. Vanwege de kleinere broncapaciteit, zou hier ventilatielucht, anders dan bij compressiewarmtepompen, wel een interessante bron voor ruimteverwarming kunnen zijn.
3. We moeten niet te optimistisch zijn over de mogelijkheden om met eenvoudige middelen in de zomer voor koeling te zorgen. Bij koeling via het vloer- of wandverwarmingssysteem mag nooit condensatie op vloer (gevaar) of wand (schade) optreden. Dit beperkt dus de koelcapaciteit. Bovendien levert koeling zonder ontvochtiging slechts een beperkte verbetering van het comfort. Daarom is het in dit geval beter om van "topkoeling" te spreken, dat wil zeggen het creëren van een vast temperatuurverschil tussen buiten en binnen van bijvoorbeeld 5 °C. Voor een significante regeneratie zal waarschijnlijk altijd een additionele eenvoudige zonnecollector nodig zijn.
4. In Duitsland kwam 15 jaar geleden een aardig systeem op de markt; de conische bodemwarmtewisselaar. Vanuit een put in de vorm van een voldoende zware betonnen ring, worden door een machine die, om een verticale as draaiend, verschillende posities in kan nemen, warmtewisselaar-sondes onder een instelbare hoek de bodem ingedreven. Daarmee ontstond een conische bundel met sondes, waarvan met de koppen dicht bij elkaar zitten in één put, zodat de verbindingen kort zijn en gemakkelijk kunnen worden aangelegd.