

TNO-rapport

2003-DEG-R041

**Effectieve combinaties van actieve zonne-energie
en warmtepompen**

Datum 10 december 2003

Auteur(s) ir. H.H.R. Spoorenberg (TNO Bouw)
ing. A.A.L. Traversari, MBA (TNO MEP)

Aantal pagina's 59
Aantal bijlagen 5

Opdrachtgever Novem
dhr. ing. H.J. Rienks

Novem contractno. 2020-01-13-12-003

Projectleider ir. H.H.R. Spoorenberg

Projectnummer 006.20123/01.01

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 onderzoeksopdrachten 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.

Samenvatting

In dit onderzoek zijn verwarmingsconcepten, waarin warmtepompen en actieve zonne-energie gecombineerd worden, beoordeeld op kosten- en energetische effectiviteit. Het gaat om systemen die afgedekte en/of onafgedekte collectoren, elektrische of gasgestookte warmtepompen en uiteenlopende energieopslagmethoden, waaronder met name faseovergangsmaterialen, bevatten. Vanwege de grote onderlinge verschillen in de utiliteitsbouw is dit onderzoek in de eerste plaats gericht op de woningbouw.

Er is een inventarisatie gemaakt van bestaande systemen die gebruik maken van een warmtepomp met de zon als warmtebron. Voor ieder van de verschillende basisconcepten, waarin deze systemen zijn in te delen, is een computermodel opgesteld, waarmee simulaties mogelijk zijn. Hiermee zijn de concepten energetisch beoordeeld. Tevens zijn de systemen getoetst aan andere beoordelingscriteria, zoals ruimtebeslag en benodigde bouwkundige aanpassingen, vanuit het oogpunt van verschillende gebruikersgroepen, te weten particulieren, woningbouwcorporaties, projectontwikkelaars en dienstverleners. Het resultaat van deze modelleringen zijn in de eerste plaats handvaten, waarop de fabrikant keuzen kan baseren, bijvoorbeeld met betrekking tot de dimensionering van systeemcomponenten ten opzichte van elkaar. In de tweede plaats levert het een totaaloordeel over de systemen, zodat deze met elkaar kunnen worden vergeleken.

Systemen, waarbij een energiedak direct de bron van de warmtepomp vormt, lijken het meest interessant. Deze systemen zijn qua investering verreweg het goedkoopst, omdat dure opslagmethoden, zoals de bodem of m.b.v. faseovergangsmaterialen, achterwege kunnen blijven. Qua energiekosten scoren ze redelijk. Zelfs als de investeringskosten met 50% toenemen en de energiekosten (gebruik) met 25%, is dit systeem aantrekkelijker dan de overig beschouwde systemen. Eén van de belangrijkste parameters waar dit systeem goed op scoort, betreft de bouwkundige aanpassingen die bij de implementatie noodzakelijk zijn.

Systemen die een combinatie vormen van zonneboilerbedrijf in de zomer en warmtepompbedrijf in de winter scoren qua energiekosten het gunstigst. Qua investering scoren ze niet veel slechter dan eerder genoemde systemen, waar een energiedak direct de bron vormt van de warmtepomp.

Systemen, waarbij een zonnecollector of energiedak een (faseovergangsmateriaal) opslag voedt die als bron dient voor de warmtepomp, zijn verreweg het duurst. Wat bij deze systemen een grote invloed heeft is de toegestane temperatuur door het energiedak: hoe lager die mag zijn, hoe minder bijstook benodigd is. Om de bijstook onder de 5% te houden volstaat bij een elektrische warmtepomp een onafgedekte collectoroppervlakte van 25-40 m², bij een gaswarmtepomp is 12 m² ruim voldoende.

Systemen met een gasgestookte warmtepomp zijn qua energiekosten goedkoper t.o.v. systemen met een elektrische warmtepomp. Hoewel de COP lager is, is financieel gezien een hogere bijstook toegestaan. Ook kan deze met een aanmerkelijk kleinere bron toe dan een compressiewarmtepomp. De gaswarmtepomp lijkt daarmee typisch een goed systeem voor de renovatie, dat tevens de mogelijkheid biedt tot koelen.

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	5
1.1	Doel	5
1.2	Werkwijze.....	5
2	Systeemconcepten met AZE en WP	7
2.1	Componenten.....	7
2.2	Inventarisatie systeemconcepten.....	8
2.2.1	Constateringen	11
2.2.2	Knelpunten.....	11
2.3	Te beoordelen systemen.....	11
3	Energetische beoordeling	12
3.1	Uitgangspunten	12
3.2	Bijstook.....	13
3.3	Systeemmodellering.....	14
3.3.1	Energiedak voedt faseovergangsmateriaal opslag, die bron vormt van warmtepomp ...	14
3.3.2	Combinatie van warmtepompbedrijf in de winter en zonneboilerbedrijf in de zomer ..	19
3.3.3	Thermische zonne-energie als directe warmtebron voor een warmtepomp.....	22
3.4	Conclusies.....	25
4	Totaalbeoordeling	27
4.1	Beoordelingsaspecten	27
4.2	Beslismodel.....	28
4.2.1	Investeringskosten	29
4.2.2	Energie- en operationele kosten.....	30
4.2.3	Energiepremie regeling (EPR).....	30
4.2.4	Regelbaarheid per vertrek.....	31
4.2.5	Regelbaarheid	31
4.2.6	Bedieningssysteem.....	31
4.2.7	Mogelijkheid tot koeling.....	31
4.2.8	Temperatuurniveau afgiftesysteem.....	31
4.2.9	Effecten op de energieprestatie (EPN).....	32
4.2.10	Effecten op de milieuprestatie (MPN)	32
4.2.11	Benodigde bouwkundige aanpassingen	32
4.2.12	Ruimtebeslag installatie	33
4.2.13	Warmtekwaliteit	33
4.2.14	Uiterlijke aantrekkelijkheid	33
4.3	Eindbeoordeling.....	34
5	Toekomstige ontwikkelingen.....	37
5.1	Trends	37
5.2	Consequenties voor verwarmingsinstallaties	38
5.3	Vervolgonderzoek.....	38
6	Conclusies	40
7	Referenties	42

Bijlage(n)

Bijlage A	Randvoorwaarden voor de toepassing van warmtepompen	43
Bijlage B	Systeeminventarisatie	48
Bijlage C	Toekomstverkenning woningbouw en energievraag	52
Bijlage D	Spreiding van de waarden per aspect	58
Bijlage E	Beoordeling van de aspecten door de klankbordgroep	59

1 Inleiding

1.1 Doel

Sinds halverwege de jaren negentig streeft Novem naar het bevorderen van de toepassing van warmtepompen in Nederland. De overheidsdoelstelling voor het jaar 2020 ligt op niet minder dan 1.000.000 stuks; momenteel zijn het er om en nabij de 30.000. Uitgangspunt hierbij is uitdrukkelijk dat de warmtepompen worden ingepast in een optimale energie-infrastructuur. Koppeling met thermische zonne-energie is hiervoor een mogelijkheid.

Dat idee is niet nieuw: al in 1956 werd in het Amerikaanse Albuquerque een systeem gerealiseerd waar een warmtepomp zijn bronwarmte betrok van een zonnecollector [13] en ook in Nederland zijn in het verleden verschillende projecten uitgevoerd (zie paragraaf 2.3 en bijlage B). De systeemtechnologie die bij deze toepassingen hoort, is echter nog allerm minst duidelijk, niet alleen voor wat betreft de toe te passen energieopslag en -afgiftesystemen, maar zeker ook voor wat betreft de milieu-implicaties. Om die reden zijn in dit onderzoek verschillende mogelijke combinaties van actieve zonne-energie met een warmtepomp geïnventariseerd en beoordeeld op technische haalbaarheid en indicatie van prijs/prestatie verhouding, zodat duidelijk wordt welke combinaties zinvol zijn om door te zetten. Het vinden van alternatieven voor (kostbare) bodemwarmtewisselaars en –bronnen kwam hierbij met name aan de orde.

Een andere achtergrond is dat momenteel een aantal ontwikkelingen plaatsvindt op het gebied van actieve zonne-energie, in het bijzonder met betrekking tot lage temperatuur collectoren die al dan niet zijn geïntegreerd in hun omgeving, zoals energiedaken en asfaltcollectoren. Hierbij speelt geschiktheid voor warmtepomptoe passing een grote rol – de dankzij de zonnecollector of energiedak hogere inputtemperatuur van de warmtepomp verhoogt immers de COP – en gedacht wordt aan combisystemen voor ruimte- en tapwaterverwarming, zowel in woonhuizen als utiliteitsgebouwen, waarmee het gebouw tevens gekoeld kan worden. Het doel van dit project is derhalve het uitzetten van zinvolle lijnen en het bijeenbrengen van industriële partijen voor verdere ontwikkeling van de combinatie van thermische zonne-energie en warmtepompen.

Naast nieuwbouw is met name ook gekeken naar mogelijkheden voor de bestaande bouw. Wat is er bijvoorbeeld voor de (veel grotere) vervangingsmarkt te ontwikkelen? Componenten als bodemopslag, luchtverwarming en gebalanceerde ventilatie zijn daar niet of nauwelijks mogelijk; lage temperatuur verwarming echter wel, en mechanische afzuiging ook. Tevens zal de koelvraag in de zomer kleiner zijn dan in de nieuwbouw.

1.2 Werkwijze

Het onderzoek is begonnen met een studie van systeemconcepten op globaal niveau (hoofdstuk 2), resulterend in inzicht in de mogelijkheden voor combinaties van thermische zonne-energie en warmtepompen. Niet alleen de technische en financiële haalbaarheid zijn daarbij beschouwd, maar ook de mogelijkheden van industriële partners om samen te werken in de verdere ontwikkeling van het concept tot een marktrijp product.

De daadwerkelijke beoordeling van de concepten bestaat uit twee delen: allereerst een energetische modellering (hoofdstuk 3), waarmee men een trade-off analyse kan maken

tussen de groottes van de verschillende subsystemen, en er aldus achter komen wat nog verfijning behoeft. Het resultaat van deze modelleringen zijn dus vooral handvaten, waarop de ontwerper keuzen kan baseren, bijvoorbeeld met betrekking tot de grootte van systeemcomponenten.

Het tweede deel van de beoordeling (hoofdstuk 4) betreft de ‘overige aspecten’, zoals de verkoopvoorwaarden en -argumenten, met als doel om op basis van de door de bij het project betrokken partijen aangeleverde informatie inzicht te krijgen in de markt(en), waarvoor de systemen geschikt zijn. Aan het eind van dit hoofdstuk worden beide beoordelingen gecombineerd tot een gewogen eindoordeel.

De participanten in het project - hierna: de klankbordgroep - bestaan naast TNO Bouw en TNO Milieu, Energie- en Procesinnovatie, uit de bedrijven R&R Systems (energy-daken, bodemopslag), ITHO B.V. (warmtepompen, ventilatie, verwarming, airconditioning), Brinic B.V. (faseovergangsmaterialen, warmtepompen, zonneboilers), Gebr. Kooy B.V. (onafgedekte zonnecollectoren) en ZENSOLAR (afgedekte zonnecollectoren).

2 Systeemconcepten met AZE en WP

Bestaande systemen met een warmtepomp en zonnecollectoren zijn veelal combisystemen voor tapwater- en ruimteverwarming, of systemen enkel voor ruimteverwarming. Meestal kan het gebouw met deze systemen ook gekoeld worden, iets wat in de woningbouw geen overbodige luxe meer blijkt: uit onderzoek van TNO is gebleken dat een zeer groot deel van de woningen met een EPC van 1,0 of lager in de zomer al snel oververhit raakt. Koeling is dan een welkome optie als tenminste aan een aantal belangrijke randvoorwaarden wordt voldaan.

In de utiliteitsbouw ontkom je vaak niet aan mechanische koeling via de warmtepomp. In de woningbouw wordt het liefst zoveel mogelijk vrije (of top-) koeling toegepast. Hierbij is een warmtepomp overbodig: je onttrekt water met bijvoorbeeld een kleine pomp uit een bron, en dat laat je, al dan niet via een scheidingswarmtewisselaar, door de vloer- of wandverwarming stromen. Een dergelijk systeem levert een topkoeling van circa 35 W/m² [11]. Bovendien voer je op deze manier warmte af die door zoninstraling op de vloer valt, waarmee je een belangrijke oorzaak van oververhitting in de woning weghaalt. Het water mag echter niet te koud zijn in verband met condensatie.

2.1 Componenten

De beschouwde systemen bestaan tenminste uit een aantal van de volgende componenten:

Collector: afgedekt en/of onafgedekt¹. Het verschil tussen deze twee zit allereerst in de prijs (plm. € 150/m² resp. € 110/m², inclusief plaatsing) en het te bereiken temperatuurniveau (> 100°C resp. 40°C). Om een energetisch vergelijkbaar collectorsysteem te verkrijgen is bij een onafgedekte collector een grotere oppervlakte benodigd. Wel is er tevens koeling mee mogelijk en zijn ze ook 's nachts en in de winter te gebruiken, iets wat met afgedekte collectoren niet kan. Volledigheidshalve worden om warmte op te wekken voorts asfaltcollectoren gebruikt, warmteterugwinunits (WTW) van ventilatielucht en omgevingswarmtecollectoren.

Warmteopslag: hierbij wordt onderscheid gemaakt naar hoge en lage temperatuur opslag, naar korte of lange termijn en naar voelbare of latente warmte (via faseovergangsmaterialen²). Voordelen van een lage temperatuur opslag zijn dat weinig vatisolatie nodig is (in de bestaande bouw eventueel als bak onder de stoep uit te voeren) en een kleinere of onafgedekte collector mogelijk wordt.

Enige kenmerken van faseovergangsmaterialen (paraffines of zouthydraten): leverbare stolpunten zijn: 0, 7, 22, 29, 58 en 89°C. De warmtecapaciteit ligt tussen de 166 en 220 kJ/kg. 1 m³ bevat ongeveer 2500 bolletjes met een inhoud van 180 ml (doorsnede 70 mm, een kleinere doorsnede wordt exponentieel duurder). De soortelijke massa van faseovergangsmateriaal bedraagt 1,51 kg/dm³, zodat 1 m³ gevuld met bolletjes een massa van

¹ Voor de duidelijkheid zal in het vervolg van dit rapport worden gesproken over zonnecollectoren wanneer afgedekte collectoren worden bedoeld, en 'energiedaken' wanneer om het even welk type onafgedekte collectoren wordt bedoeld.

² In het Engels worden faseovergangsmaterialen aangeduid met *Phase Change Materials*, ofwel PCM's.

679,5 kg aan faseovergangsmateriaal bevat (en nog zo'n 0,55 m³ water of andere vloeistof). De prijs bedraagt ruwweg € 2 /kg. Er worden 6.000 tot 10.000 smeltcycli gegarandeerd (bij 1 cyclus/dag komt dat overeen met zo'n 15-25 jr.).

Bijstook: in aanvulling op een eventueel tekort aan warmte wordt met gas of elektrisch in bijstook voorzien. Zie ook paragraaf 3.3 voor aannamen en uitgangspunten.

Warmtepomp: elektrisch of gasgestookt (zie bijlage A voor een uitgebreide vergelijking). In principe is de elektrische compressiewarmtepomp probleemloos te vervangen door een gasgestookte absorptiewarmtepomp, maar merk op dat de bron dan een stuk kleiner kan worden. Wat betreft de praktische uitvoering zijn er evenwel enige haken en ogen: de kleinste leverbare gaswarmtepomp (van Techneco) heeft een afgegeven vermogen van 35-40 kW. Momenteel vinden er ontwikkelingen plaats, zodat gasgestookte toestellen naar verwachting op korte termijn (2-3 jaar) in voldoende mate leverbaar zijn. Het afgegeven vermogen van deze kleine absorptiewarmtepompen bedraagt circa 4 kW, waarbij gas als bijstook wordt toegepast. Deze toestellen worden primair gezien als toestellen voor de vervangingsmarkt, en bieden tevens de mogelijkheid tot koelen.

Warmteafgiftesysteem: in verband met de COP komen met name vloer- en wandverwarming in aanmerking (zeer comfortabel, echter kostbaar en ingrijpend in het bouwproces), net als koelplafonds, vergrote radiatoren en luchtverwarming. Ook kunnen betonkernactivering en regeneratie van (bodem-)opslag worden genoemd. Met de genoemde warmteafgiftesystemen kan men ook koelen.

2.2 Inventarisatie systeemconcepten

In deze paragraaf is een inventarisatie gemaakt van bestaande concepten, waarbij zonnecollectoren of energiedaken met een warmtepomp gecombineerd worden. Grofweg zijn er vijf mogelijke combinaties van thermische zonne-energie en een warmtepomp:

1. Thermische zonne-energie dient als directe warmtebron voor een compressie- of absorptiewarmtepomp; met name bij toepassing van onafgedekte warmtecollectoren.
2. Het gebruik van zonnecollectoren of energiedak voor het regenereren van de warmtebron van een warmtepomp.
3. Toepassing van zonnecollectoren als extra warmteopwekker ter aanvulling op de warmtepomp (bijv. zonneboilerbedrijf in de zomer en warmtepompbedrijf in de winter).
4. De warmtepomp wordt gebruikt voor het opwaarderen van de warmte van een zonnecollector of energiedak als de opbrengsttemperatuur te laag wordt.
5. Zonnecollectoren dienen als thermische aandrijving van een absorptiewarmtepomp. Deze uitvoering is met name interessant voor koeling. Vanwege de hoge benodigde temperatuur (90-110°C) is zon als aandrijving echter slechts gedurende een klein deel van het jaar mogelijk, en bovendien erg duur en zal in dit verband daarom niet verder worden bekeken.

De systemen zijn per concepttype samengevat in tabel 2.1 t/m 2.4. Schematische afbeeldingen van de systemen zijn weergegeven in bijlage B.

Tabel 2.1: Thermische zonne-energie als directe warmtebron voor de warmtepomp.

	Warmtepompsysteem met energiedak en horizontale bodemwarmtewisselaar als bron. Zie figuur B.1.	Solar Boosted Heatpump. Zie fig. B.2.
Functies	Ruimte- en tapwaterverwarming, koeling.	Tapwaterverwarming.
Componenten	Energiedak, horizontale bodemwarmtewisselaar, WP, boiler, vloerverwarming, radiatoren.	Onafgedekte collector, WP, boiler.
Opmerkingen	Voorwaarde voor effectiviteit is een grote warmteopslagcapaciteit. In het algemeen zijn de kosten van dergelijke systemen op zijn laagst als ze met een lage temperatuur verwarmingssysteem gecombineerd worden. Merk op dat bodemwarmtewisselaars en m.n. horizontale in de bestaande bouw moeilijk te realiseren zijn.	Commercieel verkrijgbaar systeem. Waarschijnlijk nog niet geschikt voor ons klimaat. Is er bijstook?

Tabel 2.2: Het gebruik van zonnecollectoren of energiedak voor het regenereren van de warmtebron van een warmtepomp.

	Warmtepomp met asfaltcollector. Zie figuur B.3.	Energiedak voedt faseovergangsmateriaal opslag. Zie figuur B.4.
Functies	Ruimte- en tapwaterverwarming, koeling.	Ruimte- en tapwaterverwarming, koeling.
Componenten	Asfaltcollector, bodembron (doublet).	Energiedak, faseovergangsmateriaal opslag, WP, boiler.
Opmerkingen	Asfaltwarmte lijkt vooral geschikt ter regeneratie van aquifers. Meest geschikte plaatsen zijn waarschijnlijk bedrijventerreinen. De asfaltcollector fungeert in de winter vaak als afgiftesysteem.	Het energiedak werkt zowel binnen als buiten zonuren door omgevingswarmte te benutten en biedt tevens de mogelijkheid tot effectief koelen in de zomer. Een bepaald warmteafgifte- of koelingsstelsel is niet gespecificeerd.

Tabel 2.3: Toepassing van zonnecollectoren als extra warmteopwekker ter aanvulling op de warmtepomp.

	Toepassing van zonnecollectoren als extra warmteopwekker ter aanvulling op de warmtepomp. Zie figuur B.5.	Het 2MW project in Haarlem. Zie figuur B.6.
Functies	Regeneratie bodemopslag, ruimte- en tapwaterverwarming, koeling.	Ruimte- en tapwaterverwarming, koeling.
Componenten	Afgedekte zonnecollector, boiler, bodemopslag. De warmtepomp, met grondcollectoren als warmtewisselaar, wordt toegepast voor een ZLTV systeem.	Afgedekte collectoren (7,6 m ² per flat), boiler, doubletbron, gasgestookte absorptiewarmtepompen.

Opmerkingen	De zonnecollector heeft hier primair de functie van een zonneboiler en kan daarnaast ingezet worden voor het regenereren van de bodemtemperatuur. Als de grond te koud wordt, waardoor het rendement van de warmtepomp daalt, wordt het water uit de boiler gebruikt om de grond op te warmen. Hier toe moet de zonneboiler worden overgedimensioneerd.	De energie die in de zomer bij de tapwaterverwarming 'over' is, wordt in de bodem opgeslagen en in de winter weer opgepompt wanneer de vraag naar warmte hoger is en het zonaanbod minder. Afhankelijk van het temperatuurniveau wordt de warmtepomp ingeschakeld.
--------------------	---	--

Tabel 2.4: De warmtepomp wordt gebruikt voor het opwaarderen van de warmte van een zonnecollector of energiedak als de opbrengsttemperatuur te laag wordt.

	Het huis van Egbert Gramsbergen. Zie figuur B.7.	Warmtepompboiler in combinatie met zonnecollectoren en WTW. Zie figuur B.8.
Functies	Ruimte- en tapwaterverwarming, koeling.	Ruimte- en tapwaterverwarming, koeling.
Componenten	16,5 m ² afgedekte collectoren en een omgevingswarmtewisselaar tussen de dakpannen aan de noordzijde. Opslag: 140L warm water en 6m ³ ijsopslag. Warmteafgifte via vergrote radiatoren en gebalanceerde ventilatie.	Afgedekte zonnecollector, boiler, WP, luchtverwarming met ventilatielucht als bron, uitgebreid met een zonnecollector.
Opmerkingen	De collectoren dienen in de zomer voor tapwaterverwarming, in de winter als bron voor de warmtepomp. In de zomer dient de ijsopslag voor regenwateropvang voor toilet- en wasmachinegebruik. De luchtWTW maakt het systeem minder kwetsbaar. Ook de relatief kleine termijnsopslag spreekt aan. Een collectieve bron zou eventueel kunnen.	Zonnecollector en warmtepomp vormen hier in zekere mate concurrerende opties; hun onderlinge beïnvloeding is echter beperkt. De bijdrage van de zonnecollector neemt enigszins af bij toenemend warmtepompvermogen (t.g.v. thermische stratificatie in de opslag) en hogere temperatuur in de boiler. De bijdrage van de warmtepomp is m.n. groot in de winter. In het voor- en najaar wordt de warmtevraag door zonnecollector en warmtepomp gezamenlijk gedekt. In de zomer nemen de collectoren de tapwaterverwarming nagenoeg geheel voor hun rekening. Het aardige aan dit systeem is dat je geen termijnsopslag nodig hebt. Een idee is om de WTW te vervangen door een omgevingswarmtewisselaar. De toepasbaarheid van het systeem voor de bestaande bouw is beperkt.

2.2.1 *Constateringen*

Uit dit overzicht blijkt, dat de bestaande systemen niet uitblinken in eenvoud. Een complex systeem is echter niet ongeoorloofd, mits het aantrekkelijk is vormgegeven en de servicevriendelijkheid hoog blijft (het systeem geeft bijvoorbeeld, zoals een moderne HR ketel, zelf aan wanneer er iets aan de hand is en wat).

Ook blijkt de zonnecollector of het energiedak vrijwel nooit de enige warmtebron. Als je de trias energetica in het oog houdt, moet je eerst de vraag terugbrengen en komt WTW (max. rendement plm. 95%!) als aanvullende warmtebron snel in aanmerking. Als je je naar de bouwpraktijk voegt, komt het er overigens sowieso in.

Een doublet bron is alleen als gemeenschappelijke opslagmethode te realiseren, niet individueel. Bodemwarmtewisselaars worden in het algemeen met name in verband met de kosten niet als haalbare optie gezien voor de woningbouw. Kernvraag in dit project is derhalve: hoe vervang je een bodembron door een combinatie van zonne-energie en een opslag?

2.2.2 *Knelpunten*

Indien langer dan enige dagen een buitentemperatuur van -15°C optreedt, voldoet omgevingslucht niet als bron voor een warmtepomp. Een eenvoudige ketel of elektrische bijverwarming is een mogelijke oplossing daar de kosten t.o.v. (bodem-) opslag miniem zijn.

Er is in Nederland weinig standaardisatie op het gebied van bouwkundige aanpassingen, en warmtepompen zijn veelal van buitenlands fabrikaat, alwaar in het algemeen meer ruimte beschikbaar is voor inbouw/ plaatsing. Ook (schuin) dakoppervlak zal in de toekomst meer waard worden (dakkapellen, PV); zodat men er niet op kan rekenen het zomaar vol te kunnen leggen met collectoren.

De noodzakelijkheid van een krachtstroomaansluiting en de afnemende bereidheid om op nieuwbouwlocaties een gas-infrastructuur aan te leggen zijn niet bevorderlijk voor de toepassing van warmtepompen.

Een groot probleem met duurzame energie in het algemeen zijn ergernissen van de gebruikers: dit weegt mee in het comfortaspect. Het succes bij toepassing ervan zit veelal in de projectontwikkelaars (er zijn er die voorop lopen en zo bepaalde technieken bekendheid geven). Het succes van de combisystemen voor verwarming van ruimte én tapwater kan verklaard worden door het ontbreken van keuzemogelijkheden voor de consument: het is wat de installateur aanbiedt.

2.3 **Te beoordelen systemen**

Gezien de voorgaande paragraaf is systeemkeuze een lastige kwestie in de woningbouw. In de utiliteit is vanwege de gevraagde comfortkwaliteit weinig stimulering voor de warmtepomp nodig; door de aanwezige koelbehoefte komt die er daar vanzelf wel. Een remedie voor de woningbouw is om voor de bewoner de investering en het onderhoud van elkaar te scheiden. De consument is niet zozeer geïnteresseerd in energiebesparing, als wel in de operationele kosten. Als die lager zijn dan van een conventioneel systeem heb je een belangrijk verkoopargument.

Er is besloten om in ieder geval drie representanten van de in paragraaf 2.3 genoemde systemen te beoordelen, allen met zowel een elektrische compressiewarmtepomp als met een gasgestookte absorptiewarmtepomp.

3 Energetische beoordeling

Van de volgende drie systemen wordt in dit hoofdstuk een energetische beschouwing gegeven:

1. Een energiedak voedt een faseovergangsmateriaal opslag die de bron vormt van de warmtepomp.
2. Combinatie van warmtepompbedrijf in de winter en zonneboilerbedrijf in de zomer.
3. Thermische zonne-energie fungeert als directe warmtebron voor de warmtepomp.

Voor ieder systeem is een computermodel opgesteld, waarmee simulaties mogelijk zijn. De functie van de beschouwde verwarmingssystemen is steeds hetzelfde: voldoen aan dezelfde tapwater-, ruimteverwarmings- en koelvraag. Alle systemen worden bekeken met zowel een elektrische compressiewarmtepomp als met een gasgestookte absorptiewarmtepomp. De beoordeling van de verschillende systemen wordt als volgt in tabelvorm gerepresenteerd, steeds voor een standaard klimatologisch jaar (deze gegevens zijn tevens betrekkelijk eenvoudig in kosten uit te drukken):

- de grootte van de warmte-invangende oppervlakte voor een realistisch systeem.
- de opslagvatgrootte(n).
- de hoeveelheid benodigde bijstook.
- het energiegebruik van de warmtepomp.

3.1 Uitgangspunten

- De energievraag van de systemen wordt gebaseerd op de Novem referentiewoning en de bijbehorende ruimteverwarmings- (30,1 GJ/jr), tapwater- (8,4 GJ/jr) en koelvraag (2,8 GJ/jr). Voor de koelvraag zijn twee varianten beschikbaar: gemiddeld en 1995 (grotere koelvraag van 5,7 GJ t.g.v. een zeer warme zomer).
- Klimaat: TRY De Bilt klimaatgegevens (instraling, temperatuur) en 1995.
- De collectororiëntatie is 45° zuid.
- De berekeningen zijn uitgevoerd op uurbasis.
- Bij toepassing van faseovergangsmateriaal is uitgegaan van de eigenschappen genoemd in paragraaf 2.2. Voelbare warmte is hierbij ook meegenomen.
- Bij bodemopslag is de opslag- en afnamecapaciteit in principe oneindig; de warmtebalans bepaalt uiteindelijk de uitvoerbaarheid.
- De marge voor de brontemperatuur van de toegepaste warmtepompen is gesteld op minus 5°C tot plus 20°C.

De bepaling van de COP van een (elektrische) warmtepomp is als volgt:

$$COP = 0,5 * (273,16 + T_c) / (T_c - T_0), \text{ waarin } T_c = T_{\text{afgifte}}, T_0 = T_{\text{bron}}$$

Bij toepassing van een gasgestookte absorptiewarmtepomp moet rekening worden gehouden met een COP van 1,2 (tapwater) tot 1,4 (ruimteverwarming). Dit is dan wel op basis van primaire energie. Aan de warmtebron wordt bij deze systemen minder warmte onttrokken. Het aan de bron onttrokken vermogen wordt in beide gevallen als volgt bepaald:

$$COP = \frac{P_{\text{condensor}}}{P_{\text{condensor}} - P_{\text{bron}}} \Rightarrow P_{\text{bron}} = P_{\text{condensor}} - \frac{P_{\text{condensor}}}{COP} = P_{\text{condensor}} * \left(1 - \frac{1}{COP}\right)$$

De berekening van de COP verloopt bij koeling analoog.

De gewenste temperatuur van het warm tapwater is op 58°C gesteld. Dat is gebaseerd op de NEN 1006, ISSO 55.1 en de eisen die het Garantie Instituut Woningbouw stelt. Een temperatuur van 55°C aan het tappunt is voldoende om aan de eisen te kunnen voldoen. In de praktijk komt het er dan op neer dat het toestel circa 58°C moet kunnen leveren. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat de temperatuur van de boiler (warmtapwatervoorraad) niet langdurig onder de 50°C mag komen. Is dit wel het geval dan is wekelijks opwarming noodzakelijk van de gehele warmtapwatervoorraad (ook aan de bodem) tot minimaal 60°C gedurende een aaneengesloten periode van tenminste 20 minuten.

Als randvoorwaarden voor de componentdimensies worden gesteld:

- Een reële collectoroppervlakte beslaat een dakhelling, minus de ruimte voor dakkapellen e.d., zeg 15 m². Voor een lessenaardak is dit ongeveer 30-40 m².
- Het maximale warmtepompvermogen bedraagt voor een elektrische compressiewarmtepomp 7 kW en voor een gasgestookte absorptiewarmtepomp 4,5 kW.
- Het dagopslagvolume (boiler) is maximaal 200 liter groot.
- Het maximaal aanvaardbare faseovergangsmateriaal opslagvolume is ongeveer 6 m³ (bevat 4075 kg faseovergangsmateriaal). Opslagen zijn separaat en worden niet geïntegreerd in bouw delen of iets dergelijks.
- Aan tuinoppervlakte is zo'n 50 m² beschikbaar. Dit komt ongeveer overeen met de oppervlakte van de achtertuin van een standaard Nederlandse rijtjeswoning. Hierop kan men 100 m leiding kwijt voor een horizontale bodemwarmtewisselaar. Deze wordt gewoonlijk op een diepte van 1 à 1,5 m gelegd. Verticale bodemwarmtewisselaars beslaan vrijwel geen (horizontale) oppervlakte. Zij worden geplaatst tot op een diepte van 20 à 50 meter. Diepte en aantal wisselaars zijn afhankelijk van factoren als capaciteit van de warmtepomp, bodemgesteldheid en beschikbare ruimte [14].

3.2 Bijstook

De voor een systeem maximaal toelaatbare hoeveelheid bijstook is gebaseerd op zowel energetische als economische overwegingen. Er bestaat een groot verschil in de toelaatbare bijstookhoeveelheid tussen een elektrische en een gasgestookte warmtepomp, dat wordt veroorzaakt door de sterke discrepantie tussen hun beider prijs per energie-eenheid, zoals blijkt uit het volgende voorbeeld. De uitgangspunten zijn als volgt:

Energiekosten:

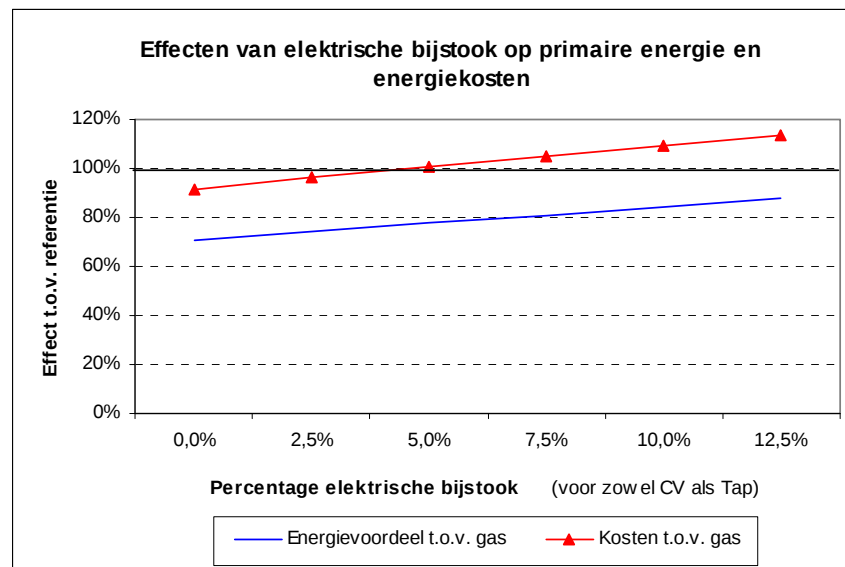
- Gas € 0,4617 per m³ (€ 0,01457 / MJ).
- Elektra 's nachts € 0,1188 per kWh (€ 0,033 / MJ).
- Elektra overdag € 0,1832 per kWh (€ 0,0509 / MJ).

Energetische uitgangspunten:

- Het omzettingsrendement voor elektriciteitsopwekking bedraagt 39% (bovenwaarde, NEN 5128 (2001)).
- Referentiesituatie: HR-combi 107 met een opwekkingsrendement 97,5% voor ruimteverwarming en 60% voor warmtapwaterbereiding.
- Opwekkrendement warmtepompsysteem 4,0 voor ruimteverwarming en 2,2 voor warm tapwater.
- Verdeling warmtevraag: 67% voor ruimteverwarming en 33% voor warm tapwater.

- Warmtevraag 's nachts 40% en gedurende de dagperiode 60%.
- Het totaalpercentage bijstook is gelijkelijk verdeeld over ruimte- en tapwaterverwarming.

In Figuur 3.1, dat is gebaseerd op deze uitgangspunten, blijkt dat de energiekosten van een warmtepompinstallatie bij een percentage van 5% (elektrische) bijstook gelijk zijn aan de energiekosten van de referentie-installatie (een gasketel). Het energetisch voordeel t.o.v. de referentiesituatie is dan nog ruim 22%, maar het kostenvoordeel is nihil. Vanaf 5% bijstook bespaar je nog wel energie (tot een zeker maximum), maar niet meer op kosten. Opgemerkt zij dat deze figuur enkel geldt voor de totale energiekosten; investeringskosten zijn niet meegerekend. Aangenomen is dat de afschrijving voor zowel de warmtepomp als de referentie-installatie gelijk is.



Figuur 3.1: Primair energiegebruik en energiekosten als functie van het percentage elektrische bijstook.

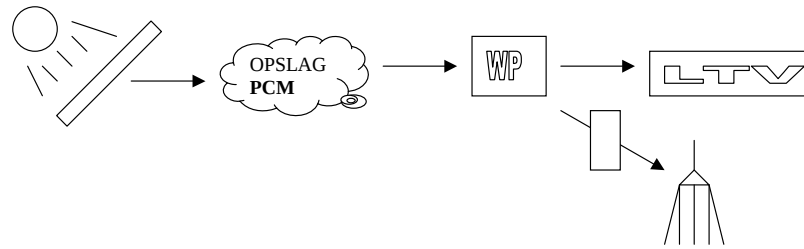
Bij een gasgestookte installatie met gasbijstook ontstaat een heel andere situatie. Bij een dergelijk systeem gaan de energiebesparing en de energiekosten hand in hand: een energiebesparing van 10% resulteert ook in een reductie op de energiekosten van 10%. Indien wordt uitgegaan van een opwekkingsrendement van de warmtepomp van 130% voor ruimte- en 110% voor warmtapwaterverwarming, en een bijstookrendement van 60% (bovenwaarde) dan blijkt dat het aandeel van de gasbijstook maximaal 85,4% mag bedragen. Wordt dat aandeel groter dan zal er geen besparing op energiekosten plaatsvinden.

3.3 Systeemmodellering

3.3.1 Energiedak voedt faseovergangsmateriaal opslag, die bron vormt van warmtepomp

Een energiedak voedt een faseovergangsmateriaal opslag, die als bron dient voor de warmtepomp, zie figuur 3.2. Zowel water (ijs) als andere faseovergangsmaterialen zijn hierbij bekeken. Als de vatemperatuur onder een (in te stellen) temperatuur zakt wordt bijgestookt, om te voorkomen dat het energiedak met een te lage temperatuur wordt doorstroomd. Met deze temperatuur op 0, -5, -10 en -15°C is de invloed van de dimen-

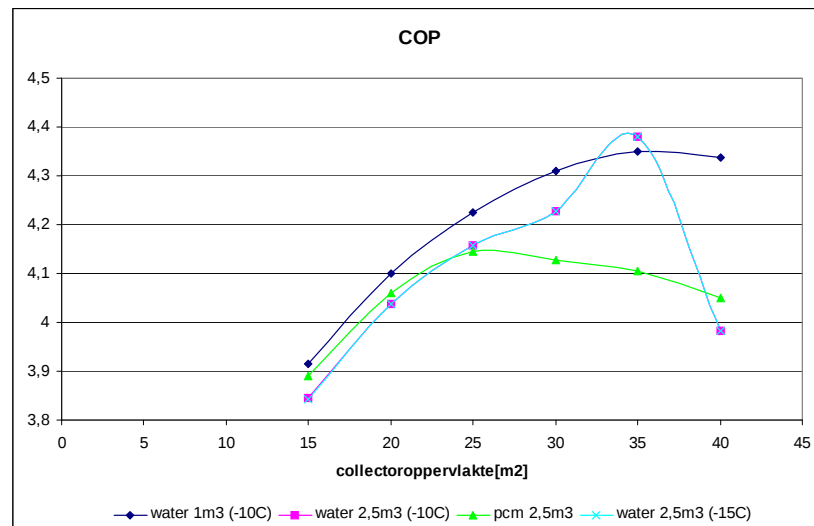
sies van het vat en het energiedak bekeken, eerst voor een elektrische compressie-warmtepomp en vervolgens voor een gasgestookte absorptiewarmtepomp.



Figuur 3.2: Schematische systeemweergave.

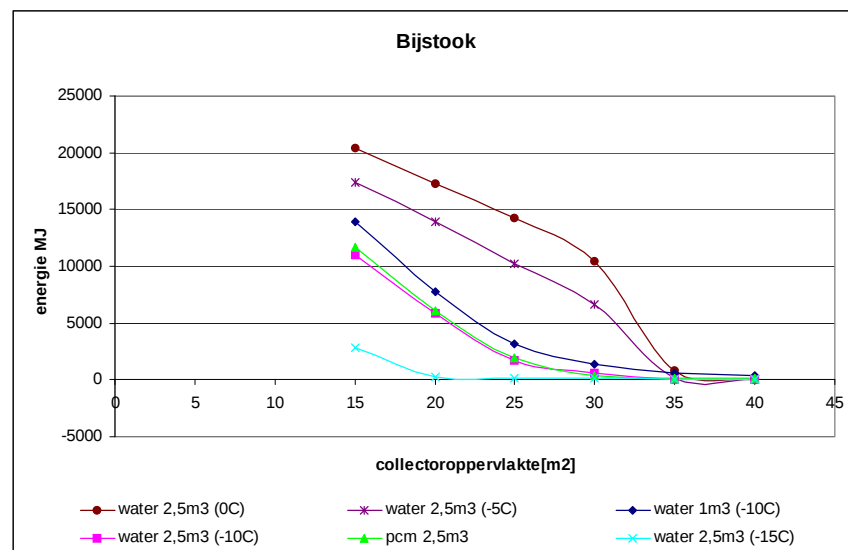
3.3.1.1 A. Compressiewarmtepomp

De COP van de warmtepomp op jaarbasis is alleen bekeken in de winterperiode, aangezien deze in de zomer ten gevolge van het enorme overschot aan zonne-energie sowieso hoog genoeg is. De gemiddelde COP blijkt voor de beschouwde energiedakoppervlaktes ook in de winter circa 4 of hoger, zie figuur 3.3.



Figuur 3.3: COP van een elektrische warmtepomp als functie van de energiedakoppervlakte voor vier verschillende opslagmedia / -grootten.

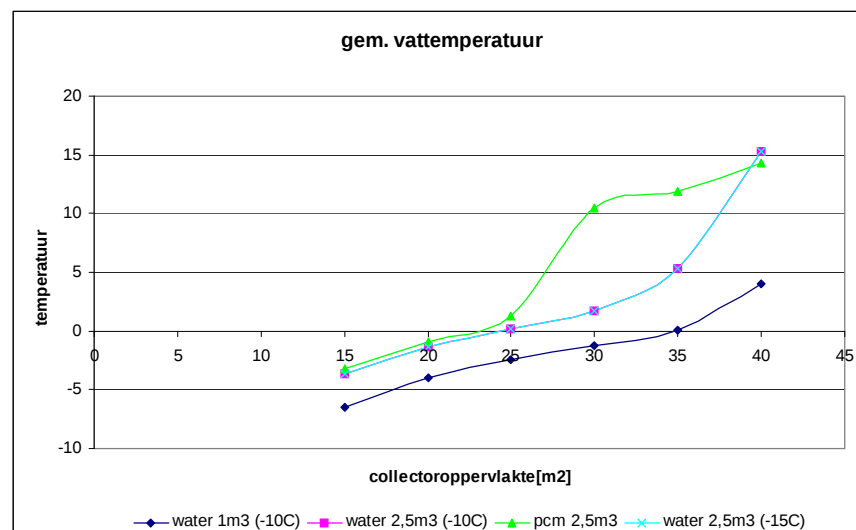
De COP is het hoogst voor het kleine opslagvat, maar het scheelt niet veel met de andere opties. Het feit dat de curven voor een opslag van 2,5 m³ bij -10°C en bij -15°C doorstroming van het energiedak vrijwel samenvallen is niet vreemd: de temperatuur in de opslag zal in deze gevallen in de winter vrijwel gelijk zijn, waardoor ook de COP gelijk is. Indien het energiedak met -15°C doorstroomd mag worden kan er echter meer energie worden ingevangen, waardoor de hoeveelheid benodigde bijstook veel kleiner is. Zie figuur 3.4, waarin de benodigde bijstook voor de verschillende opslagvormen is weergegeven als functie van de energiedakoppervlakte.



Figuur 3.4: Benodigde bijstook als functie van de energiedakoppervlakte voor zes verschillende opslagmedia / -grootten. 5% bijstook komt overeen met 1925 MJ.

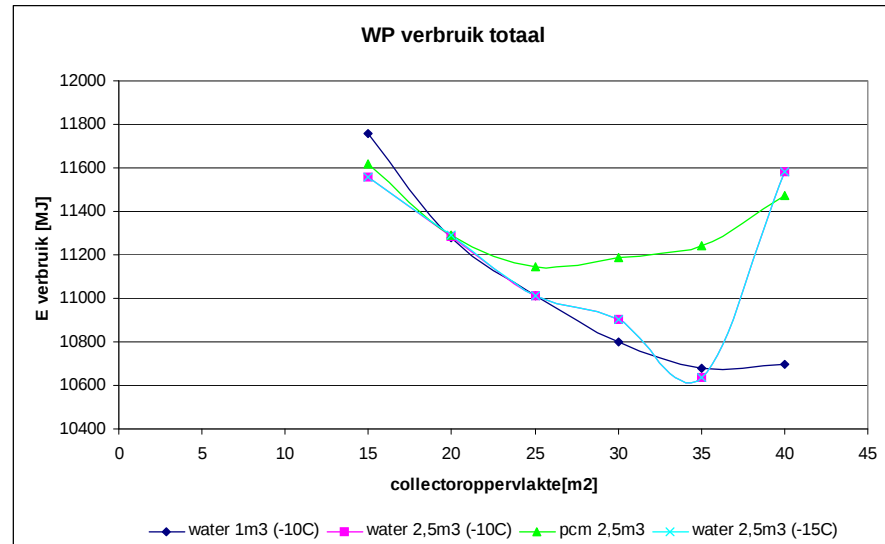
Een water/ijsopslag in combinatie met toelating van -15°C presteert duidelijk het beste. Vanaf een energiedakoppervlakte van 20 m^2 is de hoeveelheid bijstook bijna te verwaarlozen. In de andere gevallen is dat vanaf ongeveer $30\text{--}35\text{ m}^2$ het geval. Bij 0°C en -5°C daalt de hoeveelheid benodigde bijstook minder snel; pas vanaf 35 m^2 wordt deze verwaarloosbaar. Wat opvalt is het grote verschil tussen -5°C en -10°C . Het vat kan het beste wat groter worden uitgevoerd, zeg $2,5\text{ m}^3$, maar in verband met de kosten is een kleinere opslag toch te prefereren.

Figuur 3.5 geeft de gemiddelde temperatuur in de opslag als functie van de energiedakoppervlakte.



Figuur 3.5: De gemiddelde temperatuur in de opslag als functie van de energiedakoppervlakte.

Het water (ijs) bevindt zich in vrijwel alle situaties rond het 0°C gebied. De gemiddelde opslagtemperatuur bij faseovergangsmateriaal komt pas voor grotere energiedakoppervlakten rond de 22°C te liggen. Figuur 3.6 tenslotte geeft het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp weer.



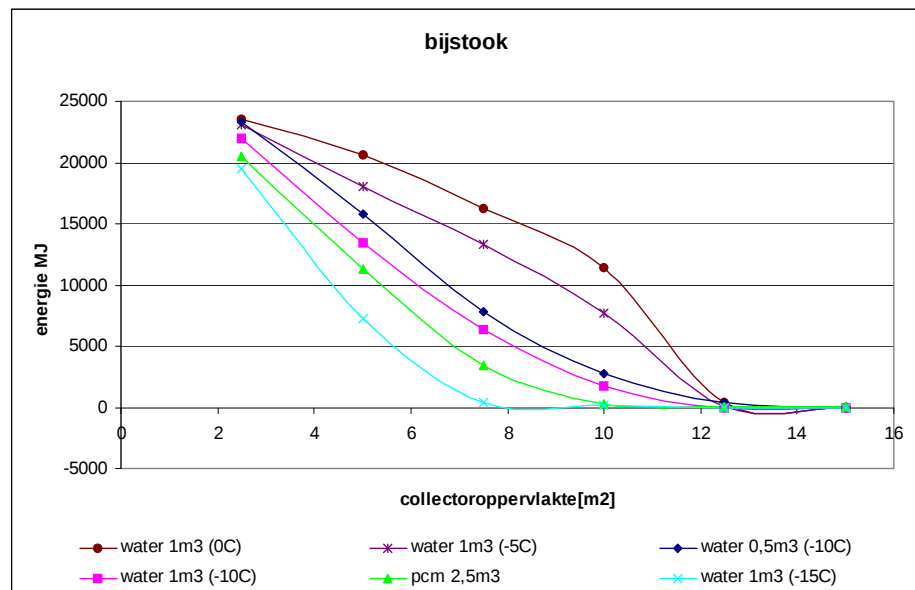
Figuur 3.6: Benodigde elektriciteit voor de warmtepompaandrijving.

Het verband met de COP (figuur 3.3) is duidelijk waarneembaar. De kosten voor dit systeem bedragen:

		normaal	prijs (€)
Oppervlakte	m ²	25 (onafgedekt)	2.750
Opslaggrootte(n)	m ³	2,5 (plus faseovergangsmateriaal)	13.875
Boilervat	-		350
Warmtepomp	-		4.000
Overig	-		600
Bijstook	MJ	1925 (elek.)	84
WP verbruik	MJ	11.000 (elek.)	481

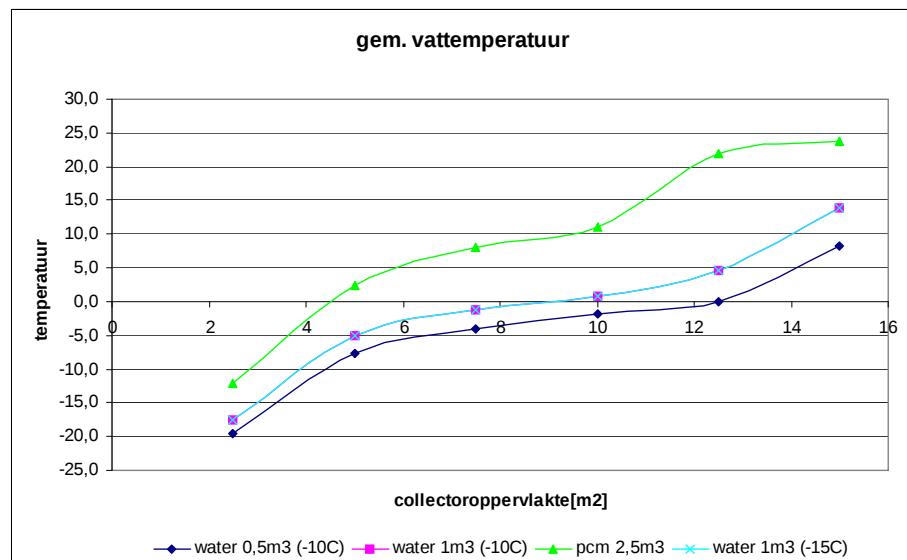
3.3.1.2 B. Gasgestookte warmtepomp

Dezelfde situatie, maar nu met een gasgestookte warmtepomp (4,5 kW). De benodigde bijstook is voor de verschillende opslagtypen in figuur 3.7 weergegeven als functie van de energiedakoppervlakte.



Figuur 3.7: De benodigde bijstook als functie van de energiedakoppervlakte en verschillende opslaggrootten en -media.

Het wordt nu in alle gevallen interessant vanaf een veel kleinere energiedakoppervlakte (plm. 10-12 m²). Bij toelating van -15°C kun je zelfs met 8 m² uit. Figuur 3.8 geeft de gemiddelde temperatuur in de opslag als functie van de energiedakoppervlakte.



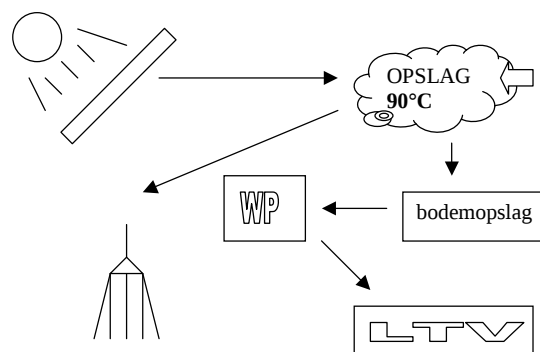
Figuur 3.8: De gemiddelde temperatuur in de opslag als functie van de energiedakoppervlakte.

De gemiddelde vattertemperatuur blijkt bij faseovergangsmateriaal inderdaad richting de 22°C te gaan. Ook blijkt wederom dat de opslag met ijs in het traject bij 8-12 m² energiedak echt rond het latente punt gaat werken (om en nabij 0°C). Het gasverbruik van de warmtepomp is vanwege de constante COP onafhankelijk van de energiedakgrootte. Qua kosten ziet het er als volgt uit:

		normaal	Prijs (€)
Oppervlakte	m ²	10 (onafgedekt)	1.100
Opslaggrootten	m ³	2,5 (evt. plus faseovergangsmateriaal)	13.875
Warmtepomp	-		4.000
Boilervat	-		350
Overig	-		600
Bijstook	MJ	1925	28
WP verbruik	MJ	28.531 (gas)	416

3.3.2 Combinatie van warmtepompbedrijf in de winter en zonneboilerbedrijf in de zomer

De (afgedekte) zonnecollector heeft hier primair de functie van een zonneboiler en wordt daarnaast ingezet voor het regenereren van de temperatuur van een seizoensopslag. Zie figuur 3.9.



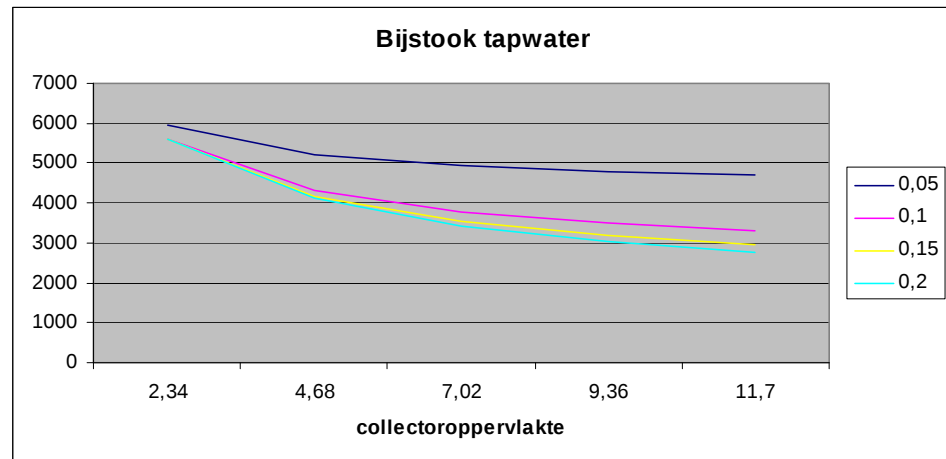
Figuur 3.9: Schematische weergave.

De warmtepomp, met grondcollectoren als warmtewisselaar, wordt toegepast voor (zeer) lage temperatuur verwarming. Aangenomen wordt dat tekorten en overschotten aan energie altijd aan de bron onttrokken respectievelijk toegevoerd kunnen worden. Een energiebalans wordt opgesteld ter verificatie van het evenwicht tussen onttrekkingen en toevoeringen. Een tekort voor tapwater komt uit bijstook, een teveel gaat naar de bodem. Dit systeem is geschikt voor koeling door de warmtepomprichting om te draaien. De woningwarmte gaat dan direct de bodem in.

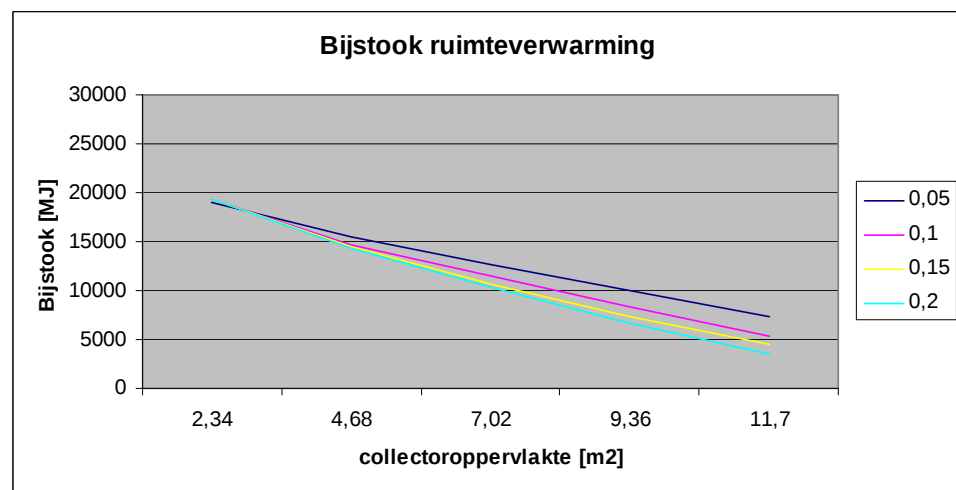
3.3.2.1 A. Compressiewarmtepomp

Onderstaande figuren tonen, als functie van de collectoroppervlakte en opslagvatgrootte, achtereenvolgens de benodigde bijstook voor het tapwater (figuur 3.10), en ruimteverwarming (figuur 3.11) bij gebruik van een elektrische compressiewarmtepomp.

Het moge duidelijk zijn dat de voor het tapwater benodigde hoeveelheid bijstook afneemt met toenemende collectoroppervlakte en vatvolume. Vanaf ongeveer 9 m² respectievelijk 0,15 m³ maakt het echter nauwelijks verschil meer. De bijstook bedraagt dan ongeveer 36% van de totale tapvraag of 10% van de totale warmtevraag. Figuur 3.11 toont de benodigde bijstook voor ruimteverwarming.



Figuur 3.10: De voor dit systeem benodigde bijstook om aan de warmtevraag te voldoen, als functie van de collectoroppervlakte en opslaginhoud (0,05 - 0,2 m³).



Figuur 3.11: De extra benodigde regeneratiewarmte als functie van de collectoroppervlakte en de opslagvatgrootte.

De extra benodigde regeneratiewarmte is in feite een theoretisch begrip, want het is een representatie van het verschil tussen de hoeveelheid warmte die aan de bodem wordt toegevoerd en die er aan wordt onttrokken. De grootte van het tapwateropslagvat is voor de hoeveelheid bijstook voor ruimteverwarming niet zo van belang. De afname van de benodigde bijstook verloopt bijna lineair met toename van de collectoroppervlakte.

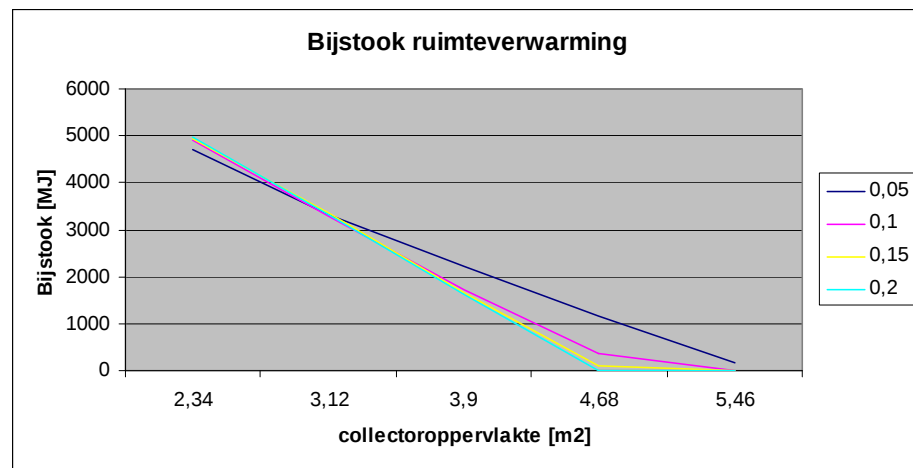
vlakke. Het blijkt dat minimaal een collectoroppervlakte van ongeveer 25 m² benodigd is om volledig warmteneutraal te kunnen opereren.

Woningkoeling voegt slechts een zeer klein aandeel van de warmte terug in de bodem in vergelijking met wat eruit wordt gehaald voor ruimteverwarming; zelfs in een zeer warme zomer. Voorts is vervanging van de bodemopslag door een faseovergangsmateriaal opslag in dit geval niet zinvol, omdat deze weliswaar prima oplaadt gedurende de zomer, maar als het stookseizoen eenmaal begint snel uitgeput raakt tenzij hij zeer groot zou worden gedimensioneerd. Onderstaande tabel toont een overzicht van de kosten voor dit systeem.

		normaal	Prijs (€)
Oppervlakte	m ²	9 (afged.)	1.350
Opslaggrootte(n)	m ³	0,15	350
Warmtepomp	-		4.000
Bodemopslag	-		700
Overig	-		600
Bijstook	MJ	3500	153
WP verbruik	MJ	7734	338

3.3.2.2 B. Gasgestookte warmtepomp

Figuur 3.12 toont de 'bijstook' voor ruimteverwarming, ditmaal voor een gasgestookte warmtepomp. De hoeveelheid benodigde bijstook voor het tapwater is onafhankelijk van het type warmtepomp en is daarom niet opnieuw afgebeeld.



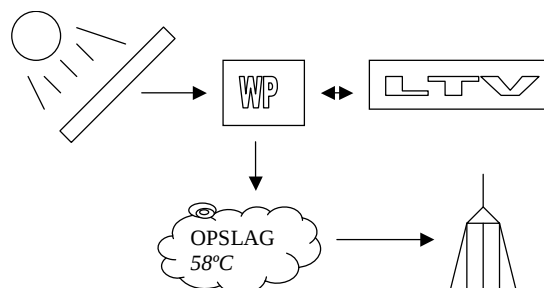
Figuur 3.12: De extra benodigde regeneratiewarmte voor ruimteverwarming, als functie van de collectoroppervlakte en het opslagvatvolume, bij gebruik van een gaswarmtepomp.

Toepassing van een gasgestookte warmtepomp blijkt ook in dit geval gunstiger dan een compressiewarmtepomp. Het is al vanaf 4,5 m² collectoroppervlakte mogelijk om, wat ruimteverwarming betreft, warmteneutraal te opereren. Onderstaande tabel geeft een indicatie van de kosten voor een dergelijk systeem.

		normaal	Prijs (€)
Oppervlakte	m ²	4,5 (afged.)	675
Opslaggrootte(n)	m ³	0,15	350
Warmtepomp	-		4.000
Bodemopslag	-		700
Overig	-		600
Bijstook	MJ	3500 (gas)	51
WP verbruik	MJ	22097 (gas)	322

3.3.3 Thermische zonne-energie als directe warmtebron voor een warmtepomp

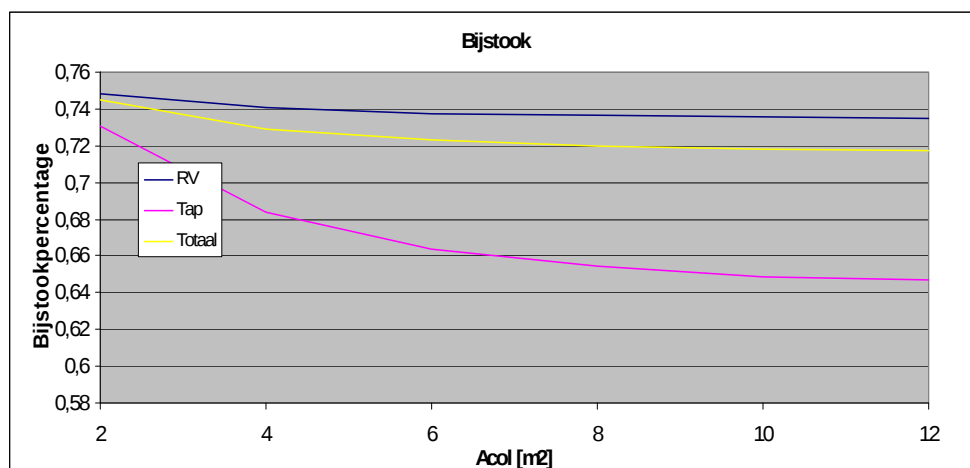
In dit systeem dient de (onafgedekte) zonnecollector direct als bron voor de warmtepomp. De aldus verkregen warmte wordt – indien nodig – gebruikt voor ruimteverwarming; een overschot wordt opgeslagen in het tapwateropslagvat. Zie figuur 3.13.



Figuur 3.13: Schematische weergave van het systeem waarbij een energiedak direct de bron vormt van de warmtepomp.

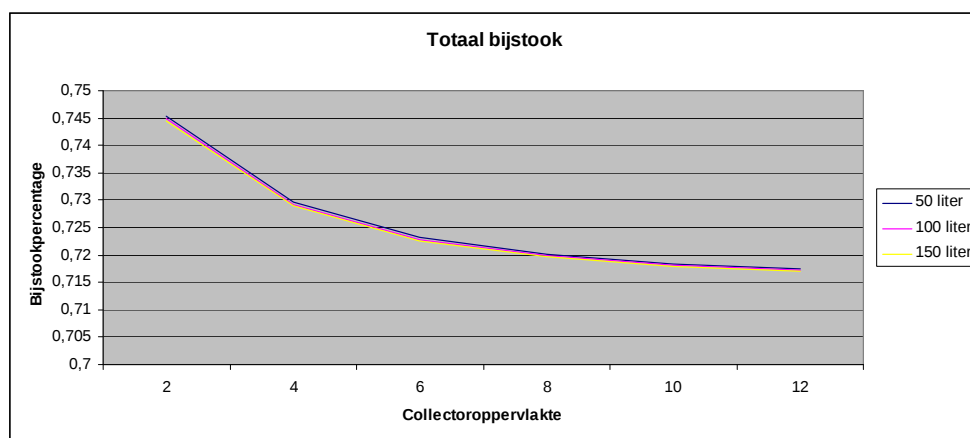
3.3.3.1 A. Compressiewarmtepomp

Figuur 3.14 geeft de benodigde warmtebijstook bij gebruik van een elektrische warmtepomp, weergegeven als percentage van de totale warmtevraag. De benodigde bijstook voor ruimteverwarming en tapwater zijn tevens apart weergegeven.



Figuur 3.14: De benodigde bijstook bij een elektrische warmtepomp met een eneriedak als directe bron. De tapwateropslag bedraagt 100 l.

Het blijkt dat de minimaal benodigde hoeveelheid bijstook qua energiedakoppervlakte vrij snel bereikt wordt. Dat minimum ligt met 72% echter behoorlijk hoog. Figuur 3.15 geeft de invloed van de boilergrootte op de totale bijstook. De boilergrootte blijkt nauwelijks van invloed op de bijstookhoeveelheid. Het energiegebruik van de warmtepomp is enigszins afhankelijk van de hoeveelheid warmte die de energiedak kwijt kan in het opslagvat, maar niet erg veel.



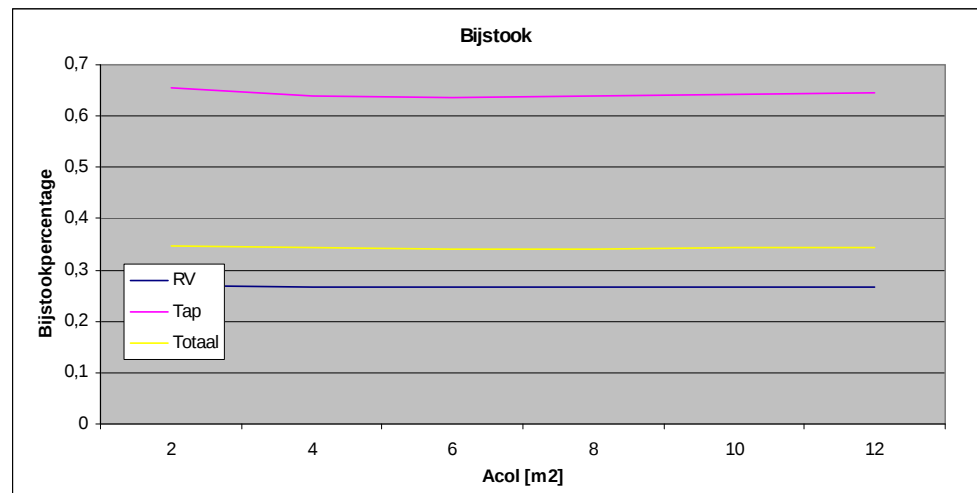
Figuur 3.15: Totale bijstook als percentage van de warmtevraag voor drie boilergrootten.

Onderstaande tabel geeft een indicatie van de kosten van een dergelijk systeem:

		normaal	Prijs (€)
Oppervlakte	m ²	8 (onafgedekt)	880
Opslaggrootte(n)	m ³	0,1 (boiler)	350
Warmtepomp	-		4.000
Overig	-		600
Bijstook	MJ	27.828 (72%, elek.)	1.217
WP verbruik	MJ	7722 (elek.)	338

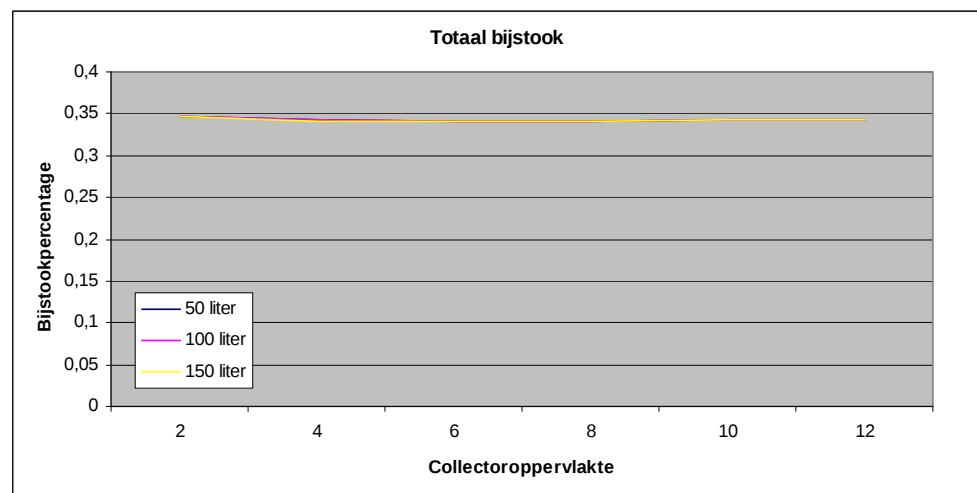
3.3.3.2 B. Gasgestookte warmtepomp

In geval van een gasgestookte boiler zien de zaken er een stuk beter uit. Zie figuur 3.16.



Figuur 3.16: De benodigde bijstook bij een gasgestookte warmtepomp met een energiedak als directe bron. De tapwateropslag bedraagt 100 liter.

Ook nu is de totale bijstookhoeveelheid vrijwel onafhankelijk van de energiedakoppervlakte, maar met 34% een stuk lager dan in geval van een elektrische warmtepomp. Belangrijke conclusie is wederom dat vergroting van de energiedakoppervlakte bij dit systeem geen zin heeft. Figuur 3.17 geeft de invloed van de boilergrootte op de benodigde bijstook.



Figuur 3.17: Totale bijstook als percentage van de warmtevraag voor drie boilergrootten.

Een grotere opslag blijkt slechts marginaal gunstiger voor de benodigde bijstook. Onderstaande tabel geeft de kosten voor dit systeem:

		normaal	Prijs (€)
Oppervlakte	m ²	6 (onafgedekt)	660
Opslaggrootten	m ³	0,1 (boiler)	350
Warmtepomp	-		4.000
Overige	-		600
Bijstook	MJ	13.372 (34%, gas)	195
WP verbruik	MJ	25.070 (gas)	365

Om de hoeveelheid benodigde bijstook te reduceren lijkt het verstandig om de onafgedekte collector uit te breiden met bijvoorbeeld een horizontale bodemwarmtewisselaar (100 m à 30 W/m) in de tuin of in de fundering.

3.4 Conclusies

Qua kosten scoren de bekeken systemen als volgt:

Systeem	totale kosten (investering / energie per jaar) [€]
1. Een energiedak voedt faseovergangsmateriaal opslag die bron vormt van de (elektrische) warmtepomp.	21.575
	565
idem, met gaswarmtepomp	19.925
	450
2. Combinatie van elektrisch warmtepompbedrijf in de winter en zonneboilerbedrijf in de zomer.	7.000
	491
idem, met gaswarmtepomp	6.325
	379
3. Thermische zonne-energie fungeert als directe warmtebron voor de elektrische warmtepomp.	5.830
	1.555
idem, met gaswarmtepomp	5.610
	566

Systemen met een gasgestookte warmtepomp blijken qua energiekosten goedkoper t.o.v. systemen met een elektrische warmtepomp. Hoewel de COP lager is, is financieel gezien een hogere bijstook toegestaan. Een gasgestookte warmtepomp kan voorts met een aanmerkelijk kleinere bron worden toegepast dan bij een compressiewarmtepomp het geval is. Dit scheelt, ten gevolge van een kleinere collector- of energiedakoppervlakte, ruwweg één derde in de kosten. In geval van een bodembron hoeft deze minder geregenereerd te worden.

Bij gebruik van een elektrische warmtepomp (met een verwarmend vermogen van 7 kW) is het vermogen tijdens een standaard klimaatjaar op ieder moment toereikend om aan de totale warmtevraag te voldoen. Beneden de 6,4 kW is het op koude dagen ontoereikend. Bij gebruik van een gasgestookte absorptiewarmtepomp met een vermogen van 4,5 kW is het gedurende 219 h ontoereikend (totaal jaarlijks tekort 408 MJ of € 6).

Voor systemen, waarbij een energiedak direct de bron van de warmtepomp vormt, is een zekere minimale energiedakoppervlakte benodigd, maar vergroting daarvan heeft nauwelijks extra positief effect op de opbrengst. Deze systemen zijn qua investering verreweg het goedkoopst, omdat dure opslagmethoden, zoals de bodem of faseovergangsmateriaal, achterwege kunnen blijven. Qua energiekosten scoren ze redelijk. Met een elektrische warmtepomp lijken dergelijke systemen echter in verband met de grote bijstookhoeveelheid, niet haalbaar.

Systemen die een combinatie vormen van zonneboilerbedrijf in de zomer en warmtepompbedrijf in de winter scoren qua energiekosten het gunstigst. Qua investering scoren ze niet veel slechter dan de systemen waar een energiedak direct de bron vormt van de warmtepomp.

Systemen, waarbij een zonnecollector of energiedak een (faseovergangsmateriaal) opslag voedt, die als bron dient voor de warmtepomp, zijn verreweg het duurst. Voor dergelijke systemen geldt: hoe hoger de werktemperatuur van het faseovergangsmateriaal, hoe hoger de COP, maar dat verband is niet heel sterk. Wat wel een grote invloed heeft is de toegestane temperatuur door het energiedak: hoe lager die mag zijn, hoe minder bijstook benodigd is. Om de bijstook onder de 5% te houden volstaat bij een elektrische warmtepomp een energiedakoppervlakte van 25-40 m², bij een gaswarmtepomp is 12 m² ruim voldoende. De (faseovergangsmateriaal) opslag kan het best groter of gelijk aan 2,5 m³ worden gekozen.

4 Totaalbeoordeling

4.1 Beoordelingsaspecten

Om de verschillende systemen op objectieve wijze te kunnen beoordelen is naast de energetische een aantal andere aspecten benoemd, die bij het beslissingstraject voor aanschaf van een systeem voor de verschillende doelgroepen relevant worden geacht. De differentiatie naar verschillende doelgroepen is noodzakelijk, omdat verschillende partijen verschillende belangen hebben. Door de klankbordgroep zijn vier verschillende klantengroepen gedefinieerd, die ieder hun eigen zwaartepunt hebben bij de afweging/keuze voor een systeem. Deze gedefinieerde potentiële klantengroepen zijn:

1. Particulieren.
2. Projectontwikkelaars.
3. Woningbouwcorporaties.
4. Dienstverleners (verhuren de installatie en dragen zorg voor financiering, installatie en onderhoud).

De aspecten die bij de beslissing een rol spelen zijn te verdelen in *voorwaarden* en *argumenten*. Onder voorwaarden zijn de aspecten ondergebracht, waaraan minimaal moet worden voldaan om de systemen überhaupt te kunnen verkopen en zijn voor de verschillende categorieën gelijk verondersteld. Als de systemen aan de voorwaarden voldoen kunnen de klanten op basis van de verkoopargumenten beslissen naar welk systeem hun voorkeur uitgaat.

In tabel 4.1 zijn alle beoordelingsaspecten weergegeven, waarbij een differentiatie is aangebracht naar de verschillende partijen en naar verkoopvoorwaarden en -argumenten³. Achter de aspecten die onder de voorwaarden vallen is tevens de eis aangegeven, waaraan moet worden voldaan. Bij de verkoopargumenten is getracht een rangschikking aan te geven, waarbij 1 het belangrijkste aspect is en 13 het minst belangrijke.

Een systeem moet simpel en degelijk zijn ("als het maar werkt") en eenvoudig in het bouwproces zijn in te passen. Het mag niet meer kosten dan anders. Van het criterium CO₂-terugverdientijd neigt men momenteel naar gewone terugverdientijd. Deze moet korter zijn dan 8 jaar. De terugverdientijd voor de woningbouw mag wat ons betreft wel wat langer zijn dan 8 jaar. Koeling moet in ieder geval mogelijk zijn. Een regeling per vertrek is gewenst. Een passieve regeling zou mooi zijn, als de warmte maar nuttig wordt gebruikt.

De in tabel 4.1 bij voorwaarde 7 aangegeven 30 dB is afkomstig uit het Bouwbesluit. Daarin wordt gesteld dat het installatiegeluid dat in een woning wordt geproduceerd met een maximaal niveau van 30 dB bij de burens mag komen. Dat is een lage waarde, maar een hoger geluidsniveau in bijvoorbeeld een slaapvertrek is vanuit comfortoogpunt niet wenselijk.

³ Oorspronkelijk was ook de Energie Premiereregeling (EPR) opgenomen als één van de verkoopargumenten, maar door de onduidelijke situatie over het voortbestaan van dit instrument is de te verkrijgen subsidie op 0 gesteld.

Tabel 4.1: Beoordelingsaspecten van installaties voor de verschillende doelgroepen.

	<i>particulier</i>	<i>projectontwikkelaar</i>	<i>woningcorporatie</i>	<i>dienstverlener</i>
voorwaarden	1. levensduur (minimaal 15 jaar). 2. vervuiling (er mogen milieutechnisch geen bezwaren zijn om het systeem toe te passen). 3. storingsvrij / bedrijfszekerheid (vergelijkbaar met een ketelinstallatie). 4. onderhoud (vergelijkbaar met een ketelinstallatie). 5. veiligheid (het systeem moet veilig zijn). 6. regelgeving (het systeem moet aan de regelgeving voldoen). 7. geluid (niet meer dan 30 dB(A) in de leefruimten). 8. gezondheid i.r.t. het binnenklimaat (het systeem moet een gezond binnenklimaat realiseren).			
(ver-)koopargumenten	1. investeringskosten. 2. bouwk aanpassingen. 3. EPR. 4. regelbaar per ruimte. 5. eenvoud bediening. 6. regelbaarheid. 7. koeling mogelijk. 8. energie-, oper. kosten. 9. ruimtebeslag. 10. warmtekwaliteit. 11. Temp. niveau. 12. uiterlijk aantrekkelijk. 13. milieuprestatie. 14. energieprestatie.	1. investeringskosten. 2. bouwk aanpassingen. 3. energieprestatie. 4. koeling mogelijk. 5. regelbaar per ruimte. 6. eenvoud bediening. 7. regelbaarheid. 8. ruimtebeslag. 9. warmtekwaliteit. 10. Temp. niveau. 11. EPR. 12. uiterlijk aantrekkelijk. 13. milieuprestatie. 14. energie-, oper. kosten.	1. investeringskosten. 2. bouwk aanpassingen. 3. EPR. 4. energieprestatie. 5. energie-, oper. kosten. 6. regelbaar per ruimte. 7. eenvoud bediening. 8. regelbaarheid. 9. koeling mogelijk. 10. ruimtebeslag. 11. warmtekwaliteit. 12. Temp. niveau. 13. uiterlijk aantrekkelijk. 14. milieuprestatie.	1. energieprestatie. 2. energie-, oper. kosten. 3. warmtekwaliteit. 4. koeling mogelijk. 5. Temp. niveau. 6. investeringskosten. 7. bouwk aanpassingen. 8. EPR. 9. regelbaar per ruimte. 10. eenvoud bediening. 11. regelbaarheid. 12. ruimtebeslag. 13. uiterlijk aantrekkelijk. 14. milieuprestatie.

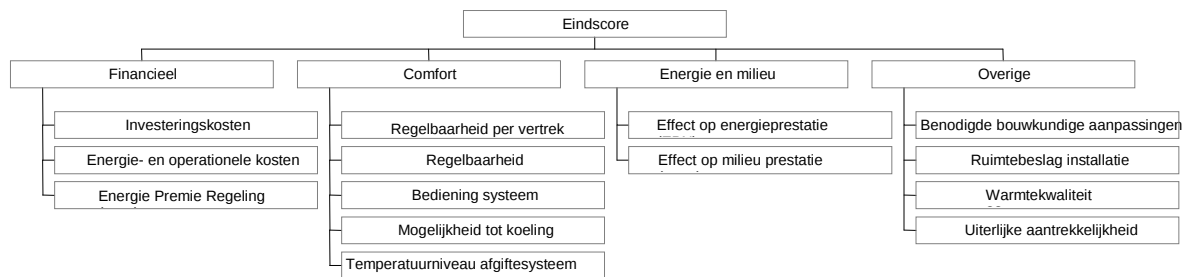
4.2 Beslismodel

Om een objectieve beoordeling te kunnen maken is het noodzakelijk om het beslissingstraject op heldere en eenduidige wijze te doorlopen. Hiertoe is een beslismodel opgesteld op basis van door de klankbordgroep aangedragen informatie. Aspecten die een voorwaarde voor het toepassen van een systeem vormen zijn niet in dit beslissingsmodel opgenomen, omdat deze voor alle systemen gelijk zijn. Wordt niet aan deze voorwaarden zoals in tabel 4.1 weergegeven voldaan, dan is er voor het systeem geen potentieel aanwezig.

Het beslismodel is per klantengroep opgezet, waarbij de verschillen zijn gelegen in het gewicht van de verschillende aspecten op de uiteindelijke score. De aspecten zijn gegroepeerd in een viertal clusters. Deze clusters zijn:

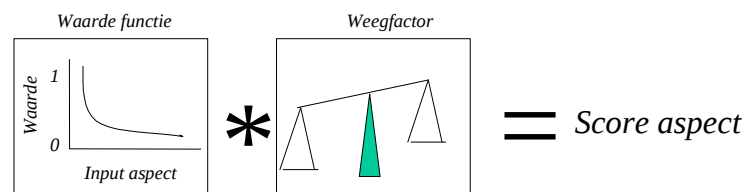
- Financiën.
- Comfort.
- Energie en milieu.
- Overige.

Deze clusters en de bijbehorende aspecten zijn in figuur 4.1 schematisch weergegeven.



Figuur 4.1: Schematische voorstelling beslismodel.

In het beslismodel wordt gebruik gemaakt van waardefuncties en weegfactoren. De input van het aspect wordt met de waardefunctie omgezet in een getal tussen 0 en 1. De waardefunctie kan een lineaire, exponentiële of een andere mathematische vorm hebben. Afhankelijk van de aangegeven minimale en maximale waarde van de input wordt via de waardefunctie de waarde van het aspect bepaald (0-1), en via een weegfactor omgezet naar een score. De som van de weegfactoren bedraagt per cluster 1. Per cluster wordt de score bepaald en vervolgens vermenigvuldigd met de weegfactor voor het betreffende cluster. Ook de som van de weegfactoren voor de verschillende clusters bedraagt 1. De som van deze scores resulteert uiteindelijk in de totaalscore. Een en ander is hieronder schematisch weergegeven.



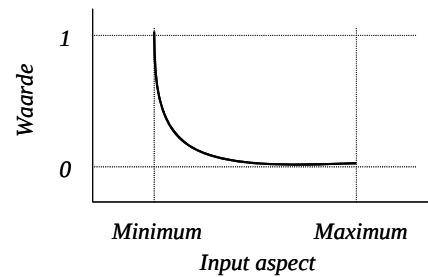
$$(\sum \text{Score aspect}_{\text{cluster}}) * \text{weegfactor cluster} = \text{totaal score cluster}$$

$$\sum (\text{Totaal score cluster}) = \text{totaal score}$$

De verschillende aspecten worden nu stuk voor stuk verder uitgewerkt, waarbij wordt aangegeven wat het gewicht van de aspecten per klantengroep is en welke relatie ten grondslag ligt aan de waardebepaling. De weegfactoren voor de verschillende aspecten en clusters zijn in tabel 4.2 (§ 4.2.14) weergegeven.

4.2.1 Investeringskosten

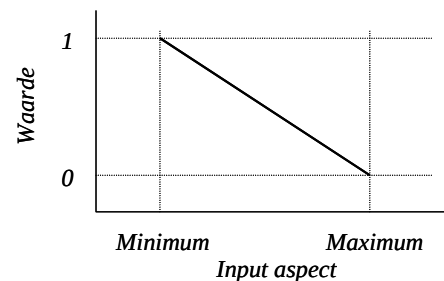
Dit betreft de geschatte kosten van de aanschaf en de plaatsing van de installatie die ten laste komen van de klantengroep. In het kader van dit project worden onder de investeringskosten verstaan de kosten van de zonnecollector of het energiedak, de eventuele opslag en de warmtepomp. Hoe lager deze investeringskosten, hoe hoger de uiteindelijke waarde van dit aspect. De waardefunctie voor de investeringskosten is in figuur 4.2 weergegeven met als minimum input € 5.000,--, als maximum input € 25.000,-- en als exponent 0,2.



Figuur 4.2: Waardefunctie voor de investeringskosten.

4.2.2 Energie- en operationele kosten

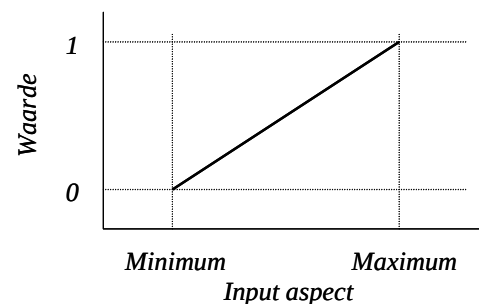
Dit betreft de energiekosten en de kosten voor het periodiek onderhoud per jaar. Hoe lager deze kosten, hoe hoger de uiteindelijke waarde van dit aspect. De waardefunctie voor deze kosten is in figuur 4.3 weergegeven met als minimum input € 0/jaar en als maximum input € 2.000,--/jaar.



Figuur 4.2: Waardefunctie voor de energie- en operationele kosten.

4.2.3 Energiepremie regeling (EPR)

Bij de beslissing speelt het al dan niet verkrijgen van een energiepremie vaak een belangrijke rol en is tevens de omvang van prominent belang. Verwacht wordt dat het effect van de omvang van de eventuele subsidie een lineair verband heeft met de waarde van dit aspect. Hoe hoger deze energiepremie, hoe hoger de uiteindelijke waarde van het aspect. De waardefunctie is in figuur 4.4 weergegeven met als minimum input € 0 en als maximum input € 3.000,--. Door de huidige onduidelijkheid betreffende het voortbestaan van deze regeling is ervoor gekozen om voor alle systemen de te verkrijgen subsidie op "0" te stellen.



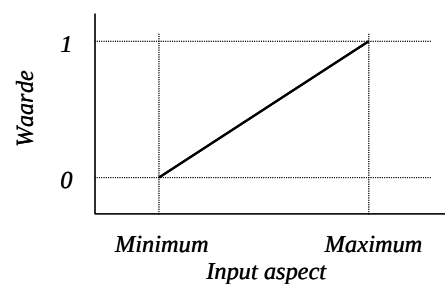
Figuur 4.3: Waardefunctie voor de energiepremie regeling.

4.2.4 Regelbaarheid per vertrek

Het al dan niet onafhankelijk regelbaar zijn van de verschillende vertrekken is een aspect dat met een 0 of een 1 gewaardeerd wordt. Zijn de verschillende vertrekken onafhankelijk regelbaar dan wordt dit met een 1 gewaardeerd, anders is de waarde 0. De waardefunctie voor deze kosten is in figuur 4.5 weergegeven met als minimum input 0 (niet onafhankelijk regelbaar) en als maximum input 1 (wel onafhankelijk regelbaar).

4.2.5 Regelbaarheid

Hieronder wordt de snelheid verstaan, waarmee verstoringen van buiten het systeem worden weggeregeld. Indien het systeem op identieke wijze reageert als een conventionele installatie wordt dit met de waarde 1 gewaardeerd, in de andere gevallen is de waarde 0 van toepassing. De waardefunctie voor deze kosten is in figuur 4.5 weergegeven.



Figuur 4.4: Waardefunctie voor regelbaarheid van het systeem.

4.2.6 Bedieningssysteem

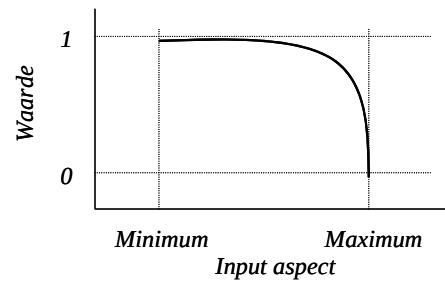
Onder de bediening van het systeem wordt in het kader van dit project verstaan of de gebruiker met het systeem kan omgaan, zoals hij of zij dat gewend is bij een conventionele installatie of dat de bediening van het systeem aanpassingen vergt in het gedrag van de gebruiker. Kunnen de gebruikers met de installatie omgaan zoals ze gewend zijn, dan heeft dit de voorkeur, omdat gedragsveranderingen vaak lastig zijn en tot problemen/ ontevredenheid kunnen leiden. De waardefunctie voor deze kosten is in figuur 4.3 weergegeven met als minimum input 0 (gedragsaanpassingen gebruiker noodzakelijk) en als maximum input 1 (identieke wijze van omgaan met de installatie).

4.2.7 Mogelijkheid tot koeling

De mogelijkheid om te koelen wordt door veel partijen als zeer positief gezien. Heeft het systeem de mogelijkheid om te koelen dan wordt dit met een 1 gewaardeerd, anders is de waarde 0. De waardefunctie voor deze kosten is in figuur 4.5 weergegeven met als minimum input 0 (geen koeling mogelijk) en als maximum input 1 (koeling mogelijk).

4.2.8 Temperatuurniveau afgiftesysteem

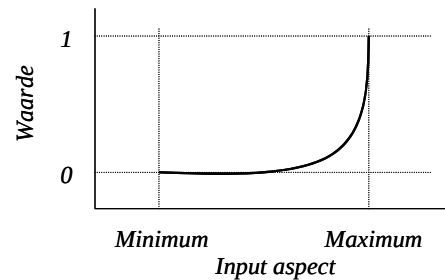
Een laagtemperatuur afgiftesysteem wordt veelal als comfortabel beschouwd en krijgt dan ook een hoge waardering. De waardefunctie voor de ontwerp-aanvoertemperatuur is in figuur 4.6 weergegeven met als minimum input 35°C, als maximum input 55°C en als exponent 0,5.



Figuur 4.5: Waardefunctie voor de ontwerp aanvoertemperatuur.

4.2.9 *Effecten op de energieprestatie (EPN)*

Het effect van het systeem op de EPC t.o.v. een conventionele installatie is veelal een belangrijk beslissingscriterium. Hoe groter de verlaging van de EPC (t.o.v. een conventioneel systeem), hoe hoger de waarde van dit aspect. Het verloop van de waardefunctie is dan ook exponentieel. De waardefunctie voor de ontwerp-aanvoertemperatuur is in figuur 4.7 weergegeven met als minimum input 0, als maximum input 0,5 en als exponent 0,5.



Figuur 4.6: Waardefunctie van het effect op de EPC.

4.2.10 *Effecten op de milieuprestatie (MPN)*

Dit betreft een toekomstige ontwikkeling, waarvan de uitkomst nog onzeker is. Om deze reden is ervoor gekozen om de waarde van dit aspect in te schatten als neutraal of positief. Heeft de installatie naar verwachting een gunstig effect op de milieuprestatie van het systeem (LCA) dan wordt dit met 1 gewaardeerd; in het geval dat het neutraal of zelfs negatief wordt ingeschat wordt de waarde op 0 gesteld. De waardefunctie voor deze kosten is in figuur 4.5 weergegeven met als minimum input 0 (niet neutraal of negatief effect) en als maximum input 1 (gunstig effect op de milieuprestatie).

4.2.11 *Benodigde bouwkundige aanpassingen*

Indien het voor het systeem noodzakelijk is om bouwkundige aanpassingen door te voeren is dit een sterke contra-indicatie voor het toepassen van het betreffende systeem, omdat het bouwproces relatief gezien conservatief is en veelal niet genegen met andere partijen af te stemmen. Om deze reden is ervoor gekozen om de waarde van dit aspect aan te geven als 0 of 1. Is het voor de installatie nodig om bouwkundige aanpassingen door te voeren of interfereert de installatie van het systeem met het bouwproces dan is de score 0, in de andere gevallen is de waarde 1. De waardefunctie voor deze kosten is in figuur 4.3 weergegeven met als minimum input 0 (interfereert met het bouwproces) en als maximum input 1 (geen effect op het bouwproces).

4.2.12 Ruimtebeslag installatie

Het ruimtebeslag van de installatie moet eigenlijk contant worden gemaakt. Het betreft hier het ruimtebeslag van de (opwek)installatie exclusief de afgiftesystemen, waardoor binnen de bouwschil mogelijk bruikbare ruimte verloren gaat. De verwachting is dat er een lineair verband bestaat tussen het ruimtebeslag en de waarde van dit aspect. Hoe groter het ruimtebeslag (m^2) hoe lager de waardering van dit aspect. De waardefunctie voor het ruimtebeslag is in figuur 4.3 weergegeven met als minimum input $0 m^2$ en als maximum input $2 m^2$.

4.2.13 Warmtekwiteit

Met warmtekwiteit wordt het mogelijk te bereiken temperatuurniveau bedoeld: hoe hoger de temperatuur die door het systeem wordt gerealiseerd, hoe hoger de exergie (warmtekwiteit). Een hoog temperatuurniveau betekent dat de warmte voor verschillende doeleinden kan worden aangewend. Verwacht wordt dat het temperatuurniveau dat de installatie kan realiseren tussen de 20 en 100°C zal liggen. Bedraagt dit temperatuurniveau 20°C dan wordt dit gewaardeerd met 0 en bedraagt de temperatuur 100°C dan bedraagt de waarde 1 (figuur 4.5).

4.2.14 Uiterlijke aantrekkelijkheid

Of een systeem uiterlijk aantrekkelijk is, is moeilijk op eenduidige wijze te bepalen. Dit aspect moet dan ook als subjectief worden beschouwd. Er kan voor de aantrekkelijkheid van het systeem een cijfer worden gegeven van 0 tot 10. Het zal echter moeilijk zijn om hier in dit stadium van het project een inschatting van te maken. Hoe hoger het cijfer, hoe hoger de uiteindelijke waarde van dit aspect. De waardefunctie voor deze kosten is in figuur 4.5 weergegeven met als minimum input 0 en als maximum input 10.

Op basis van de volgorde van het belang van de verschillende aspecten, die in gezamenlijkheid met de klankbordgroep is bepaald, zijn de verschillende weegfactoren bepaald. Deze weegfactoren zijn in tabel 4.2 weergegeven voor de verschillende aspecten en de clusters. Hierbij is gedifferentieerd naar de verschillende klantengroepen.

Tabel 4.2: Weegfactoren voor de aspecten en clusters.

Pa = Particulieren, Pr = projectontwikkelaars, Wo = woningbouwcorporaties, Di = dienstverleners.

Aspect	Weegfactor				Cluster	Weegfactor			
	Pa	Pr	Wo	Di		Pa	Pr	Wo	Di
Investeringskosten	0,42	0,52	0,39	0,39	Financiën	0,31	0,26	0,34	0,22
Energie- en operationele kosten	0,21	0,04	0,28	0,57					
Regelbaarheid per vertrek	0,26	0,24	0,27	0,18	Comfort	0,40	0,36	0,31	0,37
Regelbaarheid	0,21	0,18	0,21	0,13					
Bediening	0,24	0,21	0,24	0,15					
Mogelijkheid tot koeling	0,19	0,26	0,18	0,28					
Temp.niveau afgiftesysteem	0,10	0,11	0,09	0,26					
Effect op de EPN	0,33	0,85	0,92	0,88	Energie en milieue	0,03	0,12	0,11	0,15
Effect op de Milieuprestatie	0,67	0,15	0,08	0,13					
Ben. bouw. aanpassingen	0,48	0,48	0,54	0,30	Overige	0,26	0,26	0,23	0,26
Ruimtebeslag installatie	0,22	0,22	0,21	0,15					
Warmtekwiteit	0,19	0,19	0,17	0,44					
Uiterlijke aantrekkelijkheid	0,11	0,11	0,08	0,11					

De invoergegevens van de verschillende systemen zijn weergegeven in tabel 4.3. De waarden in deze tabel betreffen een gemiddelde van de door de klankbordgroep aangeleverde gegevens. Hierbij dient opgemerkt te worden dat dit een zo goed mogelijke inschatting van de verschillende grootheden betreft. In bijlage D is de spreiding van de verschillende waarden exclusief de investeringen en de operationele kosten weergegeven. Hieruit blijkt dat er binnen de klankbordgroep geen eenduidigheid bestaat over de waarde van de verschillende aspecten. De investeringskosten en operationele kosten zijn op basis van de in deze rapportage gegeven uitgangspunten berekend.

Tabel 4.3: Waardering aspecten van de systeemvarianten.

Aspect	Eenheid	Grenswaarden	Systeem 1 (energie-dak voedt faseovergangsmateriaal opslag die bron vormt van WP)		Systeem 2 (ZB-bedrijf in zomer, WP-bedrijf in winter)		Systeem 3 (energie-dak als directe bron WP)	
			Elek.	Gas	Elek.	Gas	Elek.	Gas
Investeringskosten	€	5.000-25.000	21.575	19.925	7.000	6.325	5.830	5.610
Energie en operationele kosten	€/j	0-2000	565	450	491	379	1.555	566
Energiepremie regeling (EPR) ⁴	€	0-3000	0		0		0	
Regelbaarheid per vertrek	nee/ja	0/1	0,425		0,425		0,233	
Regelbaarheid (gelijk aan conv. syst.)	nee/ja	0/1	0,56		0,76		0,95	
Bediening (aanpassing gedrag)	nee/ja	0/1	0,6		0,6		0,5	
Mogelijkheid tot koeling	nee/ja	0/1	0,24		0,64		0,55	
Temperatuurniveau afgiftesysteem	°C	35 - 55	42		40		40	
Effect op de energieprestatie (EPN)	d (EPC)	0 - 0,5	0,3		0,35		0,2	
Effect op de milieuprestatie (MPN)	neg/pos	0/1	0,88		0,9		0,8	
Benodigde bouwkund. aanpassingen	nee/ja	0/1	0,28		0,68		0,075	
Ruimtebeslag installatie	M ²	0 - 2	1,1		1,5		1	
Warmtekwiteit	°C	20-100	41,25		56,25		60	
Aantrekkelijk uiterlijk	nee/ja	0/1	0,867		0,867		0,7337	

De grootste verschillen in de waardering van de verschillende systemen door de klankbordgroep liggen met name bij de aspecten “regelbaarheid”, “benodigde bouwkundige aanpassingen” en “warmtekwiteit”. Hierbij scoort systeem 3 (energiedak als directe bron voor de warmtepomp) het gunstigst.

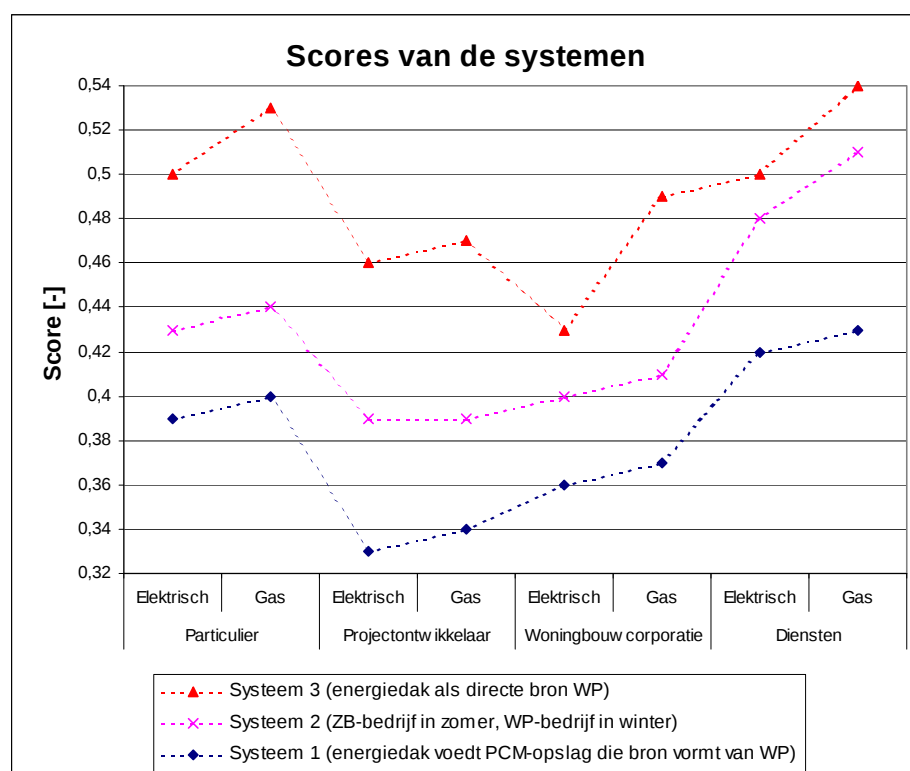
4.3 Eindbeoordeling

De benodigde gegevens zijn ingevoerd in het door TNO MEP ontwikkelde beslissingsmodel DATUM (Decision Aiding Tool Using Multi attribute analyses). Het resultaat (waarde) van de verschillende varianten is weergegeven in tabel 4.4 en figuur 4.8.

⁴ Deze waarde is voor alle systemen nul gesteld in verband met de onduidelijkheid omtrent de Energie Premie Regeling (EPR).

		Systeem 1 (energiedak voed faseovergangsmateriaal opslag die bron vormt van WP)	Systeem 2 (ZB-bedrijf in de zomer, WP-bedrijf in de winter)	Systeem 3 (energiedak als directe bron WP)
Particulier	Elektrisch	0,39	0,43	0,50
	Gas	0,40	0,44	0,53
Projectontwikkelaar	Elektrisch	0,33	0,39	0,46
	Gas	0,34	0,39	0,47
Woningbouwcorporatie	Elektrisch	0,36	0,40	0,43
	Gas	0,37	0,41	0,49
Diensten	Elektrisch	0,42	0,48	0,50
	Gas	0,43	0,51	0,54

Tabel 4.4: Resultaten van de verschillende varianten bepaald met het beslissingsmodel.



Figuur 4.7: Grafische weergave van de eindscores van de beschouwde systemen.

Uit deze tabel en figuur blijkt dat systeem 3 (energiedak als directe bron WP, zowel elektrisch als gasgedreven) voor alle gedefinieerde segmenten het beste scoort, ondanks de matige score voor de benodigde bijstook. Blijkbaar wegen andere overwegingen zwaarder! Voorts blijken de scores voor de segmenten 'particulieren' en 'diensten' fors hoger (beter) dan die van de segmenten 'projectontwikkelaar' en 'woningbouwcorporatie'.

tie'. Op basis van deze resultaten wordt dan ook geconcludeerd dat dit systeem het meest kansrijk is. Opvallend is evenwel dat het systeem bij het segment 'woningbouw-corporatie' een dip vertoont terwijl dit bij de andere systemen niet het geval is.

Als gekeken wordt naar de gevoeligheid van de verschillende aspecten en met name van de investeringskosten dan blijft systeem 3 (energiedak als directe bron WP) het beste scoren, zelfs al zouden de investeringskosten van dit systeem met 50% toenemen (€ 8.745,-- elektrisch en € 8.415,-- gas). De scores voor zowel het elektrische als het gasgedreven systeem worden dan voor het segment 'particulieren' 0,47 respectievelijk 0,51. Dit betekent dat de gevoeligheid voor de investeringskosten beperkt is. Zelfs als bij dit systeem naast een verhoging van de investeringskosten van 50% ook de operationele kosten met 25% toenemen, scoort dit systeem nog het beste. In dat geval worden de scores 0,46 respectievelijk 0,50.

5 Toekomstige ontwikkelingen

De vraag is natuurlijk: zijn er betere systemen te bedenken dan de in het voorgaande geschetste? TNO heeft de belangrijkste trends en verwachtingen in de woningbouw en de energievraag op een rij gezet, en mede op grond daarvan richtingen aangegeven waar toekomstige ontwikkelingen zich op zouden moeten richten.

5.1 Trends

Bijlage C geeft een overzicht van de huidige trends op het gebied van woningkenmerken, -bezit en de warmtevraag. In het kort komt het op het volgende neer:

Wat wonen betreft:

- De vraag naar seniorenwoningen neemt voorlopig toe.
- Mogelijk zal de woon-werksituatie verder flexibiliseren.
- Het aandeel koopwoningen stijgt t.o.v. het aantal huurwoningen.
- Er is een toenemende hoeveelheid aan renovatie te verwachten.
- De woninggrootte neemt toe.

Wat de installaties betreft:

- De vraag naar individueel comfort neemt toe (bijvoorbeeld per vertrek gewenste regeling). Ondermeer om die reden zal in de toekomst meer luchtverwarming worden toegepast.
- De ruimteverwarmingvraag neemt toe, ondanks de verbeterde isolatie. Dit komt mogelijk door de toegenomen individualisering (sociaal gedrag), of door de genoemde toegenomen woninggrootte.
- De warmtapwatervraag neemt af.
- Het aantal combisystemen neemt toe.
- Ventilatie blijft van belang.
- Er is een tendens naar 'all-electric' installatieconcepten.

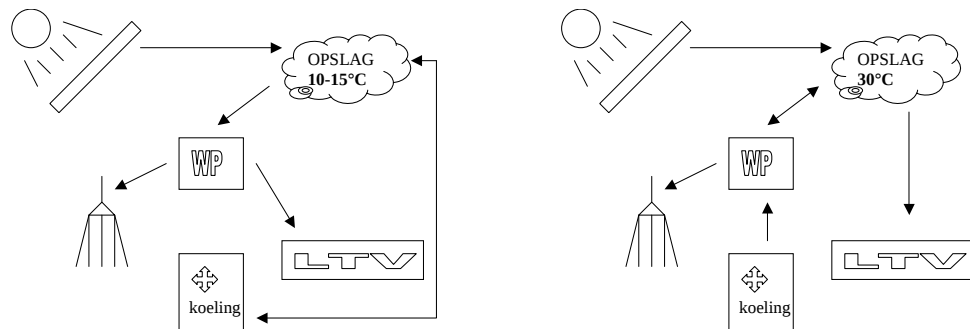
Als algemene trend wordt nog opgemerkt dat het klimaat warmer, en met name het najaar en de winter natter zullen worden, terwijl de zomers juist minder neerslag zullen kennen [10]. Ook zullen de EPN en EPK worden aangescherpt. Derhalve worden als mogelijke speerpunten voor thermische zonne-energie gezien:

- Inspelen op de renovatiemarkt, op bouwkundige inpassing van verwarmingssystemen in bestaande woningen en op een mogelijke toename van de vraag naar collectieve systemen.
- Inspelen op de nieuwbouwmarkt met systemen met een hogere warmwateropbrengst en de mogelijkheid tot koeling.
- Rekening houden met de (sterk) veranderende eigendomsstructuur naar een veel groter aandeel koopwoningen, met name in de nieuwbouw.
- Inspelen op een toename van het aantal kleinere huishoudens.
- Inspelen op de hogere comfortbehoefte en de toenemende behoefte aan snel beschikbaar warm water in de keuken, veroorzaakt door de toename van het gebruik van combiketels.
- Inspelen op multi-inzetbaarheid van vertrekken is in de huidige woning moeilijk. De buitenschil is steeds beter geïsoleerd, terwijl de binnenwanden het liefst zo dun mogelijk worden uitgevoerd.

- De warmtevraag voor ruimteverwarming zal in de toekomst (i.v.m. de toename van passieve koeling, waarvoor met name faseovergangsmaterialen zullen worden ingezet) niet het probleem zijn, voor warm tapwater wel. De installatie wordt wellicht steeds onbelangrijker, als je maar voldoende thermische massa hebt.

5.2 Consequenties voor verwarmingsinstallaties

In figuur 5.1 staan de basisschema's van twee van de meest eenvoudige verwarmings-systemen voor de nieuwbouw en de niet-gestapelde renovatie.



Figuur 5.1: Schematische weergave van twee mogelijke systemen. Links de uitvoering bij lage temperatuur opslag (10-15°C), en rechts bij opslag op een wat hoger temperatuurniveau (plm. 30°C).

Je zou hierbij een combinatie kunnen maken van functies, zoals van LTV en opslag (faseovergangsmateriaal!), of bijvoorbeeld de bouwschil met behulp van faseovergangsmateriaal als opslag uitvoeren, waardoor de opslag geïntegreerd wordt met de collector. Dit zou ook het plat dak van een garage kunnen zijn. Een ander idee, in aanvulling op de in de voorgaande hoofdstukken bekeken systemen, is om een energiedak te combineren met een klein deel afgedekte collector, om op die manier in de piekvraag te voorzien.

5.3 Vervolgonderzoek

In dit onderzoek kwam het systeem met een niet-afgedekte collector gekoppeld aan de warmtepomp als meest belovend uit de bus. De onderlinge verschillen tussen de systemen zijn echter beperkt en nader onderzoek, zowel naar markt- als technisch-inhoudelijke aspecten lijkt nodig. De volgende aspecten voor verder onderzoek kunnen worden aangekaart:

- verdere ontwikkeling van de direct gasgestookte warmtepomp.
- technische uitvoeringen van faseovergangsmateriaal buffers (vorm, prijs/ prestatie, warmte-uitwisseling).
- de invloed van de uitvoeringsvorm van niet-afgedekte collectoren.
- marktonderzoek naar de systeemacceptatie.
- gedetailleerde systeemmodellering.
- systeembeproeving in een proefproject.

Met betrekking tot faseovergangsmateriaal buffers vallen met name de hoge kosten op die een belemmering zullen vormen voor ruimere toepassing. Deze kosten hangen sa-

men met de noodzaak van opsluiting van het faseovergangsmateriaal medium. De huidige vorm in gevulde bolletjes is erg kostbaar. Mogelijke alternatieven, zoals bijvoorbeeld lijnvormige uitvoering door middel van gevulde slangen of afwisselend met verschillende media gevulde kanalen in een kanaalplaat met een speciale headerconstructie, lijken voor de hand te liggen, en daarnaast zijn zeer fijn verdeelde, verpompbare alternatieven in ontwikkeling waar nog weinig ervaring mee is. Praktische experimenten en vergelijkend onderzoek aan vatsystemen lijken nodig voor marktintroductie.

De niet-afgedekte collector kent verschillende verschijningsvormen, waarvan de toepasbaarheid marktgebonden is. Daarnaast bestaan er ideeën omtrent nog te ontwikkelen uitvoeringsvormen die meer geschikt zijn voor de renovatiemarkt. Onderzoek naar de werkingsgraad van de verschillende collectoren in combinatie met een warmtepomp, waarbij aspecten als aanvriezen en condensvorming onder ongunstige klimaatomstandigheden, gekoppeld aan een marktacceptatie praktisch worden onderzocht, lijkt hier noodzakelijk.

In het project is gebruik gemaakt van elementaire modellering op uurbasis, waarbij regeltechnische aspecten slechts rudimentair zijn meegenomen. Een gedetailleerd simulatiemodel voor systeemdimensionering minimaal op een niveau dat ingezet kan worden bij latere analyse van meetdata uit proefprojecten dient te worden opgezet. Hiermee kan tevens een nauwkeurige opbrengstvoorspelling van het systeem worden uitgevoerd. Daarnaast kan de milieubelasting van de verschillende systemen worden meegenomen in de beoordeling. Eventueel kan de beoordeling worden uitgebreid door een bredere groep te betrekken voor het creëren van een groter draagvlak bij toepassers.

Uiteindelijk kunnen gedimensioneerde systemen in een geschikt proefproject worden beproefd. Hierbij kan men uitgaan van meerdere sporen en gelijktijdig verschillende systemen naast elkaar beproeven. Alternatief is een meer voorzichtige variant in de vorm van een klein voorloperproject alvorens grootschalige inpassing op bijvoorbeeld Vinex-locaties plaatsvindt.

6 Conclusies

In dit onderzoek zijn installatieconcepten voor ruimte- en tapwaterverwarming, bestaande uit combinaties van zonnecollectoren en een warmtepomp, beoordeeld op energetische en economische criteria. Tevens zijn ze getoetst aan andere beoordelingscriteria, gezien vanuit verschillende gebruikersgroepen, zoals particulieren, woningbouwcorporaties, projectontwikkelaars en dienstverleners.

Hiertoe is allereerst een inventarisatie gemaakt van bestaande systemen die gebruik maken van een warmtepomp met de zon als warmtebron. Het gaat om systemen die afgedekte en/of onafgedekte collectoren, een elektrische of gasgestookte warmtepomp en verschillende energieopslagmethoden, waaronder met name faseovergangsmateriaal, bevatten. Dit is in de eerste plaats gedaan voor de woningbouw, aangezien opschaalbaarheid naar utiliteitsbouw zeker niet in alle gevallen mogelijk is in verband met verschillen in tapwater-, ruimteverwarming- en koelvraag.

Voor drie verschillende basissystemen is een computermodel opgesteld, waarmee simulaties mogelijk zijn. Hiermee zijn ze energetisch beoordeeld. Qua totale kosten scoren de bekeken systemen als volgt:

Systeem	totale kosten (investering / energie per jaar) [€]
1. Een energiedak voedt een faseovergangsmateriaal opslag die de bron vormt van een (elektrische) warmtepomp.	21.575
	565
idem, met gaswarmtepomp	19.925
	450
2. Combinatie van elektrisch warmtepompbedrijf in de winter en zonneboilerbedrijf in de zomer.	7.000
	491
idem, met gaswarmtepomp	6.325
	379
3. Thermische zonne-energie fungeert als directe warmtebron voor de elektrische warmtepomp.	5.830
	1.555
idem, met gaswarmtepomp	5.610
	566

Overige conclusies zijn:

- Uit het beslismodel volgt dat systeem 3, waarbij een energiedak direct de bron van de warmtepomp vormt, het meest aantrekkelijke systeem is. Ook als de investeringskosten met 50% toenemen en de energiekosten (gebruik) met 25%, is dit systeem aantrekkelijker dan de overig beschouwde systemen. Een van de belangrijkste parameters waar dit systeem zeer goed op scoort betreft de bouwkundige aanpassingen die bij de implementatie noodzakelijk zijn.

- Voor dergelijke systemen is een zekere minimale oppervlakte van het energiedak benodigd, maar vergroting daarvan heeft nauwelijks extra positief effect op de opbrengst. Qua investering zijn ze verreweg het goedkoopst, omdat dure opslagmethoden zoals de bodem of faseovergangsmaterialen achterwege kunnen blijven.
- Op één na best scoren systemen die een combinatie vormen van zonneboilerbedrijf in de zomer en warmtepompbedrijf in de winter. Deze scoren qua energiekosten het gunstigst. Qua investering scoren ze niet veel slechter dan de systemen waar een energiedak direct de bron vormt van de warmtepomp.
- Systemen waarbij een zonnecollector of energiedak een faseovergangsmateriaal opslag voedt, die als bron dient voor de warmtepomp, zijn verreweg het duurst. Voor dergelijke systemen geldt hoe hoger de werkt temperatuur van het faseovergangsmateriaal, hoe hoger de COP, maar dat verband is niet heel sterk. Wat wel een grote invloed heeft is de toegestane temperatuur van het medium dat door het energiedak stroomt: hoe lager die mag zijn, hoe minder bijstook benodigd is. Om de bijstook onder de 5% te houden volstaat bij een elektrische warmtepomp een energiedakoppervlakte van 25-40 m², bij een gaswarmtepomp is 12 m² ruim voldoende. De (faseovergangsmateriaal) opslag kan het best groter of gelijk aan 2,5 m³ worden gekozen.
- Bij een gasgestookte warmtepomp kan een aanmerkelijk kleinere bron worden toegepast dan bij een compressiewarmtepomp. Dit scheelt, ten gevolge van een kleinere collectoroppervlakte, ruwweg één derde in de kosten. In geval van een bodembron hoeft deze minder geregenereerd te worden.
- Systemen met een gasgestookte warmtepomp blijken ook qua energiekosten goedkoper t.o.v. systemen met een elektrische warmtepomp. Hoewel de COP lager is, is financieel gezien een hogere bijstook toegestaan.
- Bij gebruik van een elektrische warmtepomp met een verwarmend vermogen van 7 kW is het vermogen voor de Novem referentiewoning tijdens een standaard klimaatjaar op ieder moment toereikend om aan de totale warmtevraag te voldoen. Beneden de 6,4 kW is het op koude dagen ontoereikend. Bij gebruik van een gasgestookte absorptiewarmtepomp met een vermogen van 4,5 kW is het gedurende 219 uur ontoereikend (totaal jaarlijks tekort bij een normaal klimaatjaar 408 MJ of € 6).

Delft, 30 december 2003
SGH041.NOV (slla)

Ir. B.J.M. van Kampen
Hoofd afdeling
Duurzame Energie en Gebouwen

Ir. H.H.R. Spoorenberg
Auteur

7 Referenties

1. *Handboek energieneutrale woningen*, TNO concept-rapport 2002-DEG-R029, Delft, 2002
2. *Clay-roofing tiles and photovoltaic technology*, artikel in *Klei/Glas/Keramiek*, vol.23, no.3, 2002
3. *Rekenstudie warmtepomp boiler*, TPD rapport 914.074-I, Delft, 1990
4. *Haalbaarheid van een zonneverwarmingssysteem met warmtepomp en maandopslag*, Ecofys rapport E1084, Utrecht, 1997
5. *Inteco productinformatiefolder*, 2002
6. <http://www.gramsbergensolar.nl/>
7. *Cobouw*, 27 juni 2002
8. <http://www.quantum-energy.com.au/>
9. *De kwaliteit van de Nederlandse woning en woonomgeving rond de millenniumwisseling*, basisrapportage *Kwalitatieve Woningregistratie 2000*, VROM, 2003
10. *De toestand van het klimaat in Nederland 2003*, KNMI, De Bilt, 2003
11. *Koelen met warmtepompen zorgt voor extra dimensie*, Rob van Mil, artikel in *In-tech*, mei 2001
12. *Asfalt*, no.2, 2000
13. *Een kwestie van lange adem: de geschiedenis van duurzame energie in Nederland*, G. Verbong e.a., Aeneas 2001
14. <http://www.sbr.nl/>

Bijlage A Randvoorwaarden voor de toepassing van warmtepompen

In deze bijlage staan de randvoorwaarden voor het toepassen van elektrische en gasgedreven warmtepompen zowel in de bestaande bouw als in de nieuwbouw.

A.1 Temperatuurniveaus

Eén van de belangrijkste randvoorwaarden voor het toepassen van warmtepompen is het temperatuurniveau aan zowel de bron- als de afgiftezijde van de warmtepomp. Het temperatuurniveau, waarbij warmtepompen nog efficiënt kunnen functioneren is naast het type warmtepomp (absorptie of compressie) tevens afhankelijk van het toegepaste koudemiddel.

Compressie warmtepompen

Door regelgeving is een aantal in het verleden veelvuldig toegepaste koudemiddelen momenteel niet meer toegestaan. Toepassing van de 'nieuwe' chemische koudemiddelen (HFK's), die wel zijn toegestaan, heeft ertoe geleid dat de maximaal te bereiken condensatietemperatuur voor compressiewarmtepompen over het algemeen is gereduceerd. De maximale aanvoertemperatuur die momenteel door deze systemen kan worden geleverd bedraagt circa 50°C. Bij toepassing van natuurlijke, veelal brandbare koudemiddelen en HCFK's zijn hogere temperatuurniveaus tot circa 65°C mogelijk. Tabel A.1 geeft een aantal veelvuldig toegepaste koudemiddelen weer. Naarmate de absolute drukken en drukverschillen bij bijvoorbeeld 50°C hoger zijn, zijn de koudemiddelen minder geschikt om in warmtepompen toe te passen, omdat de constructie van het toestel en de constructie van de compressor zwaarder moeten worden.

Ook de minimale temperatuur aan de bronzijde is afhankelijk van het koudemiddel. Over het algemeen kan gesteld worden dat de minimaal te bereiken brontemperatuur niet de beperkende factor is. Wel is het zo dat ook het temperatuurverschil tussen de bron- en afgiftezijde bepalend is voor de efficiëntie van de warmtepomp. Hoe groter dit verschil hoe lager de efficiëntie van de warmtepomp. Dit resulteert in de stelling dat bij een gegeven aanvoertemperatuur geldt dat hoe hoger de brontemperatuur is, hoe beter de efficiëntie van het systeem zal zijn. Dit geldt echter niet altijd. De warmtepomp kan, doordat er vrijwel uitsluitend gebruik wordt gemaakt van hermetische compressoren, bij een al te hoge brontemperatuur niet functioneren. De maximale brontemperatuur waarbij de meeste warmtepompen nog functioneren ligt op 15-20 °C. Bij een hogere brontemperatuur zal de elektromotor te zwaar worden belast en treedt de beveiliging in werking.

Absorptie warmtepompen

Bij warmtepompen volgens het absorptieprincipe bedraagt de maximaal te realiseren aanvoertemperatuur circa 60°C.

A.2 Veiligheid

De safety group is een aanduiding voor de gevaren die een bepaald koudemiddel met zich meebrengt. De codering bestaat uit een letter en een getal. De letter heeft betrekking op de giftigheid en het getal op de brandbaarheid. Naar giftigheid zijn twee groepen koudemiddelen te onderscheiden:

Groep A:

Koudemiddelen met een tijdgewogen gemiddelde concentratie gelijk aan of groter dan 400 ml/m³ (ppm volume), die geen nadelig effect hebben op bijna alle medewerkers die hieraan dag na dag blootgesteld kunnen worden gedurende een normale 8-urige werkdag en een 40-urige werkweek.

Groep B:

Koudemiddelen met een tijdgewogen gemiddelde concentratie lager dan 400 ml/m³, die geen nadelig effect hebben op bijna alle medewerkers die hieraan dag na dag blootgesteld kunnen worden gedurende een normale 8-urige werkdag en een 40-urige werkweek.

Naar brandbaarheid zijn drie groepen koudemiddelen te onderscheiden:

Groep 1

Koudemiddelen die niet brandbaar zijn in de dampfase bij elke concentratie in lucht.

Groep 2

Koudemiddelen, waarvan de LFL (lower flammability limit) gelijk is aan of groter dan 3,5 volumeprocent wanneer ze een mengsel vormen met lucht.

Groep 3

Koudemiddelen, waarvan de LFL kleiner is dan 3,5 volumeprocent wanneer ze een mengsel vormen met lucht.

De LFL of LEL (lower explosion limit) is de minimum concentratie van een koudemiddel, waarbij een vlam zich kan voortplanten in een homogeen mengsel van koudemiddel en lucht. Om een brandbaar gas in de lucht te laten ontvlammen moet zowel de LFL overschreden worden als een ontstekingsbron aanwezig zijn.

Tabel A.1: Eigenschappen van enkele veelvuldig toegepaste koudemiddelen.

Koudemiddel Grootheid	R-134a	R-290 Propan	R1270 Propeen	R-600a Isobutaan	R-717 (NH ₃)	R 404A		R-407C		R-410A	
						damp	vloeistof	damp	vloeistof	damp	vloeistof
Druk bij T _{verd.} = 5°C [Bar]	3,50	5,47	6,77	1,88	5,16	7,05	7,15	5,37	6,57	9,32	9,36
Druk bij T _{cond.} = 50°C [Bar]	13,18	17,11	20,54	6,92	20,33	23,00	23,09	19,60	21,85	30,33	30,45
Drukverhouding bij 5/50 [-]	3,77	3,13	3,03	3,68	3,94	3,26	3,23	3,65	3,33	3,25	3,25
Drukverschil [Bar]	9,68	11,64	13,77	5,04	15,17	15,95	15,94	14,23	15,28	21,01	21,09
T _{krit} [°C]	101,2	96,7	92,4	134,7	132,3	72,07		97,5		84,9	
Safety group [-]	A1	A3	A3	A3	B2	A1		A1		A1	
Gwp _{100 jaar} (CO ₂ = 1)	1300	3	ca.3	3	0			1610		1890	

A.3 Schakelgedrag

Als algemene stelregel geldt dat warmtepompen niet te frequent mogen schakelen. De schakelfrequentie is ook afhankelijk van de soort warmtepomp.

Compressie warmtepompen

Bij compressie warmtepompen bedraagt het maximale aantal schakelingen 4-6 per uur. Er is een verband tussen de schakelfrequentie en de levensduur van de compressor. Dit wordt veroorzaakt, doordat er bij iedere start opnieuw een smeefilm moet worden gecreëerd en de smeeroliekringloop op gang moet komen.

Absorptie warmtepompen

Absorptiewarmtepompen zijn over het algemeen trage toestellen. Na het in bedrijf stellen duurt het enige tijd, afhankelijk van de constructie en capaciteit van het toestel, voordat er daadwerkelijk warmte wordt geleverd en de warmtepomp stabiel opereert (grootweg 10 tot 30 minuten). Deze toestellen fungeren het best indien ze langdurig achtereen in bedrijf zijn en de bedrijfscondities constant zijn.

A.4 Prestaties

De prestaties van de warmtepomp zijn primair afhankelijk van de temperatuurniveaus, waarbij het toestel functioneert. Hoe groter het temperatuurverschil tussen de warmtebron (verdampingstemperatuur) en de temperatuur in het afgiftesysteem (condensatortemperatuur), hoe lager de efficiëntie (COP) van de warmtepomp. Ook het door de warmtepomp afgeven vermogen is afhankelijk van de temperatuurniveaus. Hiervoor geldt dezelfde relatie als voor de efficiëntie van de warmtepomp, hoe groter het temperatuurverschil des te lager het door de warmtepomp afgegeven vermogen.

Compressie warmtepompen

De COP⁵ van een warmtepomp kan worden afgeschat met de formule:

$$COP = \frac{273,16 + T_c [^{\circ}C]}{T_c - T_0} * 0,5 [-]$$

T_c = Condensatietemperatuur koudemiddel [$^{\circ}C$]

T_0 = Verdampingstemperatuur koudemiddel [$^{\circ}C$]

Absorptie warmtepompen

De gevoeligheid van een absorptiewarmtepomp voor de temperatuur is kleiner dan bij compressiewarmtepompen. De PER⁶ van deze systemen beweegt zich grootweg tussen 1,2 en 1,4. Het afgegeven vermogen is minder gevoelig voor het verschil in temperatuurniveaus.

A.5 Geluidsniveau

De geluidsproductie van een toestel is van groot belang bij de implementatie. Een hoge geluidsproductie leidt ertoe dat er aanvullende bouwkundige maatregelen getroffen moeten worden om deze systemen toe te kunnen passen. Dit is vanuit kostenoverweging en de inpassing in het bouwproces niet wenselijk.

⁵ COP is de prestatie van het toestel op basis van de elektrische aandrijfenergie. Het getal 0,5 in de formule is een rendement om het werkelijke proces te benaderen.

⁶ PER is de prestatie van het toestel op basis van primaire energie.

Compressie warmtepompen

De geluidsproductie (geluidsvermogen) van moderne warmtepompen voor huishoudelijke toepassing bedraagt gemiddeld circa 45 dB(A). De geluidsproductie van oudere toestellen is veelal hoger.

Absorptie warmtepompen

De geluidsproductie van absorptiesystemen is over het algemeen lager dan van compressiewarmtepompen. Er zijn echter geen vergelijkende gegevens beschikbaar.

A.6 Aandrijfenergie

Zowel compressie- als absorptiewarmtepompen hebben aandrijfenergie nodig. Bij compressiewarmtepompen is dit veelal elektriciteit en bij absorptiewarmtepompen gas.

Compressie warmtepompen

Over het algemeen kan worden gesteld dat het aandrijfvermogen van een warmtepomp dusdanig hoog is dat hiervoor een krachtstroomaansluiting noodzakelijk is. Bij nieuw te ontwikkelen woongebieden is het mogelijk om de elektrische infrastructuur hierop aan te passen. In de bestaande situatie is deze mogelijkheid veelal niet aanwezig, waardoor het op grote schaal toepassen van deze systemen tot problemen met de elektrische infrastructuur kan leiden.

Absorptie warmtepompen

Door de constructie van het toestel is de benodigde gas-input lager dan bij systemen met ketels. Hierdoor worden geen problemen verwacht ten aanzien van de bestaande gas-infrastructuur. Wel rijst de vraag of het in nieuw te ontwikkelen gebieden nog wel rendabel is om een gas-infrastructuur aan te leggen.

A.7 Warmtebron

Bij het toepassen van een warmtepomp moet rekening worden gehouden met de warmtebron. De warmtepomp onttrekt hier namelijk de 'gratis' warmte aan.

Compressie warmtepompen

Bij compressie warmtepompen wordt circa 75-80% van de geleverde warmte aan de bron onttrokken. Door dit relatief grote aandeel moet de bron relatief groot zijn. Het is belangrijk om zich te realiseren dat hoe beter de COP van een warmtepomp is, hoe groter het aandeel is dat aan de bron wordt onttrokken.

Absorptie warmtepompen

Bij absorptiewarmtepompen wordt in verhouding tot compressiewarmtepompen slechts een beperkt aandeel van de afgegeven warmte aan de bron onttrokken. Dit aandeel bedraagt bij absorptiewarmtepompen 16%-28% van het afgegeven vermogen. Hierdoor kan de warmtebron relatief klein zijn.

A.8 Bouwkundige aanpassingen

Het toepassen van warmtepompen leidt over het algemeen tot bouwkundige aanpassingen. De mate van aanpassing is afhankelijk van het toegepaste systeem. In het algemeen dient rekening te worden gehouden met de locatie van de warmtebron ten opzichte van de locatie van de warmtepomp. Dit wordt veroorzaakt, doordat op relatief koude leidingen condensatie kan optreden, waardoor dampdichte isolatie een must is. Op de lange termijn kan deze isolatie beschadigd raken, waardoor schade en corrosieproblemen

kunnen ontstaan. Ook de toegankelijkheid, vloerbelasting, afmetingen en het geluidsniveau zijn bepalende factoren. Uit recente ervaringen is gebleken dat op basis van genoemde argumenten bij voorkeur de begane grond als opstellingsplaats voor warmtepompen moet worden gezien.

Compressie warmtepompen

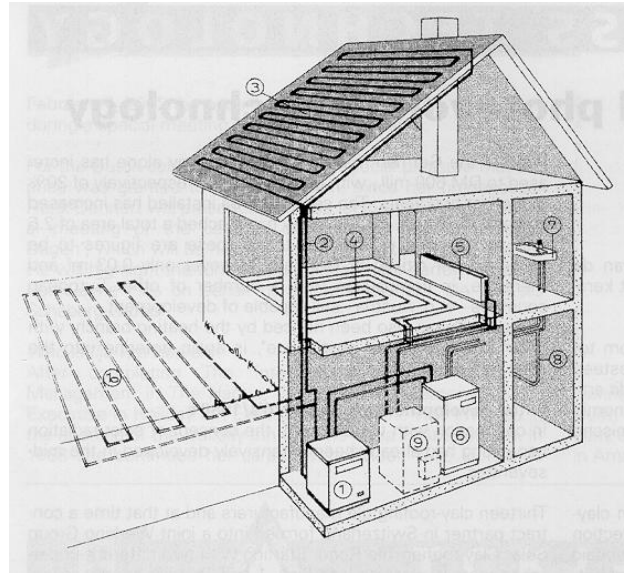
Compressiewarmtepompen met ventilatieretourlucht als warmtebron zijn vaak voorzien van een grote boiler. Door de afmetingen van deze toestellen is het vaak lastig om ze op een zolder te plaatsen, terwijl dit wel gewenst is i.v.m. ruimtebeslag en (dak)doorvoeren t.b.v. de ventilatielucht. Momenteel zijn er ook warmtepompen op de markt die net zoals een ketel aan de wand kunnen worden bevestigd. Hierbij dient wel rekening te worden gehouden met de constructie van de wand i.v.m. het gewicht en de geluidsoverdracht.

Absorptie warmtepompen

Bij absorptiewarmtepompen moet rekening worden gehouden met de toevoer van verse verbrandingslucht en de afvoer van rookgassen. Ook zijn absorptiewarmtepompen veelal zwaar, waardoor de vloerbelasting een probleem kan zijn.

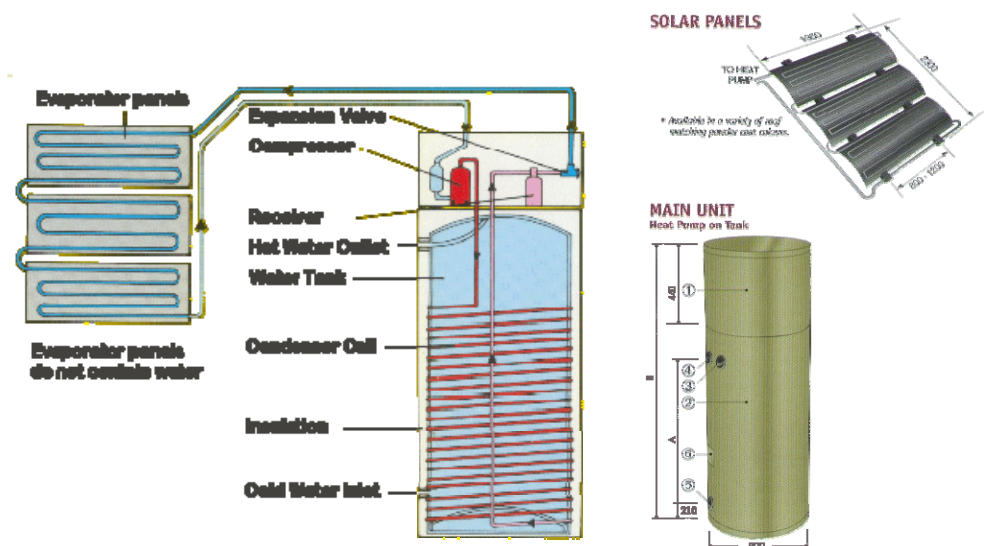
Bijlage B Systeeminventarisatie

Deze bijlage geeft de figuren die horen bij de beschrijvingen in tabel 2.1.



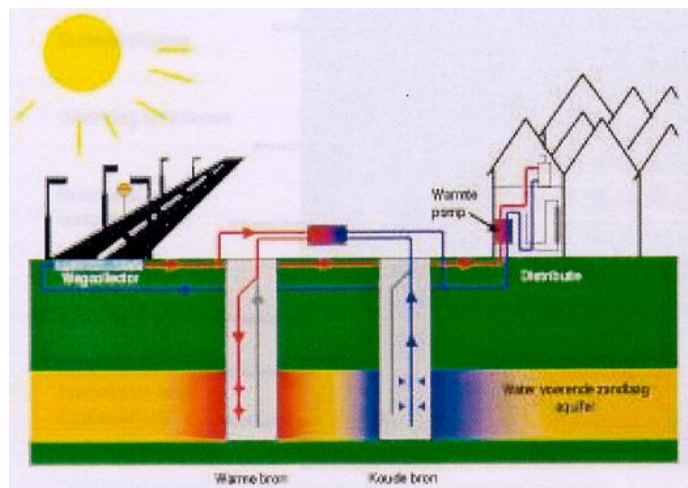
Figuur B.1: Warmtepompsysteem met energiedak en horizontale bodemwarmtewisselaar als bron [2].

De collector (3) is hier verwerkt in het pannendak (esthetisch interessant!) en wordt zo'n 4-7 graden onder de omgevingstemperatuur afgekoeld (1 = warmtepomp, 6 = opslagvat, 9 = back-up ketel). De bodemwarmtewisselaar (10) kan ook als back-up dienen.

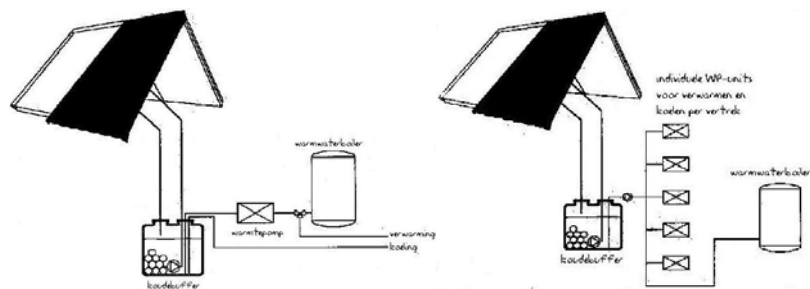


Figuur B.2: Quantum 'solar boosted heat pump' [8].

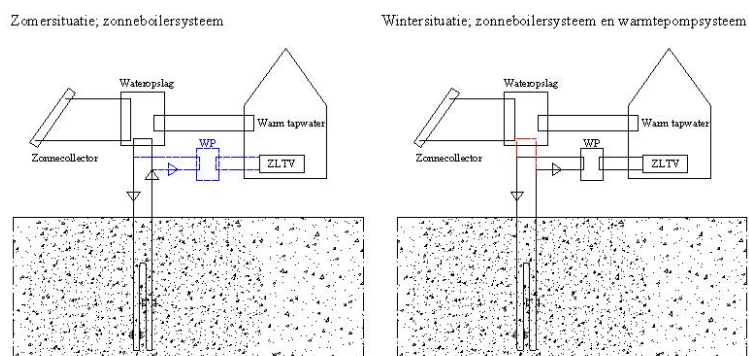
De SPHB bestaat ruwweg uit drie componenten: een compressor en twee warmtewisselaars (verdamperspanelen en de condensor). In werking absorbeert het verdamperspaneel wat er aan omgevingswarmte (uit zon, wind, regen en lucht) beschikbaar is om het koelmiddel te laten verdampen. De damp wordt vervolgens gecomprimeerd. De hete damp die aldus ontstaat wordt door buizen rond de opslagtank geleid, die de condensor vormen. Terwijl het koelmiddel weer condenseert, geeft het zijn warmte af aan het water in de opslag. Als dat is gebeurd, passeert het koelmiddel via een expansieventiel wederom de verdamperspanelen, waarna de cyclus zich herhaalt.



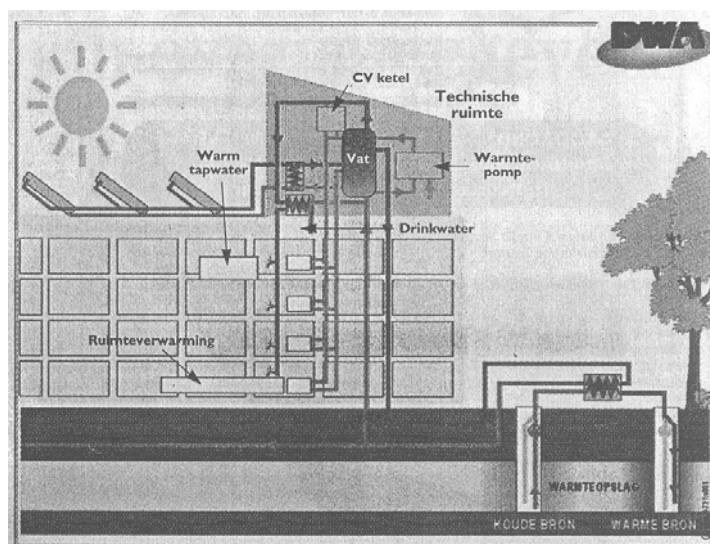
Figuur B.3: Warmtepomp met asfaltcollector[12]. Afgebeeld is de zomersituatie.



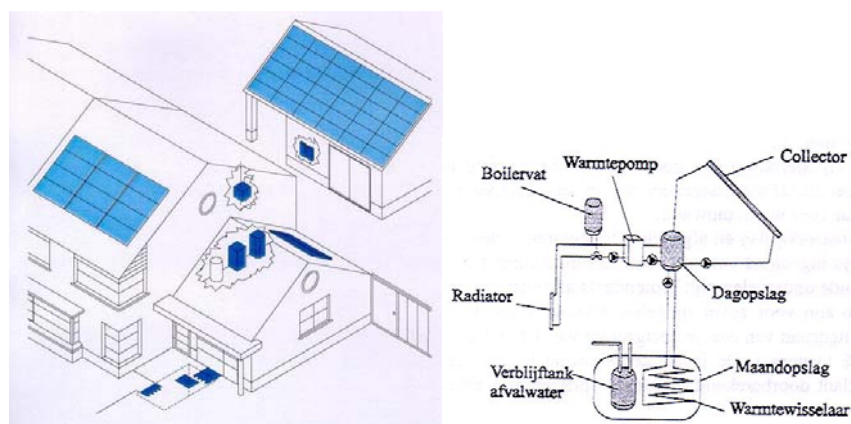
Figuur B.4: Energiedak met links een centrale warmtepomp en rechts met individuele warmtepompunits, per vertrek bijvoorbeeld [5].



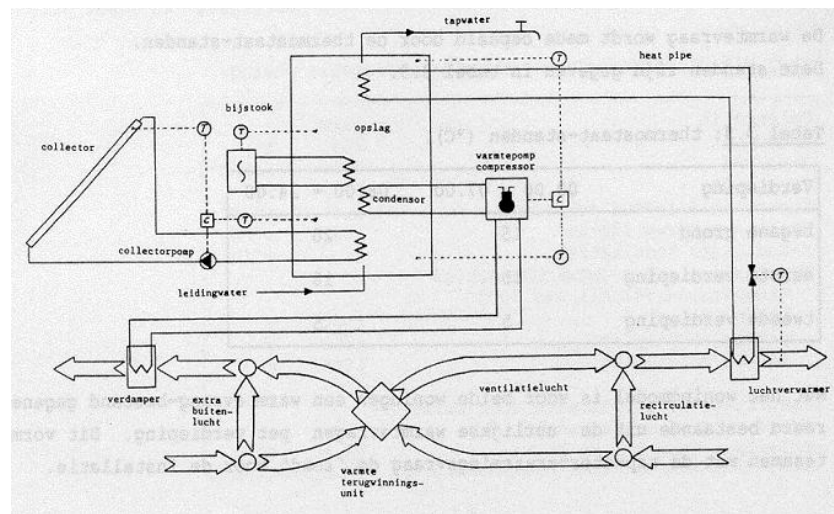
Figuur B.5: Toepassing van zonnecollectoren als extra warmteopwekker ter aanvulling op de warmtepomp [1].



Figuur B.6: Het 2MW project in Haarlem [7].



Figuur B.7: Het huis van Egbert Gramsbergen [6].



Figuur B.8: Warmtepompboiler in combinatie met zonnecollectoren en WTW [3].

Bijlage C Toekomstverkenning woningbouw en energievraag

C.1 Ontwikkelingen in de warmtevraag en de woningmarkt

In de periode 1995 tot 2000 is het aantal woningen in Nederland gestegen van 6,2 naar 6,6 miljoen. Er zijn 444.000 nieuwbouwwoningen aan de voorraad toegevoegd, wat neerkomt op 7,2% van de woningvoorraad. Door sloop is ongeveer 1% veelal slechtere woningen aan de voorraad onttrokken. In de afgelopen jaren zijn er verschuivingen opgetreden tussen de verschillende eigendoms categorieën. Het meest in het oog springend is de verschuiving van particuliere en sociale huurwoningen naar de koopsector.

Voor de nieuwbouw stelt de (model)bouwverordening vanaf 1965 eisen aan de energetische kwaliteit van de gebouwschil. Deze eisen zijn in de loop van de tijd fors toegenomen en hebben geleid tot invoering van een EnergiePrestatieNorm (EPN) van 1,4 per december 1995. Deze is in 2000 aangescherpt tot 1,0.

Voor de bestaande bouw was er in de beschouwde periode (1995–2000) geen regelgeving ten aanzien van energie. Alleen bij ingrijpende verbouwingen was de nieuwbouwregelgeving partieel van kracht. Afgesloten convenanten met de sociale verhuursector bleken moeizaam te werken. Afgezien van enkele subsidieregelingen was er slechts sprake van een beperkte stimulering in de markt.

Het laatste KWR-onderzoek (Kwalitatieve Woning Registratie, een onderzoek gebaseerd op een steekproefgrootte van circa 15.000 woningen, waarin door inspectie onder andere de energetische kwaliteit van de woningvoorraad in beeld wordt gebracht, [9]) eindigde ongeveer op het moment dat het Energie Prestatie Advies (EPA) voor de bestaande bouw van start ging in combinatie met de Energie Premiereregeling (EPR). De effecten hiervan zijn daarom niet zichtbaar in de resultaten.

Door het samenvallen met de start van het EPA kan deze analyse als een nulmeting beschouwd worden voor een latere evaluatie van de resultaten van het energieprestatieadvies.

C.2 Isolatiemaatregelen in de woningvoorraad

Ten opzichte van 1995 blijkt de isolatiegraad van de totale Nederlandse woningvoorraad met ca. 10 procentpunt te zijn toegenomen. De isolatiegraad van de bouwdelen varieerde in 2000 van 69% voor beglazing tot 34% voor de begane grondvloer. De isolatiegraad voor de gesloten geveldelen en het dak waren respectievelijk 50 en 63%. Overigens is een deel van deze verbeteringen toe te kennen aan de goed geïsoleerde nieuwbouwwoningen die aan de voorraad zijn toegevoegd.

In het algemeen geldt dat de isolatiegraad in de particuliere huursector lager is dan bij de andere beheercategorieën. Voor beglazing blijkt dat de relatieve toename in isolatiegraad bij de particuliere huur het grootst is. De koopsector geeft voor alle bouwdelen de grootste stijging van de isolatiegraad (in procentpunten) te zien.

Voor de onderverdeling naar bouwjaarklassen geldt dat de hoogste isolatiegraad voorkomt in de woningen gebouwd na 1970. Er is een behoorlijk potentieel aan na te isoleren bouwdelen bij woningen gebouwd vóór 1971. Dit is vooral het geval bij de gesloten gevel (isolatiegraad 20%) en het dak (isolatiegraad 30%). Bij de gesloten gevels lijken zich met name voor spouwisolatie nog op grote schaal mogelijkheden voor te doen. De

toepassing van dakisolatie vertoont over de afgelopen jaren een grotere toename dan gevelisolatie. De eenvoudige toepassing van isolatie bij de reguliere vervanging van dakbedekking bij platte daken is hierbij een stimulerend mechanisme. De isolatie van de begane grondvloer is meestal een lastig uit te voeren maatregel, deze is dan ook gering. Isolerende beglazing is een populaire maatregel, die in alle deelpopulaties hoog scoort en waarvan ook de toename in procentpunten groot is. Wellicht dat de gevoerde campagne voor HR-glas en de comfortaspecten van isolerende beglazing hierbij een rol hebben gespeeld. Ook de vervanging van dubbele beglazing na ca. 20 jaar vormt een natuurlijk moment voor de overstap naar een beter isolerende glasconstructie.

C.3 Installatiegebruik in de woningvoorraad

Voor wat betreft de energetische kwaliteit van de toegepaste installaties is binnen de woningvoorraad eveneens een verbetering te constateren.

Het aantal ketels met een conventioneel rendement (CR) in de Nederlandse woningvoorraad geeft een forse afname te zien: tweederde van alle CR-ketels die in 1995 aanwezig waren, is inmiddels vervangen, grotendeels door een ketel met hoog rendement (HR-ketel). Het aandeel CR-ketels bedroeg in 2000 nog slechts 12% van alle woningen die beschikken over een individueel cv-systeem. Het aandeel HR-ketels is gestegen tot bijna 40%.

Opvallend is dat de sociale huursector vooral kiest voor een ketel met een verbeterd rendement (VR-ketel), terwijl in koopwoningen meestal een HR-ketel wordt gekozen. Voor de verschillende bouwjaarklassen zien we overal een verschuiving van CR- naar HR-ketels optreden. Een substantieel aandeel in deze verbetering is toe te schrijven aan de nieuwbouw die aan de voorraad is toegevoegd.

Het succes van de HR-ketel zal ongetwijfeld zijn veroorzaakt door de breed opgezette stimulering van HR-ketels, gekoppeld aan de vervangingscyclus van ketels in de orde van 15 tot 20 jaar.

Het deel van de woningvoorraad, dat is aangesloten op warmtelevering (blok- of stadsverwarming), is over de onderzochte periode vrijwel constant gebleven op circa 10% van de woningvoorraad.

In de KWR 2000 zijn voor het eerst woningen in de steekproef aangetroffen met een zonneboiler of gebalanceerde ventilatie met warmteterugwinning. Het aantal is te gering om conclusies aan te verbinden, maar de voortschrijdende introductie van deze systemen tekent zich af.

C.4 Energetische karakterisering woningvoorraad

De energetische kwaliteit van een woning is ingeschat door het al dan niet geïsoleerd zijn van de bouwdelen (begane grondvloer, gevel, beglazing en dak), samen met de toepassing van een meer energie-efficiënte ketel voor ruimteverwarming als indicatoren te gebruiken. Per geïsoleerd bouwdeel wordt een punt toegekend evenals voor een energie-efficiënte ketel. In totaal zijn er dus maximaal 5 punten te scoren.

Het indicatieve karakter van deze methodiek maakt dat de puntenscore niet rechtstreeks is te verbinden met de energiezuinigheid van de woning. Belangrijke aspecten als luchtdichtheid, aard van de ventilatievoorziening, tapwatervoorzieningen, etc. zijn immers niet in de puntentelling opgenomen. Desalniettemin levert de puntenscore een (grof)

beeld op, vooral als gekeken wordt naar het potentieel aan nog uit te voeren maatregelen.

Er is een duidelijke verbetering te zien. Het aantal woningen met 0 of 1 punt (het slechte segment) is afgenomen van ca 35% van de voorraad in 1995 tot 22% in 2000. Het goede deel van de voorraad (4 en 5 punten) is toegenomen van 25% in 1995 tot 39%. De particuliere huursector blijft achter bij de overige eigenaarscategorieën. Duidelijk tekent zich een behoorlijk potentieel af aan nog te treffen maatregelen. Dit potentieel is met name te vinden in de woningen gebouwd voor 1970. In de particuliere verhuursector is het potentieel wat groter dan in de andere eigendomssectoren. Over het geheel bezien zijn er nog tal van mogelijkheden om energiebesparende maatregelen uit te voeren in een groot deel van de voorraad. Hiermee kan nog een substantiële besparing worden bereikt boven op de reductie in gasverbruik van gemiddeld 2.145 m³ gas per woning in 1995 naar 1.955 m³ gas in 2000. Rekening houdend met de toename van het aantal huishoudens is het totale primaire energiegebruik voor huishouden (gas en elektra) ongeveer gelijk aan het niveau van 1995.

C.5 Huishoudenkenmerken

Er blijkt een duidelijk verband aanwezig tussen het besteedbaar inkomen en de energetische kwaliteit van de woning. Hoe hoger het inkomen, des te beter de puntenscore. Dit verband is vooral waarneembaar in de koopsector. Bij zowel particuliere als sociale huurwoningen is het verband minder duidelijk. Lage inkomensgroepen in de sociale huursector wonen in woningen die energiezuiniger zijn dan de overeenkomstige groepen in de andere twee sectoren.

Bij onderverdeling naar beheervorm blijkt dat er bij de sociale huurwoningen een duidelijk verband is tussen de leeftijd van de bewoner(s) en de behaalde puntenscore: deze neemt toe met de leeftijd. Bij de koopwoningen zien we het tegenovergestelde: een afname van de puntenscore met de leeftijd.

Meergezinswoningen behalen gemiddeld een hogere score dan eengezinswoningen. Dit verschil springt met name in het oog bij de leeftijdscategorie boven de 65 jaar en dan weer vooral bij de particuliere huurwoningen.

Bij de huishoudensamenstelling blijken mensen met partner en kind(eren) in de woningen met de hoogste puntenscore te wonen en eenoudergezinnen juist in de energetisch mindere woningen. Bij een onderverdeling naar geboorteland van de hoofdbewoner(s) blijkt er nauwelijks verschil te zijn tussen autochtonen en (niet-westerse) allochtonen.

C.6 Conclusies

Er is een duidelijke verbetering waarneembaar van de isolatiegraad van de woningvoorraad tussen 1995 en 2000, met een toename van ongeveer 2 procentpunt per jaar. Met name voor isolerende beglazing en dakisolatie is een grote toename van de isolatiegraad geconstateerd. De absolute percentages van de isolatiegraad geven echter aan dat een substantieel deel van de woningvoorraad nog van isolatie kan worden voorzien.

Er is sprake van een substantiële toename in het aantal HR-ketels, ten faveure van ketels met een slecht rendement. Nieuwere energiebesparende technieken als zonneboilers en warmteterugwinning uit ventilatielucht beginnen hun intree te doen, met name in de nieuwbouw.

Het ligt voor de hand dat de expliciete stimulering van HR-ketels en HR-beglazing door de overheid een belangrijke rol heeft gespeeld. De relatief korte vervangingscyclus van ketels en beglazing heeft ook een positief effect. Bij dakisolatie speelt vooral de samenhang met onderhoud en de eenvoud van de maatregel een belangrijke rol.

Over de totale breedte aan energiebesparende maatregelen is nog steeds een aanzienlijk besparingspotentieel aanwezig. Vooral de na-isolatie van gesloten gevels verdient de nodige aandacht. Anno 2000 heeft nog steeds eenderde deel van de Nederlandse woningvoorraad ongeïsoleerde spouwmuuren.

C.7 Algemene trends

Als algemene trends in onze samenleving die van belang zijn voor energiegebruik, woningvoorraad en in het bijzonder zonne-energieoepassingen worden de volgende punten genoemd:

- De toename en samenstelling van de bevolking, de individualisering en de vergrijzing zetten zich de komende tientallen jaren nog voort. Het aantal een- en tweepersoonshuishoudens zal toenemen, waardoor de totale energievraag slechts licht zal dalen, in plaats van de gewenste sterke daling.
- Ook de stijgende behoefte aan comfort zal voortgaan. Verwacht wordt dat de warmwatervraag op woningniveau door de toenemende comfortbehoefte zal stijgen en dat de ruimteverwarmingvraag zal dalen door toenemende isolatiemaatregelen en de inzet van passieve zonne-energie. Getallen van de afgelopen jaren spreken dit beeld echter tegen! De gashoeveelheid voor tapwaterbereiding neemt af, terwijl die voor ruimteverwarming een stijgende lijn vertoont, ondanks de zachte winters [10].
- Persoonlijke woonwensen zullen de woningmarkt steeds sterker gaan sturen. Consumenten worden mondiger en veeleisender. Dit vertaalt zich door een schaarste in het aanbod en nog slechts in beperkte mate consumentgericht bouwen en meer differentiatie. In eerste instantie zichtbaar voor de inbouwpakketten (keuken, badkamer en eventueel vrij indeelbare ruimten). Tevens is er sprake van een versterking van de belangenvertegenwoordiging van kopers: er is een toenemende aandacht voor opleveringskeuring en zekerstellingen. Dit wordt mogelijk ingevuld door certificaten en/of keurmerken.
- Kwaliteit wordt belangrijker: er is een toenemende aandacht voor het binnenmilieu, gezondheid en comfort (energie en regelingen) alsmede LCC (kosten gedurende de gehele levensfase, onderhoud en beheer).
- De invloed van overheden (m.n. gemeenten) in de planvormingfase neemt toe en die van projectontwikkelaars blijft onverminderd groot.

De komende jaren zal **de nieuwbouwmarkt** een interessante markt blijven, maar deze is afnemend. Er geldt:

- Vinex loopt af, dus van grootschalige projecten nu gaan we naar kleinschalige projecten straks.
- De uitbreiding van de woningvoorraad zal voor de periode 2001-2005 312.600 bedragen, dat is 62.520 woningen per jaar. Er zullen ruim 600.000 nieuwe woningen gebouwd worden tot 2010. Voor deze nieuwe woningen zal de EPN van kracht zijn. In 2000 is de EPN vastgesteld op 1,0 en verwacht wordt dat deze in 2004 0,8 zal zijn. Dit zal met name van invloed zijn op de ruimteverwarmingvraag, en in mindere mate op de warmwatervraag. Geschat wordt dat de ruimteverwarmingvraag per woning zal dalen tot ongeveer 700 m³ gas (19 GJ). Gezien de boven be-

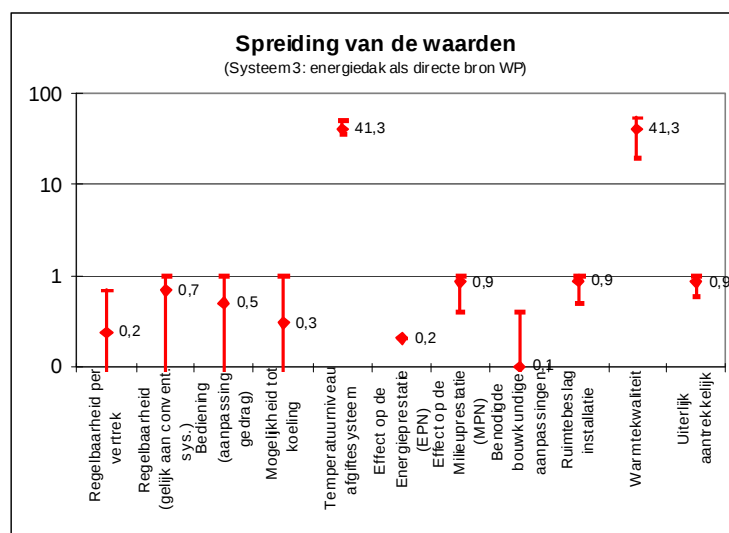
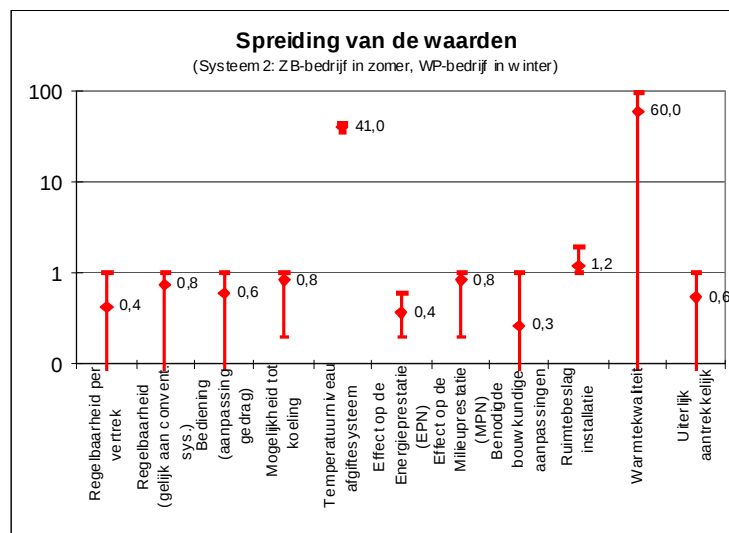
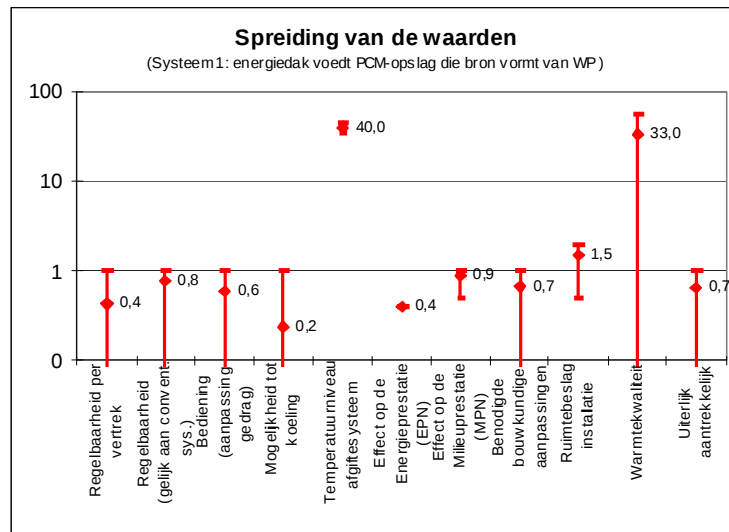
sproken toename van de warmwatervraag zal de zonneboiler, naast concurrerende technieken, hierin een goede rol kunnen spelen.

- In de nieuwbouw zal een groot deel van de woningen uitgevoerd worden met HR ketels, wat neerkomt op ongeveer 500.000 nieuw te installeren ketels tot 2010.
- Binnen de nieuwbouw zal het aandeel koopwoningen groot zijn (65 tot 80%) en zullen met name huizen gebouwd worden in de hogere prijsklassen. Vanuit het oogpunt van energiegebruik mag dus aangenomen worden dat het om huishoudens zal gaan met een hoge comfortbehoefte. Bovendien neemt de inhoud van nieuwbouwwoningen per bewoner nog altijd licht toe (bij een vrij constante bezettingsgraad), zowel voor koop als huur.
- Bouwprojecten worden complexer: het belang van het bouwproces groeit, betere componenten, beter interacterende systemen en andere samenwerkings- en financieringsvormen. Prefabricatie neemt ten gevolge van hoge prestatienormen, ruimte, logistiek en ordening toe, maar staat op gespannen voet met on-site productie i.v.m. verkeersproblemen bij de aanvoer.

In het algemeen kan gezegd worden dat **renovatie, beheer en onderhoud** van zowel de bestaande woning- als van de installatievoorraad van toenemend belang zijn. Op het gebied van renovaties is een aantal ontwikkelingen te noemen, die deels overlappen en deels als onafhankelijk van elkaar kunnen worden gezien.

- Verwacht wordt dat tot 2010 ongeveer 2 miljoen woningen aan renovatie toe zijn, waarvan 53% huur- en 47% koopwoningen. Het gaat hier om ingrijpende renovaties, waarbij mogelijk ook daken en gevels aangepakt worden. Met het oog op de beleidsspeerpunten van VROM zullen veel van deze renovaties plaatsvinden in de stedelijke gebieden. Ingeschat wordt dat daarom extra aandacht aan renovaties in de gestapelde bouw gegeven zal worden, waardoor de behoefte aan innovatieve collectieve verwarmingssystemen zou kunnen toenemen. Gezien bovengenoemde ontwikkelingen zal dit gepaard gaan met een stijging van de comfortbehoefte in deze sector.
- Hoewel hier nog geen bindende afspraken over zijn, kan verwacht worden dat de EPK (Energieprestatiekeur voor de bestaande bouw) de komende jaren ingevoerd zal worden. Dit zal als gevolg hebben dat bij tenminste 1,5 miljoen woningen extra isolatiemaatregelen getroffen moeten worden. Ook kan dit marktaandeel interessant worden voor toepassing van duurzame energie.
- Er zijn tot 2010 ongeveer 1,2 miljoen verouderde CV ketels aan vervanging toe. Verwacht wordt dat het merendeel van deze ketels vervangen zal worden door HR/VR ketels. Verder wordt verwacht dat nog eens ongeveer 0,5 miljoen woningen met lokale verwarming uitgevoerd zullen worden met een nieuwe HR/VR ketel. Wat betreft warmwaterapparatuur neemt het aantal combiketels nog altijd fors toe, net als het aantal badgeisers. Het aantal keukengeisers daarentegen neemt fors af. Het aandeel zonneboilers blijft nog altijd laag (<1%). Wat betreft elektrische verwarmingstoestellen is er een lichte stijging waarneembaar qua elektrische geisers, het aandeel van andere warmwatertoestellen neemt licht af.
- Gezien de blijvend groeiende comfortbehoefte en de nauwelijks dalende totale warmtevraag tegenover het aanscherpende milieubeleid, wordt er groot potentieel gezien voor meer toepassing van energiereducerende maatregelen en het inzetten van duurzame energiebronnen. Concurrerende technieken voor de zonneboiler zijn (of kunnen zijn) de nieuwste HR-ketels en de warmtepomp (-boiler) en in mindere mate warmteterugwinning uit ventilatie en micro-W/K.

Bijlage D Spreiding van de waarden per aspect



Bijlage E Beoordeling van de aspecten door de klankbordgroep

I					
Aspect	Eenheid	Grenswaarden	Systeem 1 (energiedak voedt faseovergangsmateriaal opslag die bron vormt van WP)	Systeem 2 (ZB-bedrijf in zomer, WP-bedrijf in winter)	Systeem 3 (energiedak als directe bron WP)
Regelbaarheid per vertrek	Nee/ja	0/1	0	0	0
Regelbaarheid (gelijk aan convent. sys.)	Nee/ja	0/1	1	1	1
Bediening (aanpassing gedrag)	Nee/ja	0/1	1	1	1
Mogelijkheid tot koeling	Nee/ja	0/1	0	1	0
Temperatuurniveau afgiftesysteem	°C	35 – 55	45	45	35
Effect op de Energieprestatie (EPN)	d(EPC)	0 – 0,5	0,4	0,3	0,2
Effect op de Milieuprestatie (MPN)	Neg/pos	0/1	1	1	1
Benodigde bouwkundige aanpassingen	Nee/ja	0/1	0	0	0
Ruimtebeslag installatie	m ²	0 – 2	1	1	1
Warmtekwaliteit	°C	20 - 100	20	80	20
Uiterlijk aantrekkelijk	Nee/ja	0/1	0/1	0/1	0/1

II					
Aspect	Eenheid	Grenswaarden	Systeem 1	Systeem 2	Systeem 3
Regelbaarheid per vertrek	Nee/ja	0/1	1	1	
Regelbaarheid (gelijk aan convent. sys.)	Nee/ja	0/1	0	0	
Bediening (aanpassing gedrag)	Nee/ja	0/1	1	1	
Mogelijkheid tot koeling	Nee/ja	0/1	0	1	
Temperatuurniveau afgiftesysteem	°C	35 – 55	35	35	
Effect op de Energieprestatie (EPN)	d(EPC)	0 – 0,5	0,4	0,6	
Effect op de Milieuprestatie (MPN)	Neg/pos	0/1	1	1	
Benodigde bouwkundige aanpassingen	Nee/ja	0/1	1	1	
Ruimtebeslag installatie	m ²	0 – 2	2	2	
Warmtekwaliteit	°C	20 - 100	0	0	
Uiterlijk aantrekkelijk	Nee/ja	0/1	0	0	

III					
Aspect	Eenheid	Grenswaarden	Systeem 1	Systeem 2	Systeem 3
Regelbaarheid per vertrek	Nee/ja	0/1			
Regelbaarheid (gelijk aan convent. sys.)	Nee/ja	0/1	1	1	1
Bediening (aanpassing gedrag)	Nee/ja	0/1	0	0	0
Mogelijkheid tot koeling	Nee/ja	0/1	0	0	1
Temperatuurniveau afgiftesysteem	°C	35 – 55	45	45	45
Effect op de Energieprestatie (EPN)	d(EPC)	0 – 0,5			
Effect op de Milieuprestatie (MPN)	Neg/pos	0/1	1	1	1
Benodigde bouwkundige aanpassingen	Nee/ja	0/1	0	1	0
Ruimtebeslag installatie	m ²	0 – 2	1	2	1
Warmtekwaliteit	°C	20 - 100	55	55	55
Uiterlijk aantrekkelijk	Nee/ja	0/1	1	1	1

IV					
Aspect	Eenheid	Grenswaarden	Systeem 1	Systeem 2	Systeem 3
Regelbaarheid per vertrek	Nee/ja	0/1	0,7	0,7	0,7
Regelbaarheid (gelijk aan convent. sys.)	Nee/ja	0/1	0,8	0,8	0,8
Bediening (aanpassing gedrag)	Nee/ja	0/1	1	1	1
Mogelijkheid tot koeling	Nee/ja	0/1	0,2	0,2	0,2
Temperatuurniveau afgiftesysteem	°C	35 – 55	50	40	45
Effect op de Energieprestatie (EPN)	d(EPC)	0 – 0,5	0,2	0,4	0,2
Effect op de Milieuprestatie (MPN)	Neg/pos	0/1	0,4	0,5	0,2
Benodigde bouwkundige aanpassingen	Nee/ja	0/1	0,4	0,4	0,3
Ruimtebeslag installatie	m ²	0 – 2	0,5	0,5	1
Warmtekwaliteit	°C	20 - 100	50	50	70
Uiterlijk aantrekkelijk	Nee/ja	0/1	0,6	0,6	0,2

V					
Aspect	Eenheid	Grenswaarden	Systeem 1	Systeem 2	Systeem 3
Regelbaarheid per vertrek	Nee/ja	0/1	0	0	0
Regelbaarheid (gelijk aan convent. sys.)	Nee/ja	0/1	0	1	1
Bediening (aanpassing gedrag)	Nee/ja	0/1	0	0	0
Mogelijkheid tot koeling	Nee/ja	0/1	1	1	1
Temperatuurniveau afgiftesysteem	°C	35 – 55	35	35	35
Effect op de Energieprestatie (EPN)	d(EPC)	0 – 0,5			
Effect op de Milieuprestatie (MPN)	Neg/pos	0/1	1	1	1
Benodigde bouwkundige aanpassingen	Nee/ja	0/1	0	1	0
Ruimtebeslag installatie	m ²	0 – 2	1	2	1
Warmtekwaliteit	°C	20 - 100	40	40	95
Uiterlijk aantrekkelijk	Nee/ja	0/1	1	1	1