TNO-rapport
TNO-MEP – R 2000/367

TNO Milieu, Energie
en Procesinnovatie

Implementatie van warmtepompen - Technologische innovatie door combinatie met koelfunctie

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

Telefoon: 055 549 34 93
Fax: 055 541 98 37
Internet www.mep.tno.nl

Datum
oktober 2000

Auteur(s)
Ing. A.A.L. Traversari
Ir. C.P.J.M. Geelen
Ir. N.R. Bootsveld
Ing. M. van Ingen

Projectnummer
30315

Trefwoorden
- warmtepomp
- EPN
- koeling
- vloerkoeling

Bestemd voor
Strategie en Programma TNO
NUON

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

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

© 2000 TNO

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

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

Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek TNO

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

Samenvatting

Dit rapport betreft de resultaten van een co-financieringsonderzoek met NUON, naar de mogelijkheid een koelfunctie toe te voegen aan warmtepompsystemen. De onderzoeksdoelstelling luidde:

Kennis op te bouwen waarmee het mogelijk is om tegen zo weinig mogelijk extra kosten een koelfunctie met een laag energiegebruik en een hoog comfort aan het systeem toe te voegen.

Om deze doelstelling te realiseren is een inventarisatie uitgevoerd naar de verschillende mogelijke systemen. Deze zijn vervolgens beoordeeld op kwalitatieve aspecten. Ook is met berekeningen inzicht verkregen in het te realiseren comfort in een gedefinieerde woning en in de effecten op het jaarlijkse energiegebruik.

De belangrijkste conclusies van dit onderzoek zijn:
- De zoninstraling is de belangrijkste factor bij oververhitting van moderne woningen.
- Adequate ventilatie kan oververhitting voorkomen bij matig warme buitentemperaturen (typisch voor- en naseizoen).
- Het koelend vermogen van de bodem is voldoende om het thermisch comfort in de woning behaaglijk te houden.
- Passieve koeling van de woning voorziet in de beschouwde situatie niet in volledige regeneratie van de bodem. Er is nog sprake van een thermische onbalans.
- De conclusies van het onderzoek blijken gevoelig voor bewonersgedrag. Indien de bewoners in staat zijn te ventileren is het positieve effect van de extra koelfunctie kleiner.

De woning dient integraal ontworpen te worden, met meewegen van de specifieke eigenschappen van het verwarmings- en koelsysteem en bouwkundige maatregelen. Toepassing van een warmtepompsysteem met koelfunctie zal namelijk leiden tot een ander optimum tussen installatievoorzieningen en bouwkundige maatregelen. Zo kan meer zontoetreding worden toegestaan als vloerkoeling de zonnewarmte kan wegvangen. De EPN kan dan verder worden verlaagd zonder risico op oververhitting in de zomer.

Niet onderzocht is het effect van vloer- en wandkoeling op absorptie van zoninstraling. Volgens literatuur is het koelend vermogen van vloerkoeling, voor directe zoninstraling, factoren groter dan op basis van convectieve warmteoverdracht verwacht kan worden. Voordeel is dat de constructie niet warm wordt.

Aanbevolen wordt een vervolgonderzoek te starten, waarin koude- en warmtevraag van een woning, zontoetreding en regeneratie van de bodem in samenhang onderzocht worden. Doel is een economisch interessante verlaging van het primair energiegebruik. Zo kan overwogen worden om de warmteverliezen in de winter verder te verminderen en meer passieve zonnewarmte te benutten, terwijl de resulterende extra koudevraag in de zomer op een efficiënte, passieve manier wordt ingevuld. De extra warmte die 's zomers in de woning komt, wordt dan gebruikt om de bodem te regenereren terwijl de koelfunctie het binnenklimaat comfortabel houdt. Uiteraard moet warmtetoetreding in de zomer zo veel mogelijk worden voorkomen. Dit onderzoek kan ook leiden tot routes naar verdere verlaging van de EPC, zonder aantasting van het wooncomfort in de zomer, of ongewenste neveneffecten.

Een integrale benadering van koude- en warmtevraag kan leiden tot een systeem waarbij de woning gaat fungeren als zonnecollector die warmte opslaat in het bodemsysteem, voor ruimteverwarming in de winter. Volgens literatuur is het koelend vermogen van vloerkoeling, voor directe zoninstraling, factoren groter dan op basis van convectieve warmteoverdracht verwacht kan worden. De warmte wordt geabsorbeerd voordat de constructie de binnenlucht kan verwarmen of voor een hogere stralingstemperatuur kan zorgen. Dit effect is niet onderzocht in de huidige studie, maar zou een wezenlijk onderdeel moeten zijn van vervolgonderzoek. Ook zou aandacht besteed moeten worden aan de robuustheid van het systeem voor bewonersgedrag. De toevoeging van een koelfunctie aan een warmtepompsysteem maakt de weg vrij om zonder noemenswaardige meerinvesteringen, de benutting van passieve zonne-energie te vergroten

Inhoudsopgave

Samenvatting 2

Inhoudsopgave 4

1. Inleiding 6

2. Inventarisatie van de verschillende systemen 7
   2.1 Route I; Warmtepomp met aanvullende koelfunctie 7
      2.1.1 Variant Ia Vloerverwarming en vloerkoeling 8
      2.1.2 Variant Ib Wandverwarming en wandkoeling 8
      2.1.3 Variant Ic Plafondkoeling 9
      2.1.4 Variant Id Radiatoren voor verwarming en koeling 9
      2.1.5 Variant Ie Gekoelde plafondventilator (Fiwihex) 9
   2.2 Route II Omkeerbare airconditioning 10
      2.2.1 Variant IIa DX-systemen 10
   2.3 Route III Alternatieve systeemconcepten 11
      2.3.1 Variant IIIa Nakoeling gebalanceerde ventilatie met WTW 11
   2.4 Kwalitatieve beoordeling voor verdere ontwikkeling 12

3. Beoordeling comfortaspecten 13
   3.1 Inleiding begrippen thermisch comfort in zomersituatie 13
   3.2 Criteria temperaturen en vochthuishouding uit kantooromgeving 16

4. Selectie van systemen met een goed marktpotentieel 18

5. Berekeningen 20
   5.1 Uitgangspunten 20
      5.1.1 Woning 20
      5.1.2 Koel/verwarmingssysteem 21
      5.1.3 Bodemwarmte als bron 21
      5.1.4 Grondwater als bron 22
      5.1.5 Warmte en koude behoefte van de woning 22
   5.2 Resultaten 24
      5.2.1 Mogelijke warmtelevering door de bodem 24
      5.2.2 Mogelijke koudelevering door de bodem 25
      5.2.3 Resultaten temperatuur- en vochthuishouding 25
      5.2.4 Invloed bewonersgedrag 30

5.2.5 Invloed COP warmtepomp 30
5.2.6 Koeling met grondwater 30
5.2.7 Energetisch rendement koeling 31
5.3 Combinatie met gebalanceerde ventilatie 31
5.4 Conclusies 31

6. Inschatting van de kosten 33

7. Conclusies 35

8. Aanbevelingen 36
8.1 Passieve koeling bij warmtepompsysteem zinvol 36
8.2 Combinatie met gebalanceerde ventilatie 36
8.3 Thermische balanswoning 36

9. Literatuur 38

10. Verantwoording 39

1. Inleiding

In het kader van het co-financieringsprogramma van TNO Strategie en Programma heeft TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie met ondersteuning van Nuon onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheid om middels warmtepompsystemen op energetisch efficiënte wijze in woningen te koelen. Dit is ingegeven door een marktstudie [5] waarin aanbevelingen worden gedaan om de implementatie van huishoudelijke warmtepompen te starten in de dure sectoren en daarbij de functie van het systeem, naast de gebruikelijke ruimteverwarming en warmtapwaterbereiding, uit te breiden met een koelfunctie. Dit is gebaseerd op het feit dat een warmtepompsysteem voor ruimteverwarming en warmtapwaterbereiding in principe tegen geringe extra kosten uitgebreid kan worden naar een systeem waarmee ook gekoeld kan worden zonder dat dit in resulteert in een hoog energiegebruik, zoals het geval is bij het toepassen van separate airconditioning units.
De doelstelling van het project is erop gericht om kennis op te bouwen waarmee het mogelijk is om tegen zo weinig mogelijk extra kosten een koelfunctie met een laag energiegebruik en een hoog comfort aan het systeem toe te voegen.
Om deze doelstelling te realiseren is in eerste instantie een inventarisatie uitgevoerd naar de verschillende mogelijke systemen die vervolgens op basis van kwalitatieve aspecten zijn beoordeeld. Naast deze criteria is tevens gekeken naar het comfort die de verschillende systemen kunnen realiseren met betrekking tot de temperatuurniveaus en de relatieve vochtigheden. Omdat het onduidelijk is of er voldoende koeling gerealiseerd kan worden met de bodem zijn er een aantal simulaties uitgevoerd waarmee er duidelijkheid is gekomen omtrent de capaciteit van de bodem. Als laatste onderdeel van het project zijn globaal te verwachte meerkosten van de meest veelbelovende systemen aangegeven.

2. Inventarisatie van de verschillende systemen

In dit hoofdstuk wordt een analyse gemaakt van de verschillende mogelijke systemen om het comfort in de woningbouw te verbeteren. Van ieder concept worden de kwalitatieve voor- en nadelen aangegeven.

Bij de beschouwing van systeemvarianten voor klimatisering (koeling) middels warmtepompen, zijn drie routes gevolgd. De eerste betrof de uitbreiding van warmtepompsystemen zodat ze naast verwarming in het stookseizoen, ook koeling kunnen leveren op warme dagen. Hierbij is de warmtepomp het vertrekpunt en is de koelfunctie te zien als een uitbreiding van de functionaliteit van de warmtepomp. De betreffende systemen voldoen dus in de eerste plaats aan de eisen voor verwarmingsbedrijf en de extra koelfunctie "is mooi meegenomen." In de tweede route is klimatisering het vertrekpunt en lift de warmtepompfunctie mee op de investeringen in een koel leefklimaat in de zomer. Tot slot kan de gehele probleemstelling om een aangenaam binnenklimaat te realiseren tegen lage (energie)-gebruikskosten als startpunt worden genomen. Mogelijk leidt deze benadering met een ruim perspectief tot innovatieve oplossingen die anders niet aan bod zouden komen.

De drie ontwikkelingsroutes leiden tot technisch verschillende systemen. Vanuit de eerste route, waarbij de warmtepompfunctie het vertrekpunt is, zijn met name brine/water warmtepompen met een bodemwarmtewisselaar en warmtepompen met grondwater als warmtebron beschouwd. Bij deze systemen wordt warmte uit de bodem onttrokken met een glycol/water mengsel en via een warmtepomp op een hogere temperatuur aan een lagetemperatuurverwarmingsinstallatie aangeboden. Vanuit de tweede route, die begint bij klimatisering, worden juist lucht/lucht systemen nader beschouwd. Gedacht kan worden aan DX-systemen, waarbij het koudemiddel ook het warmtetransport verzorgt van binnen naar buiten, of andersom. Geavanceerder zijn multi-split systemen met één buitenunit en meerdere binnenunits die ofwel verwarmen, ofwel koelen, afhankelijk van de lokale behoefte. Daarnaast is vanuit een ruimer perspectief onderzocht welke alternatieve systeemconcepten aan de doelstelling kunnen voldoen aan het doel van deze studie om warmtepompen met een aanvullende koelfunctie te introduceren in woningen.

2.1 Route I; Warmtepomp met aanvullende koelfunctie

De op de Nederlandse markt beschikbare warmtepompsystemen maken in de regel gebruik van water voor het warmtetransport binnen de woning. De warmtebron die in veel gevallen wordt gebruikt is grondwater of de bodem zelf. De warmteonttrekking aan het grondwater vindt plaats door grondwater op te pompen, door de warmtepomp te leiden en vervolgens weer in de bodem terug te voeren of op het riool te lozen. Warmteonttrekking aan de bodem vindt plaats door middel van

(verticale)bodemwarmtewisselaars. Aan de gebouwzijde wordt de warmte via een watercircuit afgegeven in lagetemperatuurverwarmingssystemen. Bij systemen die de bodem als warmtebron gebruiken daalt door warmteonttrekking de (locale)-bodemtemperatuur, wat mogelijkheden biedt om in de zomer koud water te produceren en daarmee de bodem te regenereren (opnieuw van warmte te voorzien). Het koude water wordt gebruikt om de woning te koelen. Wordt grondwater als warmtebron gebuikt dan is de temperatuur relatief constant op een niveau van 10 a 12°C. Het warmtepompsysteem wordt in de eerste plaats ontworpen voor verwarming. Koeling wordt met minimale investeringen als extra meegeleverd. De onderstaande varianten hebben betrekking op verschillen tussen de afgiftesystemen.

2.1.1 Variant Ia Vloerverwarming en vloerkoeling

Als afgiftesysteem wordt de vloer gebruikt. Voor ruimteverwarming is dit een gangbare mogelijkheid. Voor koeling zijn er mogelijkheden, maar ook bezwaren:

Voordelen:	*Nadelen:*
– eenvoud – groot warmte-uitwisselend oppervlak – aan te sluiten op de bodemwarmtewisselaar zonder tussenkomst van de warmtepomp – uitstekende warmteverdeling bij verwarmingsbedrijf – hoog comfort voor verwarming	– kans op condensvorming – geen ontvochtiging[1] – hygiëne risico's (huismijt) – de temperatuurverdeling in de ruimte is ongunstig bij koelbedrijf (koude voeten, heet hoofd) – beperkte warmteoverdracht bij koelbedrijf

2.1.2 Variant Ib Wandverwarming en wandkoeling

Wandverwarming bestaat net als vloerverwarming uit buizen die in de wanden van de woning worden aangebracht.

Voordelen:	*Nadelen:*
– betere hygiëne dan vloerkoeling – betere temperatuurverdeling dan vloerkoeling – extra mogelijkheid voor de aanleg van warmte-uitwisselend oppervlak	– beschikbaarheid van wanden: voor binnenwanden komen kasten, de buitenwanden bevatten ramen en geven meer warmteverliezen – kans op condensvorming – geen ontvochtiging[1]

[1] De voorstanders (leveranciers) van vloer- en wandverwarmingssystemen beweren dat stralingskoeling dermate comfortverhogend werkt dat het niet ontvochtigen niet als comfortvermindering wordt ervaren.

2.1.3 Variant Ic Plafondkoeling

Bij plafondkoeling zorgt een warmte-uitwisselend oppervlak aan het plafond voor koeling van de ruimte. Het systeem is vooral in gebruik in de utiliteitsbouw.

Voordelen:	*Nadelen:*
– goede temperatuurverdeling – hoog comfort – goede warmteoverdracht bij koeling	– aparte investering in plafondkoelers – niet geschikt voor verwarming – kans op condensvorming – geen ontvochtiging[1] – matige warmteoverdracht bij verwarming

2.1.4 Variant Id Radiatoren voor verwarming en koeling

Het centrale verwarmingsysteem met radiatoren in de ruimte is het meest gangbaar in Nederland. Bij toepassing van warmtepompen worden radiatoren gebruikt met een groter warmte-uitwisselend oppervlak, zogenaamde lagetemperatuurverwarming. In deze variant worden dezelfde radiatoren ook voor koeling gebruikt.

Voordelen:	*Nadelen:*
– eenvoud – lage investeringen	– warmte-uitwisselend oppervlak (VO) is te klein – condensvorming op leidingen en radiatoren

2.1.5 Variant Ie Gekoelde plafondventilator (Fiwihex)

De Fiwihex Fan (Fine Wire Heat Exchanger) is een Nederlandse ontwikkeling die gesteund is door Novem in het NECST programma (Nieuwe EnergieConversie-Systemen en -Technologieën). Een beschrijving door de fabrikant is opgenomen als bijlage. Het apparaat maakt het volgens de fabrikant mogelijk om warmte over te dragen van water naar lucht bij een zeer klein temperatuurverschil. In elk vertrek wordt een dergelijke ventilator geplaatst die gekoeld wordt met koude uit de bodem.

Voordelen:	*Nadelen:*
– perceptie van airco door de consument – luchtverplaatsing geeft extra koelend effect voor de bewoners	– investering in extra installatiecomponenten (echter de fiwihex kan ook voor verwarming worden gebruikt).

– goede temperatuurverdeling in de ruimte – eenvoud	– zichtbaarheid installatie in de woning – geen ontvochtiging

2.2 Route II Omkeerbare airconditioning

De verkoop van airconditioners neemt toe. Als ze toch gekocht worden zouden ze omkeerbaar moeten zijn, zodat ze in de winter als (aanvullende) verwarming kunnen dienen. Deze systemen worden ontworpen voor dekking van de koudevraag door actieve koeling. Idee bij deze variant is dat de warmtepompfunctie tegen geringe meerinvesteringen een besparing voor de gebruiker kan genereren. Voorwaarde is wel dat de COP voldoende hoog is.

2.2.1 Variant IIa DX-systemen

Een split unit DX systeem bestaat uit een warmtewisselaar buiten en één binnen. Beide warmtewisselaars kunnen dienen als verdamper en als condensor. Door de omkeerbaarheid fungeert het systeem als airconditioning in de zomer en als warmtepomp in de winter. Met multi-split systemen is één buitenunit aangesloten op meerdere binnenunits die ofwel verwarmen, ofwel koelen, afhankelijk van de lokale behoefte. Zo kan een warmteoverschot in één deel van de woning naar een ander gedeelte worden getransporteerd, waar een warmtevraag heerst.

Voordelen:	*Nadelen:*
– lift mee op de investering in airconditioning – eenvoudiger plaatsbaar dan systemen met bodemwarmtewisselaar – beschikbaarheid van buitenlucht	– vermogen en rendement zijn sterk afhankelijk van de buiten-temperatuur – minder comfort bij verwarming t.o.v. stralingsverwarming – groter gebruik van koudemiddelen (broeikas, ozonlaag) t.o.v. warmte-pomp in cv-systeem – geluid-producerende componenten buiten de woning

Een alternatief DX systeem is in Frankrijk en Zwitserland voorgesteld, waarbij directe expansie van koudemiddel in een bodemwamtewisselaar plaatsvindt en het koudemiddel in leidingen in de vloer condenseert. Dit gaf problemen bij de terugvoer van olie naar de compressor. De olie bleef in het systeem waardoor de compressor niet meer gesmeerd werd en defect raakte.

2.3 Route III Alternatieve systeemconcepten

Getracht is om vanuit fundamentele overwegingen te komen tot alternatieve systeemconcepten. Voorbij de grenzen van bestaande techniek liggen misschien mogelijkheden die anders over het hoofd kunnen worden gezien. Een fundamentele doelstelling is vergroting van de toegevoegde waarde van de warmtepomp, zodat zijn investering eerder gerechtvaardigd is. Extra investeringen in installaties moeten dus relatief veel waarde toevoegen voor de consument. Dit kan onder andere door zo veel mogelijk gebruik te maken van installaties die toch al worden aangelegd in nieuwbouwwoningen.

2.3.1 Variant IIIa Nakoeling gebalanceerde ventilatie met WTW

Gebalanceerde ventilatie in combinatie met warmteterugwinning (WTW) is niet meer weg te denken in de nieuwbouw van woningen als gevolg van de Energie Prestatie Normering [6]. Lucht wordt afgezogen in toilet, keuken en badkamer en verse lucht wordt toegevoerd in de slaapkamers en de woonkamer. In deze variant wordt een water-lucht-warmtewisselaar geplaatst na de WTW in de toevoerleiding voor verse lucht. De warmtewisselaar wordt aangesloten op de bodemwarmtewisselaar die in de winter als bron dient voor de warmtepomp die de woning verwarmt. Op deze wijze wordt gebruik gemaakt van het reeds aanwezige systeem voor ventilatie, dat noodzakelijk is voor de luchtkwaliteit in de woning. Tegelijkertijd blijft men vrij in de keuze van het afgiftesysteem voor verwarming via de warmtepomp.

Voordelen:	*Nadelen:*
– inbreng van koude lucht op de juiste hoogte, dus goede verticale temperatuurverdeling in de ruimte – ontvochtiging is in dit afgiftesysteem goed te realiseren, in combinatie met actieve koeling – naar keuze aan te sluiten op de bodemwarmtewisselaar of de warmtepomp – vrije keuze warmtepompsysteem – de warmtewisselaar voor koeling kan ook een deel van de warmteafgifte voor verwarming invullen.	– extra investeringen nodig – horizontale temperatuurverdeling is mogelijk onvoldoende – beperkte koelcapaciteit – vrije keuze afgiftesysteem voor verwarming

2.4 Kwalitatieve beoordeling voor verdere ontwikkeling

Ia samen met Ib, vloer- en wandverwarming en –koeling, worden al toegepast in de utiliteitsbouw, terwijl er nog veel vragen zijn. Dit verdient dus nadere aandacht.
Ie, toepassing van convectorunits, is interessant, in eerste instantie om na te gaan of er technisch potentieel is.
IIa, DX-systemen betreffen een autonome ontwikkeling die buiten het kader van het huidige project valt.
IIIa, nakoeling van gebalanceerde ventilatie met warmteterugwinning, betreft een concept dat nog niet wordt toegepast en waarvoor systeemkennis noodzakelijk is. TNO zou hier een ontwikkeling in gang kunnen zetten.
In hoofdstuk vier worden de comfortaspecten beschreven, waarna in hoofdstuk vijf de verschillende systemen worden beoordeeld.

3. Beoordeling comfortaspecten

3.1 Inleiding begrippen thermisch comfort in zomersituatie

Voor de bepaling van het thermisch comfort dat 's zomers bereikt wordt met klimatisering door de warmtepomp zijn de volgende parameters van belang:
- de luchttemperatuur
- de gemiddelde stralingstemperatuur
- de luchtsnelheid
- de relatieve luchtvochtigheid
- het metabolisme (de lichamelijke activiteit van personen)
- de kleding

Voor de kleding nemen we aan dat men lichte zomerkleren draagt. Het metabolisme hangt af van de mate van activiteit die de bewoners verrichten. Voor deze studie wordt uitgegaan van weinig lichamelijke activiteit, zodat aangesloten kan worden bij onderzoek dat voor de kantooromgeving is uitgevoerd. Daar zijn namelijk veel meer gegevens beschikbaar.

De relatieve luchtvochtigheid (R.V.) is volgens de literatuur van ondergeschikt belang voor personen die zich thermisch behaaglijk voelen. Volgens ISO 7730 moet de relatieve luchtvochtigheid gehandhaafd worden tussen 30% en 70%. Het is echter geen doel van dit onderzoek om volledige klimatisering na te streven in woningen. In 's zomerse omstandigheden accepteren we dat een beperkte koeling leidt tot enige thermische onbehaaglijkheid. Onder die omstandigheden kan het belang van de relatieve luchtvochtigheid niet worden uitgesloten.
In het mollier-diagram (zie bijlage) is een comfortzone aangegeven. Vertrekkend vanuit buitenluchtcondities van 28°C en 60% R.V., leidt afkoeling niet tot een punt in de comfortzone. Afkoeling alleen is dan dus niet voldoende: er ontstaat discomfort als gevolg van de luchtvochtigheid. Dit discomfort is met het mollier-diagram niet te kwantificeren.

De stralingstemperatuur is van belang voor dit onderzoek omdat stralingskoeling één van de voorgestelde afgiftesystemen is. De gemiddelde stralingstemperatuur (T_{mrt}) wordt bepaald door te middelen over de over de temperaturen van de zichtbare wanden:

$$T_{mrt} = \sum_{i=1}^{n} \frac{A_l}{A_{tot}} T_l$$

waarin:
n = het aantal wanden van het betreffende vertrek
A_l = oppervlakte wand l [m^2]
A_{tot} = totale zichtbare wandoppervlak van het vertrek [m^2]
T_l = temperatuur van wand l [°C]

Bij deze benadering wordt dus geen rekening gehouden met de plaats van een persoon in een vertrek. Dit betekent dat lokale verschillen in de ruimte in deze benadering niet meegenomen worden.
Een bijzonder aspect van de stralingstemperatuur is de stralingsasymmetrie. Dit houdt in dat een groot verschil in stralingstemperatuur tussen oppervlakken in een ruimte als onbehaaglijk wordt ervaren. Volgens ISO 7730 moet deze stralingsasymmetrie kleiner dan 10°C zijn. Door het geringe temperatuurverschil tussen gekoelde oppervlakten en ruimtetemperatuur, zal stralingsasymmetrie door koeling geen rol spelen.

De luchttemperatuur is de meest voor de hand liggende parameter. De meest comfortabele luchttemperatuur hangt vooral af van de stralingstemperatuur van de ruimte. Het verband tussen luchttemperatuur, stralingstemperatuur en mate van welbevinden is weergegeven in onderstaande tabel, afkomstig uit DIN ISO 7730. Hierin wordt aangegeven welk percentage van de personen in een ruimte ontevreden zal zijn bij een gegeven combinatie van luchttemperatuur en stralingstemperatuur (= predicted percentage dissatisfied, PPD).

Tabel 1 *Het verband tussen luchttemperatuur, stralingstemperatuur en mate van welbevinden.*

Lucht-temperatuur °C	Predicted Percentage Dissatisfied (PPD)																				
	Behaaglijkheidsgebied																				
30	5	6	8	10	14	18	23	29	36	43	51	59	67	74	81	87	91	95	97	98	100
29	5	5	6	8	11	14	18	24	30	37	44	52	60	68	75	82	88	92	95	97	99
28	6	5	5	6	8	11	14	19	24	30	37	45	53	61	69	76	83	88	93	96	98
27	7	6	5	5	6	8	11	14	19	24	31	38	46	54	62	70	77	84	89	93	96
26	9	7	6	5	5	6	8	11	15	19	25	32	39	47	55	63	71	78	84	89	93
25	12	9	7	5	5	5	6	8	11	15	20	26	32	39	47	55	63	70	77	84	89
24	15	12	9	7	5	5	5	7	9	12	15	20	25	32	39	46	54	62	70	77	83
23	19	15	12	9	7	5	5	5	6	8	11	15	19	24	31	38	45	53	61	69	76
22	25	19	15	12	9	7	6	5	5	6	8	11	14	18	24	30	36	44	52	60	68
21	31	26	21	16	12	10	7	6	5	5	6	8	10	13	17	23	29	35	43	51	59
20	39	33	27	22	17	13	10	8	6	5	5	6	7	9	13	17	21	27	34	41	49
	20	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**	**34**	**35**	**36**	**37**	**38**	**39**	**40**
	stralingstemperatuur °C																				

Een bijzonder aspect van de luchttemperatuur betreft de verticale temperatuurgradiënt, zoals die zich kan voordoen bij vloerkoeling. Volgens ISO 7730 moet dit verschil kleiner zijn dan 3°C.

De samenhang en uitwisselbaarheid tussen lucht- en stralingstemperatuur kan vereenvoudigd worden uitgedrukt door gebruik te maken van de operatieve tempera-

tuur. De operatieve temperatuur (T_o) is de samenstelling van luchttemperatuur en stralingstemperatuur en is als volgt gedefinieerd:

$$T_0 = \frac{\alpha_s \cdot T_{mrt} + \alpha_c \cdot T_l}{\alpha_s + \alpha_c}$$

met:

α_s = warmteoverdrachtscoëfficiënt van de mens voor straling [m^2K/W]
T_{mrt} = gemiddelde stralingstemperatuur [°C]
α_c = warmteoverdrachtscoëfficiënt van de mens voor convectie [m^2K/W]
T_l = binnenluchttemperatuur [°C]

Indien we aannemen dat de mens evenveel warmte verliest aan straling als aan convectie, dan ontstaat de resulterende temperatuur:

$$T_r = \frac{T_{mrt} + T_l}{2}$$

Deze benadering is verantwoord bij luchtsnelheden <0,4 m/s en een gemiddelde stralingstemperatuur die lager is dan 50°C.

Combinatie van deze formule met bovenstaande tabel geeft het verband tussen behaaglijkheid, stralingstemperatuur en luchttemperatuur. Dit kan uitgedrukt worden in onderstaande grafiek, die laat zien dat optimaal comfort wordt bereikt bij een resulterende temperatuur van circa 25°C.

Figuur 1 *Predicted Percentage Dissatisfied (PPD) als functie van de comforttemperatuur.*

De luchtsnelheid is niet van belang bij snelheden onder 0,1 m/s, waarnaar normaal gesproken gestreefd wordt. Echter, onder warme omstandigheden kan een hogere luchtsnelheid juist als behaaglijk ervaren worden, zie de toepassing van ventilatoren. Op deze wijze kan met beperkte klimatisering (=laag energieverbruik) toch voldoende klimatisering bereikt worden. De luchtsnelheid is integraal onderdeel van sommige afgiftesystemen en zal in die gevallen worden meegenomen.

Bij vloerkoeling en verwarming en bij langdurig zittend verblijf moet volgens ISO 7730 de vloertemperatuur liggen tussen 19°C en 29°C. Bij een vloertemperatuur van 19°C mag de luchttemperatuur ongeveer 1°C hoger zijn dan de gevraagde comforttemperatuur. Bij een gevraagde resulterende temperatuur van 25 °C, bedraagt de stralingstemperatuur voor een kubusvormige ruimte bij benadering 1/6*19 + 5/6 * 25 = 24°C. Bij toepassing van vloerkoeling mag de luchttemperatuur dus 26°C zijn bij een gevraagde resulterende temperatuur van 25°C. Dit is van belang bij de interpretatie van de rekenresultaten uit hoofdstuk 5. De comforttemperatuur door passieve koeling met vloer of wand is ongeveer 1 °C lager dan de gerealiseerde luchttemperatuur.

3.2 Criteria temperaturen en vochthuishouding uit kantooromgeving

Er is veel onderzoek gedaan naar behaaglijkheid, verreweg de meeste gegevens zijn bekend uit de kantooromgeving. Voor de berekeningen in hoofdstuk 5 is daarom gebruik gemaakt van behaaglijkheidscriteria voor de kantooromgeving met gemiddelde kleding, waarbij een behaaglijk en minder behaaglijke zone wordt onderscheidden. Deze criteria zijn als streng te beschouwen en moeten daarom worden gezien naast de criteria, met zomerse kleding, uit paragraaf 3.1.

Om onderscheid te kunnen maken in gradaties van behaaglijkheid heeft Fanger de PMV (Predictive Mean Vote) geïntroduceerd; de PMV geeft de te verwachten gemiddelde beoordeling van het binnenklimaat voor een grote groep personen in een bepaalde situatie. Daarbij wordt het als behaaglijk ervaren van het binnenklimaat uitgedrukt in een score van 0, een (te) warme ervaring scoort positief (max. 3) en een (te) koude ervaring scoort negatief (max. –3)
In de literatuur worden resultaten van behaaglijkheidsonderzoek meestal paarsgewijs uitgewerkt (bijvoorbeeld de combinatie luchttemperatuur en relatieve vochtigheid of de combinatie luchttemperatuur en stralingstemperatuur). Voor dit onderzoek is de combinatie luchttemperatuur en luchtvochtigheid van belang. Uit [3] blijkt dat de standaard eisen voor kantoren (- 0,5 < PMV < 0,5) resulteren in een gebied voor toelaatbare combinaties van temperatuur en vochtigheid zoals aangegeven in de figuren 5 t/m 9 als "behaaglijk". Daarbij gelden de volgende randvoorwaarden:

- gemiddelde luchtsnelheid < 0,15 m/s
- metabolisme: 72 W/m^2 (zittend schrijfwerk)
- kledingweerstand: 's zomers: 0,7 clo (Fanger, zie [3])
  's winters: 0,9 clo
- luchttemperatuur gelijk aan de gemiddelde stralingstemperatuur

Deze eis (- 0,5 < PMV < 0,5) houdt in dat maximaal 10% van de aanwezige personen het enigszins koud en maximaal 10% van de aanwezige personen het enigszins warm vindt.
Als toelaatbare overschrijding van de norm wordt daarnaast (voor kantoren) aangehouden dat de PMV ca. 100 uur per jaar tussen 0,5 en 1,0 (10% tot 27% vindt het enigszins warm) mag liggen (in de figuren 5 t/m 9 aangegeven als "nog behaaglijk".
Verder wordt bij toepassing van de methode van Fanger de overschrijdingsduur (van een bepaalde conditie) gewogen met de PMV: dit houdt in dat een overschrijdingsuur zwaarder weegt naarmate het verder buiten het behaaglijkheidsgebied ligt. Dit effect is niet nader gekwantificeerd.

4. Selectie van systemen met een goed marktpotentieel

De beoordeling van de verschillende systemen is gebeurd in onderstaande tabel 2. Deze tabel geeft een matrix met kritische succesfactoren en is het resultaat van langdurige discussie binnen het projectteam en NUON.

Varianten:

Ia	Vloerverwarming en -koeling
Ib	Wandverwarming en -koeling
Ic	Plafondverwarming en -koeling
Id	Radiatorenverwarming en -koeling
Ie	Fiwihexverwarming en -koeling
IIa	DX-systemen
IIIa	Luchtverwarming en -koeling
IIIb	Nakoeling gebalanceerde ventilatie met WTW

Tabel 2 Kritische succesfactoren, beoordeeld t.o.v. een systeem met vloerverwarming en -koeling.

Onderdeel \ Variant	Ia	Ib	Ic	Id	Ie	IIa	IIIa	IIIb
Verwarmingsvermogen	+/-	-	--	++		+	+/-	
Koelvermogen	+/-	+	++	--	+	+	+	+
Ontvochtiging	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+	++	++
Temperatuurverdeling verwarmen	+/-	+	-	-		-	-	-
Temperatuurverdeling koelen	+/-	+	+	-		-	+	+
Hygiëne	+/-	+	+	+/-		+/-	-	-
Totaal comfort verwarmen/koelen	+/-	+	-	+/-		-	-	-
Inpasbaarheid bouwproces	+/-	-	--	++		+	-	-
Extra kosten	+/-	-	--	++		-	-	-

De aandacht bij de berekeningen in hoofdstuk 5 is gericht op systeem Ia: vloerverwarming en –koeling. Vloerkoeling wordt namelijk al toegepast, terwijl fundamentele kennis nog ontbreekt. Verdere kennisinvesteringen in dit onderwerp door TNO blijven dus van belang om te verwachten vragen te kunnen beantwoorden.
Ie Fiwihexverwarming en -koeling (of vergelijkbare convectoren) lijkt een goede tweede. Het systeem kan werken met zeer kleine temperatuurverschillen tussen koelmedium en lucht. Het kan leiden tot een systeem dat lijkt op een multi-split DX systeem (gelijktijdig verwarmen en koelen mogelijk) maar dat goedkoper en praktischer is in aanleg. Het zou ook geschikt kunnen zijn voor nieuwbouw. Nadeel voor kennisinvestering op dit moment is dat het nog niet commercieel beschikbaar is en nog niet gebruikt wordt in warmtepompprojecten. Toepassing ervan betekent daarom ontwikkeling van de koude èn de warme kant van het systeem, wat buiten dit project valt.
IIa (DX-systemen) betreft vooral productontwikkeling en valt daardoor buiten de scope van het huidige project.

Luchtsystemen (IIIa en IIIb) blijven grotendeels buiten beschouwing vanwege de grote volumina die nodig zijn voor warmteoverdracht bij een luchtsysteem en vanwege de matige acceptatie. Het concept wordt nog niet toegepast in woningen (wel in de utiliteit). Anderzijds maakt de aanwezigheid van gebalanceerde ventilatie in circa 40% van de nieuwe woningen de sprong naar aanvullende koeling betrekkelijk klein. In paragraaf 5.3 wordt een indicatieve berekening van het potentieel van systeem IIIa uitgewerkt.

5. Berekeningen

In dit hoofdstuk worden de simulaties beschreven die uitgevoerd zijn met volgende doel:
- bepaling van de invloed van koeling op de vochthuishouding in de woning
- bepaling van de hoeveelheid koeling die met een gesloten bodemwarmtesysteem kan worden geleverd.

Hiertoe is uitgaande van het woningmodel "villa" volgens het EP-variantenboek van Novem een vraagpatroon voor verwarming en koeling vastgesteld. Daarna is met behulp van het TNO-rekenprogramma "Bodemtix" vastgesteld hoeveel koeling met het bodemsysteem kan worden geleverd. Met VA114 is vervolgens voor een aantal situaties berekend wat de optredende binnencondities zijn. De binnencondities zijn op hun beurt getoetst aan behaaglijkheidscriteria op basis van de methode van Fanger (zie ook hoofdstuk 3).

5.1 Uitgangspunten

5.1.1 Woning

Ter bepaling van het vraagpatroon aan warmte en koude is gekozen voor de "villa" uit het EP-variantenboek woningbouw [1]. Deze keuze is met name gemaakt op grond van het gegeven dat de promotie van warmtepompen met koelfunctie zich vooral richt op het bovengemiddelde marktsegment van de woningbouw. Daarnaast bevat de modelvilla uit het variantenboek relatief veel glas zodat er ook daadwerkelijk sprake is van een substantiële koelbehoefte.
De villa is met de volgende hoofdkenmerken te karakteriseren:
- Inhoud : 440 m^3
- Verliesoppervlak : 407 m^2
- Gebruiksoppervlak : 166 m^2
- Raamoppervlak : 78 m^2
- Rc-waarde dichte delen : 2,5 m^2.K/W
- U-waarde glas : 2,4 W/m^2.K, ZTA = 0,60
- Infiltratie : qv-10 = 1,43 dm^3/s * Ag
- Ventilatie : 135 m^3/h (mech. afzuiging, geen warmteterugwinning)
- Interne vochtproductie : 1,4 g/kg droge lucht (gemiddeld continue verhoging van de buitenluchtvochtigheid, zie [2]).
- Zonwering : gaat naar beneden bij een zonintensiteit van meer dan 300 W/m^2

5.1.2 Koel/verwarmingssysteem

Voor het woningsysteem is in het kader van bodemwarmteuitwisseling de combinatie met stralingsverwarming/-koeling middels de vloer beschouwd (systeem Ia uit hoofdstuk 2). De relevante aspecten van dit systeem met betrekking tot comfort, in relatie tot de andere mogelijke systemen zijn beschreven in hoofdstuk 4.

5.1.3 Bodemwarmte als bron

Voor het bodemsysteem is uitgegaan van 4 parallelle bodemwarmtewisselaars van elk 40 m lengte uitgevoerd als enkele U-buis. De U-buizen zijn in een vierkant geplaatst met een onderlinge afstand van 6 m (zie figuur 2). De opbouw van de bodem is als volgt verondersteld (vanaf het maaiveld naar beneden; figuur 6.1):

- 0 - 1 m droog zand
- 1 - 10 m klei/veen
- 10 - 60 m nat zand

Voor de simulaties is de grondwaterstroming op nul gesteld.

Opstelling bodemwarmtewisselaars

Dwarsdoorsnede bodem
(niet op schaal)

Figuur 2 Configuratie van de bodemwarmtewisselaars.

5.1.4 Grondwater als bron

Het gebruik van grondwater uit een watervoerende zandlaag, middels een collectieve bron, is een mogelijk alternatief voor het leveren van warmte en koude uit de bodem. De bodemgesteldheid moet zich daarvoor lenen en bovendien moeten meerdere villa's van warmtepompen worden voorzien. Vanwege de relatief hoge basisinvestering komt dit bronsysteem namelijk met name in aanmerking voor klein-collectieve voorzieningen. Na afkoeling of opwarming wordt het grondwater in dezelfde bodemlaag geïnjecteerd.
Het grondwater heeft een constante temperatuur van 10 – 12 °C en is daarmee een relatief gunstige bron in zowel de verwarmings- als de koelsituatie. Het vermogen wordt in deze situatie alleen beperkt door het maximale debiet dat verpompt mag worden. In het huidige vergunningenstelsel is 10 m^3/h een praktische grens.
Bij afkoeling van 10 naar 4 °C kan ca. 70 kW aan warmte worden onttrokken, voldoende voor het piekvermogen (zonder opwarmtoeslag) van 6 villa's. In de koelsituatie kan ca. 47 kW koeling worden geleverd bij opwarming van het grondwater van 12 naar 16 °C (secundair 15/19 °C); hiermee kunnen 7 villa's van volledige koeling (zonder ontvochtiging) worden voorzien.

5.1.5 Warmte en koude behoefte van de woning

Met behulp van het Vabi-programma VA114 is het warmte- en koudevraagpatroon van de villa bepaald. Hierbij zijn voor de koeling en de bepaling van de binnencondities de volgende varianten doorgerekend:

a. voldoende koelcapaciteit aanwezig: het gekozen set-point voor de ruimtetemperatuur tijdens koelbedrijf (24 °C) is altijd haalbaar;
b. 3 kW koelcapaciteit beschikbaar (zie paragraaf 6.3.2);
c. geen koeling aanwezig; de ramen blijven dicht;
d. geen koeling aanwezig; wanneer de ruimtetemperatuur boven de 23 °C stijgt worden de ramen geopend;
e. geen koeling aanwezig; wanneer de ruimtetemperatuur boven de 25 °C stijgt worden de ramen geopend.

Voor verwarming is steeds uitgegaan van een ruimtetemperatuur van 20 °C zonder nachtverlaging. In tabel 3 zijn de kengetallen van de energievraag voor de drie varianten weergegeven. Figuur 3 bevat de jaarbelastingduurkromme van de warmtebehoefte en van de koelbehoefte van de varianten a. en b. (volledige resp. gedeeltelijke koeling).

Tabel 3 Warmte- en koelbehoefte varianten.

	Warmte		Koeling		Netto Bodem-warmte-onttrekking [kWh/a]
	Vermogen [kW]	Behoefte [kWh/a]	Vermogen [kW]	Behoefte [kWh/a]	
Variant a; volledige koeling (ruimtetemperatuur max. 24 °C)	15	15900	6,5	3130	9350
Variant b; koelvermogen max. 3 kW	15	15900	3,0	2670	9800
Variant c, d en e; geen koeling	15	15900	0	0	12500

Figuur 3 Jaarbelastingduurkromme.

5.2 Resultaten

Figuur 4 frequentieverdeling mediumtemperatuur bodemwarmtewisselaar.

5.2.1 Mogelijke warmtelevering door de bodem

Bij de bodemsimulaties is uitgegaan van een COP van 4,6; dit komt overeen met de huidige stand der techniek (best geteste warmtepomp bij 0 °C brine-aanvoertemperatuur en 35 °C cv-aanvoertemperatuur). Met het systeem bestaande uit 4 enkele U-buizen van elk 40 m lengte in samenhang met de COP is gekozen voor een "worst-case" benadering. Het gevraagde vermogen en de jaarlijkse hoeveelheid warmte kan worden geleverd, mits tijdens pieklevering een gemiddelde mediumtemperatuur van ca. –8 °C wordt toegelaten; wanneer een groter bodemsysteem kan worden geïnstalleerd zullen de mediumtemperaturen (tijdens warmtelevering) stijgen. Bij keuze voor een warmtepomp met een slechtere COP zal de warmtevraag aan de bodem dalen, hetgeen eveneens in hogere temperaturen resulteert.
Uit de simulaties blijkt tevens (zie ook Figuur 4) dat slechts een gering aantal uren (50 – 100 per jaar) een gemiddelde mediumtemperatuur beneden –2 °C vereist is; de warmtepomp levert bij deze brontemperatuur 7 tot 8 kW warmte. Bij de praktische realisatie is het dus goed mogelijk te kiezen voor een bivalent systeem, waarbij de warmtepomp 50% van het vermogen voor z'n rekening neemt. De bijstookvoorziening levert dan jaarlijks 500 tot 800 kWh van de benodigde 16 MWh (= max. 5% van de behoefte).

5.2.2 Mogelijke koudelevering door de bodem

De koelcapaciteit van de bodem wordt met name door twee aspecten bepaald:

- De hoeveelheid warmte die tijdens de verwarmingsperiode is onttrokken. Dit is een lange termijn effect, dat vooral bepalend is voor **hoe lang** koeling uit de bodem geleverd kan worden. Zoals in Tabel 3 is weergegeven, is de warmtevraag aan de bodem groter dan de koudevraag, zodat de bodem over een periode van meerdere jaren enigszins in temperatuur zal dalen (zie ook Figuur 4). Dit heeft een gunstig effect op de mogelijke koudelevering. Dit geldt ook wanneer wordt gekozen voor een grotere bodemwarmtewisselaar.
- De temperatuur van het medium in de bodemwarmtewisselaar. Dit betreft in hoofdzaak een momentaan effect, dat met name bepalend is voor het koel**vermogen** dat door de bodem kan worden geleverd. Omdat de bodem direct (via een warmtewisselaar) koude aan het woningsysteem levert, is de temperatuur gebonden aan een maximum waarde: immers boven een bepaalde temperatuur kan geen koeling meer worden geleverd. Hierdoor is het maximaal te leveren koelvermogen beperkt.

Uit de simulaties met Bodemtix is gebleken dat het maximale koelvermogen met het beoogde bodemwarmtewisselaarsysteem (berekend op warmte-onttrekking tijdens het stookseizoen) ca. 3 kW bedraagt.

5.2.3 Resultaten temperatuur- en vochthuishouding

De rekenresultaten voor de varianten a. t/m e. van de warmte- en koudebehoefte zijn weergegeven in de figuren 5 t/m 9. Met de criteria uit paragraaf 3.2 ontstaan twee behaaglijkheidszones voor normale omstandigheden en kleding. Het binnenste behaaglijkheidsgebied komt overeen met: -0,5 < PMV < 0,5 (20% van de aanwezigen voelt zich niet behaaglijk). De buitenste ring geeft de grens aan van het gebied waarvoor geldt: -1,0 < PMV < 1,0 (54% van de aanwezigen voelt zich niet behaaglijk).
In figuur 10 resp. 11 zijn de frequentieverdelingen aangegeven van de binnentemperatuur resp. de binnenluchtvochtigheid voor elk van de varianten a t/m e. Tabel 6.2 geeft de overschrijdingsduur van enkele relevante condities. Ter verduidelijking: in de figuren 5 t/m 9 zouden deze condities als rechte lijnen voorgesteld worden, de praktische criteria (Fanger) zijn schuine lijnen. De getallen in tabel 4 zijn dus een (bruikbare) benadering van de grafische weergave.
Met de criteria uit paragraaf 3.1 volgen de zones volgens de roze kaders. Als de bewoners zich aanpassen bij warm weer door luchtige kleding te dragen, kunnen hogere ruimtetemperaturen toegestaan worden. Dan is 23°C tot 27 °C "behaaglijk" en 21 °C tot 29 °C "nog behaaglijk". Voor vocht wordt 30% tot 70% relatieve luchtvochtigheid aangehouden.

Tabel 4 Aantal uren per jaar waarbij het gestelde comfortcriterium wordt overschreden.

Uren per jaar	Binnentemperatuur				Relatieve vochtigheid
	> 24°C	> 25°C	>26°C	>27°C	> 70%
Variant a; volledige koeling; Binnentemp. max. 24°C	0	0	0	0	250
Variant b; koelvermogen max. 3 kW	1000	380	110	20	150
Variant c; geen koeling, dichte ramen	2750	2300	1800	1250	20
Variant d; geen koeling, ramen open bij T > 23°C	550	250	110	50	440
Variant e; geen koeling, ramen open bij T > 25°C	1420	640	250	100	180

Figuur 5 Variant a; behaaglijkheid bij onbeperkt koelvermogen.

Figuur 6 *Variant b; behaaglijkheid bij een maximaal koelvermogen van 3 kW.*

Figuur 7 *Variant c; behaaglijkheid zonder koeling (ramen gesloten).*

Figuur 8 *Variant d, behaaglijkheid zonder koeling (ramen open bij t_{binnen} > 23°C).*

Figuur 9 *Variant e, behaaglijkheid zonder koeling (ramen open bij t_{binnen} > 25°C).*

Figuur 10 Frequentieverdeling binnentemperatuur.

Figuur 11 Frequentieverdeling relatieve vochtigheid binnen (varianten a t/m e).

5.2.4 Invloed bewonersgedrag

Hoewel bewonersgedrag geen specifiek onderdeel van de studie was, kunnen wel kwalitatieve uitspraken gedaan worden over de mogelijke effecten van bewonersgedrag. Vergelijking tussen de varianten c, d en e laat het effect zien van het openen van ramen bij verschillende binnentemperaturen. Variant d, ramen open bij een binnentemperatuur van meer dan 23°C, nooit relatief gunstig ten opzichte van variant b, beperkte koeling met ramen dicht. Variant d heeft minder temperatuuroverschrijdingen maar meer overschrijdingen van de relatieve luchtvochtigheid.
De mogelijkheid bestaat dat bewoners er voor kiezen eerder de koeling in te schakelen, dus bij een kleinere stijging van de binnentemperatuur dan in deze studie is aangenomen. Dit zal leiden tot een grotere koudevraag van de bodem, waardoor deze meer opwarmt gedurende het koelseizoen. Gezien de warmtebalans over de bodem, waarbij met de doorgerekende varianten netto circa 4 x zo veel warmte wordt onttrokken als koude gevraagd, wordt geen nadelig effect verondersteld. Bovendien neemt de luchtzijdige warmteoverdracht bij koeling bij lagere binnentemperatuur snel af omdat de vloer niet kouder dan 19°C mag zijn.

5.2.5 Invloed COP warmtepomp

In deze studie is een COP van 4,6 aangehouden. Dit is de best geteste warmtepomp bij 0°C brine-aanvoertemperatuur en 35°C cv-aanvoertemperatuur. De marktgemiddelde prestatie is, volgens de testresultaten van TNO circa 4,6, terwijl de laagst gemeten COP 3,9 bedraagt, bij deze condities.
Een lagere COP leidt tot een geringere warmte-onttrekking aan de bodem. Gezien de warmtebalans over de bodem is de invloed daarvan, op de prestaties voor koeling, gering.
De invloed van toepassing van passieve koeling op de prestaties bij verwarming is niet eenduidig aan te geven. De verbetering van het rendement door een hogere bodemtemperatuur, hangt af van de warmtebalans over de bodem en die wordt bepaald door de dimensionering van het hele systeem.

5.2.6 Koeling met grondwater

De mogelijkheden voor koeling met grondwater uit een acquifer of een monobron, kunnen worden afgeleid uit de berekeningen voor variant a. Er is in deze situatie immers altijd voldoende koelcapaciteit beschikbaar: de enige restrictie is het afgiftevermogen in de woning.

5.2.7 Energetisch rendement koeling

Het energetisch rendement van koeling met de bodemwarmtewisselaars worden afgeleid uit meetresultaten voor dergelijke projecten. Hieruit komt een "COP" voor vrije koeling van circa 10.

5.3 Combinatie met gebalanceerde ventilatie

Luchtsystemen zijn in dit onderzoek niet verder uitgewerkt, maar met de resultaten voor vloerkoeling, kan wel geconcludeerd worden dat er voor luchtsystemen interessante mogelijkheden zijn. Een warmtewisselaar, geplaatst in de luchtstroom voor gebalanceerde ventilatie systeem IIIa), kan volgens indicatieve berekeningen circa 1 tot 2 kW koeling verzorgen en ook deels ontvochtigen:

Lucht van buiten (300m^3/uur)	Lucht naar ruimte	Koelend vermogen
28°C, 60% R.V.	15 °C, 100% R.V.	2,3 kW
25°, 50% R.V.	15°C, 100% R.V.	0,84 kW

Gezien het koelend vermogen van de bodem van 3 kW is dit een significante bijdrage. Aanbevolen wordt deze optie in een vervolgonderzoek nader uit te werken. Als zelfstandige koeloptie biedt hij minder vermogen dan vloerkoeling, maar daar staat ontvochtiging tegenover. Deze ontvochtiging zal bijdragen aan de comfortbeleving en de kwaliteit van het binnenklimaat. Bovendien wordt gekoeld in de ruimten waar dit het meest relevant is omdat ingeblazen wordt in de slaapkamers en de woonkamer en niet in de hele woning. Een combinatie met vloerkoeling zou ook mogelijk zijn, waardoor meer afgiftevermogen te realiseren is en een combinatie van ontvochtiging, gekoelde lucht en stralingskoeling. Punt van onderzoek is of zo'n luxe systeem voldoende toegevoegde waarde heeft.

5.4 Conclusies

Uit de resultaten zijn de volgende conclusies te trekken:

- Zonder koeling is de binnentemperatuur ruimschoots vaker dan toelaatbaar buiten het behaaglijkheidsgebied (variant c, figuur 7).
- Met volledige koeling is weliswaar de temperatuur voldoende laag, echter zonder ontvochtiging, wordt een r.v. van 70% 250 uur per jaar overschreden (variant a, figuur 5).
  Wanneer de temperatuur-eis van 24 °C "hard" is, heeft een installatie met ontvochtiging de voorkeur; want ook met grondwater als koudeleverancier is voldoende ontvochtiging niet haalbaar vanwege de vereiste temperatuurniveaus. Met een grondwatersysteem waarbij 's winters een koude geladen wordt is dit wel mogelijk. Een dergelijk systeem wordt normaliter als "acquifers" aangeduid; de essentie is, dat de stromingsrichting van het grondwatersysteem aan het begin en einde van het stookseizoen wordt omgedraaid.

- Met beperkte koeling (3 kW) kan de binnentemperatuur niet onder de 24 °C worden gehouden: overschrijding ca. 1000 uur per jaar (bijna de helft van het koelseizoen). Doordat de binnentemperatuur in een zekere mate met de buitentemperatuur oploopt, is de stijging van relatieve vochtigheid geringer t.o.v. volledige koeling en blijft het aantal uren boven de 70% beperkt tot ca. 150 uur per jaar.
- Uit tabel 4 blijkt dat het aantal overschrijdingsuren snel afneemt bij hogere temperaturen. 110 uur per jaar is de binnentemperatuur hoger dan 26 °C en 20 uur hoger dan 27°C. Indien de bewoners hun kleding aanpassen aan zomerse omstandigheden, kan een comfortabel binnenklimaat worden gerealiseerd met beperkte koeling.
- Variant d waarbij geen koeling aanwezig is en de ramen open gaan bij temperaturen boven de 23 °C lijkt in eerste instantie, op basis van de temperatuurverdeling, zeer comfortabel en beter dan beperkte koeling (variant b). Echter een praktisch bezwaar bij het toepassen van de variant "ramen open" is dat dit niet altijd op de gewenste tijdstippen mogelijk is, bijvoorbeeld omdat de bewoners overdag afwezig zijn. Een woning waarvan de bewoners overdag afwezig zijn wordt dus toch 1250 uur per jaar te warm (variant c, T>27 °C).
  Wanneer we bovendien de resultaten van "b" en "d" nader beschouwen en met elkaar vergelijken (figuur 6, 8, 10 en 11 en tabel 4) zien we dat met name de relatieve vochtigheid bij "d." vaker hoger is dan 70%. Met betrekking tot de temperatuurverdeling kan worden opgemerkt dat bij variant b, beperkte koeling, de maximale overschrijding (weegfactor PMV) lager is (28 °C t.o.v. 31 °C). Daarnaast komt het aspect stralingskoeling (waarvan "b." gebruik maakt) niet tot uitdrukking in de frequentieverdelingen van temperatuur en vochtigheid (dit aspect wordt uitgebreid besproken in hoofdstuk 3).
- Het toepassen van beperkte koeling levert voor de villa een aanzienlijke mate van comfortverbetering op. Dit geldt ook voor volledige koeling, hier moet echter enige extra aandacht worden besteed aan ontvochtiging. Waarschijnlijk kan overschrijding van de relatieve luchtvochtigheid boven 70% gedurende een beperkt aantal uren per jaar geaccepteerd worden omdat de grens vooral een hygiënische grens is. De vraag is of kortdurend hoge relatieve luchtvochtigheid leidt tot problemen met schimmels en huismijt. Omdat de temperatuur wel binnen het comfortgebied blijft, wordt de relatieve luchtvochtigheid minder belangrijk voor het ervaren comfort.
  De gevoeligheid voor bewonersgedrag voor de onderzochte klimatisering middels warmtepompen wordt gering geacht.
- De mate waarin het rendement voor verwarming verbetert door toepassing van passieve koeling is niet eenduidig aan te geven. Dit moet voor iedere situatie bekeken worden.
- Nakoeling van lucht bij gebalanceerde ventilatie, is een optie die nadere uitwerking verdient. Het koelend vermogen is met circa 1 tot 2 kW significant en de mogelijke ontvochtiging draagt bij aan de kwaliteit van het binnenklimaat.

6. Inschatting van de kosten

In dit hoofdstuk wordt een schatting gegeven van de kosten van een systeem dat bestaat uit een warmtepomp met een verticale bodemwarmtewisselaar en vloer verwarming/koeling. Dit systeem kan ook worden toegepast indien er in plaats van volledige vloerverwarming een combinatie wordt gemaakt met ventilator convectoren. Figuur 12 geeft een schematische voorstelling van deze opzet weer.

Bij het opstellen van de berekening weergegeven in onderstaande Tabel 5 is uitgegaan van de villa zoals omschreven in hoofdstuk 5. Bij de kostenberekening zijn tevens de kosten van een warmtepompsysteem zonder koeling en een referentiesysteem weergegeven. Het referentiesysteem bestaat uit een HR-combi met een identiek afgifte systeem als bij de warmtepompinstallaties. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de weergegeven kosten gelden voor individuele installaties die door een particulier worden aangeschaft (niet op project basis).

Figuur 12 Schematische voorstelling warmtepompsysteem met passieve koeling.

Tabel 5 Kostenberekening warmtepompsysteem met passieve koeling inclusief installatiewerkzaamheden.

Omschrijving	Warmtepompsysteem met passieve koeling	Warmtepompsysteem zonder koelfunctie [4]	Referentiesysteem
Warmteopwekker (Warmtepomp of HR-combi)	*f* 13.000,--	*f* 13.000,--	*f* 3.500,--
Afgiftesysteem	*f* 8.800,--	*f* 8.800,--	*f* 8.800,--
Warmtebron (vbww)	*f* 12.000,--	*f* 12.000,--	n.v.t.
Extra kosten koeling	*f* 2.000,--		
Bouwkundige zaken/oplevering	*f* 2.000,--	*f* 2.000,--	*f* 500,--
Regeling	*f* 1.000,--	*f* 750,--	n.v.t.
Totaal	*f* 38.800,--	*f* 36.550,--	*f* 12.800,--
Extra kosten t.o.v. referentie	*f* 26.000,--	*f* 23.750,--	

Uit Tabel 5 blijkt dat de kosten van een warmtepompsysteem veel hoger zijn dan die van de referentie installatie. Deze hogere kosten worden hoofdzakelijk veroorzaakt door de kosten van de verticale bodemwarmtewisselaars. Ook de hoge aanschafprijs van de combi warmtepomp is veel hoger dan die van een HR-ketel. Om passief te kunnen koelen in de woning is dus een extra investering van *f* 26.000,-- nodig t.o.v. een referentiesysteem. De extra kosten voor het koelen t.o.v. een standaard warmtepompsysteem bedragen *f* 2.250,--. Daarvoor krijgt de bewoner 1230 comforturen per jaar terug.

7. Conclusies

De belangrijkste conclusies van dit onderzoek zijn:

- De zoninstraling is de belangrijkste factor bij oververhitting van moderne woningen.
- Adequate ventilatie en zonwering kan oververhitting voorkomen bij matig warme buitentemperaturen (typisch voor- en naseizoen).
- Het koelend vermogen van de bodem is voldoende om het thermisch comfort in de woning behaaglijk te houden. Dit is mogelijk met een koelend vermogen in de woning van 3 kW.
- Passieve koeling van de woning voorziet in de beschouwde situatie niet in volledige regeneratie van de bodem. Er is nog sprake van een thermische onbalans (15900 kWh/a warmtevraag tegen 2670 kWh/ koudevraag van de woning; netto warmteonttrekking aan de bodem 9800 kWh/a)
- De conclusies van het onderzoek blijken gevoelig voor bewonersgedrag. Indien de bewoners in staat zijn te ventileren is het positieve effect van de extra koel-functie kleiner.

8. Aanbevelingen

8.1 Passieve koeling bij warmtepompsysteem zinvol

Indien besloten wordt tot plaatsing van een warmtepompsysteem wordt aanbevolen altijd een passieve koelfunctie mee te nemen. De extra investeringen zijn gering, terwijl het geleverde totaalcomfort aanzienlijk verbetert.

De woning dient integraal ontworpen te worden, met meewegen van de specifieke eigenschappen van het verwarmings- en koelsysteem en bouwkundige maatregelen. Toepassing van een warmtepompsysteem met koelfunctie zal leiden tot een ander optimum tussen installatievoorzieningen en bouwkundige maatregelen. Zo kan meer zontoetreding worden toegestaan als vloerkoeling de zonnewarmte kan wegvangen.

Tot slot is de invloed van de luchtvochtigheid op het comfort in woningen een aandachtspunt dat verder kan worden uitgediept. De beschikbaarheid van koelend vermogen maakt beperking van te hoge luchtvochtigheid in principe mogelijk.

8.2 Combinatie met gebalanceerde ventilatie

Een warmtewisselaar, geplaatst in de luchtstroom voor gebalanceerde ventilatie, kan volgens indicatieve berekeningen circa 1 tot 2 kW koeling verzorgen en ook deels ontvochtigen. Aanbevolen wordt deze optie in een vervolgonderzoek nader uit te werken. Als zelfstandige koeloptie biedt hij minder vermogen dan vloerkoeling, maar daar staat ontvochtiging tegenover. Bovendien wordt gekoeld in de ruimten waar dit het meest relevant is en niet in de hele woning. Een combinatie met vloerkoeling zou ook mogelijk zijn. Punt van onderzoek is of zo'n luxe systeem voldoende toegevoegde waarde heeft.

8.3 Thermische balanswoning

Aanbevolen wordt een vervolgonderzoek te starten, waarin koude- en warmtevraag van een woning, zontoetreding en regeneratie van de bodem in samenhang onderzocht worden. Doel is een economisch interessante verlaging van het primair energiegebruik. Zo kan overwogen worden om de warmteverliezen in de winter verder te verminderen en meer passieve zonnewarmte te benutten, terwijl de resulterende extra koudevraag in de zomer op een efficiënte, passieve manier wordt ingevuld. De extra warmte die 's zomers in de woning komt, wordt dan gebruikt om de bodem te regenereren terwijl de koelfunctie het binnenklimaat comfortabel houdt. Uiteraard moet warmtetoetreding in de zomer zo veel mogelijk worden voorkomen. Dit onderzoek kan ook leiden tot routes naar verdere verlaging van de

EPC, zonder aantasting van het wooncomfort in de zomer, of ongewenste neveneffecten.

Een integrale benadering van koude- en warmtevraag kan leiden tot een systeem waarbij de woning gaat fungeren als zonnecollector die warmte opslaat in het bodemsysteem, voor ruimteverwarming in de winter. Volgens literatuur is het koelend vermogen van vloerkoeling, voor directe zoninstraling, factoren groter dan op basis van convectieve warmteoverdracht verwacht kan worden. De warmte wordt geabsorbeerd voordat de constructie de binnenlucht kan verwarmen of voor een hogere stralingstemperatuur kan zorgen. Dit effect is niet onderzocht in de huidige studie, maar zou een wezenlijk onderdeel moeten zijn van vervolgonderzoek. De toevoeging van een koelfunctie aan een warmtepompsysteem maakt echter de weg vrij om zonder noemenswaardige meerinvesteringen, de benutting van passieve zonne-energie te vergroten.

Er zou nadere aandacht besteed moeten worden aan de robuustheid van het warmtepompsysteem voor bewonersgedrag. De temperaturen in de woning en het energiegebruik zijn in aanzienlijke mate hiervan afhankelijk. Tot slot is in het huidige onderzoek geen rekening gehouden met tapwaterbereiding. Indien de warmtepomp ook tapwater levert, ontstaat een grotere warmteonttrekking aan de bodem dan in dit rapport is aangenomen.

9. Literatuur

[1] EP-Variantenboek woningbouw
Novem
Maart 1996

[2] De rol van ventilatie bij vochtproblemen in energiezuinige woningen
Knoll, B., TNO-MT
publicatie nr.: P87/002
Januari 1987

[3] Leerboek Klimaatregeling (2e druk),
Technische Universiteit Eindhoven
Leijendeckers, P.H.H.
Augustus 1996

[4] Simulatie bouwproces
A.A.L. Traversari (TNO-MEP)
G. van Gelder (Groen Holland)
A. van Rijsewijk (Paans Installatietechniek)
T. Stam (Bouw Partners)
Rapport TNO-MEP R 2000/083
Maart 2000

[5] De concurrentiekracht van warmtepompen in Nederland
P.A. Oostendorp (TNO-MEP)
P.C.W. Juffermans (KEMA)
A.J. Oostwaard (BMT)
TNO-rapport TNO-MEP R 99/528
December 1999
(verkrijgbaar via publicatiecentrum Novem, bestelnummer DV2.1.130, fax 046 – 4528260, publicatiecentrum@novem.nl)

[6] Energieprestatie van utiliteitsgebouwen – Bepalingsmethoden
NEN 2916/A1:1999
Normcommissie 351 074 "Klimatisering in gebouwen"

10. Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

Strategie en Programma TNO
NUON

Namen en functies van de projectmedewerkers:

Ing. A.A.L. Traversari	projectleider
Ir. N.R. Bootsveld	projectmedewerker
Ing. A.A.L. Traversari	projectmedewerker
Ir. C.P.J.M. Geelen	projectmedewerker
Ing. M. van Ingen	projectmedewerker

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

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

Ondertekening:

Ing. A.A.L. Traversari
projectleider

Goedgekeurd door:

Ir. S.M. van der Sluis
afdelingshoofd