

## **PVT BODEMREGENERATIE**

### **Haalbaarheidsstudie naar bodemregeneratie met behulp van een dakvullend PVT-systeem**

M. Bakker  
K.J. Strootman  
M.J.M. Jong  
M.J. Elswijk

## Verantwoording

Dit project is mede mogelijk gemaakt door ondersteuning vanuit het programma Duurzame Energie in Nederland, dat wordt uitgevoerd door Novem in opdracht van het ministerie van Economische Zaken, onder projectnummer 2020-02-13-28-002. Het project staat bij ECN geregistreerd onder projectnummer 7.4915.

## Abstract

In this project, the feasibility of a system concept has been studied, in which a roof-sized PVT system has been combined with a heat pump and vertical ground loop heat exchangers, for both space and domestic hot water heating of a residential building. This system has several advantages. By regenerating the ground with heat from the PVT panels, the average ground temperature can be kept constant on the long term. This prevents a possible decline of the COP of the heat pump, and ensures that the system complies beforehand with possible future regulations concerning ground heat extraction. In addition, the heat pump now uses fully renewable electricity from the PVT panels. Finally, the electrical yield of the PVT panels is improved slightly due to active cooling of the PV.

First, the available knowledge and literature on the different system components—PVT panels, heat pump, and ground loop heat exchangers—has been inventoried. Based on this, one representative system has been defined, consisting of 25 m<sup>2</sup> of PVT panels, a 200 • storage vessel, and a heat pump with two ground loop heat exchangers of 35 m length each.

With this system, a system study has been performed using numerical simulations in TRNSYS. It has been found that regeneration of the ground only has a small positive effect on the long term ground temperature. Unless future regulations require so, regeneration of the ground seems unnecessary. In addition, the PVT panels have been found to have little effect on the COP of the heat pump, whether or not they are used for regeneration of the ground. The most important contribution of the PVT panels is the generation of renewable heat and power. Nevertheless, when combined with the heat pump, the PVT panels are able to cover 100% of the heat demand and 96% of the building related electricity demand with renewable energy.

Finally, the feasibility of the system has been studied. The technical feasibility of the system is good, provided that sufficient attention is paid to relevant information services, to clear regulations and guidelines, and to the quality of the installation and fine-tuning of the components. The economic feasibility has been studied by comparing the costs, the yield, and the simple payback time of the system with another system, where the PVT panels have been replaced by separate PV panels and solar collectors. It has been found that the system with PVT panels and heat pump requires the largest initial investment, but still has a shorter payback time than the system with separate PV panels and solar collectors. Based on the existing literature on the market potential for PV panels, solar thermal collectors, and heat pumps, the market potential for this system for 2010 has been estimated to be more than 3,000 systems, or approximately 78,500 m<sup>2</sup> of PVT panels cumulative.

# INHOUD

1. INLEIDING	7
2. INVENTARISATIE	9
2.1 Inleiding	9
2.2 Warmtepompen	9
2.2.1 Beschrijving	9
2.2.2 Warmtebronnen	10
2.2.3 Stand van zaken	12
2.2.4 Conclusie	12
2.3 Bodemwarmtewisselaars	12
2.3.1 Beschrijving	12
2.3.2 Bodemregeneratie	13
2.3.3 Stand van zaken	13
2.3.4 Conclusie	14
2.4 PVT-panelen	14
2.4.1 Beschrijving	14
2.4.2 Stand van zaken	15
2.4.3 Conclusie	15
2.5 Conclusie	16
3. MODELLERING	17
3.1 Inleiding	17
3.2 Modelbeschrijving	17
3.2.1 Woning	17
3.2.2 Installatie	19
3.2.3 Regeling	20
3.2.4 PVT-panelen	20
3.2.5 Warmtepomp	21
3.2.6 Bodemwarmtewisselaars	22
3.3 Resultaten	23
3.3.1 Optimalisatie	23
3.3.2 Referentiesituatie	27
3.3.3 Systeemanalyse	28
3.4 Conclusie	32
4. HAALBAARHEID	34
4.1 Inleiding	34
4.2 Technische haalbaarheid	34
4.2.1 Aandachtspunten per component	34
4.2.2 Aandachtspunten per gebruiksfase	35
4.2.3 Conclusie	36
4.3 Kostprijs	36
4.4 Marktpotentie	38
4.5 Conclusie	42
5. CONCLUSIES	43

## LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1	Overzicht warmtepompen op basis van omgevingswarmte (bron: De Graaf, 1996, Graus, 2002).....	12
Tabel 2	Overzicht gerealiseerde projecten met bodemopslag (Vegt, 1998, Graus, 2002)...	13
Tabel 3	Gebruikte waarden voor de nieuwbouw- en de bestaande woning.....	18
Tabel 4	Interne warmtelast in W/m <sup>2</sup> .....	18
Tabel 5	Gebruikte waarden voor de debieten aan de verdamperzijde en aan de condensorzijde bij gebruik voor ruimte- en tapwaterverwarming voor de nieuwbouw- en de bestaande woning.....	21
Tabel 6	Thermische eigenschappen van de gedefiniëerde bodemtypes.....	23
Tabel 7	Parameters voor de referentiesituatie.....	27
Tabel 8	Invloed toepassing PVT-panelen op systeemprestatie.....	29
Tabel 9	Invloed regeneratie op systeemprestatie.....	29
Tabel 10	Invloed bodemkwaliteit op systeemprestatie.....	30
Tabel 11	Vergelijking systeemprestatie bestaande bouw en nieuwbouw.....	32
Tabel 12	Invloed klimaatgegevens op systeemprestatie.....	32
Tabel 13	Overzicht van de vergeleken systemen.....	36
Tabel 14	Uitgangspunten voor de kostprijsvergelijking.....	37
Tabel 15	Indicatie van de kostprijs van drie verschillende systemen.....	38
Tabel 16	Marktsegmenten voor PVT-panelen.....	39
Tabel 17	Grootte en groei van de Nederlandse woningvoorraad (bron: CBS, 2003).....	39
Tabel 18	Uitgangspunten voor de schatting van het marktpotentieel voor PVT-panelen.....	42
Tabel 19	Vergelijking van het marktpotentieel van PVT-daken met dat van PV, zonthermische collectoren, en warmtepompen in 2010.....	42

## LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1	Links: twee afgedekte PVT-collectoren in een testopstelling; rechts: voor- en achterzijde van een onafgedekt PVT-paneel.....	15
Figuur 2	Plattegrond van de Novem referentiewoning.....	18
Figuur 3	Schematische weergave van de installatie.....	19
Figuur 4	Schematische weergave van de regeling van het systeem.....	20
Figuur 5	Links rendementscurves van een onafgedekt PVT-paneel bij verschillende windsnelheden; rechts het nulrendement en de warmteverliescoëfficiënt van een onafgedekt PVT-paneel als functie van de windsnelheid.....	21
Figuur 6	COP van de warmtepomp als functie van de ingangstemperatuur aan de verdamperzijde, bij een vaste uitgangstemperatuur aan de condensorzijde van 55°C.....	22
Figuur 7	Resultaten van de systeemoptimalisatie, gemiddeld over 10 jaar.....	26
Figuur 8	Cumulatieve PVT-opbrengst gedurende één jaar.....	27
Figuur 9	Bodemtemperatuurprofiel als functie van de afstand tot de bodemwarmtewisselaar op 15 meter diepte, op de 1 <sup>e</sup> dag van het 9 <sup>e</sup> jaar.....	27
Figuur 10	Bodemtemperatuurprofiel als functie van de diepte gedurende het negende jaar op 15 meter diepte, ter plaatse van de bodemwarmtewisselaar.....	28
Figuur 11	Temperatuurverloop op 15 meter diepte, op 0 en 2 meter afstand van de bodemwarmtewisselaar.....	28
Figuur 12	Temperatuurverloop op 15 meter diepte van de bodem direct naast de bodemwarmtewisselaar, met en zonder regeneratie.....	30

Figuur 13	Effect van bodemkwaliteit, regeneratie, PVT-panelen, warmtevraag en klimaatdata op de systeemprestatie. ....	31
Figuur 14	Grootte en groei van de Nederlandse woningvoorraad tot 2010, geëxtrapoleerd vanaf 2003. ....	39
Figuur 15	Marktpotentieel voor zon-thermisch, PV en warmtepompen, in aantal systemen (waarbij uitgegaan is van 25 m <sup>2</sup> PV voor één systeem).....	41
Figuur 16	Marktpotentieel voor PVT-panelen, onderverdeeld naar de drie toepassingsvormen. ....	41

## SAMENVATTING

In dit project is een studie gedaan naar de haalbaarheid van een systeemconcept waarin een dakvullend PVT-systeem is gecombineerd met een warmtepomp en een verticale bodemwarmtewisselaar ten behoeve van zowel ruimte- als tapwaterverwarming van een Novem referentie-tussenwoning.

In eerder onderzoek is deze combinatie reeds als veelbelovend beoordeeld: door de bodem te regenereren met de warmte uit de PVT-panelen kan de gemiddelde bodemtemperatuur ook op de lange termijn constant gehouden worden, waarmee een mogelijke daling van de COP voorkomen wordt, en reeds bij voorbaat wordt voldaan aan eventuele toekomstige regelgeving op het gebied van warmteonttrekking aan de bodem. Dankzij deze regeneratie, en dankzij het feit dat de warmtepomp nu duurzame elektriciteit uit de PVT-panelen verbruikt, wordt de milieuprestatie van de warmtepomp aanzienlijk verbeterd. Door de actieve koeling met bodemkoude stijgt ook de elektrische opbrengst van de PVT-panelen.

Allereerst is een inventarisatie gemaakt van de beschikbare kennis en literatuur met betrekking tot de verschillende componenten van het systeem—PVT-panelen, warmtepomp en bodemwarmtewisselaars. Op grond van de resultaten van de inventarisatie is één representatief systeem samengesteld, waarmee met behulp van numerieke simulaties in TRNSYS een systeemstudie is uitgevoerd.

Na een optimalisatie is hierin een optimaal referentiesysteem gedefinieerd met een PVT-oppervlak van 25 m<sup>2</sup>, een opslagvat van 200 l, en twee bodemwarmtewisselaars van 35 m lengte. Uit de systeemstudie volgt dat, bij de gedane aannames en een correcte dimensionering van het systeem, regeneratie van de bodem slechts een klein positief effect heeft op de gemiddelde bodemtemperatuur op de lange termijn. Tenzij eventuele regelgeving dit in de toekomst vereist, lijkt regeneratie in dit geval dus niet noodzakelijk te zijn. Tevens volgt uit de systeemstudie dat de PVT-panelen, al dan niet ingezet voor bodemregeneratie, slechts tot een kleine verbetering van de COP van de warmtepomp leiden. De belangrijkste bijdrage van de PVT-panelen is de duurzame warmte- en elektriciteitsopwekking. Gecombineerd met een warmtepomp zijn de PVT-panelen echter in staat om 100% van de warmtevraag en 96% van de gebouwgebonden elektriciteitsvraag te dekken met duurzame energie.

Tot slot is de haalbaarheid van het systeem onderzocht. De technische haalbaarheid van het systeem is goed, mits voldoende aandacht wordt besteed aan een goede informatievoorziening en duidelijke regelgeving en richtlijnen, en aan de kwaliteit van de installatie en afstemming van de componenten. De economische haalbaarheid is onderzocht door de kostprijs, opbrengst en eenvoudige terugverdientijd van het systeem te vergelijken met een vergelijkbaar systeem, waarbij de PVT-panelen zijn vervangen door separate PV-panelen en zonnecollectoren. Gebleken is dat het onderzochte systeem met PVT-panelen en een warmtepomp weliswaar de grootste investering vergt, maar desondanks een kortere terugverdientijd heeft dan het systeem met separate PV-panelen en zonnecollectoren. Gebaseerd op de bestaande literatuur over het marktpotentieel voor PV-panelen, zon-thermische collectoren en warmtepompen is tot slot het marktpotentieel van dit systeem in 2010 geschat op ruim 3.000 systemen, ofwel ongeveer 78.500 m<sup>2</sup> aan PVT-panelen cumulatief.

## 1. INLEIDING

### *Achtergrond*

In een verkennend onderzoek door Leenders *et al.* zijn een aantal systeemconcepten met PVT-panelen vergeleken. Eén van de conclusies van dit onderzoek was dat de combinatie van PVT-panelen met een warmtepomp en een verticale bodemwarmtewisselaar een veelbelovende toepassing is. Aanbevolen werd dat meer onderzoek verricht dient te worden naar de systeemaspecten van zo'n combinatie (Leenders, 1999).

De combinatie van PVT-panelen met een bodemgekoppelde warmtepomp heeft een aantal belangrijke voordelen. Ten eerste kan het gebruik van een bodemgekoppelde warmtepomp in sommige gevallen leiden tot een daling van de bodemtemperatuur rond de bodemwarmtewisselaar op de langere termijn. Omdat daarmee de brontemperatuur van de warmtepomp daalt, zal ook de COP van de warmtepomp dalen. Ook de milieuprestatie van de warmtepomp wordt nadelig beïnvloed wanneer de voortdurende warmteonttrekking aan de bodem leidt tot een dalende bodemtemperatuur. Mogelijk wordt daarom in milieuwetgeving vastgelegd dat de gemiddelde bodemtemperatuur constant moet blijven. Door de bodem te regenereren kan ook voor de lange termijn een constante bodemtemperatuur en dus een constante COP en een goede milieuprestatie van de warmtepomp gegarandeerd worden.

Andere voordelen van deze combinatie zijn het hogere elektrische rendement van de PV-cellen door de actieve koeling met bodemkoude en de mogelijke kostenbesparing, omdat volstaan kan worden met kortere bodemwarmtewisselaars.

### *Doel en aanpak*

Dit rapport is het resultaat van een studie waarin de haalbaarheid wordt onderzocht van een systeem waarin PVT-panelen en een bodemgekoppelde warmtepomp worden gebruikt voor zowel ruimte- als tapwaterverwarming. Hiertoe is allereerst een literatuurstudie uitgevoerd om een inventarisatie te maken van de beschikbare kennis en literatuur met betrekking tot de verschillende componenten van het systeem—PVT-panelen, warmtepomp en bodemwarmtewisselaars. Deze inventarisatie is beschreven in hoofdstuk 2. Op grond van de resultaten van de inventarisatie is één representatief systeem samengesteld, waarmee met behulp van numerieke simulaties in TRNSYS een systeemstudie is uitgevoerd. In deze systeemstudie zijn de technische randvoorwaarden voor dit systeem onderzocht en zijn de verschillende componenten ten opzichte van elkaar geoptimaliseerd. De resultaten van deze modellering worden gepresenteerd in hoofdstuk 3. Uitgaande van deze resultaten is tot slot de haalbaarheid van het systeem onderzocht. Hierbij is aandacht besteed aan zowel de technische als de economische haalbaarheid. Ook is een schatting gemaakt van het marktpotentieel voor dit systeem. De resultaten van deze haalbaarheidsstudie zijn weergegeven in hoofdstuk 4. De conclusies van het onderzoek worden gepresenteerd in hoofdstuk 5.





## 2. INVENTARISATIE

### 2.1 Inleiding

Aan de hand van de op dit moment beschikbare kennis en literatuur is een inventarisatie uitgevoerd naar de voor- en nadelen en de prestaties van de combinatie van PVT-panelen met een bodemgekoppelde warmtepomp, zoals beschreven in hoofdstuk 1. In deze inventarisatie is voor zowel warmtepompen, bodemwarmtewisselaars als PVT-panelen aandacht besteed aan de verschillende verkrijgbare varianten en hun voor- en nadelen, de aandachtspunten bij de toepassing ervan, en de stand van zaken op dit moment. Deze inventarisatie beslaat paragrafen 2.2 tot en met 2.4.

Gebaseerd op beschikbaarheid en technische geschiktheid wordt vervolgens uit de verschillende varianten één combinatie van PVT-panelen en bodemgekoppelde warmtepomp samengesteld. Dit systeem, en de voor- en nadelen van deze specifieke combinatie, staat beschreven in paragraaf 2.5.

### 2.2 Warmtepompen

#### 2.2.1 Beschrijving

Warmtebronnen met een laag temperatuurniveau, zoals de buitenlucht, bodem of grondwater zijn volop aanwezig. Met behulp van een warmtepomp wordt de temperatuur van deze bronnen verhoogd. Een warmtepomp brengt warmte van een laag temperatuurniveau naar een hoger niveau. Hoe kleiner het temperatuurverschil tussen het bron- en afgiftesysteem, hoe minder aandrijfvermogen noodzakelijk is om de energie te transporteren tussen deze twee systemen, en hoe beter de prestatie van de warmtepomp.

De prestatie van een warmtepomp wordt uitgedrukt in een *coefficient of performance* (COP). Deze varieert per type warmtepomp, en hangt ook af van het temperatuurniveau van warmtebron en -afgifte. Een meer gedetailleerde definitie wordt gegeven in paragraaf 3.2.5. Als richtgetal voor de COP van warmtepompen worden de volgende getallen aangenomen (Wijshoff, 2002):

- elektrische (compressie)warmtepomp: 2,5–5,0;
- gasgestookte (absorptie)warmtepomp: 1,0–1,5;
- gasmotorwarmtepomp: 1,2–2,0.

Bij verwarming van tapwater wordt gesproken over een warmtepompboiler. Vanwege legionellarijchten wordt in de woningbouw naverwarming toegepast, waarbij gekozen kan worden tussen een elektrische naverwarmer of een gasgestookte (HR-)ketel.

#### *Elektrische (compressie)warmtepomp*

Bij een elektrische warmtepomp wordt de transportvloeistof met behulp van een elektrisch aangedreven compressor samengeperst. De elektriciteit die een elektrische warmtepomp in Nederland gebruikt, is afkomstig van verschillende bronnen, die niet allemaal even 'groen' zijn. De milieuprestatie van een warmtepomp is dan ook sterk afhankelijk van de gebruikte elektriciteit (kolen, nucleair, zon, etc.). Door de warmtepomp nu te combineren met duurzaam opgewekte elektriciteit, zoals die uit een PV- of PVT-paneel, verbetert de milieuprestatie van de warmtepomp aanzienlijk. Naast de toch al duurzame omgevingswarmte kan nu ook de benodigde elektriciteit uit een 'groene' bron betrokken worden.

Omdat de COP sterk afhangt van het temperatuurverschil tussen bron en afgiftesysteem, is lage-temperatuurverwarming noodzakelijk. Elektrische warmtepompen zijn in vele capaciteiten te koop, zowel voor verwarming van eengezinswoningen als voor de collectieve woningbouw. Elektrische warmtepompen worden hoofdzakelijk in nieuwbouwwoningen toegepast. Als

bronsysteem wordt meestal gebruik gemaakt van een gesloten verticale bodemwarmtewisselaar of van afgezogen ventilatielucht uit de woning.

#### *Gasgestookte (absorptie)warmtepomp en gasmotorwarmtepomp*

Gasgestookte warmtepompen kunnen direct door een gasmotor worden aangedreven of door middel van een zogenaamd absorptieproces met een brander/generator-combinatie. Ook combinaties met warmtekrachtkoppeling komen voor. Op dit moment zijn voornamelijk systemen met een capaciteit boven 45 kW beschikbaar, geschikt voor minimaal 10 woningen (Wijshoff, 2002). Kleinere systemen zijn sinds kort ook beschikbaar.

De gasabsorptiewarmtepomp heeft voldoende aan een bron met een kleinere capaciteit dan de compressiewarmtepomp. Zelfs wanneer het rendement daalt bij vorst of lage buitentemperaturen, zal het rendement van een gasabsorptiewarmtepomp nooit minder worden dan dat van de beste HR-ketel. Een warmteafgiftetemperatuur tot 70°C is mogelijk bij een gasabsorptiewarmtepomp. Absorptiewarmtepompen zijn verder uitermate stil.

Een speciale uitvoering van de gasgestookte warmtepomp is de gasmotorwarmtepomp, een combinatie van een gasmotor- en een compressiewarmtepomp. De algemene eigenschappen lijken sterk op die van een gasgestookte absorptiewarmtepomp; het geluidsniveau is echter wel hoger (Wijshoff, 2002).

#### *Toekomstige warmtepompen*

De thermo-akoestische warmtepomp bevindt zich op het ogenblik nog in de ontwikkelingsfase. Het toepassingsgebied van deze warmtepompen ligt in de industrie en bestaande utiliteitsbouw. Thermo-akoestische warmtepompen kunnen de mechanische energie van geluidsgolven omzetten in een temperatuurverschil. Hoewel de werking van thermo-akoestische technologie vrij complex is, is de praktische uitvoering relatief simpel. Dit biedt grote voordelen ten aanzien van de economische haalbaarheid van deze technologie. Daarnaast zijn er geen bewegende onderdelen bij het thermodynamische proces. Dit verhoogt de betrouwbaarheid en levensduur van de warmtepomp. De verwachte COP van een gasgedreven thermo-akoestische warmtepomp varieert tussen 1,4 en 2,0.

Enkele andere nieuwe ontwikkelingen zijn de omgekeerde distillatie-warmtepomp en de Stirling aangedreven warmtepomp (SDHP). De eerstgenoemde warmtepomp werkt volgens het principe van distillatie gevolgd door omgekeerde distillatie. De pomp wordt met gas gestookt, maar onttrekt daarnaast een aanzienlijke hoeveelheid warmte aan de omgeving. Gerelateerd aan de warmteinhoud van het benodigde aardgas zou het systeem een opwekkingsrendement van 155% hebben. Bij de SDHP zet een Stirlingmotor warmte om in arbeid en drijft daarmee een Stirling-warmtepomp aan. Ten opzichte van de huidige HR-ketels is met de SDHP een besparing op het huishoudelijk gasgebruik van tenminste 40% mogelijk. Wel zal het nog veel inspanning vergen de kostprijs van deze innovatie op een concurrerend niveau te brengen.

### 2.2.2 Warmtebronnen

De warmtepomp maakt gebruik van warmtebronnen die in eerste instantie niet direct bruikbaar zijn, zoals omgevingswarmte of restwarmte uit de industrie. Hierdoor wordt het gebruik van fossiele brandstoffen aanzienlijk beperkt. Een groot voordeel van omgevingswarmte is dat het altijd beschikbaar is, in praktisch eindeloze hoeveelheden. Als duurzame bron voor een warmtepomp komen verschillende warmtebronnen in aanmerking: ventilatielucht, buitenlucht, afvalwarmte uit de industrie, warmte uit het oppervlakte- of grondwater en bodemwarmte.

#### *Ventilatielucht*

De warme lucht uit een woning kan goed worden gebruikt als bron voor de warmtepomp. De temperatuur van de ventilatielucht is relatief warm (20°C), hetgeen gunstig is voor de COP van de warmtepomp. Een bijkomend voordeel is dat de installatiekosten van een ventilatiesysteem lager kunnen zijn in vergelijking met een bodemsysteem. Aan de andere kant is ventilatielucht echter minder geschikt als warmtebron: bij ventilatie volgens het bouwbesluit is de bron slechts vrij beperkt. De warmte kan vaak beter worden benut door een warmteterugwinunit (rendement ca. 90%) waarmee verse koude ventilatielucht wordt opgewarmd. Een ander nadeel is de mogelijke geluidshinder door de ventilatiekanalen.

### *Buitenlucht*

Financiële gezien is het direct benutten van de warmte uit de buitenlucht erg aantrekkelijk als warmtebron voor een warmtepomp. Een buizensysteem om de omgevingswarmte naar de warmtepomp te transporteren is eenvoudig te realiseren. Een groot nadeel is echter de lage buitentemperatuur in de winterperiode. De COP van een warmtepomp is bij lage brontemperaturen erg slecht en de warmtepomp kan zelfs in storing raken tijdens een zeer koude winterperiode.

### *Afvalwarmte uit de industrie*

Met een warmtenet wordt collectief warm water toegevoerd aan de woningen voor ruimteverwarming en/of warm tapwater. Bij relatief lage temperaturen (tot ca. 20-25°C) kan deze warmte ook goed benut worden als bron voor de warmtepomp. De warmte kan geleverd worden door dichtbij gelegen industrie, elektriciteitscentrales of een collectieve WKK-installatie in een wijk. Een belangrijke voorwaarde is dat er voldoende plaats is om warmwaterleidingen ondergronds aan te leggen en dat er een goede benuttingsgraad van warmte is. Met name in nieuwbouwwijken waarbij warmtepompen toegepast worden en er voldoende restwarmte uit de industrie aanwezig is, vormt afvalwarmte een goede optie als bron voor de warmtepomp.

### *Warmte uit het oppervlaktewater*

Oppervlaktewater als bron voor de warmtepomp wordt in de praktijk sporadisch toegepast. De grootste voorwaarde is dat dichtbij de woning voldoende oppervlaktewater beschikbaar moet zijn. Bij gebruik van oppervlaktewater is de watertemperatuur in de winter lager dan bij toepassing van een aquifer of bodemwarmtewisselaar. Warmteopslag is niet mogelijk, maar koeling in de zomer door de continue aanvoer van koud water wel. Warmteonttrekking aan het oppervlaktewater is met name interessant voor collectieve woning- en utiliteitsbouw direct gesitueerd aan een groot kanaal of rivier.

### *Warmte uit het grondwater*

Grondwaterlagen bevinden zich in watervoerende zandlagen die op 25 tot 100 meter diepte liggen. Grondwater wordt uit een open bronsysteem (aquifer) onttrokken, waarbij de warmte uit het grondwater als bron voor de warmtepomp gebruikt wordt. Met behulp van een aquifer is warmte- en koudeopslag in de bodem mogelijk. De warmtewinst van een aquifer is iets hoger dan bij een gesloten bronsysteem, omdat de warmte direct gebruikt kan worden, in plaats van via een warmtewisselaar.

Een groot nadeel voor toepassing van een aquifer is de onderhoudsgevoeligheid van een open bronsysteem. Door een mogelijke slechte kwaliteit van het grondwater, vervuiling en/of groei van micro-organismen kan het bronsysteem verstopt raken en is een filter vaak noodzakelijk. Een ander nadeel is dat een vergunning nodig is in het kader van de Grondwaterwet wanneer grondwater geïnjecteerd dan wel onttrokken wordt. De aquifer is door hoge investeringen voornamelijk interessant voor collectieve woningbouwprojecten en de utiliteitsbouw.

Aardwarmte uit veel dieper gelegen grondlagen wordt in Nederland nog weinig toegepast. Dit is het gevolg van de hoge investeringslasten die worden veroorzaakt door de noodzaak om diepe putten te slaan.

### *Bodemwarmte*

Een in Nederland veelgebruikte bron voor de warmtepomp is bodemwarmte. De bodem heeft een nagenoeg constante temperatuur van 10 à 12°C, afhankelijk van de locatie. Door het installeren van een bodemwarmtewisselaar kan deze warmte eenvoudig benut worden. De bodem is in bijna heel Nederland goed geschikt voor het gebruik van bodemwarmtewisselaars. In sommige gebieden, zoals waterwingebieden of natuurgebieden, is het gebruik van bodemwarmtewisselaars niet toegestaan.

Een voordeel van het gebruik van bodemwarmte is de mogelijkheid van warmte- en/of koudeopslag. Omdat warmtevraag en -aanbod over het algemeen moeilijk op elkaar zijn af te stemmen—'s zomers is er een overschot aan warmte, 's winters juist een tekort—is de mogelijkheid van lange-termijn warmteopslag een uitkomst. Wel wordt de warmteopslagcapaciteit beperkt wanneer het grondwater een hoge stroomsnelheid heeft.

### 2.2.3 Stand van zaken

De stand van zaken van de warmtepompmarkt voor de periode 1994 tot en met 2001 is weergegeven in Tabel 1. In dit overzicht zijn warmtepompen die gebruik maken van afvalwarmte niet meegenomen, omdat in de praktijk deze afvalwarmte altijd opgewekt wordt uit fossiele energiedragers. Verder wordt uitsluitend de energiebesparing door warmteproductie in beschouwing genomen. Bij het ontbreken van gegevens worden alleen warmtepompen in de sectoren huishoudens en utiliteit als duurzame energiebron beschouwd (De Graaf, 1996, Graus, 2002).

Tabel 1 Overzicht warmtepompen op basis van omgevingswarmte (bron: De Graaf, 1996, Graus, 2002).

jaar	aantal (cumulatief)	thermisch vermogen [MW <sub>th</sub> ]	vermeden prim. energie [TJ <sub>prim</sub> /a]
1994	10.204	64	227
1995	10.866	69	240
1996	13.393	91	291
1997	15.659	109	367
1998	18.690	128	425
1999	21.635	165	502
2000	24.281	200	626
2001	27.514	238	798

Het Ministerie van Economische Zaken heeft in de Derde Energienota de warmtepomp tot een speerpunt verheven: de warmtepomp dient een belangrijke bijdrage te gaan leveren aan de te bereiken energiebesparing van 65 PJ in 2020. Voor de uitvoering van dit beleid is onder andere het Meerjarenprogramma Warmtepompen gestart.

### 2.2.4 Conclusie

Afgezien van een aantal kleinschalige veldexperimenten is de elektrische warmtepomp van alle beschreven varianten tot nu toe de belangrijkste variant voor kleine systemen. Om deze reden beperkt deze studie zich tot de elektrische warmtepomp. Deze beperking zal voornamelijk gelden voor de conclusies met betrekking tot kosten en markt (zie hoofdstuk 4). De modellering van de warmtepomp (zie hoofdstuk 3) gebeurt echter op een dusdanig abstract niveau dat die conclusies een bredere geldigheid hebben.

Vanwege de doelstelling van deze studie moge duidelijk zijn dat als warmtebron voor de warmtepomp gekozen is voor bodemwarmte.

## 2.3 Bodemwarmtewisselaars

### 2.3.1 Beschrijving

Een gesloten bodemwarmtewisselaar onttrekt warmte of koude aan de bodem en is verticaal of horizontaal in de grond aangebracht. Bij een verticale bodemwarmtewisselaar is het rendement iets beter dan bij een horizontale bodemlus vanwege kleinere temperatuurschommelingen dieper in de bodem. Daarnaast is een belangrijk voordeel van verticale bodemlussen dat minder ruimte nodig is voor de installatie, zodat ze ook in relatief dichtbebouwde gebieden geplaatst kunnen worden. De bodemwarmtewisselaars kunnen met behulp van verschillende technieken in de grond worden aangebracht. Wel moet dichtbij de woning in de grond geboord kunnen worden, hetgeen in bestaande dichtbebouwde wijken lastig kan zijn. In dichtbebouwde wijken kunnen de bodemwarmtewisselaars veel hinder van elkaar ondervinden en wordt het uniform toepassen van warmtepompen met bodemwarmtewisselaars dan soms ook afgeraden.

Een bijzondere vorm van een gesloten bodemlus is wanneer deze wordt ingegoten in een heipaal. Een belangrijk voordeel hiervan is dat zo de kosten van een aparte bodemwarmtewisselaar kunnen worden uitgespaard. In Nederland is recent begonnen met een

aantal projecten in de utiliteits- en woningbouw waarbij deze zgn. energiepalen worden toegepast.

Bij gebruik van energiepalen moet wel rekening gehouden worden met de dimensionering: bij teveel onttrekking kan de grond rondom de palen bevriezen, waardoor het kleeftgedrag van de heipaal door ijsafzetting verandert en de constructie kan verzakken. Het bevriezen van de heipalen kan worden tegengegaan door de warmtepompen te voorzien van begrenzers die ervoor zorgen dat het water/glycol-mengsel niet beneden de 0°C komt. Bij geschakelde woningbouw (rijtjeswoningen) kan het gebruik van energiepalen eventueel problemen opleveren vanwege het geringe aantal heipalen en de beperkte afstand tussen de heipalen. Deze techniek is alleen toe te passen bij nieuwbouwprojecten of bij gebouwen waar de fundering aangepast moet worden.

### 2.3.2 Bodemregeneratie

Het onttrekken van warmte aan de bodem door de warmtepomp veroorzaakt een temperatuurdaling van de bodem rondom de bodemwarmtewisselaars en een afname van de bruikbare warmte in de bodem. Deze temperatuurdaling wordt gecompenseerd door de natuurlijke warmtetoevoer door de omringende grond en grondwaterstroming. Indien er teveel warmte wordt onttrokken aan de grond, hetzij omdat het systeem niet juist is gedimensioneerd, hetzij omdat de dichtheid van bodemwarmtewisselaars groot is (bijvoorbeeld in dichtbewoonde gebieden), kan de gemiddelde bodemtemperatuur op den duur toch dalen.

Deze temperatuurdaling kan worden voorkomen door geforceerd warmte aan de bodem toe te voegen. Voor deze zogenaamde bodemregeneratie bestaan drie belangrijke argumenten. Ten eerste is het door de groeiende warmtepompmarkt aannemelijk dat er in de toekomst regelgeving komt op het gebied van warmteonttrekking aan de grond. Ten tweede daalt bij een lage bodemtemperatuur de verdampertemperatuur van de warmtepomp. Het temperatuurverschil tussen de condensor en de verdamper is dan relatief groot, waardoor de COP van de warmtepomp daalt. Bij een groot temperatuurverschil kan de warmtepomp zelfs in storing raken. Door de bodem te regenereren wordt een te sterke temperatuurdaling van de bodem voorkomen, waardoor de gemiddelde COP van de warmtepomp stijgt. Ten derde kan de lengte van de bodemwarmtewisselaars teruggebracht worden wanneer de bodem geregenereerd wordt, omdat de gemiddeld hogere bodemtemperatuur leidt tot meer warmteoverdracht. Dit leidt tot lagere investeringskosten voor de bron.

De bodem kan worden geregenereerd met behulp van de in de woning aanwezige warmte, hetzij via directe regeneratie met een warmtewisselaar tussen bodemsysteem en het verwarmingssysteem, hetzij via een intern omkeerbare warmtepomp. Nadeel van de eerste mogelijkheid is de beperkte regeneratiecapaciteit; de koeling beperkt zich tot topkoeling. Met de tweede mogelijkheid is bodemregeneratie wel goed mogelijk en wordt de woning ook goed gekoeld door de warmtepomp. Een dergelijke omkeerbare warmtepomp heeft echter wel een hogere kostprijs dan onomkeerbare warmtepompen.

Een andere mogelijkheid van regeneratie is met behulp van zonnewarmte, hetzij met behulp van zon-thermische collectoren, hetzij met behulp van PVT-panelen. In deze studie zal de laatste mogelijkheid verder onderzocht worden.

### 2.3.3 Stand van zaken

De ontwikkeling van warmte/koude opslag is weergegeven in Tabel 2. In dit overzicht is seizoensopslag van warmte/koude meegerekend als duurzame energietechniek, mits geen gebruik gemaakt wordt van afvalwarmte geproduceerd door fossiele energiedragers. De inventarisatie van de projecten is gedaan door DWA (t/m 1997) en Ecofys (1998 t/m 2001) aan de hand van de verleende vergunningen door de provincies en enquêtes naar de eigenaren/beheerders van de installatie (Vegt, 1998, Graus, 2002).

Tabel 2 Overzicht gerealiseerde projecten met bodemopslag (Vegt, 1998, Graus, 2002).

jaar	aantal (cumulatief)	thermisch vermogen [MW <sub>th</sub> ]	vermeden prim. energie [TJ <sub>prim</sub> /a]
------	------------------------	---	---

1985	2	0,7	2
1986	2	0,7	2
1987	3	1	4
1988	3	1	4
1989	3	1	4
1990	4	4	14
1991	6	5	16
1992	9	8	40
1993	13	12	46
1994	19	13	49
1995	29	23	71
1996	39	39	117
1997	56	62	153
1998	91	112	284
1999	139	183	397
2000	172	241	473
2001	227	290	658

Energiepalen zijn vanaf 1997 in ruim tien projecten in Nederland gerealiseerd in zowel de utiliteits- als de woningbouw. In de woningbouw zijn tot nu toe alleen energiepalen toegepast in villa's.

#### 2.3.4 Conclusie

Het vervolg van deze studie beperkt zich tot verticale bodemwarmtewisselaars: ten eerste worden horizontale bodemwarmtewisselaars in Nederland relatief weinig toegepast, en ten tweede heeft bodemregeneratie nauwelijks zin in de ondiepe bodemlagen waarin horizontale bodemwarmtewisselaars toegepast worden.

De verschillende uitvoeringsvormen van verticale bodemwarmtewisselaars zijn op het gehanteerde abstracte niveau van de modellering (zie paragraaf 3.2.6) nauwelijks van elkaar te onderscheiden: de relatief kleine verschillen in warmtegeleidingscoëfficiënten en warmtecapaciteiten zijn op jaarbasis vrijwel verwaarloosbaar. De conclusies uit hoofdstuk 3 zijn daarom geldig voor alle varianten van verticale bodemwarmtewisselaars.

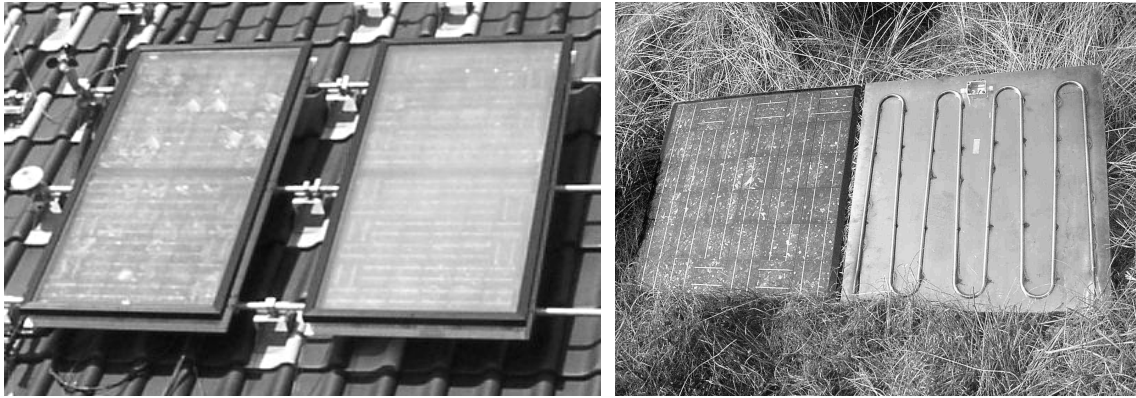
## 2.4 PVT-panelen

### 2.4.1 Beschrijving

In een fotovoltaiisch/thermisch of PVT-paneel wordt zonlicht gelijktijdig omgezet in electriciteit en warmte, door de combinatie van PV-cellen met een zon-thermische collector. Een PVT-paneel heeft een hoger energetisch rendement per vierkante meter dan de combinatie van separate PV- en zon-thermische systemen. Er kan dus effectiever gebruik worden gemaakt van de beschikbare ruimte op de gebouwschil, zodat de toepassing van PVT-panelen voor de hand ligt wanneer zowel electriciteit als warmte opgewekt moet worden, en waar weinig dak- of geveloppervlak beschikbaar is, zoals bijvoorbeeld bij woningen.

Omdat in PVT-panelen warmte- en electriciteitsopwekking gecombineerd worden in één paneel, is het mogelijk om een dak waarop een PVT-systeem geïnstalleerd is een meer uniform uiterlijk te geven dan een dak met twee separate systemen. Tenslotte zijn de installatiekosten van een PVT-systeem vermoedelijk lager: er hoeft immers maar één systeem geïnstalleerd te worden.

In grote lijnen kunnen twee soorten PVT-panelen onderscheiden worden: afgedekte en onafgedekte.



Figuur 1 Links: twee afgedekte PVT-collectoren in een testopstelling; rechts: voor- en achterzijde van een onafgedekt PVT-paneel.

Afgedekte PVT-panelen lijken in constructie veel op zon-thermische collectoren, waarbij een absorber, voorzien van PV-cellen, geplaatst wordt in een geïsoleerde aluminium omkasting voorzien van een afdekkende glasplaat. Ze worden typisch toegepast met een oppervlak van enkele vierkante meters. Door de isolatie aan de zij- en onderkant en de luchtsponw aan de bovenkant kunnen relatief hoge temperaturen bereikt worden. Het toepassingsgebied is daardoor vergelijkbaar met dat van zon-thermische collectoren. Het belangrijkste voordeel van afgedekte PVT-panelen is het hoge thermisch rendement. Daarentegen zijn de kosten relatief hoog, is het elektrisch rendement lager door de extra glasplaat, en is het paneel lastiger in het dak te integreren.

Onafgedekte PVT-panelen lijken in constructie meer op PV-panelen, waarbij aan de achterzijde van het paneel een absorber en leidingen zijn aangebracht. Ze worden typisch in grotere oppervlakken (eventueel dakvullend) in een dak geïntegreerd. Omdat ze zonder afdekking toegepast worden, zijn de temperaturen relatief laag. Onafgedekte PVT-panelen worden dus bij voorkeur in combinatie met een warmtepomp en/of lage-temperatuurverwarming toegepast. De belangrijkste voordelen van onafgedekte PVT-panelen zijn de lagere kosten en betere esthetiek (ze zijn eenvoudiger in een dak te integreren, en eventueel te combineren met PV-panelen, die eenzelfde uiterlijk hebben). Daarentegen is het thermisch rendement iets lager door de hogere verliezen bij lage buitentemperatuur of sterke wind.

#### 2.4.2 Stand van zaken

Zowel afgedekte als onafgedekte PVT-panelen bevinden zich in de overgang van ontwikkelings- naar demonstratiefase. In januari 2003 is een systeem met 45 m<sup>2</sup> afgedekte PVT-panelen geïnstalleerd op een bedrijfspand in Engeland. Tevens zal in de loop van 2003 een dakvullend systeem van onafgedekte PVT-panelen geïnstalleerd worden op een demonstratiewoning op het ECN-terrein in Petten.

#### 2.4.3 Conclusie

Zowel afgedekte als onafgedekte PVT-panelen zijn in vergelijkbare mate uitontwikkeld en technisch haalbaar. Beide zijn echter nog niet commercieel verkrijgbaar. Op grond van kosten of beschikbaarheid is daarom geen voorkeur voor één van beide varianten uit te spreken.

Onafgedekte PVT-panelen zijn echter beter geschikt voor bodemregeneratie: omdat afgedekte PVT-panelen relatief meer hoogwaardige warmte leveren, is het energetisch gezien gunstiger om deze warmte direct te gebruiken voor bijvoorbeeld tapwaterverwarming dan voor bodemopslag. Bovendien is het mogelijk dat een te hoge temperatuur van het bodemsysteem nadelige gevolgen heeft voor de ecologie en het bodemwarmtewisselaarsysteem.

## 2.5 Conclusie

In de voorafgaande paragrafen zijn de verschillende varianten van warmtepompen, bodemwarmtewisselaars en PVT-panelen besproken. Gebaseerd op beschikbaarheid en technische geschiktheid is gekozen voor een systeem bestaande uit een combinatie van onafgedekte PVT-panelen, een elektrische warmtepomp en verticale bodemwarmtewisselaars. De combinatie van deze technologieën leidt tot een aantal specifieke voordelen: de mogelijkheid tot bodemregeneratie, een hogere elektrische opbrengst van de PVT-panelen, en een betere milieuprestatie van de warmtepomp.

### *Bodemregeneratie*

Zoals reeds besproken in paragraaf 2.3.2 leidt het toepassen van bodemregeneratie tot een hogere gemiddelde bodemtemperatuur, en daardoor tot een toename van de COP van de warmtepomp. Ook kan de lengte van de bodemwarmtewisselaars teruggebracht worden, omdat de gemiddeld hogere bodemtemperatuur leidt tot een grotere warmteoverdracht. Tenslotte kan door toepassing van bodemregeneratie naar verwachting gegarandeerd worden dat de gemiddelde bodemtemperatuur ook op de lange termijn constant blijft, zodat bij voorbaat voldaan wordt aan mogelijke toekomstige regelgeving op het gebied van warmteonttrekking aan de bodem.

### *Hogere elektrische opbrengst PVT-panelen*

Door de actieve koeling van de PV-cellen is het elektrisch rendement van PVT-paneel hoger dan dat van een PV-paneel. Wanneer de van het PVT-paneel afgevoerde warmte niet alleen in een opslagvat, maar ook in de bodem opgeslagen wordt, neemt de gemiddelde temperatuur van de PV-cellen af. Het elektrisch rendement neemt dus verder toe.

### *Milieuprestatie warmtepomp*

De elektriciteit die een elektrische warmtepomp gebruikt, is afkomstig van verschillende bronnen, die niet allemaal even 'groen' zijn. De milieuprestatie van een warmtepomp is dan ook sterk afhankelijk van de gebruikte elektriciteit (kolen, nucleair, zon, etc.). Door de warmtepomp nu te combineren met duurzaam opgewekte elektriciteit, zoals die uit een PV- of PVT-paneel, verbetert de milieuprestatie van de warmtepomp aanzienlijk. Naast de toch al duurzame omgevingswarmte is nu ook de benodigde elektriciteit 'groen'.



## 3. MODELLERING

### 3.1 Inleiding

Om het gedrag en de opbrengst van het systeem te bepalen, is van het systeem en de componenten zoals die in het vorige hoofdstuk zijn omschreven een numeriek model gemaakt, in detail beschreven in paragraaf 3.2. Dit model is gebaseerd op toepassing van het systeem in een eengezinswoning, voor zowel ruimte- als tapwaterverwarming. Met behulp van dit model is een optimalisatie uitgevoerd van de verschillende componenten, zoals collectoroppervlak, lengte van de bodemwarmtewisselaars en grootte van het opslagvat. Aan de hand van de resultaten van deze optimalisatie, beschreven in paragraaf 3.3.1, is een referentiesituatie gedefinieerd (zie paragraaf 3.3.2). Van deze referentiesituatie is de elektrische en thermische opbrengst van het systeem berekend, evenals het gedrag van de bodem op de lange termijn. Tot slot is, uitgaande van de referentiesituatie, de toegevoegde waarde van PVT en bodemregeneratie voor de systeemopbrengst bepaald, en is de invloed van klimaatdata op de modelvoorspellingen getoetst. De resultaten van deze berekeningen zijn te vinden in paragraaf 3.3.3.

### 3.2 Modelbeschrijving

Voor het opzetten van een numeriek model is gekozen voor TRNSYS. Met dit pakket kan het dynamisch gedrag van een combinatie van verschillende componenten en modules gesimuleerd worden.

Een belangrijk nadeel van TRNSYS is dat, hoewel er inmiddels verschillende modules ontwikkeld zijn voor de modellering van een verticale bodemwarmtewisselaar, er nog geen modules zijn die het effect van grondwaterstroming meenemen. Daarnaast is het veelal niet mogelijk om een gelaagde bodemopbouw in het model in te voeren, maar moet worden volstaan met een set gemiddelde bodemeigenschappen.

Er bestaan weliswaar verschillende andere pakketten waarmee het gedrag van de bodem nauwkeuriger beschreven kan worden, maar in TRNSYS is de wisselwerking tussen de verschillende systeemcomponenten—warmteafgiftesysteem, PVT, warmtepomp, bodemwarmtewisselaar en bodem—nauwkeurig te bepalen. Dit is met de meer specialistische bodempakketten niet mogelijk. Om deze reden is toch gekozen voor modellering in TRNSYS.

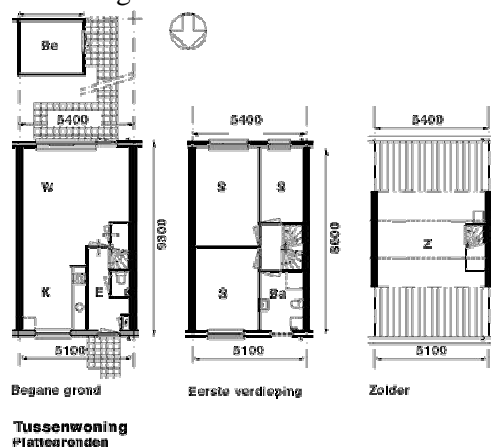
#### 3.2.1 Woning

Uitgangspunt voor het model van de woning is de Novem referentie-tussenwoning uit 1999 (Novem, 1999). Deze woning is voorzien van een vloerverwarmingssysteem op de begane grond en de eerste verdieping. In deze woning wordt het onderzochte systeem—een PVT-dak met een bodemgekoppelde warmtepomp—ingezet voor zowel ruimte- als voor tapwaterverwarming.

De isolatiewaarden van vloer, gevel en dak bedragen  $R_C = 3,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ ; het glas heeft een warmte weerstand van  $U = 1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Ten aanzien van de infiltratie is gerekend met een constante luchthoeveelheid van  $80 \text{ m}^3/\text{h}$ , ofwel een infiltratievoud van  $0,252 \text{ h}^{-1}$ . Voor de (mechanische) ventilatie is gekozen voor een luchthoeveelheid van  $140 \text{ m}^3/\text{h}$ , gelijkelijk verdeeld over de begane grond en de eerste verdieping. De zolder wordt niet mechanisch geventileerd. Het ventilatiesysteem is voorzien van warmteterugwinning met een rendement van 75%.

Naast de zojuist beschreven woning is ook een bestaande, gerenoveerde woning gemodelleerd. Het doel hiervan is om te bepalen hoe groot de invloed van een slechtere isolatie, en dus een grotere warmtevraag, op de systeemprestatie is. Ook hier is het uitgangspunt de Novem referentie-tussenwoning, voorzien van een bodemgekoppelde warmtepomp voor tapwaterverwarming en ruimteverwarming met behulp van een vloerverwarmingssysteem. Hoewel vloerverwarming minder gebruikelijk is in gerenoveerde woningen, is hier toch voor

een dergelijk systeem gekozen: door hetzelfde warmteafgiftesysteem te kiezen, is een rechtstreekse vergelijking tussen de gerenoveerde en de nieuwbouwwoning mogelijk.



Figuur 2 Plattegrond van de Novem referentiewoning.

Omdat de bouwkundige kwaliteit van bestaande woningen sterk uiteenloopt, is een schatting gemaakt van de isolatiewaarden voor vloer, gevel en dak. Er is uitgegaan van een isolatiedikte van 6 cm voor vloer en gevel; ook voor het dak is uitgegaan van een isolatiedikte van 6 cm, maar omdat draagbalken doorgaans niet geïsoleerd zijn, is een iets kleinere dikte van 5 cm aangehouden. Deze dikten leiden tot isolatiewaarden voor vloer, gevel en dak van respectievelijk  $R_c = 1,8, 2,2$  en  $1,7 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Voor de vensters is uitgegaan van normaal dubbel glas, met een U-waarde van  $U = 2,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Tevens is aangenomen dat de bestaande woning minder naad- en kierdicht is: de infiltratie is verhoogd naar  $150 \text{ m}^3/\text{h}$ , ofwel een infiltratievoud van  $0,5 \text{ h}^{-1}$ . Mechanische ventilatie is niet toegepast.

De gebruikte waarden voor de bestaande en de nieuwbouwwoning zijn samengevat in Tabel 3.

Tabel 3 Gebruikte waarden voor de nieuwbouw- en de bestaande woning.

		nieuwbouw	bestaand
$R_c$ -waarde vloer	$[\text{m}^2\text{K/W}]$	3,0	1,8
gevel	$[\text{m}^2\text{K/W}]$	3,0	2,2
dak	$[\text{m}^2\text{K/W}]$	3,0	1,7
U-waarde glas	$[\text{W/m}^2\text{K}]$	1,7	2,8
Infiltratie	$[\text{m}^3/\text{h}]$	80	150
Ventilatie (mechanisch)	$[\text{m}^3/\text{h}]$	140	–

De interne warmtelast in de woning ten gevolge van verlichting, apparatuur en bewoners wordt verondersteld gelijk te zijn gedurende het gehele jaar, en is weergegeven in Tabel 4. Onderscheid is gemaakt in de interne warmtelast in de woonzone (de begane grond) en de slaapzone (de eerste verdieping). Aangenomen is dat er op de zolder geen interne warmtelast is. Het vloerverwarmingssysteem is ingesteld op een ruimtetemperatuur van  $21^\circ\text{C}$  in de woonzone en  $16^\circ\text{C}$  in de slaapzone. Er wordt geen nachtverlaging toegepast.

Tabel 4 Interne warmtelast in  $\text{W/m}^2$ .

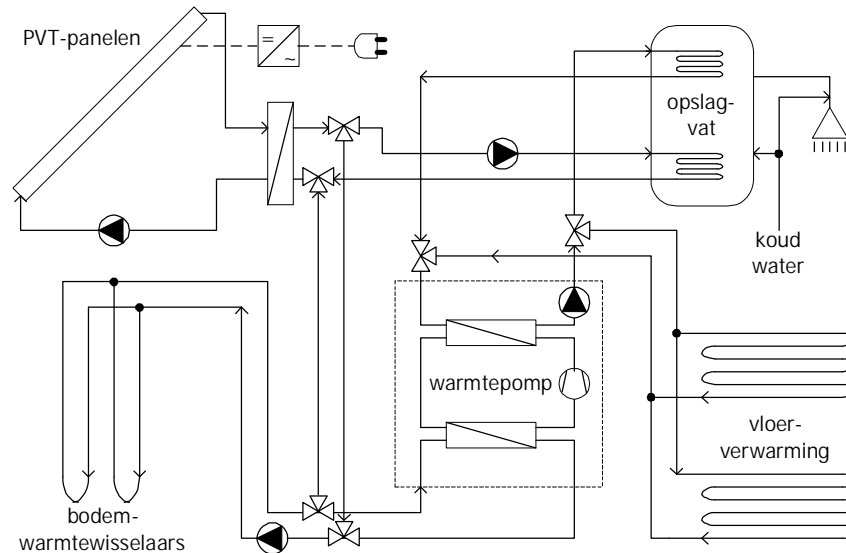
tijd	woonzone		slaapzone	
	ma t/m zo	ma t/m vr	za t/m zo	
23:00 – 07:00 uur	2	6	6	
07:00 – 17:00 uur	8	1	2	
17:00 – 23:00 uur	20	1	4	

Voor de klimaatgegevens is gebruik gemaakt van het Test Reference Year (TRY) voor De Bilt, gebaseerd op de meetgegevens van 1971–1980. Om het gedrag van het systeem ook gedurende

een langere periode te kunnen bestuderen, is tenzij anders vermeld een periode van 10 aaneenvolgende TRVs gemodelleerd.

### 3.2.2 Installatie

De hierboven beschreven woningen worden verwarmd met behulp van een dakvullend systeem van PVT-panelen in combinatie met een bodemgekoppelde warmtepomp, die zijn warmte levert voor zowel ruimteverwarming als voor verwarming van tapwater. Het volledige systeem is schematisch weergegeven in Figuur 3.



Figuur 3 Schematische weergave van de installatie.

De PVT-panelen zijn door middel van een warmtewisselaar hydraulisch gescheiden van de rest van de installatie. Deze warmtewisselaar heeft een rendement van 90%. De in de PVT-panelen opgewekte warmte kan worden opgeslagen in een voorraadvat, of in de bodem via een aantal verticale bodemwarmtewisselaars. De in de bodem opgeslagen warmte wordt via dezelfde bodemwarmtewisselaars onttrokken door een warmtepomp, die ingezet kan worden voor tapwater (door naverwarming van het opslagvat) of ruimteverwarming.

Het opslagvat is in het model gescheiden in een lage-temperatuur- en een hoge-temperatuurgedeelte met een inhoud van respectievelijk 150 en 50 liter. De PVT-panelen leveren hun warmte via een warmtewisselaar aan het lage-temperatuurgedeelte, terwijl de warmtepomp warmte levert aan het hoge-temperatuurgedeelte. Beide gedeelten zijn apart gelaagd (in 5 segmenten), en direct aan elkaar verbonden: het hoge-temperatuurgedeelte wordt in het onderste segment aangevuld met water uit het bovenste segment van het lage-temperatuurgedeelte. Het lage-temperatuurgedeelte wordt in het onderste segment aangevuld met koud leidingwater. Beide vaten zijn geïsoleerd met 10 cm isolatie en zijn gepositioneerd op de zolder.

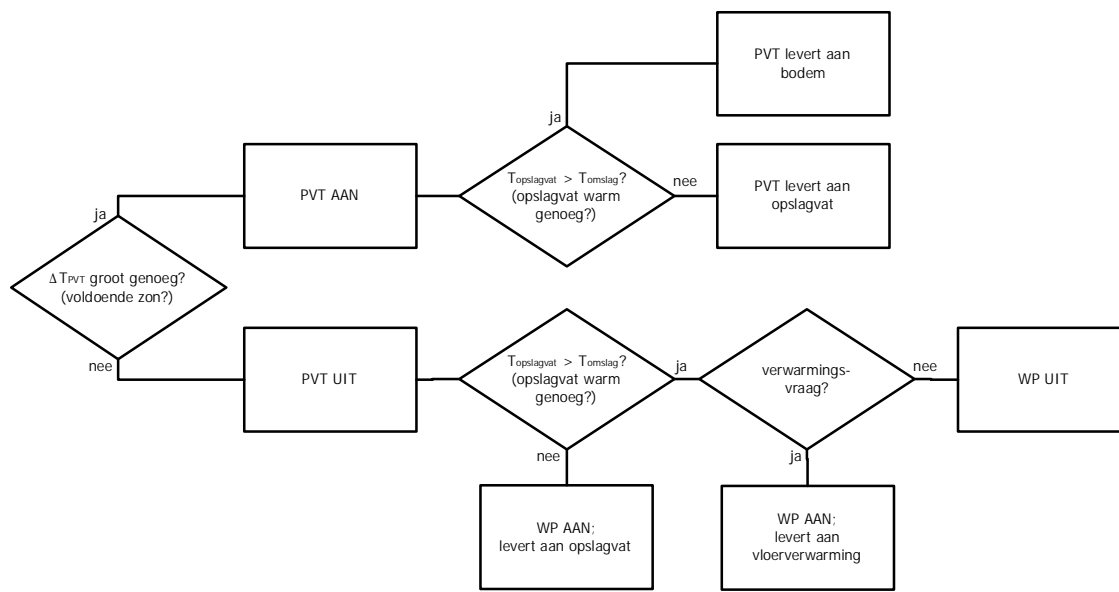
In verband met legionella-ontsmetting is boven in het opslagvat een elektrische verwarmmer opgenomen. Deze verwarmmer verwarmt het water éénmaal per week tot een temperatuur van 65°C.

Het vloerverwarmingssysteem wordt per verdieping doorstroomd met een debiet van 450 kg/h. De warmtepomp levert echter altijd een constante hoeveelheid van 120 kg/h warm water van 55°C; de resterende 330 kg/h is retourwater van het vloerverwarmingssysteem. Wanneer beide verdiepingen warmte nodig hebben, stroomt er in totaal dus 900 kg/h door het buizenstelsel, en zal er dus per verdieping meer water gerecirculeerd worden.

Bij de bestaande woning is de piekwarmtevraag hoger: in dit geval levert 120 kg/h water van 55°C niet altijd voldoende warmte. De warmtepomp levert daarom in dit geval een debiet van 250 kg/h, bijgemengd met 200 kg/h retourwater.

### 3.2.3 Regeling

Om de in de PVT-panelen opgewekte zonnewarmte met zo min mogelijk verliezen in te zetten, is gekozen voor een zo direct mogelijk gebruik van de warmte. De warmte wordt daarom eerst gebruikt om het tapwater in het opslagvat te verwarmen tot een vooraf ingestelde temperatuur, de omslagtemperatuur. Zodra deze temperatuur bereikt is, wordt verdere PVT-warmte opgeslagen in de bodem via de bodemwarmtewisselaars. In een optimalisatie (zie paragraaf 3.3.1) is bepaald bij welke omslagtemperatuur het systeem het beste presteert. Het debiet is gelijk bij levering aan zowel het vat als de bodem. De regeling is schematisch weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4 Schematische weergave van de regeling van het systeem.

Het opslagvat wordt door de warmtepomp verwarmd tot 55°C, dat wil zeggen dat de warmtepomp wordt ingeschakeld wanneer de vatemperatuur 51°C of lager is, en weer wordt uitgeschakeld bij een vatemperatuur van 54°C of hoger.

### 3.2.4 PVT-panelen

Het thermisch rendement  $h$  van een PVT-paneel wordt net als bij zon-thermische collectoren doorgaans uitgedrukt in het nulrendement  $h_0$  en de warmteverliescoëfficiënt  $U_L$ :

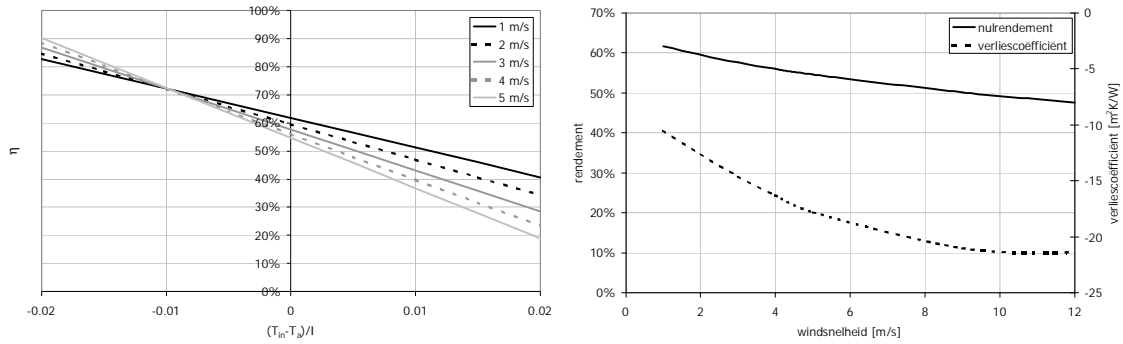
$$h = h_0 - U_L \left( \frac{T_{in} - T_a}{I} \right),$$

met  $T_{in}$  en  $T_a$  respectievelijk de temperatuur aan de ingang van het paneel en de omgevingstemperatuur, en  $I$  de zoninstraling.

Het thermisch rendement van een onafgedekt PVT-paneel is bepaald met behulp van een numeriek model in Matlab, dat is gevalideerd aan de hand van verschillende metingen aan een aantal prototypes (Zondag, 2001; Jong, 2002). Omdat het thermisch rendement van een onafgedekt paneel relatief sterk beïnvloed wordt door de windsnelheid, is deze afhankelijkheid ook in het model opgenomen. De berekende thermische rendementen zijn weergegeven in Figuur 5.

Het elektrisch rendement  $h_{el}$  van een onafgedekt PVT-paneel is, net als dat van een PV-paneel, afhankelijk van de temperatuur van de PV-cellen:

$$h_{el} = h_{el,0} [1 - b(T_{PV} - T_{ref})],$$



Figuur 5 Links rendementscurves van een onafgedekt PVT-paneel bij verschillende windsnelheden; rechts het nulrendement en de warmteverliescoëfficiënt van een onafgedekt PVT-paneel als functie van de windsnelheid.

met  $\eta_{el,0}$  het PV-rendement bij standaard testcondities<sup>1</sup>,  $b$  de temperatuurscoëfficiënt, en  $T_{PV}$  de oppervlaktetemperatuur van de PV-cellen in graden Celsius. Met behulp van een numeriek model, gevalideerd door verschillende metingen, is het nulrendement bepaald op  $\eta_{el,0} = 9,68\%$ , en de temperatuurscoëfficiënt op  $b = 0,45 \text{ \%}/\text{K}$  (De Vries, 1998).

De oppervlaktetemperatuur van de PV-cellen wordt sterk beïnvloed door het al dan niet actief koelen van de cellen. Deze temperatuur wordt daarom op andere wijze berekend wanneer er wel of geen doorstroming van het PVT-paneel plaatsvindt. Wanneer er wel doorstroming plaatsvindt, wordt de temperatuur van de PV-cellen gegeven door

$$T_{PV} = \frac{T_{uit} - T_{in}}{2} + \frac{\eta_{el,0} I}{h_{ca}}$$

met  $h_{ca}$  de warmteoverdrachtscoëfficiënt van de PV-cellen naar het warmteafvoerende medium (voor een onafgedekt PVT-paneel is  $h_{ca} = 150 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ ). Wanneer er geen doorstroming plaatsvindt, wordt de PV-temperatuur gegeven door

$$T_{PV} = \frac{T_a + \frac{I}{U_L} [h_0 - \eta_{el,0} (1 + bT_{ref})]}{1 - \frac{I}{U_L} b \eta_{el,0}}$$

### 3.2.5 Warmtepomp

De warmtepomp wordt gebruikt voor verwarming van het water van de vloerverwarming en van het tapwater. De warmtepomp gebruikt de bodem als bron door middel van verticale bodemwarmtewisselaars. Uitgangspunt is dat de warmtepomp altijd een temperatuur van 55°C levert met een vast debiet (zie Tabel 5).

Tabel 5 Gebruikte waarden voor de debieten aan de verdamperzijde en aan de condensorzijde bij gebruik voor ruimte- en tapwaterverwarming voor de nieuwbouw- en de bestaande woning.

	nieuwbouw	bestaand
debiet verdamperzijde [kg/h]	1000	1000
debiet condensorzijde, ruimteverwarming [kg/h]	120	250
debiet condensorzijde, tapwaterverwarming [kg/h]	120	250

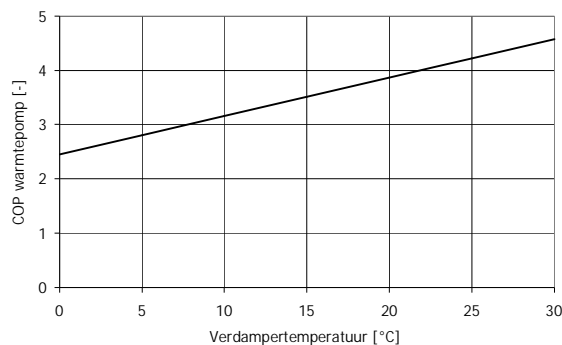
<sup>1</sup> STC: instraling  $I = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$ , referentietemperatuur  $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$ .

Wanneer de warmtepomp aan de ruimteverwarming levert, wordt het thermisch vermogen dat de warmtepomp moet leveren bepaald door de retourtemperatuur van de verwarming, middels

$$P_{thermisch} = \eta c_p (T_{verw.aanvoer} - T_{verw.retour}),$$

waarbij de aanvoertemperatuur constant is, zoals eerder vermeld.

De COP van de warmtepomp is afhankelijk van de ingangstemperatuur aan de verdamperszijde, d.i. de temperatuur waarmee het medium (water/glycol) uit de bodemwarmtewisselaar komt. Deze temperatuur wordt berekend in het bodemwarmtewisselaar-model. Het gebruikte verband is weergegeven in Figuur 6 (Günther-Pomhoff, 1994).



Figuur 6 COP van de warmtepomp als functie van de ingangstemperatuur aan de verdamperszijde, bij een vaste uitgangstemperatuur aan de condensorzijde van 55°C.

Omdat nu zowel het thermisch vermogen als de COP bekend is, kan het compressorvermogen berekend worden uit

$$COP = \frac{P_{thermisch}}{P_{compressor}}.$$

Uit het compressorvermogen volgt vervolgens het verdampervermogen middels

$$P_{thermisch} = P_{verdamp} + P_{compressor}.$$

Dit verdampervermogen is het vermogen dat aan de bodem onttrokken wordt. Omdat ook het debiet door de bodemwarmtewisselaar (en dus door de verdamper) vast is, en de uitgangstemperatuur van de bodemwarmtewisselaar bekend is, kan nu de ingangstemperatuur voor de bodemwarmtewisselaar berekend worden.

Wanneer de warmtepomp niet voor ruimteverwarming maar voor verwarming van tapwater ingezet wordt, is de berekening analoog: de aanvoer aan de condensorzijde komt dan uit de onderzijde van het opslagvat, en het tot 55°C opgewarmde water wordt aan de bovenzijde van het opslagvat teruggeleverd.

### 3.2.6 Bodemwarmtewisselaars

Voor het modelleren van de bodemwarmtewisselaars wordt gebruik gemaakt van het model van Eskilson, in TRNSYS geïmplementeerd in Type 81 (Eskilson, 1986). In dit model wordt aangenomen dat de thermische eigenschappen van de grond homogeen zijn, en wordt warmtetransport door grondwaterstroming verwaarloosd.

In een Amerikaans onderzoek is de invloed van grondwaterstroming op de bodemtemperatuur berekend voor verschillende bodemtypen (Chiasson, 1999). Bij een constante warmteonttrekking van 2,5 kW aan een enkele bodemwarmtewisselaar van 76 meter lengte in een bodem bestaande uit grof zand blijkt de invloed van grondwaterstroming op de bodemtemperatuur ongeveer 25% te zijn: dat wil zeggen dat de temperatuurdaling van de bodem 25% kleiner is wanneer grondwaterstroming meegenomen wordt in de modellering. De invloed van grondwaterstroming hangt sterk af van de porositeit van de grond: bij fijn zand is de

invloed van grondwaterstroming nog maar 2%, en bij dichtere bodemsoorten als bijvoorbeeld klei is deze minder dan 1%. Omdat de Nederlandse bodem voornamelijk uit zand en klei bestaat, zal de fout door het niet modelleren van grondwaterstroming naar verwachting kleiner dan 25% zijn; in gebieden waar de bodem vooral klei bevat zal de fout naar verwachting kleiner dan 2% zijn.

In de uitgangssituatie is de bodem voorzien van twee verticale bodemwarmtewisselaars van elk 35 meter lengte, geplaatst op een onderlinge afstand van 10 meter. In de bovenste twee meter van elke bodemwarmtewisselaar vindt geen warmteuitwisseling met de bodem plaats. Door de bodemwarmtewisselaars stroomt een 70%/30% water/glycolmengsel met een debiet van 500 kg/h per bodemwarmtewisselaar. Om de optimale configuratie voor dit systeem te bepalen, is zowel het aantal bodemwarmtewisselaars als het debiet gevarieerd (zie paragraaf 3.3.1).

Voor het bepalen van de bodemeigenschappen is uitgegaan van een aantal kruisprofielen van TNO-NITG voor een aantal lokaties in Nederland, gelegen in gebieden met verschillende bodemopbouw (Almere, Assen, Deventer, Dordrecht, Petten en Zaanstad). Door de keuze van deze lokaties is getracht een zo breed mogelijke spreiding in bodemsamenstelling te verkrijgen. Vanwege de aannames in de gebruikte TRNSYS-module was het echter nodig om de bodemeigenschappen van de verschillende lagen voor elke lokatie te middelen. Deze middeling resulteerde in één warmtegeleidingscoëfficiënt en één warmtecapaciteit voor elke lokatie. Na middeling bleek dat de bodemeigenschappen van de verschillende lokaties ruwweg in drie categorieën te verdelen waren. Daarom zijn voor de verdere modellering drie bodemtypes gedefinieerd; de eigenschappen van deze bodemtypes zijn weergegeven in Tabel 6. Hoewel met deze aanpak de details van de verschillende bodems verloren gaan, geven deze drie bodemtypes een goede indruk van de spreiding in bodemeigenschappen in Nederland.

Tabel 6 Thermische eigenschappen van de gedefinieerde bodemtypes.

bodemtype	$\lambda$ [W/mK]	$c_p$ [MJ/m <sup>3</sup> K]
slecht	1,5	2,2
gemiddeld	1,8	2,3
goed	2,4	2,5

### 3.3 Resultaten

#### 3.3.1 Optimalisatie

Voor de optimalisatie van het systeem is eerst een uitgangssituatie gekozen. Vanuit dit uitgangspunt zijn de verschillende parameters in het systeem gevarieerd. Hierbij is aangenomen dat in eerste benadering de parameters elkaar niet beïnvloeden, dat wil zeggen dat het optimum van het systeem bereikt kan worden door alle parameters één voor één onafhankelijk van elkaar te optimaliseren. Deze aanpak volstaat om te bepalen wat de invloed van de verschillende parameters is. Voor de installatie van een systeem in de praktijk is echter wel degelijk een volledige optimalisatie noodzakelijk.

Uit de combinatie van de verschillende optima is tenslotte een referentiesituatie gedefinieerd. Opgemerkt dient te worden dat in sommige gevallen naast het energetisch optimum ook andere factoren een rol gespeeld hebben. Deze worden in het volgende in meer detail besproken.

##### *Uitgangssituatie*

Als uitgangssituatie is gekozen voor de nieuwbouwwoning, voorzien van een systeem met een PVT-oppervlak van 15 m<sup>2</sup> met een opslagvat van 200 •. De omslagtemperatuur—de temperatuur waarboven het PVT niet langer aan het opslagvat levert, maar aan de bodem—is ingesteld op 50°C. Daarnaast is er gekozen voor twee bodemwarmtewisselaars, elk met een lengte van 35 meter, geplaatst op een onderlinge afstand van 10 meter in een “gemiddelde” bodem. Het debiet door de bodemwarmtewisselaars is ingesteld op 750 •/h per paal.

### *PVT-oppervlak*

Voor de optimalisatie van het PVT-oppervlak zijn drie berekeningen uitgevoerd, voor een PVT-oppervlak van 5, 15 en 25 m<sup>2</sup>. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 7.

Zoals verwacht is de elektrische opbrengst van de PVT-panelen lineair afhankelijk van het oppervlak: er zijn immers geen factoren die de elektrische opbrengst zullen beperken bij een groter PVT-oppervlak. De thermische opbrengst stijgt wel relatief langzamer bij een toenemend oppervlak: omdat de verblijftijd van het water in de PVT-panelen langer wordt bij een groter oppervlak, neemt ook de gemiddelde temperatuur van het water toe, zodat de warmteverliezen toenemen. Vergroten van het oppervlak heeft geen merkbare invloed op de COP van de warmtepomp. Wel is bij een groter PVT-oppervlak meer warmte beschikbaar voor regeneratie van de bodem.

Voor de referentiesituatie is gekozen voor een PVT-oppervlak van 25 m<sup>2</sup>. De grootste oppervlakte geeft vanzelfsprekend de hoogste thermische en elektrische opbrengst. Belangrijk is echter ook dat deze keuze het beste past bij de opzet van het project, namelijk het onderzoeken van één systeem dat naast het leveren van directe warmte ook in staat is de bodem te regenereren.

### *Vatinhoud*

De optimalisatie van de inhoud van het opslagvat is uitgevoerd met behulp van berekeningen voor een totale vatinhoud van 100, 200 en 400 • (telkens met een hoge-temperatuurgedeelte van 50 •, zie par. 3.2.2). Een grotere vatinhoud is niet doorgerekend, omdat de toepassing van dergelijke grote vaten nog nauwelijks gebruikelijk is in de woningbouw. De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Figuur 7.

Vergroten van de vatinhoud heeft twee tegenstrijdige gevolgen. Enerzijds kan er meer warmte rechtstreeks door het PVT aan het tapwater geleverd worden, zodat de thermische opbrengst van de PVT-panelen toeneemt. Anderzijds is bij een groter vat minder warmte beschikbaar voor bodemregeneratie: er wordt dus langer aan het vat geleverd. Omdat het opslagvat een hogere gemiddelde temperatuur heeft dan de bodem, betekent dit dat de gemiddelde temperatuur van de panelen toeneemt, waardoor ook de verliezen toenemen en de thermische opbrengst vermindert. Deze twee effecten leiden samen tot een optimale thermische opbrengst bij een vatgrootte van 200 •.

Omdat bij een groter vat gedurende een kortere tijd aan de bodem geleverd kan worden, kan de bodem dus ook minder geregenereerd worden. Daarentegen wordt er meer warmte aan het tapwater geleverd, zodat de warmtepomp minder hoeft na te verwarmen en dus minder aan de bodem hoeft te onttrekken. Op de elektrische opbrengst en de COP heeft de vatgrootte zoals verwacht geen merkbare invloed.

Gekozen is voor een vatinhoud van 200 •: deze inhoud levert de beste opbrengst, en is daarnaast acceptabel voor gebruik in de woningbouw.

### *Aantal bodemwarmtewisselaars*

Om te controleren of ook met minder bodemwarmtewisselaars volstaan kan worden, zijn berekeningen uitgevoerd met één en twee bodemwarmtewisselaars van gelijke lengte. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 7.

Wanneer één bodemwarmtewisselaar wordt gebruikt in plaats van twee, daalt de bodemtemperatuur ter plaatse van de paal, omdat de volledige warmtevraag nu uit één bron in plaats van twee onttrokken moet worden. Hierdoor neemt de hoeveelheid aan de bodem onttrokken warmte af. De temperatuurdaling van de bodem heeft ook een COP-daling van de warmtepomp tot gevolg. Het aantal bodemwarmtewisselaars heeft uiteraard geen invloed op de (thermische of elektrische) opbrengst van de PVT-panelen.

Vanwege de betere prestaties is voor de referentiesituatie gekozen voor twee bodemwarmtewisselaars.

### *Lengte bodemwarmtewisselaars*

De optimalisatie van de lengte van de bodemwarmtewisselaars is uitgevoerd met berekeningen voor lengtes van 15, 35 en 70 meter. Zowel langere als kortere bodemwarmtewisselaars komen in Nederland weinig voor. De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Figuur 7.



De resultaten lijken sterk op de voorgaande optimalisatie: wanneer kortere bodemwarmtewisselaars worden gebruikt, neemt de hoeveelheid onttrokken warmte per meter paallengte toe, waardoor de bodemtemperatuur ter plaatse daalt. Net als boven leidt dit tot een lagere COP en een lagere onttrekking van warmte uit de bodem. Ook hier heeft de lengte van de bodemwarmtewisselaars uiteraard geen invloed op de opbrengst van de PVT-panelen.

Hoewel een lengte van 70 meter leidt tot een hogere COP, is in de uiteindelijke modellering toch een lengte van 35 meter gebruikt: de toename in COP is relatief gering, terwijl bij grote lengtes relatief kostbare boortechnieken toegepast moeten worden.

#### *Debiet door bodemwarmtewisselaars*

Voor de optimalisatie van het debiet door de bodemwarmtewisselaars zijn berekeningen uitgevoerd voor debieten van 500, 750 en 1000 •/h per paal. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 7.

Bij het verhogen van het debiet door de bodemwarmtewisselaars verhoogt uiteraard ook het debiet door de verdamper van de warmtepomp. De verblijftijd van het medium neemt dus in de bodemwarmtewisselaar én in de warmtepomp evenveel af—hoewel het medium dus in de bodem minder tijd krijgt om op te warmen, krijgt het in de warmtepomp evenzoveel minder tijd om weer af te koelen. Beide effecten zijn ongeveer even groot, zodat het debiet nauwelijks invloed heeft op de hoeveelheid aan de bodem onttrokken warmte, noch op de COP van de warmtepomp. Het debiet door de bodemwarmtewisselaars heeft geen invloed op de prestatie van de PVT-panelen.

Omdat de grootte van het debiet nauwelijks invloed heeft op de prestatie van de PVT-panelen, warmtepomp of bodemwarmtewisselaars, is voor de referentiesituatie is gekozen voor het laagste debiet van 500 •/h per bodemwarmtewisselaar, oftewel een totaal debiet van 1000 •/h.

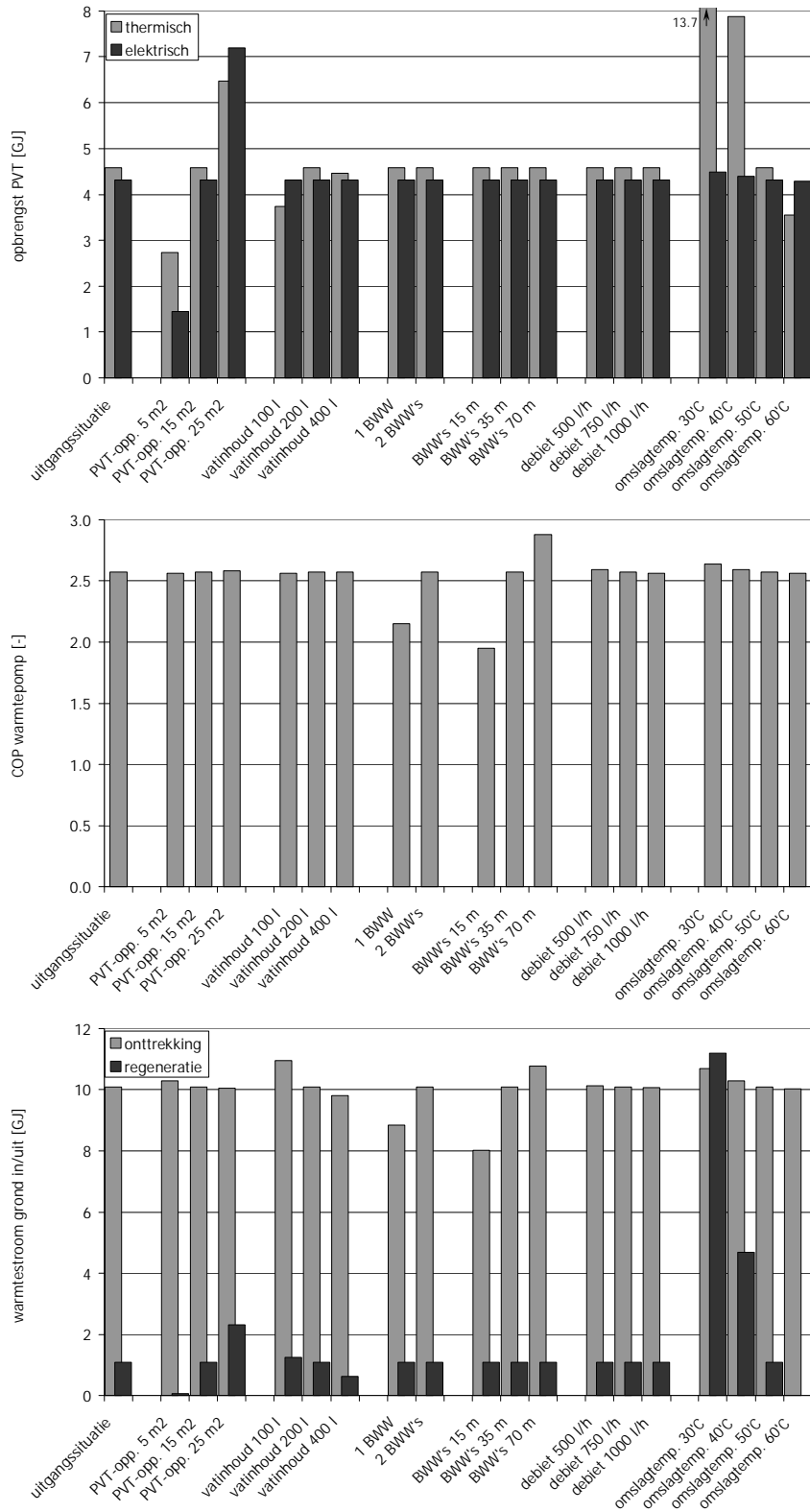
#### *Omslagtemperatuur*

De optimalisatie van de omslagtemperatuur—de temperatuur waarbij geschakeld wordt tussen opslag van de PVT-warmte in het opslagvat dan wel in de bodem—is uitgevoerd voor temperaturen van 30, 40, 50 en 60°C. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 7.

Bij een lage omslagtemperatuur leveren de PVT-panelen relatief lang aan de bodem. Omdat de gemiddelde temperatuur van de bodem aanzienlijk lager is dan de gemiddelde temperatuur van het opslagvat, daalt hierdoor de gemiddelde temperatuur van de PVT-panelen. Zowel het thermische als het elektrische PVT-rendement neemt hierdoor toe.

Omdat relatief veel warmte in de bodem terechtkomt, neemt ook de temperatuur van de bodem toe. Hierdoor stijgt zowel de COP van de warmtepomp als de hoeveelheid aan de bodem onttrokken warmte.

Ondanks het relatief lage rendement van de PVT-panelen, is toch gekozen voor een omslagtemperatuur van 30°C: alleen bij deze temperatuur is sprake van een daadwerkelijke regeneratie van de bodem.



Figuur 7 Resultaten van de systeemoptimalisatie, gemiddeld over 10 jaar.

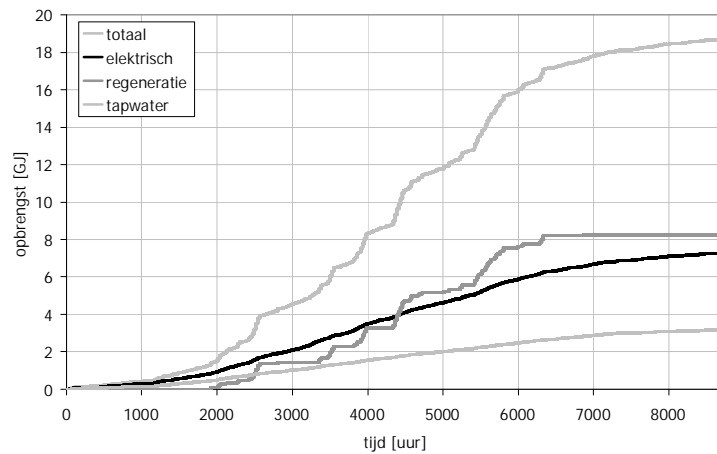
### 3.3.2 Referentiesituatie

Uit de hierboven beschreven optimalisatie is één systeem gekozen, dat voor het vervolg van de modellering als referentiesituatie is gebruikt. De parameters van deze referentie zijn weergegeven in Tabel 7.

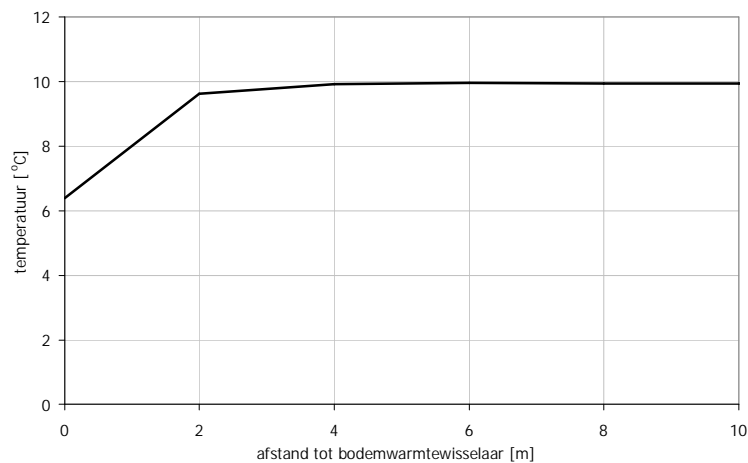
Tabel 7 Parameters voor de referentiesituatie.

parameter	waarde
PVT-oppervlak	25 m <sup>2</sup>
inhoud opslagvat	200 •
aantal bodemwarmtewisselaars	2
lengte bodemwarmtewisselaars	35 m
debiet door bodemwarmtewisselaars	1000 •/h
omslagtemperatuur	30°C

De opbrengst van de PVT-panelen in de referentiesituatie is weergegeven in Figuur 8. De totale PVT-opbrengst is 18,8 GJ, waarvan 7,3 GJ (ofwel 2027 kWh) elektrische opbrengst, en 8,3 GJ en 3,2 GJ warmteopbrengst, respectievelijk voor regeneratie en tapwater.



Figuur 8 Cumulatieve PVT-opbrengst gedurende één jaar.

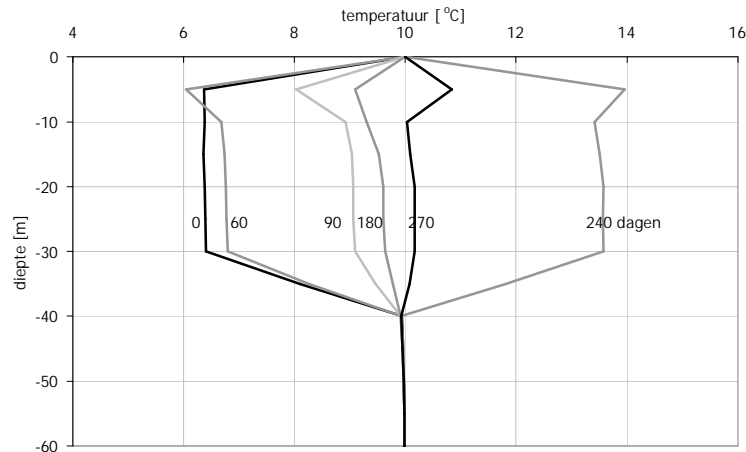


Figuur 9 Bodemtemperatuurprofiel als functie van de afstand tot de bodemwarmtewisselaar op 15 meter diepte, op de 1<sup>e</sup> dag van het 9<sup>e</sup> jaar.

Figuur 9 toont het temperatuurprofiel als functie van de afstand tot de bodemwarmtewisselaar. De invloed van de bodemwarmtewisselaar op de omringende bodem blijkt vrij beperkt: al na 4

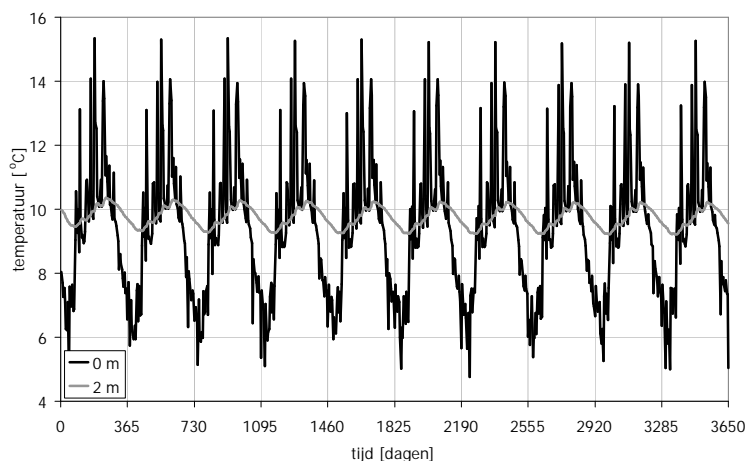
meter is de temperatuur van de bodem minder dan  $0,1^{\circ}\text{C}$  gedaald ten opzichte van de ongestoorde bodemtemperatuur van  $10^{\circ}\text{C}$ .

In Figuur 10 is het temperatuurprofiel van de bodem als functie van de diepte in de loop van een jaar weergegeven. De bodem koelt in het stookseizoen af, en wordt in de tussenliggende periode langzaam opgewarmd door regeneratie. Ook verticaal blijkt de invloed van de bodemwarmtewisselaar zich te beperken tot de zeer nabije omgeving: op 40 meter diepte, 5 meter onder het diepste punt van de bodemwarmtewisselaar, verschilt de temperatuur minder dan  $0,1^{\circ}\text{C}$  van de ongestoorde bodemtemperatuur.



Figuur 10 Bodemtemperatuurprofiel als functie van de diepte gedurende het negende jaar op 15 meter diepte, ter plaatse van de bodemwarmtewisselaar.

Het effect van afkoeling en opwarming van de bodem is ook goed zichtbaar in Figuur 11: hierin is het temperatuurverloop op 15 meter diepte weergegeven gedurende 10 jaar. Ook hier is te zien dat de bodem na ruwweg de 240<sup>e</sup> dag van elk jaar afgekoeld wordt door de warmteonttrekking, en vanaf de 60<sup>e</sup> dag weer langzaam opgewarmd wordt door regeneratie. In deze figuur is ook zichtbaar dat de bodemwarmtewisselaar al op twee meter afstand nog slechts een geringe invloed op de bodemtemperatuur heeft.



Figuur 11 Temperatuurverloop op 15 meter diepte, op 0 en 2 meter afstand van de bodemwarmtewisselaar.

### 3.3.3 Systemanalyse

Om een beter begrip van de werking van het systeem te verkrijgen, en om te bepalen in welke mate de verschillende onderdelen van het systeem bijdragen tot het rendement, zijn de belangrijkste elementen in het systeem gevarieerd: de bodemkwaliteit, PVT-panelen,

bodemregeneratie, en woningkwaliteit. Tot slot is ook de gevoeligheid van de resultaten voor de meteorologische gegevens bepaald.

#### *Invloed PVT-panelen*

Om het effect van de PVT-panelen op de systeemprestatie te bepalen, is het systeem doorgerekend voor een situatie zonder en met PVT-panelen. Voor een correcte vergelijking is in beide gevallen de bodem niet geregenereerd. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 8 en Figuur 13.

Tabel 8 Invloed toepassing PVT-panelen op systeemprestatie.

situatie		elektrische opbrengst	elektriciteitsverbruik	COP	onttrekking bodem	regeneratie bodem
PVT	regeneratie	PVT [GJ]	systeem [GJ]	[-]	[GJ]	[GJ]
zonder	geen	-	8,25	2,58	11,59	-
met	geen	7,12	7,46	2,60	9,60	-

De belangrijkste invloed van de toepassing van PVT-panelen is uiteraard de duurzame opwekking van elektriciteit en warmte.

Daarnaast hoeft de warmtepomp in de situatie mét PVT-panelen minder warmte aan het tapwater te leveren, en dus ook minder warmte aan de bodem te onttrekken. Omdat de gemiddelde bodemtemperatuur daarom iets minder daalt, verbetert de COP van de warmtepomp. Dit effect is echter marginaal.

#### *Invloed bodemregeneratie*

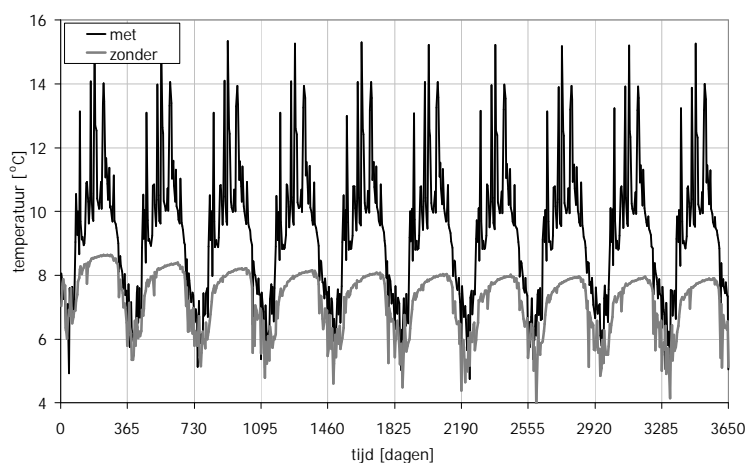
Om de invloed van bodemregeneratie op de prestatie van het systeem te bepalen, is ook een vergelijking gemaakt van de referentiesituatie met een situatie zonder regeneratie, waarbij de warmte van de PVT-panelen dus volledig gebruikt wordt voor tapwaterverwarming. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 9 en Figuur 13.

Tabel 9 Invloed regeneratie op systeemprestatie.

situatie	elektrische opbrengst	elektriciteitsverbruik	COP	onttrekking bodem	regeneratie bodem
	PVT [GJ]	systeem [GJ]	[-]	[GJ]	[GJ]
geen regeneratie	7,12	7,46	2,60	9,60	-
wel regeneratie	7,29	7,59	2,66	9,95	8,29

Wanneer de bodem geregenereerd wordt, neemt de gemiddelde bodemtemperatuur iets toe, waardoor meer warmte aan de bodem onttrokken kan worden. Zoals blijkt is de invloed van bodemregeneratie op de COP van de warmtepomp echter gering: de COP verbetert met slechts 2%.

In Figuur 12 is het effect van regeneratie op het verloop van de bodemtemperatuur zichtbaar: zonder regeneratie daalt de gemiddelde bodemtemperatuur op de lange termijn met ongeveer 1°C, terwijl de bodemtemperatuur door regeneratie constant blijft. Benadrukt dient te worden dat het effect van grondwaterstroming niet is meegenomen: verwacht wordt dat dit het afkoelen van de bodem beperkt, en dus de noodzaak van regeneratie vermindert. Daarnaast is aangenomen dat de bodemtemperatuur op grote afstand van de bodemwarmtewisselaar constant is; wanneer meerdere bodemwarmtewisselaars relatief dicht bij elkaar staan (~ 5 meter of minder) is deze aanname niet juist, en zal de bodem aanzienlijk sterker afkoelen.



Figuur 12 Temperatuurverloop op 15 meter diepte van de bodem direct naast de bodemwarmtewisselaar, met en zonder regeneratie.

### *Invloed bodemkwaliteit*

Uitgaande van de referentiesituatie is allereerst de prestatie van het systeem bij verschillende bodemkwaliteiten onderzocht. Hiervoor zijn de in paragraaf 3.2.6 gedefinieerde bodems—slecht, gemiddeld en goed—gebruikt. De resultaten hiervan staan weergegeven in Tabel 10 en Figuur 13.

Tabel 10 Invloed bodemkwaliteit op systeemprestatie.

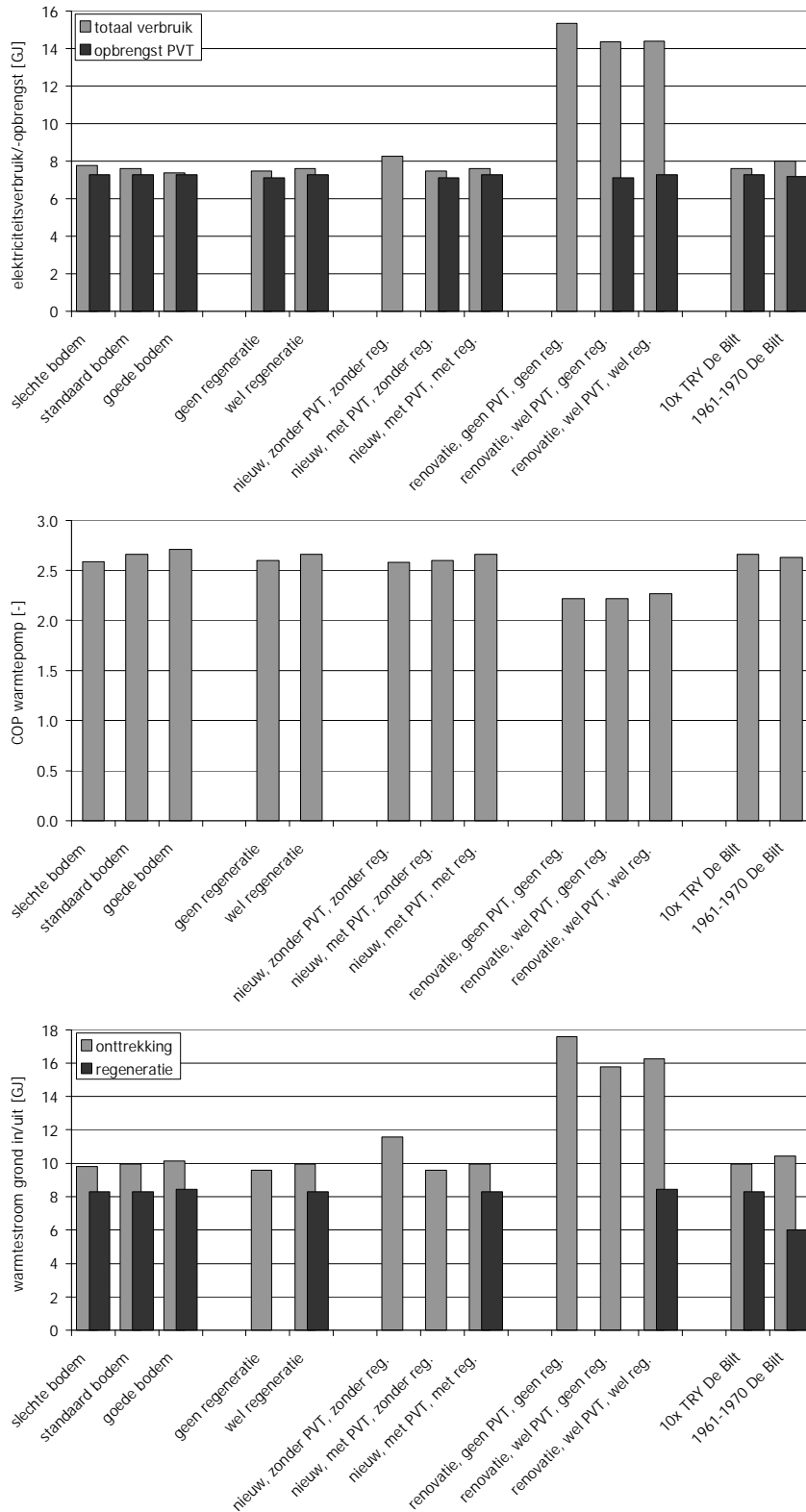
situatie	elektrische opbrengst PVT [GJ]	elektriciteitsverbruik systeem [GJ]	COP [-]	onttrekking bodem [GJ]	regeneratie bodem [GJ]
slechte bodem	7,29	7,76	2,59	9,79	8,28
gemiddelde bodem	7,29	7,59	2,66	9,95	8,29
goede bodem	7,29	7,38	2,71	10,13	8,46

Bij een bodem met betere thermische eigenschappen kan efficiënter warmte aan de bodem onttrokken worden, waardoor de COP van de warmtepomp met 5% verbetert. Wederom dient opgemerkt te worden dat dit alleen ten gevolge van variatie van de eigenschappen van de bodem zelf is: in géén van de gevallen is grondwaterstroming meegenomen.

Verwacht wordt dat bij een sterke grondwaterstroming de prestatie van het systeem verbetert. Door de dempende werking van de grondwaterstroming op de bodemtemperatuur zal meer warmte aan de bodem onttrokken kunnen worden, waardoor de COP verder toeneemt en het elektriciteitsverbruik verder daalt. Anders gezegd: er is minder warmte nodig om de bodem te regenereren, waardoor meer warmte ten goede kan komen aan de verwarming van het tapwater. In alledrie de gevallen is de regeneratie minder dan 100%: er gaat minder energie de bodem in dan er aan de bodem onttrokken wordt. Desondanks blijft de bodemtemperatuur op de lange termijn constant: de resterende energie wordt door middel van natuurlijke regeneratie uit de omringende bodem en diepere bodemlagen aangevoerd.

### *Bestaande bouw versus nieuwbouw*

Zoals reeds vermeld in paragraaf 3.2.1 is ook een gerenoveerde bestaande woning gemodelleerd en vergeleken met de referentiesituatie, om zo te bepalen wat de invloed van een slechtere woningkwaliteit, en dus een grotere warmtevraag, op de prestatie van het systeem is. De resultaten van deze vergelijking zijn weergegeven in Tabel 11 en Figuur 13.



Figuur 13 Effect van bodemkwaliteit, regeneratie, PVT-panelen, warmtevraag en klimaatdata op de systeemprestatie.

Tabel 11 Vergelijking systeemprestatie bestaande bouw en nieuwbouw.

situatie	elektrische opbrengst PVT [GJ]	elektriciteitsverbruik systeem [GJ]	COP [-]	onttrekking bodem [GJ]	regeneratie bodem [GJ]
bestaande bouw	7,29	14,40	2,27	16,25	8,45
nieuwbouw	7,29	7,59	2,66	9,95	8,29

Zoals blijkt is het effect van zowel PVT als bodemregeneratie gelijk bij de bestaande woning als bij de nieuwbouwwoning uit de referentiesituatie. Omdat de warmtevraag en dus de warmteonttrekking aan de bodem echter veel hoger is dan de regeneratiecapaciteit, is de gemiddelde bodemtemperatuur en dus de COP van de warmtepomp lager dan bij de nieuwbouwwoning.

#### *Gevoeligheid voor klimaatgegevens*

Tot slot is de gevoeligheid van het model voor meteorologische gegevens geverifieerd door de referentiesituatie met 10 opeenvolgende Test Reference Years te vergelijken met dezelfde situatie, maar met werkelijke klimaatgegevens uit een periode van 10 opeenvolgende jaren. Hiervoor is gekozen voor de periode 1961–1970, omdat deze zowel een zeer strenge winter als een zeer warme zomer bevatte. Gemiddeld is deze periode echter wel iets kouder dan het TRY. De resultaten van de vergelijking zijn weergegeven in Tabel 12 en Figuur 13.

Tabel 12 Invloed klimaatgegevens op systeemprestatie.

situatie	elektrische opbrengst PVT [GJ]	elektriciteitsverbruik systeem [GJ]	COP [-]	onttrekking bodem [GJ]	regeneratie bodem [GJ]
10x TRY De Bilt	7,29	7,59	2,66	9,95	8,29
1961–1970 De Bilt	7,18	8,00	2,63	10,42	6,02

Omdat deze periode gemiddeld iets kouder is dan het TRY, is de warmtevraag en dus de warmteonttrekking aan de bodem iets hoger. De uiteindelijke invloed hiervan op de COP van de warmtepomp, de PVT-opbrengst en het totale elektriciteitsverbruik is echter gering (maximaal 5%).

### 3.4 Conclusie

De combinatie van een dakvullend PVT-systeem met een bodemgekoppelde warmtepomp is in TRNSYS gesimuleerd, uitgaande van een Novem referentie-tussenwoning uit 1999. Met dit systeem wordt de warmte uit de PVT-panelen opgeslagen in een voorraadvat, tot het vat een vooraf ingestelde temperatuur bereikt heeft. De resterende PVT-warmte wordt opgeslagen in de bodem. In de winter wordt de bodemwarmte onttrokken door een warmtepomp, die zowel ingezet wordt voor ruimteverwarming als voor naverwarming van het tapwater.

De PVT-panelen zijn gemodelleerd op basis van rendementscurves, die bepaald zijn met eerdere modelberekeningen, en gevalideerd zijn met behulp van verschillende praktijkmetingen aan een aantal PVT-prototypes. De warmtepomp wordt gemodelleerd met behulp van het IKARUS-model, waarin de COP berekend wordt als functie van de in- en uitgangstemperatuur aan de verdamper- en condensorzijde. Tot slot is voor het modelleren van de bodemwarmtewisselaars het model van Eskilson gebruikt. De aannames in dit model—een homogene bodemopbouw en afwezigheid van grondwaterstroming—leiden vermoedelijk tot een geringe onnauwkeurigheid in de modelresultaten.

Allereerst is met behulp van het model een optimalisatie uitgevoerd, waarin o.a. het oppervlak van de PVT-panelen, de inhoud van het opslagvat, het aantal en de lengte van de bodemwarmtewisselaars stuk voor stuk geoptimaliseerd zijn. Met behulp van de resultaten hiervan is gekozen voor een referentiesysteem met een PVT-oppervlak 25 m<sup>2</sup>, een opslagvat van 200 •, en twee bodemwarmtewisselaars van 35 m lengte.



Vervolgens is het gedrag en de opbrengst van dit referentiesysteem onderzocht. De PVT-panelen leveren 7,3 GJ (2027 kWh) aan elektriciteit en 11,5 GJ aan warmte, bij een constante gemiddelde bodemtemperatuur. De opgewekte hoeveelheid energie is nagenoeg gelijk aan de gebouwgebonden energievraag: 100% van de warmtevraag en 96% van de elektriciteitsvraag van het systeem (ruimte- en tapwaterverwarming, naverwarming en hulpenergie) is gedekt met duurzame energie.

Tot slot is de invloed van de belangrijkste elementen van het systeem onderzocht: PVT-panelen, bodemregeneratie, bodemkwaliteit, bouwkwaliteit en klimaatdata.

Het gebruik van PVT-panelen op zich, dat wil zeggen zonder ze in te zetten voor regeneratie, heeft geen noemenswaardige invloed op de COP van de warmtepomp. Wel daalt het totale elektriciteitsverbruik, omdat de warmtepomp minder warmte aan het tapwatervat hoeft te leveren. Naast de mogelijkheid tot bodemregeneratie is de belangrijkste bijdrage van de PVT-panelen de duurzame warmte- en elektriciteitsopwekking.

Wanneer de warmte van de PVT-panelen deels ingezet wordt voor bodemregeneratie, blijft het totale energieverbruik nagenoeg gelijk. De lichte stijging in elektriciteitsverbruik door de toegenomen pompenergie wordt volledig gedekt door eveneens licht gestegen elektrische opbrengst van de PVT-panelen. De COP van de warmtepomp neemt iets toe dankzij de hogere gemiddelde bodemtemperatuur; dit effect bedraagt echter slechts 2%.

De bodemtemperatuur daalt ook zonder regeneratie slechts ongeveer 1°C door de onttrekking van warmte aan de bodem. Wanneer ook het regeneratieve effect van warmtetransport door grondwaterstroming meegerekend wordt, is deze daling wellicht nog kleiner. Hierbij moet echter wel worden opgemerkt dat de bodemtemperatuur op flinke afstand van de bodemwarmtewisselaar constant verondersteld is. Wanneer zich meerdere bodemwarmtewisselaar-systemen dicht bij elkaar bevinden, is deze veronderstelling niet langer juist, en zal de bodem sterker in temperatuur dalen.

Tot slot dient opgemerkt te worden dat de optimalisaties die in dit hoofdstuk zijn uitgevoerd slechts dienen om de effecten van de verschillende systeemp parameters te onderzoeken. Voor een goede optimalisatie van een systeem uit de praktijk voldoet de aanname van onafhankelijkheid van de verschillende parameters niet, en is een meer gedetailleerde systeemstudie noodzakelijk.

## 4. HAALBAARHEID

### 4.1 Inleiding

Uit het vorige hoofdstuk is gebleken dat een combinatie van PVT-panelen met een bodemgekoppelde warmtepomp op energetische gronden zinvol is. Om te kunnen beoordelen of het systeem ook daadwerkelijk potentie heeft in de woningbouw, is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd. Daartoe is begonnen met een beoordeling van de technische haalbaarheid aan de hand van een inventarisatie van de aandachtspunten van elke component van het systeem (zie paragraaf 4.2). Vervolgens is de economische haalbaarheid bepaald door een schatting van de kostprijs van het systeem te maken. Deze schatting is beschreven in paragraaf 4.3. Tot slot is het marktpotentieel voor het systeem in 2010 bepaald (zie paragraaf 4.4).

### 4.2 Technische haalbaarheid

Bij de implementatie van het systeem van PVT-panelen met een bodemgekoppelde warmtepomp moet rekening worden gehouden met een aantal belangrijke aandachtspunten. Om de technische haalbaarheid te kunnen beoordelen is daarom een inventarisatie gemaakt van deze aandachtspunten. Hierbij is zowel een onderverdeling gemaakt naar de afzonderlijke componenten van het systeem—warmtepomp, verticale bodemwarmtewisselaar en PVT-panelen—als naar de aandachtspunten in elke specifieke levensfase van het systeem.

#### 4.2.1 Aandachtspunten per component

##### *Warmtepomp*

Al vanaf de start van het bouwproces moet aandacht besteed worden aan de inpassing van de warmtepomp. Een goede (omgevings-)warmtebron in de directe omgeving is uiteraard vereist. Tevens moet de dimensionering van de warmtepomp goed worden afgestemd op het benodigde verwarmingsvermogen. Maar (vooral) ook moet speciale aandacht worden besteed aan de installatie en de integratie van de afzonderlijke componenten in een warmtepompsysteem, en aan onderhoud en beheer van het systeem.

Vanuit de gebruiker bezien moet vooral gelet worden op geluid- en trillingshinder van compressiewarmtepompen. Met name warmtepompsystemen die hun warmte uit de lucht halen, kunnen geluidsoverlast veroorzaken. Ook neemt een individuele warmtepomp meer ruimte in beslag dan een standaard gasketel.

De prijs-prestatie verhouding van vooral de kleinere elektrische warmtepompen is vooralsnog matig. Dit is een gevolg van de hoge investering, de relatief lage elektriciteitsprijs en het lage rendement van de opwekking van elektriciteit, uitgedrukt in primaire energie. Daarnaast zijn de bestaande stimuleringsregelingen ondoorzichtig en soms contraproductief.

##### *Verticale bodemwarmtewisselaar*

Onbekendheid met energie opslag bij gemeente-ambtenaren, projectontwikkelaars, architecten, installateurs en eindgebruikers vormt één van de belangrijkste knelpunten bij toepassing van verticale bodemwarmtewisselaars. Daardoor kan vertraging ontstaan bij de planologie, de vergunningverlening en de acceptatie bij de eindgebruiker.

De toepassing van een open systeem (aquifer) is gebonden aan verschillende regels en vergunningen. Voor gesloten bodemwarmtewisselaars bestaat op dit moment nog geen vergunningsplicht; wel is een voorwaarde dat er niet geboord mag worden in een boringsvrije zone, zoals een waterwin- of natuurgebied. Ook wordt strenge regelgeving verwacht wanneer bodemwarmtewisselaarsystemen op grote schaal toegepast zullen gaan worden.

Tenslotte is er weinig bekend over de langdurige gevolgen van warmteonttrekking aan de grond. Met name bij grootschalige toepassing van bodemgekoppelde warmtepompen kan de grond op lange termijn thermisch uitgeput raken. Daarnaast is ook weinig bekend over de gevolgen van

bevriezingsverschijnselen op de bodemwarmtewisselaar en de fundering en over de ecologie rondom de bodemwarmtewisselaar.

#### *PVT-panelen*

Omdat PVT-panelen nog niet commercieel verkrijgbaar zijn, is onbekendheid bij gemeenteambtenaren, projectontwikkelaars, architecten, installateurs en eindgebruikers één van de belangrijkste aandachtspunten.

Onduidelijkheid en gebrek aan eenduidigheid ten aanzien van vergunningverlening is tevens een belangrijk aandachtspunt. Voor een PV- en/of een zon-thermisch systeem is in sommige gemeentes een vergunning noodzakelijk op grond van een advies van bijvoorbeeld een welstandscommissie. Op het moment is het nog niet duidelijk welke vergunningen voor PVT-systemen noodzakelijk zijn. Wel ligt voor de hand dat PVT-systemen te maken zullen krijgen met vergelijkbare onduidelijkheden.

Net als bij PV- en zon-thermische systemen moet het dak voor een goede installatie van een PVT-paneel aan een aantal eisen voldoen: er moet voldoende beschikbare ruimte op het dak zijn, het dak moet de juiste oriëntatie hebben en mag niet beschaduwd worden door objecten in de omgeving, en het dak moet bereikbaar zijn voor installatie van de panelen.

Bij gebruik van PVT-panelen kan men te maken krijgen met diefstal of schade door blikseminslag, brand, storm of lekkage. Wat betreft diefstal is het aan te raden om PVT-panelen buiten het bereik van derden stevig te verankeren aan het dak. In het algemeen geldt dat schade aan de installatie voor rekening van de eigenaar is. De schade is doorgaans echter gedekt door de reguliere verzekeringen. Aangenomen mag worden dat voor PVT-systemen vergelijkbare regels zullen worden gehanteerd.

### 4.2.2 Aandachtspunten per gebruiksfase

#### *Vorbereidingsfase*

In de voorbereidingsfase wordt vastgesteld of een systeem met PVT-panelen, warmtepomp en een verticale bodemwarmtewisselaar praktisch haalbaar is. Het beschikbare dakoppervlak, de bereikbaarheid van het dak, oriëntatie en beschaduwning is hierbij van belang, maar ook moet er in de woning voldoende plaats voor de warmtepomp moet zijn, en moet er worden nagedacht op welke wijze de warmtepomp in de woning geplaatst wordt (via deur of raam). Ook de verticale bodemwarmtewisselaar vergt de nodige voorbereiding betreffende de boorlocatie, de bodemopbouw, de aanwezigheid van naburige bodemsystemen en de plaatsingsmogelijkheid. Tenslotte moet in deze fase de eventuele vergunning voor PVT-panelen worden aangevraagd en moet het systeem correct gedimensioneerd worden. Vooral de vereiste combinatie van verschillende expertisegebieden is een aandachtspunt.

#### *Realisatiefase*

In de realisatiefase wordt het systeem geïnstalleerd. Hierbij dient bij de installatie van het PVT-systeem onder andere rekening te worden gehouden met de arbo-wetgeving. Deze schrijft bij het werken op daken en aan gevels vanaf een hoogte van 2,5 meter bepaalde veiligheidsmaatregelen voor. In de realisatiefase moeten ook goede afspraken worden gemaakt over nacontrole van de componenten (zoals bijvoorbeeld lekdichtheidsmetingen), een garantieperiode, de verantwoordelijkheid met betrekking tot onderhoud en storingen, en verzekering en aansprakelijkheid.

#### *Gebruiksfase*

In deze fase wordt het systeem daadwerkelijk in de praktijk gebruikt. Deze fase is van groot belang voor het verbeteren van de marktpositie van het systeem. Negatieve geluiden van eindgebruikers kunnen het beeld van het systeem sterk ongunstig beïnvloeden, waardoor de marktpositie verslechtert en door andere gebruikers sneller besloten zal worden tot de aanschaf van een conventionele niet-duurzame installatie. Nazorg en terugkoppeling zijn in deze fase daarom een essentieel onderdeel van een goed begeleide marktintroductie.

Naast de economische aspecten zijn de volgende criteria belangrijk voor de uiteindelijke acceptatie door de eindgebruikers:

- onderhouds- en storingsgevoeligheid,
- geluids- en trillingsniveau,
- warmtedissipatie van de installatie in de woning,
- gebruiksgemak,
- garantietermijn en levensduur van de installatie,
- een gezond en aangenaam binnenklimaat, en
- goede informatievoorziening en nazorg door de installateur.

### 4.2.3 Conclusie

De technische haalbaarheid van het systeem kan worden vergroot door goed te letten op de verschillende aandachtspunten. Het belangrijkste aandachtspunt is de onbekendheid van het systeem bij de verschillende marktpartijen (gemeente-ambtenaren, projectontwikkelaars, architecten, installateurs en eindgebruikers). Daaraan gerelateerd is een onduidelijke en oneenduidige regelgeving en vergunningverlening. Wanneer aan deze punten niet voldoende aandacht besteed wordt, kan dit een sterke verlenging van het tijdpad voor implementatie tot gevolg hebben, evenals een ontmoediging van de marktpartijen om dit systeem toe te passen. Goede informatievoorziening en duidelijke regelgeving en richtlijnen kunnen deze problemen voor een groot gedeelte voorkomen en wegnemen. Daarnaast is het bij een dergelijk complex systeem belangrijk dat grondig aandacht besteed wordt aan de installatie en de onderlinge afstemming van de componenten. De technische haalbaarheid van het onderzochte systeem wordt vooral bepaald door de aandacht die aan de bovengenoemde punten gegeven wordt.

### 4.3 Kostprijs

Voor een goede kans van slagen van het systeem is alleen een goede technische haalbaarheid niet voldoende; ook de kostprijs van het systeem moet kunnen concurreren met alternatieve opties. Om deze reden is een schatting van de kostprijs van het PVT-systeem gemaakt. Omdat de geschatte kostprijs op zichzelf niet veel zegt, is deze vergeleken met een via dezelfde methodiek geschatte kostprijs voor een vergelijkbaar systeem, bestaande uit een bodemgekoppelde warmtepomp gecombineerd met separate PV-panelen en zonnecollectoren. De twee systemen zijn schematisch weergegeven in Tabel 13.

Tabel 13 Overzicht van de vergeleken systemen.

<b>systeem</b>	<b>PVT + BWP</b>	<b>PV + T + BWP</b>
PVT-panelen	•	
PV-panelen		•
zonnecollectoren		•
warmtepomp	•	•
verticale bodemwarmtewisselaar	•	•

**PVT** = PVT-panelen – **PV** = PV-panelen – **T** = collector – **BWP** = bodemgekoppelde warmtepomp

De uitgangspunten voor de kostprijsvergelijkingen zijn gepresenteerd in Tabel 14. Voor het energieverbruik van de woning is uitgegaan van het energieverbruik van de Novem referentietussenwoning (Novem, 1999). De vermelde energieprijzen zijn een gemiddelde van de actuele energieprijzen in Nederland. Voor de elektriciteitsprijs is uitgegaan van de prijs voor een enkeltariefsmeter.

Om een indicatie van de terugverdientijd te kunnen geven, is het ook van belang te weten wat de jaaropbrengst van de verschillende systemen is. Voor de opbrengst van een zon-thermische collector is daarvoor uitgegaan van de door Novem gehanteerde waarde (Novem, 1999). Deze waarde is in overeenstemming met in de literatuur gebruikte waarden. Voor de thermische opbrengst van een PVT-paneel in combinatie met een warmtepomp is uitgegaan van de berekeningen in hoofdstuk 3 van dit rapport. Voor de elektrische opbrengst van een PV- en een PVT-paneel is uitgegaan van verschillende flashtest-metingen zoals die bij ECN zijn uitgevoerd

(Zondag, 2001). De elektrische opbrengst van PV- en PVT-panelen is gelijk verondersteld—hoewel een PVT-paneel in principe iets meer elektriciteit produceert door de lagere gemiddelde PV-temperatuur, is dit op jaarbasis slechts een klein effect.

Tabel 14 Uitgangspunten voor de kostprijsvergelijking.

<b>energiegebruik</b>	
gasverbruik	844 m <sup>3</sup>
elektriciteitsverbruik	1432 kWh
<b>energieprijzen</b>	
gasprijs	0,4591 €/m <sup>3</sup>
elektriciteitsprijs	0,1721 €/kWh
<b>jaaropbrengsten</b>	
zon-thermische collector	344 kWh/m <sup>2</sup>
PVT-paneel, thermisch	128 kWh/m <sup>2</sup>
PV-paneel	100 kWh/m <sup>2</sup>
PVT-paneel, elektrisch	100 kWh/m <sup>2</sup>

Op basis van deze uitgangspunten is vervolgens voor beide systemen een kostprijs berekend. Hiertoe is een aantal gemeenschappelijke componenten gedefinieerd, waaruit de systemen samengesteld kunnen worden. Voor elke component is vervolgens een kostprijs berekend op basis van verschillende literatuurbronnen en gesprekken met leveranciers. Door nu voor elk systeem de kostprijs van alle benodigde componenten op te tellen, kan een schatting van de totale kostprijs van elk systeem worden gemaakt.

Benadrukt dient te worden dat deze methodiek slechts kan leiden tot een indicatie van de totale kostprijs, omdat twee belangrijke maar noodzakelijke vereenvoudigingen gebruikt zijn. Zowel de kostprijs van elke afzonderlijke component als de totale kostprijs van elk systeem kan daarom alleen geïnterpreteerd worden als een schatting van de kosten.

Als een eerste vereenvoudiging moet bij de kostprijsberekening een afweging worden gemaakt tussen een zo nauwkeurig mogelijke kostprijsberekening en een zo eerlijk mogelijke vergelijking, omdat de optimale dimensionering van de componenten in elk systeem enigszins kan verschillen. De tweede vereenvoudiging hangt hiermee samen: omdat ook de oppervlakte van PVT-panelen, PV-panelen en zonnecollectoren per systeem verschillen, is in deze methodiek gekozen voor ofwel een prijs per vierkante meter, ofwel een vaste prijs die onafhankelijk is van de grootte van het systeem. Beide keuzes zijn zelden geheel conform de werkelijkheid; ook hier biedt deze vereenvoudiging echter wel de beste mogelijkheid om achteraf eenvoudig te kunnen zien welke factoren de belangrijkste oorzaak zijn van eventuele verschillen in kostprijs.

De kostprijs van de afzonderlijke componenten, het aantal benodigde componenten per systeem en de feitelijke kostprijsvergelijking zijn weergegeven in Tabel 15.

Nogmaals dient benadrukt te worden dat bovenstaande tabel slechts geïnterpreteerd kan worden als een indicatie van de kostprijs, opbrengst en terugverdientijd van de verschillende systemen. Deze indicatie is nadrukkelijk alleen bedoeld om een onderlinge vergelijking van de systemen mogelijk te maken, en niet als een absolute uitspraak over de kostprijs, opbrengst of terugverdientijd.

Uit de vergelijking blijkt dat wanneer de PVT-panelen vervangen worden door separate PV-panelen en zon-thermische collectoren de investering met ongeveer 10% daalt, maar de opbrengst met maar liefst 40% daalt. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door het lage absolute rendement van PV-cellen: de totale hoeveelheid energie die uit het zonlicht gehaald wordt is daarom relatief laag.

De combinatie van PVT-panelen met een bodemgekoppelde warmtepomp vraagt weliswaar de hoogste investering, maar levert daarnaast ook de grootste jaaropbrengst, en dus de grootste energie- en kostenbesparing. Dit systeem heeft daarom een kortere eenvoudige terugverdientijd dan een systeem met separate PV-panelen en zon-thermische collectoren.

Tabel 15 Indicatie van de kostprijs van drie verschillende systemen.

<b>kostencomponent</b>	<b>kostprijs</b>	<b>PVT + BWP</b>		<b>PV + T + BWP</b>	
<b>zon-thermisch</b>					
absorber	70 €/m <sup>2</sup>	25 m <sup>2</sup>	1.750	4 m <sup>2</sup>	280
behuizing	90 €/m <sup>2</sup>	–	0	4 m <sup>2</sup>	360
opslagvat	950 €/st.	1 st.	950	1 st.	950
pompen, leidingwerk, etc.	550 €/st.	1 st.	550	1 st.	550
<b>PV</b>					
PV-laminaten	350 €/m <sup>2</sup>	25 m <sup>2</sup>	8.750	21 m <sup>2</sup>	7.350
draagconstructie PV	90 €/m <sup>2</sup>	25 m <sup>2</sup>	2.250	21 m <sup>2</sup>	1.890
inverter	35 €/m <sup>2</sup>	25 m <sup>2</sup>	875	21 m <sup>2</sup>	735
<b>systeem</b>					
warmtepomp	3.000 €/st.	1 st.	3.000	1 st.	3.000
bodemwarmtewisselaars	2.750 €/st.	1 st.	2.750	1 st.	2.750
<b>manuren</b>					
installatie zon-thermisch	1.000 €/st.	–	0	1 st.	1.000
installatie PV	70 €/m <sup>2</sup>	25 m <sup>2</sup>	1.750	21 m <sup>2</sup>	1.470
installatie systeem	840 €/st.	1 st.	840	1 st.	840
assemblage PVT	18 €/m <sup>2</sup>	25 m <sup>2</sup>	450	–	0
<b>totale kostprijs [€]</b>			<b>23.915</b>		<b>21.175</b>
<b>jaaropbrengst systeem in secundaire energie</b>					
thermisch [kWh]			3.194		1.354
elektrisch [kWh]			2.490		2.092
<b>totale jaaropbrengst [kWh]</b>			<b>5.684</b>		<b>3.446</b>
<b>relatieve kostprijs</b>					
kostprijs van het systeem per geleverde kWh			€ 4,21		€ 6,24
eenvoudige terugverdientijd			41 jaar		50 jaar

PVT = PVT-panels – PV = PV-panels – T = collector – BWP = bodemgekoppelde warmtepomp

#### 4.4 Marktpotentie

Naast de technische en economische haalbaarheid is het voor de totale haalbaarheid van het systeem vanzelfsprekend van belang dat er een voldoende grote markt bestaat, of op korte termijn zal ontstaan. Om die reden is een schatting van de marktpotentie van het systeem gemaakt, aan de hand van de marktpotentie van de verschillende componenten van het systeem. Hierbij zal de nadruk liggen op een schatting van de marktpotentie van PVT-panels. en is de bestaande literatuur over de marktpotentie van warmtepompen, PV-panels, en zon-thermische collectoren als uitgangspunt genomen.

De markt voor PVT-panels kan onderverdeeld worden in verschillende segmenten, weergegeven in Tabel 16. Hiervan is de woningbouw verreweg de belangrijkste markt, omdat de combinatie van een beperkt dakoppervlak met zowel warmte- als elektriciteitsvraag correspondeert met de belangrijkste voordelen van PVT-panels: een hogere specifieke opbrengst en gecombineerde warmte- en elektriciteitsproductie. De schatting van de marktpotentie van PVT-panels wordt daarom vooralsnog beperkt tot de woningmarkt.

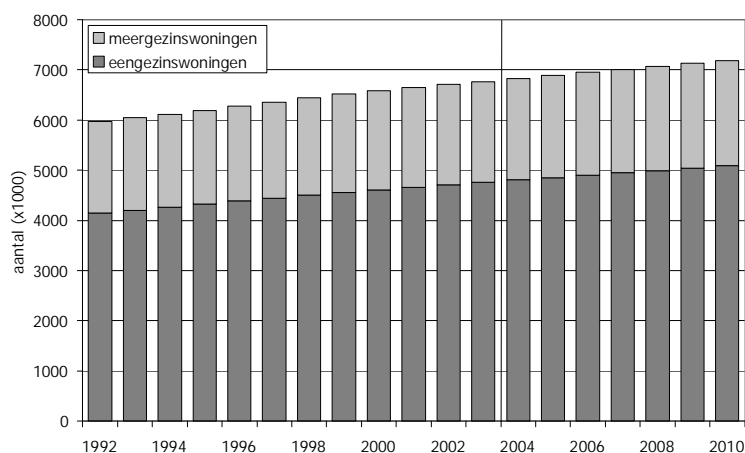
De grootte en de groei van de Nederlandse woningmarkt is weergegeven in Tabel 17. Naast de in de tabel vermelde groei wordt het woningbestand door sloop ook jaarlijks verminderd met gemiddeld 10.000 stuks. Op basis van deze gegevens is voor de periode vanaf 2003 een jaarlijkse nieuwbouwmakmarkt aangenomen van 53.000 eengezins- en 17.000 meergezinswoningen. De aldus geprognostiseerde groei is weergegeven in Figuur 14.

Tabel 16 Marktsegmenten voor PVT-panelen.

<b>marktsegment</b>	
woningbouw	eengezins/meergezins, bestaand/nieuwbouw
utiliteit	kantoren, zorginstellingen, horeca, ...
overig	sport en recreatie, land- en tuinbouw, industrie, ...

Tabel 17 Grootte en groei van de Nederlandse woningvoorraad (bron: CBS, 2003).

(x1000)	<b>eengezinswoningen</b>		<b>meergezinswoningen</b>		<b>totaal</b>	
	aantal	groei	aantal	groei	aantal	groei
1991	4085	73	1807	24	5892	97
1992	4146	64	1822	21	5969	85
1993	4205	62	1838	20	6043	82
1994	4262	62	1854	21	6116	82
1995	4321	64	1871	22	6192	88
1996	4386	69	1890	24	6276	93
1997	4442	60	1916	28	6358	87
1998	4502	64	1939	26	6441	92
1999	4563	66	1959	24	6522	90
2000	4613	56	1975	21	6588	76
2001	4661	53	1988	17	6649	71
2002	4709	53	2000	17	6709	70



Figuur 14 Grootte en groei van de Nederlandse woningvoorraad tot 2010, geëxtrapoleerd vanaf 2003.

Geschat wordt dat van alle eengezinswoningen ongeveer 85% beschikt over één dakvlak met een geschikte oriëntatie voor de opwekking van zonne-energie. Hiervan is naar schatting 25% onbruikbaar door beschaduwing of andere beperkingen in het dak, zoals bijvoorbeeld dakramen of dakkapellen. Uitgaande van de hierboven genoemde 53.000 nieuwbouw-eengezinswoningen per jaar komt dit neer op een totaal jaarlijks technisch potentieel van ruim 33.750 woningen.

Voor meergezinswoningen geldt, dankzij de veelal platte daken, dat het dak vrijwel altijd geschikt is voor de opwekking van zonne-energie. Ook hiervan is echter naar schatting 25% onbruikbaar door beschaduwing of andere beperkende factoren. Uitgaande van bovengenoemde 17.000 nieuwbouw-meergezinswoningen per jaar komt dit neer op een totaal jaarlijks technisch potentieel van 12.750 woningen. Wel is voor meergezinswoningen het dakoppervlak per woning kleiner dan voor eengezinswoningen.

Wanneer de cijfers voor eengezins- en meergezinswoningen gecombineerd worden, bestaat het totale jaarlijkse technisch potentieel voor PVT-panelen in de woningmarkt dus uit ruim 46.500 woningen.

Dit technisch potentieel moet vervolgens nog vertaald worden naar een daadwerkelijk realiseerbaar marktpotentieel. Omdat het beschreven PVT-systeem in feite een combinatie is van een PV-paneel, een zon-thermische collector en een warmtepomp, kan een goede indruk van het marktpotentieel voor PVT-panelen het beste verkregen worden aan de hand van de marktpotentieën van deze drie technologieën.

#### *Marktpotentieel PV*

In de Referentieraming 2010, opgesteld door ECN en RIVM ten behoeve van het energie- en klimaatbeleid, worden de ontwikkelingen in de Nederlandse energievoorziening ingeschat, uitgaande van het bestaande overheidsbeleid. Hierin wordt geschat dat het opgesteld vermogen aan PV-panelen in 2010 172 MW<sub>p</sub> zal bedragen (Menkveld, 2002). Hiervan was in 2001 reeds 15 MW<sub>p</sub> geïnstalleerd. Verdeeld over de resterende jaren tussen 2001 en 2010 komt dit neer op een marktpotentieel van 17,4 MW<sub>p</sub> per jaar. Uitgaande van een gemiddeld PV-vermogen van 100 W<sub>p</sub>/m<sup>2</sup> correspondeert dit ruwweg met een marktpotentieel van ongeveer 175.000 m<sup>2</sup> geïnstalleerd PV-oppervlak per jaar, waarvan slechts een gedeelte gerealiseerd zal worden in de woningbouw.

Verondersteld dat de helft hiervan gerealiseerd zal worden in de woningbouw, met systemen met een PV-oppervlak van 25 m<sup>2</sup>, levert dit een marktpotentieel van bijna 3.500 systemen per jaar. In vergelijking met het geschatte aantal nieuwbouw-eengezinswoningen van 53.000 per jaar lijkt dit een redelijke waarde.

#### *Marktpotentieel zon-thermisch*

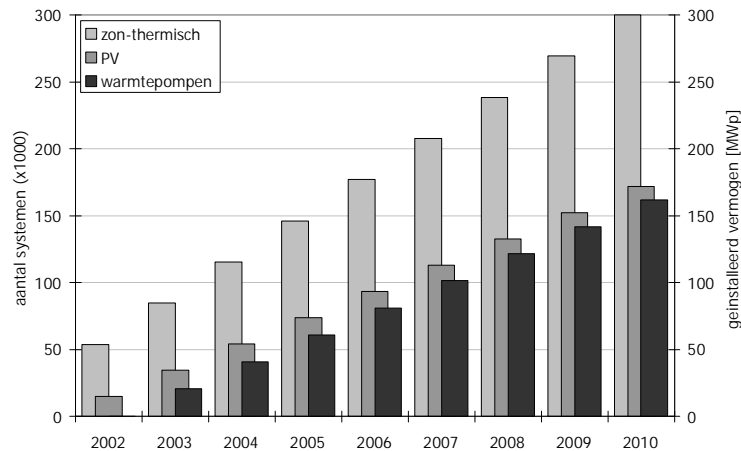
In de Referentieraming 2010 wordt geschat dat in 2010 in Nederland omstreeks 300.000 zonneboilers geïnstalleerd zijn (Menkveld, 2002). Dit is een conservatieve schatting vergeleken met de overheidsdoelstelling van 400.000 zonneboilers in 2010, en lijkt redelijk in vergelijking met de geschatte totale woningvoorraad van ruim 7 miljoen in 2010. Eind 2001 waren reeds 53.800 zonneboilersystemen gerealiseerd. Uitgaande van de referentieraming is het marktpotentieel voor zonneboilers, verdeeld over de resterende jaren tussen 2001 en 2010, dus ruim 27.000 systemen per jaar.

Ter vergelijking: de feitelijke afzet van zonneboilers bevindt zich al enkele jaren op een redelijk constant niveau van ongeveer 10.000 systemen per jaar, waarvan het grootste gedeelte wordt geïnstalleerd op nieuwbouwwoningen. Voor de bepaling van het marktpotentieel van PVT-panelen zal uitgegaan worden van meer conservatieve schattingen, en zal de waarde van 10.000 systemen per jaar aangehouden worden. Dit is 18% van het geschatte aantal nieuwbouw-eengezinswoningen per jaar, en lijkt daarom een redelijke schatting.

#### *Marktpotentieel warmtepomp*

Volgens de Referentieraming zijn in 2010 in totaal 12.000 warmtepompsystemen voor gecombineerde ruimte- en tapwaterverwarming geïnstalleerd, naast 150.000 elektrische warmtepompboilers (Menkveld, 2002). In 2001 waren hiervan slechts enkele honderden geïnstalleerd. Dit komt neer op een jaarlijks marktpotentieel van ruim 20.000 warmtepompen per jaar. Dit is 37% van het geschatte aantal nieuwbouw-eengezinswoning per jaar. Tenzij de nodige maatregelen (zoals aanscherping van de EPC of verhoging van warmtepomp-subsidies) worden getroffen, is dit wellicht aan de hoge kant.





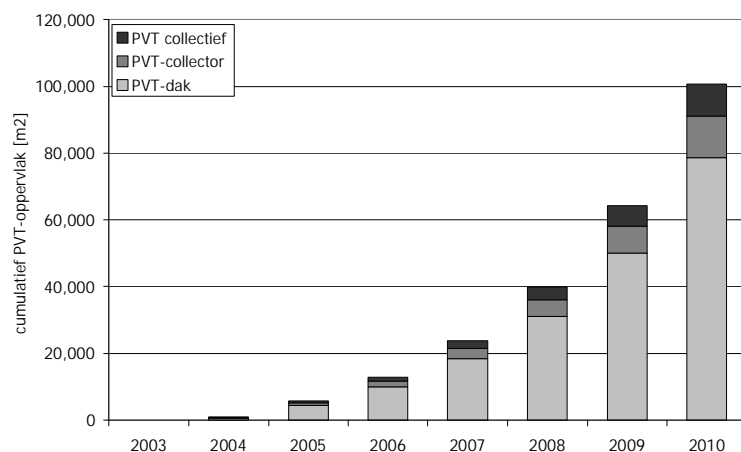
Figuur 15 Marktpotentieel voor zon-thermisch, PV en warmtepompen, in aantal systemen (waarbij uitgegaan is van 25 m<sup>2</sup> PV voor één systeem).

### Marktpotentieel PVT-panelen

Omdat de marktpotentiëlen voor PV, zon-thermische collectoren en warmtepompen flink uiteenlopen, is het lastig om op grond hiervan een concrete voorspelling voor het marktpotentieel van PVT-panelen te doen. Wel kunnen deze schattingen gebruikt worden om een indicatie te geven van de juistheid van het geschatte marktpotentieel voor PVT-panelen.

Op moment van schrijven van dit rapport wordt gewerkt aan het opzetten van een samenwerkingsverband tussen ECN en verschillende marktpartijen, met als resultaat een onderneming die verantwoordelijk is voor de productie en marketing van PVT-panelen. Doel is om in de loop van 2004 een aantal eerste PVT-demonstratieprojecten te realiseren, gevolgd door meer grootschalige demonstratieprojecten in 2005. Voor een schatting van het verloop van het marktpotentieel voor PVT-panelen zijn daarom de uitgangspunten gekozen zoals weergegeven in Tabel 18.

Op basis van deze uitgangspunten is het marktpotentieel voor PVT-panelen in 2010 geschat op ruim 100.000 m<sup>2</sup>, waarvan ongeveer driekwart bestaat uit PVT-daken, al dan niet in combinatie met een bodemgekoppelde warmtepomp. Het verloop van het marktpotentieel is weergegeven in Figuur 16.



Figuur 16 Marktpotentieel voor PVT-panelen, onderverdeeld naar de drie toepassingsvormen.

Tabel 18 Uitgangspunten voor de schatting van het marktpotentieel voor PVT-panelen.

<b>jaar</b>	<b>aantal geïnstalleerde PVT-systemen</b>
2004	25 PVT-daken van 25 m <sup>2</sup> 25 PVT-collectorsystemen van 4 m <sup>2</sup> 1 PVT collectief systeem
2005	150 PVT-daken van 25 m <sup>2</sup> 150 PVT-collectorsystemen van 4 m <sup>2</sup> 3 PVT collectieve systemen
2006	
...	totale afzetgroei: 50% per jaar
2010	

Tabel 19 Vergelijking van het marktpotentieel van PVT-daken met dat van PV, zon-thermische collectoren, en warmtepompen in 2010.

<b>stelsel</b>	<b>marktpotentieel in 2010</b>	<b>relatief aandeel PVT</b>
PVT-dak	78.500 m <sup>2</sup>	
PV	1.720.000 m <sup>2</sup>	5%
collectoren	300.000 systemen	1%
warmtepompen	162.000 systemen	2%

In vergelijking met het geschatte marktpotentieel in 2010 voor PV, zon-thermische collectoren, en warmtepompen (zie Tabel 19), lijkt deze schatting reëel, en wellicht zelfs aan de voorzichtige kant.

Ook in vergelijking met een eerdere marktstudie naar PVT-panelen in verschillende systeemconcepten lijkt deze schatting reëel. In een haalbaarheidsonderzoek uit 2002 in opdracht van Novem is voor 2010 de cumulatieve afzet van onafgedekte PVT-panelen op vergelijkbare grootte geschat (Thybaut, 2002).

#### 4.5 Conclusie

De haalbaarheid van de combinatie van een PVT-dak met een bodemgekoppelde warmtepomp is onderzocht in drie delen: de technische haalbaarheid, de economische haalbaarheid, en een schatting van het marktpotentieel in 2010.

De technische haalbaarheid is onderzocht aan de hand van een inventarisatie van de aandachtspunten bij toepassing van de verschillende componenten. De technische haalbaarheid van het systeem is goed, mits voldoende aandacht aan deze punten wordt besteed. De belangrijkste hiervan zijn (1) de onbekendheid van het systeem bij de verschillende marktpartijen, zoals gemeentebestuurders, projectontwikkelaars, architecten, installateurs en eindgebruikers; (2) de nog onduidelijke regelgeving; (3) de kwaliteit van de installatie en de onderlinge afstemming van de componenten.

Vervolgens is de economische haalbaarheid onderzocht door de kostprijs van het systeem te vergelijken met de kostprijs van een vergelijkbaar systeem, maar met separate PV-panelen en zon-thermische collectoren. Voor een goede vergelijking zijn de systemen onderverdeeld in gemeenschappelijke componenten, waarvoor aan de hand van de literatuur en interviews met leveranciers de kostprijs is bepaald. Door voor elk systeem een optelling van de kostprijs van de benodigde componenten te maken, is een schatting van de totale kostprijs van elk systeem gemaakt. Gebleken is dat van deze systemen het PVT-systeem weliswaar de grootste investering vergt, maar desondanks een kortere terugverdientijd heeft dan een vergelijkbaar systeem, maar met separate PV-panelen en zonnecollectoren.

Tot slot is een schatting van het marktpotentieel van het systeem gemaakt, gebaseerd op de bestaande literatuur over het marktpotentieel voor PV-panelen, zon-thermische collectoren en warmtepompen. Het marktpotentieel voor dit systeem in 2010 wordt geschat op ruim 3.000 systemen, ofwel ongeveer 78.500 m<sup>2</sup> aan PVT-panelen cumulatief.

## 5. CONCLUSIES

In dit project is een studie gedaan naar de haalbaarheid van een systeemconcept waarin een dakvullend PVT-systeem is gecombineerd met een warmtepomp en een verticale bodemwarmtewisselaar ten behoeve van zowel ruimte- als tapwaterverwarming van een Novem referentie-tussenwoning.

In eerder onderzoek is deze combinatie reeds als veelbelovend beoordeeld: door de bodem te regenereren met de warmte uit de PVT-panelen kan de gemiddelde bodemtemperatuur ook op de lange termijn constant gehouden worden, waarmee een mogelijke daling van de COP voorkomen wordt, en reeds bij voorbaat wordt voldaan aan eventuele toekomstige regelgeving op het gebied van warmteonttrekking aan de bodem. Dankzij deze regeneratie, en dankzij het feit dat de warmtepomp nu duurzame elektriciteit uit de PVT-panelen verbruikt, wordt de milieuprestatie van de warmtepomp aanzienlijk verbeterd. Door de actieve koeling met bodemkoude stijgt ook de elektrische opbrengst van de PVT-panelen.

Allereerst is een inventarisatie gemaakt van de beschikbare kennis en literatuur met betrekking tot de verschillende componenten van het systeem—PVT-panelen, warmtepomp en bodemwarmtewisselaars. Op grond van de resultaten van de inventarisatie is één representatief systeem samengesteld, waarmee met behulp van numerieke simulaties in TRNSYS een systeemstudie is uitgevoerd.

Na een optimalisatie is hierin een optimaal referentiesysteem gedefinieerd met een PVT-oppervlak van 25 m<sup>2</sup>, een opslagvat van 200 •, en twee bodemwarmtewisselaars van 35 m lengte. Uit de systeemstudie volgt dat, bij de gedane aannames en een correcte dimensionering van het systeem, regeneratie van de bodem slechts een klein positief effect heeft op de gemiddelde bodemtemperatuur op de lange termijn. Tenzij eventuele regelgeving dit in de toekomst vereist, lijkt regeneratie in dit geval dus niet noodzakelijk te zijn. Tevens volgt uit de systeemstudie dat de PVT-panelen, al dan niet ingezet voor bodemregeneratie, slechts tot een kleine verbetering van de COP van de warmtepomp leiden. De belangrijkste bijdrage van de PVT-panelen is de duurzame warmte- en elektriciteitsopwekking. Gecombineerd met een warmtepomp zijn de PVT-panelen echter in staat om 100% van de warmtevraag en 96% van de gebouwgebonden elektriciteitsvraag te dekken met duurzame energie.

Tot slot is de haalbaarheid van het systeem onderzocht. De technische haalbaarheid van het systeem is goed, mits voldoende aandacht wordt besteed aan een goede informatievoorziening en duidelijke regelgeving en richtlijnen, en aan de kwaliteit van de installatie en afstemming van de componenten. De economische haalbaarheid is onderzocht door de kostprijs, opbrengst en eenvoudige terugverdientijd van het systeem te vergelijken met een vergelijkbaar systeem, waarbij de PVT-panelen zijn vervangen door separate PV-panelen en zonnecollectoren. Gebleken is dat het onderzochte systeem met PVT-panelen en een warmtepomp weliswaar de grootste investering vergt, maar desondanks een kortere terugverdientijd heeft dan het systeem met separate PV-panelen en zonnecollectoren. Gebaseerd op de bestaande literatuur over het marktpotentieel voor PV-panelen, zon-thermische collectoren en warmtepompen is tot slot het marktpotentieel van dit systeem in 2010 geschat op ruim 3.000 systemen, ofwel ongeveer 78.500 m<sup>2</sup> aan PVT-panelen cumulatief.

## REFERENTIES

- CBS, *CBS Statline databank*, <http://statline.cbs.nl>, 2003.
- Chiasson, A.D., *Advances in modeling of ground-source heat pump systems*, MSc-thesis, Oklahoma State University, 1999.
- Dufour, F.C., *Grondwater in Nederland*, NITG-TNO, Delft, 1998.
- Dol, C.P., H.M.H van der Heijden, C.J.M. Lamain, *Monitor nieuwe woningen*, Onderzoeksinstituut OTB, Delft, januari 2003.
- Eskilson, P, *Superposition borehole model*, University of Lund, Dep't of Mathematical Physics, Lund, 1986.
- Graaf, L.E. de, D. de Jager, C.A.M. Stap, M. van Brummelen, K. Blok, *Nulpuntsvaststelling warmtepompen per 1-1-1995*, Ecofys i.o.v. Novem, Utrecht, december 1996.
- Graus, W., S. Joosen, *Inventarisatie warmtepompen 1995-2001*, Ecofys i.o.v. Novem, Utrecht, november 2002.
- Günther-Pomhoff, C., G. Pfitzner, *Wärmepumpen*, IKARUS Teilprojekt 8 "Querschnittstechniken", Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, 1994.
- ISSO, *Handboek warmtepompen voor de gebouwde omgeving*, ISSO-publikatie 38, Rotterdam, 1996.
- Jong, M.J.M., H.A. Zondag, W.G.J. van Helden, *Systeemstudies PV combi*, ECN-rapport ECN-I-02-003, 2002.
- Leenders, F., A.B. Schaap, *et al.*, *Technologieverkenning hybride PVT concepten*, Novem/Ecofys-rapport 149.600-708.1, 1999.
- Menkveld, M., *Duurzame energie en ruimte*, ECN-rapport ECN-C-02-058, 2002.
- Novem, *Referentiewoningen 1999*, Novem-brochure DV 1.2.183 99.09, 1999.
- Novem, *Cijfers en tabellen 1999*, Meijer Energie- en milieumanagement, Den Haag, 1999.
- Oostendorp, P.A., P.C.W. Juffermans, A.J. van Oostwaard, *De concurrentiekracht van warmtepompen in Nederland*, eindrapport Novem-project 345101.9909, 1999.
- Snijders, A.L., R.G.A. Wennekes, *Vertikale bodemwarmtewisselaars voor warmtepompen, deel 1: Energetische aspecten*, IF Technology, overdruk uit Verwarming&Ventilatie, november 1997.
- Thybaut, F.F.D., E.J. Koot, *Marktverkenning en SWOT-analyse voor hybride zonne-energiesystemen (PVT)*, Ekomatic, Rotterdam, 2002.
- Vegt, J. van de, *Monitoring energie-opslagprojecten, stand van zaken gerealiseerde koudeopslagprojecten*, DWA, Bodegraven, 1998.
- Vries, de, D.W., *Design of a photovoltaic/thermal combi-panel*, proefschrift Technische Universiteit Eindhoven, 1998.
- Wijshoff, L.J.H., *Warmtepompen in de woningbouw*, Novem, Utrecht, december 2002.
- Willems, E.M.M., J.M.J. Groeneveld, *Warmtepompen in de woningbouw: afwegingsmethode voor projectontwikkelaars*, Cauberg-Huygen rapport 20011258-5, Rotterdam, 2002.
- Zondag, H.A., M.J. Elswijk, *3<sup>e</sup> prototype combi-paneel fase 1*, ECN-rapport ECN-C-01-0134, Petten, 2001.