

In welke mate kan zonne-energie bijdragen?

In het kader van het EOS-programma 'Duurzaam bouwen, renoveren en wonen 2015' is onderzoek gedaan naar de mate waarin een woning duurzaam verwarmd kan worden. Belangrijk voor het bepalen van het beste ontwerp van een toekomstige woning zijn de totale warmtevraag en het aandeel dat een zonneboiler kan leveren. In het simulatieprogramma Trnsys zijn een woning met een traag conventioneel verwarmingssysteem en een snel vraaggestuurd (adaptief) verwarmingssysteem gemodelleerd. De vraag was: welk systeem leidt tot een lager energiegebruik en grotere inzetbaarheid van duurzame energie?

Dr. H. (Henk) Polinder, ir. A. (Arie) Kalkman, ing. A. (Ad) van der Aa, Cauberg-Huygen
Raadgevende Ingenieurs BV

■ ACHTERGROND

Het hier beschreven onderzoek moet inzicht geven in de mate waarin een duurzame energiebron (zonne-energie) kan bijdragen aan de ruimteverwarming van een duurzame woning. Maar interesse gaat ook uit naar de manier waarop klimaatinstallaties van een duurzame woning met een beperkte energievraag het beste ontworpen kunnen worden. Onderzocht wordt of het toepassen van een snel vraaggestuurd (adaptief) verwarmingssysteem tot een lager energiegebruik zal leiden dan een conventioneel verwarmingssysteem, zie ook [1]. Het betreffende vraaggestuurde verwarmingssysteem levert warmte wanneer en waar dit nodig is. Dit is gebaseerd op een aanwezigheidspatroon van bewoners, dat gedetailleerd is in tijd en ruimte. Verder is het van belang of het toepassen van het vraaggestuurde verwarmingssysteem resulteert in een duurzamer energiegebruik voor ruimteverwarming. Als conventioneel verwarmingssysteem is in dit onderzoek gekozen voor een vloerverwarmingssysteem. Dit systeem functioneert bij

relatief lage watertemperaturen; hierdoor kan een zonneboiler waarschijnlijk een relatief groot aandeel in de warmtebehoefte leveren. Een nadeel van dit systeem is dat het traag reageert op de behoefte van bewoners. Als snel vraaggestuurd verwarmingssysteem wordt een luchtverwarmingssysteem beschouwd. Dit systeem reageert snel op de behoefte van bewoners en de totale warmtebehoefte is waarschijnlijk lager dan die van het conventionele verwarmingssysteem. Maar een nadeel van het luchtverwarmingssysteem is dat het functioneert bij relatief hoge watertemperaturen; hierdoor is het aandeel in de warmtebehoefte dat een zonnecollector kan leveren waarschijnlijk kleiner dan bij het vloerverwarmingssysteem. Dit artikel presenteert de eerste resultaten van het onderzoek.

■ METHODE

Het onderzoek heeft zich tot dusverre beperkt tot het beschouwen van één type woning: een SenterNovem referentie-eengezinswoning (hoekwoning), met één specifiek aanwezig-

heidspatroon voor de bewoners. Andere type woningen en aanwezigheidspatronen voor bewoners zijn niet beschouwd.

De uitgangspunten voor de referentiewoning, de bewoners en de meteorologische omstandigheden komen verderop in dit artikel aan de orde. Gebaseerd op deze referentiewoning is voor beide verwarmingssystemen een model ontwikkeld met identieke, voornoemde, uitgangspunten. De modellen verschillen alleen in het toegepaste verwarmingssysteem om een goede vergelijking tussen beide mogelijk te maken.

Het softwarepakket Trnsys [2] rekent de modellen numeriek door. De totale jaarlijkse warmtebehoefte van de woning wordt voor beide verwarmingssystemen berekend. Tevens wordt berekend het aandeel in de jaarlijkse warmtevraag dat een zonneboiler kan leveren. Dit zijn twee belangrijke eigenschappen voor het bepalen van het beste ontwerp van een toekomstige, duurzame woning. Voor het bepalen van het aandeel duurzame energie worden twee typen zonnecollectoren beschouwd in het onderzoek: een vlakke-

plaatcollector en een vacuümbuiscollector. De eigenschappen hiervan komen verderop in dit artikel aan de orde. Ook is onderzocht in welke mate het aandeel duurzame energie afhankelijk is van de eigenschappen van het systeem, zoals collectoroppervlakte, tankinhoud en hellingshoek van de collector.

Kenmerken woning

De SenterNovem referentie-eengezinswoning (hoekwoning) heeft een woonkamer met open keuken, hal, toilet op de begane grond, drie slaapkamers, overloop en badkamer op de eerste verdieping, en een zolderverdieping. De woonkamerzijde is georiënteerd op het zuiden. Gekozen is voor een onverwarmde zolderverdieping zonder zolderraam.

De referentiewoning is voorzien van een CO₂-gestuurd ventilatiesysteem. Uitgangspunt is dat door de bewoners gespuid wordt; dit is afhankelijk van de buitentemperatuur en de binnentemperatuur in het specifieke vertrek. De gebruikte meteorologische condities zijn gebaseerd op NEN5060:2008. De ramen zijn goed geïsoleerd, het glas van de ramen heeft een U-waarde van 0.7 W/m²/K, terwijl de ZTA-waarde 0.5 is. Voor de buitengevel geldt een warmteweerstand van ongeveer 5 m²K/W. Met de inzet van zonne-energie voldoet deze woning met een EPC van 0,4 aan de wettelijke eisen voor 2015.

De interne warmtelast wordt bepaald door de warmteafgifte van bewoners en elektronische apparaten. De aanwezigheidspatronen van de bewoners (twee volwassenen en twee kinderen) worden gebaseerd op het TNO rapport 'Herziening NEN5128 Formules voor berekening warmteverlies door ventilatie en infiltratie', [3]. De kleinste tijdseenheid voor het verblijf in een vertrek is hierbij vijf minuten. De warmteafgifte door het menselijk metabolisme wordt berekend op basis van het aanwezigheidspatroon. Voor de gebruikte aanwezigheidspatronen van de vier bewoners komt dit neer op ongeveer 2.200 kWh op jaarbasis. Veertig procent hiervan is latente warmte (de potentiële condensatie van de uitgestoten waterdamp). De totale warmteafgifte door elektronische apparaten wordt gebaseerd op het PEGO rapport [4]. Dit rapport gaat uit van een jaarlijkse warmteafgifte van 3.660 kWh. In het onderzoek is er echter van uitgegaan dat na 2015 de warmteafgifte van verlichting, was/vaatwasser en stand-by functies gehalveerd is. In dat geval is de jaarlijkse warmteafgifte 2.922 kWh.

Energiebehoefte ruimteverwarming

Een belangrijke parameter is de setpointtemperatuur. Deze bepaalt in grote mate de omvang van de warmtevraag. Voor de refe-

rentiewoning is de jaarlijkse energiebehoefte voor ruimteverwarming onderzocht als functie van de binnentemperatuur. De resultaten zijn weergegeven in figuur 1.

Veelal wordt gedacht dat de warmtevraag ongeveer 7% toeneemt bij een setpointtoename van 20 °C naar 21 °C en een gemiddelde buitentemperatuur van 6 °C (→ $[21-6]/[20-6] = 1.07$). Dit is echter niet het geval voor een goed geïsoleerde woning. Uit de berekeningen (zie figuur 1) blijkt dat de relatie tussen de benodigde verwarmingsenergie en de binnentemperatuur niet lineair is. Tevens blijkt dat de toename in de warmtevraag aanzienlijk groter is: 19% meer energie bij een setpointtoename van 20 °C naar 21 °C. Dit wordt o.a. veroorzaakt doordat de interne warmtelast, die een aanzienlijke bijdrage levert aan de warmte in de duurzame woning, niet gerelateerd is aan de buitentemperatuur. Tevens zijn er andere processen die niet lineair in temperatuur zijn, bijvoorbeeld de warmteafstraling van de gevel en het dak. Bedrijfsbeperking/nachtverlaging heeft dus meer invloed dan wordt gedacht. Uit berekeningen blijkt dat de gemiddelde temperatuur in de (goed geïsoleerde) woning gedurende het stookseizoen ongeveer 15 °C is indien de woning niet wordt verwarmd. Deze relatief hoge temperatuur geeft een verklaring voor de sterke procentuele toename van de warmtevraag bij een setpointtoename van 1 °C. In het onderzoek is gekozen voor een setpointtemperatuur van 20 °C.

Vloerverwarmingssysteem

Een lage temperatuur vloerverwarmingssysteem verwarmt de woning continu. Een voordeel van dit systeem is dat de aanvoertemperaturen relatief laag zijn: lager dan 30 °C. Hierdoor kan een zonnecollector waarschijnlijk een relatief groot aandeel van de warmtebehoefte leveren. Een nadeel van het systeem is dat het traag reageert op de

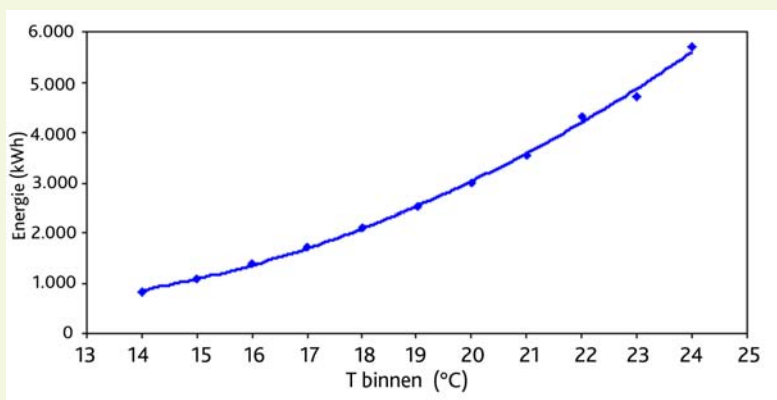
behoefte van bewoners.

De vloeren van de begane grond en de eerste verdieping worden verwarmd. De afstand tussen de buizen van het vloerverwarmingssysteem is 25 cm op de begane grond en 15 cm op de eerste verdieping. In het model betreft het een woning waarin geen thermostaat aanwezig is. De temperatuur van het aanvoerwater wordt geregeld als een lineaire functie van de buitentemperatuur, $T_{\text{water}} = 24.36 - 0.364 * T_{\text{buiten}}$, met als minimum de temperatuur van het uitgaande water. Met deze aanvoertemperatuur benadert de stooklijn van het vloerverwarmingssysteem de stooklijn van een gemodelleerd ideaal verwarmingssysteem met 20 °C als setpoint. Uit de berekeningen blijkt dat zonder thermostaat de binnentemperatuur gedurende het jaar behoorlijk stabiel blijft. Een beperkt deel van de tijd, gedurende de zomer, is de binnentemperatuur hoger dan 24 °C. In de woning is de minimum temperatuur van de eerste verdieping ongeveer 18 °C. De temperatuur op de begane grond (keuken en woonkamer) is minimaal 20 °C.

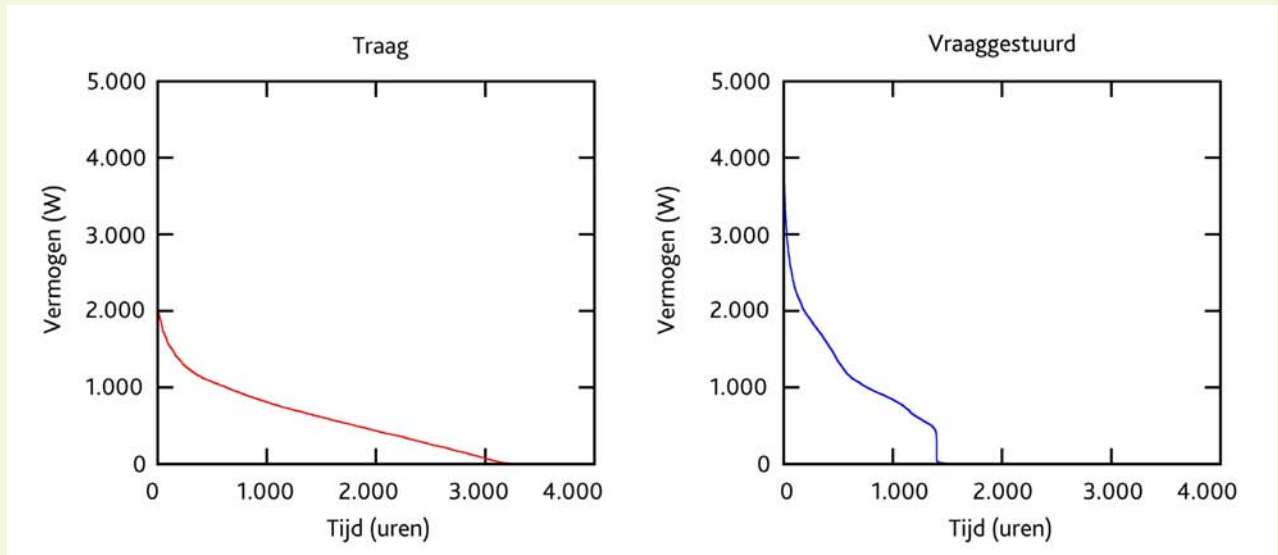
Luchtverwarmingssysteem

Het is ook mogelijk de woning te verwarmen met een vraaggestuurd luchtverwarmingssysteem. Dit gebeurt niet continu maar per vertrek wanneer daarin bewoners aanwezig zijn. Een voordeel hiervan is de snelle reactie op de behoefte van bewoners en een lagere totale warmtevraag dan bij het vloerverwarmingssysteem. Een nadeel zijn de hogere piekvermogens die geleverd moeten worden en daardoor de relatief hoge aanvoertemperaturen. Hierdoor kan een zonnecollector waarschijnlijk een kleiner aandeel van de warmtebehoefte leveren, vergeleken met het lage temperatuur verwarmingssysteem.

In elk vertrek is een thermostaat aanwezig die de temperatuur regelt op 20 °C (met een 'dead



-Figuur 1- De jaarlijks benodigde stookenergie als functie van de setpoint-binnentemperatuur voor de referentiewoning (met zolderverwarming)



-Figuur 2- Belastingduurkromme: stookvermogen als functie van de tijd voor de referentiewoning, bij vloerverwarming (traag) en luchtverwarming (vraaggestuurd); de totale warmtevragen op jaarbasis zijn respectievelijk 2.047 en 1.774 kWh voor vloerverwarming en luchtverwarming

band' van 1 °C) wanneer hierin bewoners aanwezig zijn. Een warmtewisselaar draagt energie uit warm water over aan de lucht. De verwarmde lucht wordt de vertrekken ingeblazen via een viervoudige ventilatie. De ingeblazen lucht circuleert door de woning. De temperatuur van het ingaande warme water kan, zoals bij het vloerverwarmingssysteem, geregeld worden als een lineaire functie van de buitentemperatuur. Voor het luchtverwarmingssysteem wordt $T_{\text{water}} = 43.2 - 0.682 \cdot T_{\text{buiten}}$ beschouwd, waarbij de temperatuur van het uitgaande water het minimum is. Bij deze functie heeft het luchtverwarmingssysteem voldoende vermogen om op de koudste dag van het jaar (en ook de rest van het jaar) aan de warmtevraag te voldoen. De temperatuur van het ingaande warme water kan echter ook gedurende het jaar constant gehouden worden. In het model volstaat een watertemperatuur van 50 °C om de gevraagde piekvermogens te kunnen leveren. Omdat het luchtverwarmingssysteem snel reageert en schakelt maakt het voor het totale energiegebruik niet veel uit of de temperatuur van het ingaande water varieert met de buitentemperatuur of constant wordt gehouden. Dit is echter wel relevant voor het aandeel in het totale energiegebruik dat een zonneboiler kan leveren. Bij een variabele watertemperatuur kan de zonneboiler een groter aandeel leveren dan bij een constante watertemperatuur. Dit

komt omdat bij een variabele watertemperatuur de temperatuur meestal lager is dan 50 °C. In het gebruikte aanwezigheidspatroon is de kortste verblijfsduur van een bewoner in een vertrek vijf minuten. Met name het verblijf in de badkamer is van korte duur. In het model zal het luchtverwarmingssysteem binnen dit tijdsbestek de ruimte verwarmen. Om dit goed te kunnen modelleren moet de gebruikte tijdstap in het model aanzienlijk kleiner zijn dan vijf minuten. Bij een gesimuleerde tijdstap van één minuut wordt voldoende convergentie van de resultaten bereikt. Dit gaat echter wel ten koste van de snelheid waarmee het model op jaarbasis doorgerekend kan worden.

Zonnecollector

In het model zijn twee typen zonnecollectoren opgenomen. Een vlakke-plaatcollector en een vacuümbuiscollector. Het rendement (η) van deze collectoren is bepaald en wordt gegeven door de volgende uitdrukkingen: $\eta^{\text{plaat}} = 0.733 - 3.606T^* - 0.012T^{*2}$ en $\eta^{\text{buis}} = 0.642 - 0.885T^* - 0.001T^{*2}$. Hierin is $T^* = (T_{\text{gem.}} - T_{\text{buiten}}) / G$, $T_{\text{gem.}}$ de gemiddelde collectorvloeiostoftemperatuur (°C), T_{buiten} is de buitentemperatuur (°C), en G is de instraling op de apertuuroppervlakte van de collector (W/m²). Dit rendement is bepaald bij loodrechte inval van de zonnestraling. Er is tevens een correctiefactor in rekening gebracht waarmee het rendement vermenig-

vuldigd moet worden als de zonnestraling niet loodrecht invalt, de 'incidence angle modifier'. Afhankelijk van de gewenste binnentemperatuur, buitentemperatuur en de temperatuur van het water in de zonneboiler, stroomt het verwarmingswater voor een deel door de zonneboiler (fractie f_z) en voor een deel door een bypass (fractie f_b). Hierbij geldt voor de fracties:

$$f_z + f_b = 1 \text{ en } 0 \leq f_b \leq 1.$$

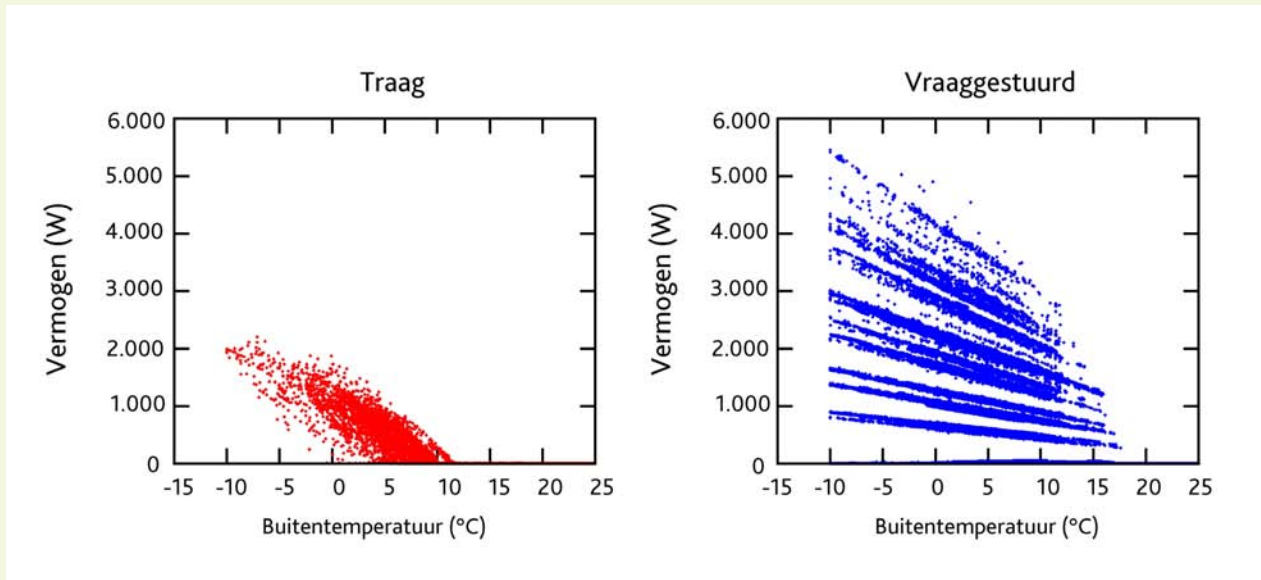
Vervolgens worden de twee stromen weer samengevoegd en indien nodig verder opgewarmd door een hr-ketel.

RESULTATEN EN DISCUSSIE

Op basis van de genoemde uitgangspunten is de totale jaarlijkse energievraag voor ruimteverwarming berekend en het aandeel hierin dat een zonneboiler kan leveren. De berekeningen zijn uitgevoerd met een model voor de referentiewoning met een vloerverwarmingssysteem en voor de referentiewoning met een luchtverwarmingssysteem.

Totale energiebehoefte ruimteverwarming

De totaal benodigde energie voor ruimteverwarming bedraagt op jaarbasis 2.047 kWh voor de woning met het vloerverwarmingssysteem en 1.774 kWh voor de woning met het luchtverwarmingssysteem, zie ook de oppervlakten onder de belastingduurkromme in figuur 2.



-Figuur 3- Stookvermogen als functie van de buitentemperatuur voor de referentiewoning, bij vloerverwarming (traag) en luchtverwarming (vraaggestuurd)

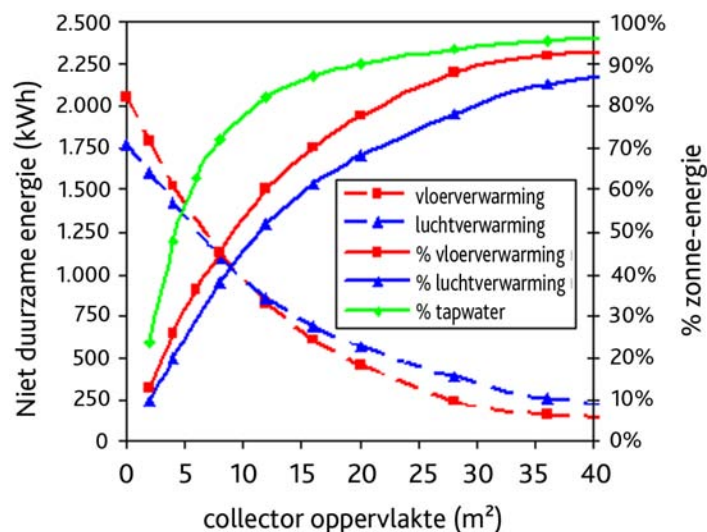
In figuur 2 zijn duidelijke verschillen te zien tussen de belastingduurkrommen van beide verwarmingssystemen. Bij het vloerverwarmingssysteem zijn er relatief lage piekvermogens, maar het aantal uren warmtevraag op jaarbasis is relatief groot. Bij het luchtverwarmingssysteem geldt het omgekeerde: relatief hoge piekvermogens, terwijl het aantal uren warmtevraag op jaarbasis relatief klein is. Ondanks de hoge piekvermogens die nodig zijn bij het vraaggestuurde luchtverwarmingssysteem is de totale energiebehoefte voor ruimteverwarming lager dan bij het conventionele vloerverwarmingssysteem. Reden hiervoor is dat het luchtverwarmingssysteem maar een gering aantal uren operatief is. Het vraaggestuurde (adaptieve) systeem leidt in dit model tot ongeveer 13% besparing op de jaarlijkse warmtevraag. Ook als het berekende stookvermogen als functie van de buitentemperatuur in ogenschouw wordt genomen, zijn er grote verschillen tussen beide verwarmingssystemen, zie figuur 3. In figuur 3 is te zien dat bij het vloerverwarmingssysteem binnen een bepaalde bandbreedte er één lineair verband is tussen het stookvermogen en de buitentemperatuur. Bij het luchtverwarmingssysteem zijn er duidelijk verschillende lineaire verbanden te zien tussen het stookvermogen en de buitentemperatuur. De banden corresponderen met de verschillende aantallen (één tot vier) en combinaties van vertrekken die

gelijktijdig verwarmd worden gedurende het jaar, gebaseerd op het aanwezigheidspatroon van de bewoners. De bovenste band correspondeert bijvoorbeeld met de vier vertrekken die de grootste warmtebehoefte hebben.

Zonne-energie voor ruimteverwarming

Uit de berekeningen is gebleken dat de

energieopbrengst van de twee beschouwde zonnecollectoren nagenoeg hetzelfde is. De resultaten zijn berekend met de vlakke-plaatcollector. Gebaseerd op een collector die is georiënteerd op het zuiden met een oppervlakte van 4 m², een tankinhoud van 240 liter en een hellingshoek van 45° blijkt het aandeel zonne-energie bij vloerverwarming groter te

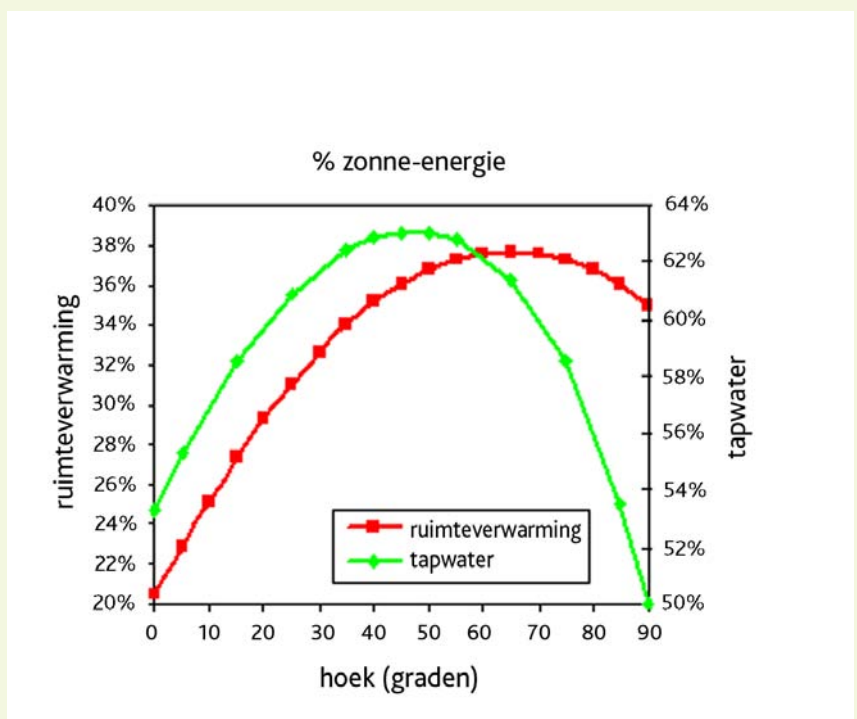


-Figuur 4- Het aandeel niet duurzame energie voor ruimteverwarming op de linker as en het relatieve aandeel duurzame energie voor ruimteverwarming en tapwater op de rechter as, als functie van de collectoroppervlakte

zijn dan bij luchtverwarming: respectievelijk 409 en 354 kWh op jaarbasis. Dit komt door de lagere wateraanvoertemperatuur van het vloerverwarmingssysteem. Maar ook het niet duurzame aandeel in de totale energie is hoger bij het vloerverwarmingssysteem.

In figuur 4 wordt het niet duurzame aandeel in de totale energie bij ruimteverwarming weergegeven als functie van de collectoroppervlakte. Er is een constante verhouding tussen de tankinhoud en de collectoroppervlakte van 60 liter per m². Uit figuur 4 blijkt dat bij een collectoroppervlakte tot 8 m² het vloerverwarmingssysteem meer niet duurzame energie gebruikt dan het luchtverwarmingssysteem. Bij grotere oppervlakten zal het vloerverwarmingssysteem echter minder niet duurzame energie gebruiken.

De totale energie voor ruimteverwarming bedraagt 2.047 kWh voor de woning met vloerverwarming en 1.774 kWh voor de woning met luchtverwarming, zoals volgt uit figuur 2. Het percentage hiervan dat de zonnecollector kan leveren, is weergegeven in figuur 4. Deze figuur laat zien dat een zonnecollector een substantieel deel van de benodigde energie voor ruimteverwarming kan leveren. Bij een typische collectoroppervlakte van 2 m² wordt een aandeel van 12,6% en 9,4% behaald voor de woning met respectievelijk vloerverwarming en luchtverwarming. Bij een verdubbeling van deze oppervlakte zijn de percentages 25,8% en 20,0%. Figuur 4 toont ter vergelijking ook het aandeel van zonne-energie in de verwarming van tapwater. Dit percentage is hoger dan voor ruimteverwarming. Tapwaterverwarming vindt immers ook plaats tijdens de zomer, wanneer er relatief veel zonne-energie beschikbaar is. Het aandeel van de zonneboiler in de totale energie voor ruimteverwarming is ook onderzocht als functie van de hellingshoek: de hoek tussen het collectoroppervlak en het horizontale vlak. Hierbij is een collectoroppervlakte van 6 m² en een tankinhoud van 360 l gebruikt. Het resultaat van de berekeningen is weergegeven in figuur 5. Een hellingshoek van 0° correspondeert met een horizontaal liggende collector en een hellingshoek van 90° met een verticaal staande collector. Uit figuur 5 blijkt dat de hellingshoek van 45°, die we tot nu toe gebruikt hebben, niet de meest optimale is voor een maximale bijdrage aan de ruimteverwarming van de woning. Voor een woning in Nederland is het optimum een hellingshoek van 65°. De reden hiervoor is dat de meeste energie voor de ruimteverwarming in de winter nodig is en de stand van de zon dan relatief laag is (voor een loodrechte inval is dus een grotere hellingshoek nodig). In figuur 5 is ook het relatieve aandeel van de zonneboiler in



-Figuur 5- Het relatieve aandeel van zonne-energie voor ruimteverwarming en tapwater, als functie van de hellingshoek

de totale energie voor warm tapwater weergegeven als functie van de hellingshoek. Hieruit is af te lezen dat voor warm tapwater de optimale hellingshoek in Nederland ongeveer 45° is. Indien een zonneboiler gebruikt zal worden voor zowel tapwaterverwarming als ruimteverwarming zal rekening gehouden moeten worden met deze verschillende optima.

CONCLUSIE

Uit modelberekeningen met Trnsys blijkt dat het toepassen van een vraaggestuurd (adaptief) verwarmingssysteem kan leiden tot een reductie van het jaarlijkse energiegebruik voor ruimteverwarming van een woning. Uit de berekeningen met het model, zoals besproken in dit artikel, volgt bijvoorbeeld een reductie van 13% in het jaarlijkse energiegebruik voor ruimteverwarming. Een procentuele reductie van ongeveer 15% van de warmtevraag van een goed geïsoleerde woning kan ook bereikt worden door het verlagen van de setpointtemperatuur. Een aanzienlijk deel van de energie voor ruimteverwarming van een duurzame woning kan geleverd worden door een duurzame energiebron, zoals zonne-energie. De grootte van dit aandeel is sterk afhankelijk van het toegepaste verwarmingssysteem en van de eigenschappen van de zonnecollector/boiler, zoals de collectoroppervlakte. Dit wordt duidelijk geïllustreerd in figuur 4. Hoe de klimaatinstallatie het duurzaamst gemaakt kan worden, is niet eenvoudig te zeggen. Uit ons onderzoek blijkt dat bij een

vloerverwarmingssysteem en luchtverwarmingssysteem afhankelijk te zijn van de eigenschappen van de zonnecollector, zie ook figuur 4. Tevens zal dit afhankelijk kunnen zijn van het type woning en het aanwezigheidspatroon van de bewoners.

Het huidige onderzoek is uitgevoerd voor één type woning (een eengezinswoning) met één specifiek aanwezigheidspatroon voor de bewoners. De reductie van het energiegebruik voor ruimteverwarming evenals de inzetbaarheid van een duurzame energiebron zoals zonne-energie, zal anders zijn voor andere typen woningen met andere aanwezigheidspatronen voor de bewoners. Het zou interessant zijn om andere typen woningen en aanwezigheidspatronen voor bewoners in verder onderzoek te beschouwen.

REFERENTIES

1. Alders, N., Kurvers, S., Cauberg, H., Comfort Delivery on Demand: an Adaptive Approach to Comfort Systems in Dwellings, Proceedings of the 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec, Canada, 2009.
2. Trnsys, <http://www.trnsys.com>.
3. Kornaat, W., de Gids, W.F., Herziening NEN 5128, Formules voor berekening warmteverlies door ventilatie en infiltratie, 98-BBI-R0386, TNO-Bouw, Delft, 1998.
4. Energietransitie-plan PEGO Werkgroep Innovatie: Een innovatieplan energie-efficiency nieuwbouw en renovatie, 2009.