



Ir. E.J.H. Swinkels*



Dr. ir. A.H.C. van Paassen*



Prof. ir. R.W.J. Kouffeld*

Klimaatregeling van woningen met een extreem laag energiegebruik

Climate control of dwellings with an extreme low energy consumption

Inleiding

In het kader van een proefproject binnen IEA-taak XIII is het project "Urban Villa" gestart. Dit project bestaat uit de bouw van 42 appartementen waarvan 16 stuks extreem energiezuinig zullen zijn, (figuur 1 en figuur 2). Deze luxe appartementen worden gebouwd in Amstelveen en worden in september 1994 opgeleverd.

Het project heeft als doelstelling woningen te ontwerpen met een extreem laag energiegebruik door gebruik te maken van geavanceerde componenten en technieken, die op het ogenblik nog niet economisch haalbaar zijn, maar waarvan verwacht mag worden, dat deze het in de toekomst zullen worden. In dit artikel komen de klimaat- en regelinstallaties aan de orde met het accent op energiegebruik en behaaglijkheid.

In het project zijn de volgende elementen te onderscheiden:

- verwarming
- zonneboilers als voorverwarmer van tapwater
- ventilatie met warmteterugwinning en gebruik van de serre als voorverwarmer van ventilatielucht.
- natuurlijke ventilatie voor koeling
- de regeling

In figuur 3 staat een overzicht weergegeven van de componenten geïntegreerd met de regeling. De juiste systeemkeuze en dimensionering ervan zullen in dit artikel aan de orde komen. Hiervoor is gebruik gemaakt van het simulatieprogramma TRNSYS.

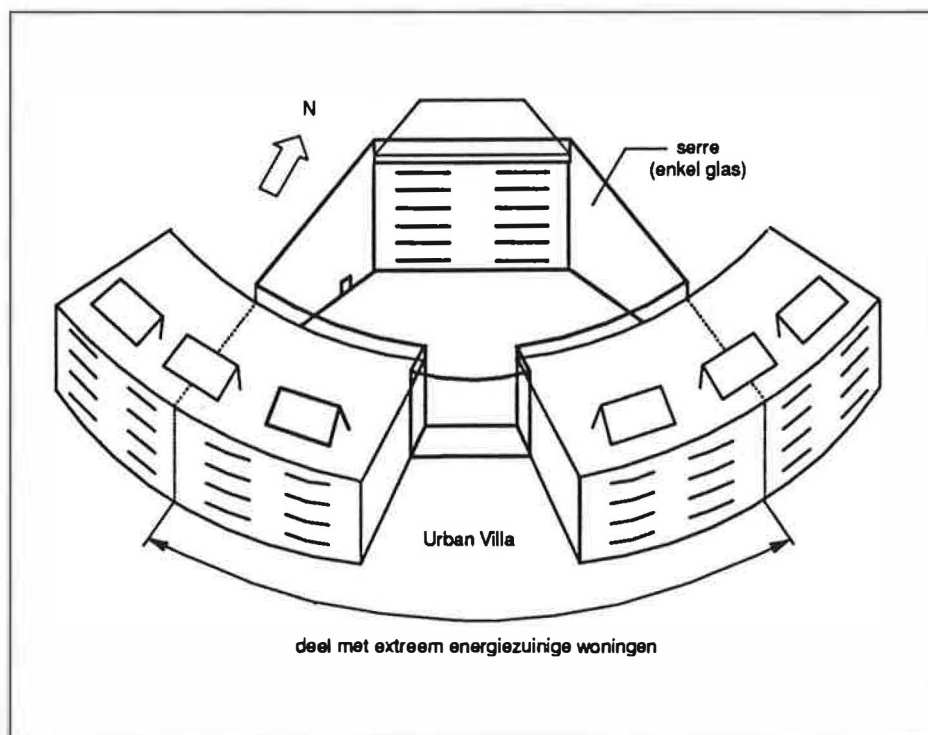
Samenvatting
Een studie is gemaakt naar optimale installatie-ontwerpen voor een appartementencomplex met een extreem laag energiegebruik. De studie is gericht op een specifiek ontwerp: "Urban Villa Amstelveen", bestaande uit 42 woningen en een serre. Toegepast zijn: passieve zonne-energie voor verwarming, zonneboilersysteem voor warm tapwater, gebalanceerde ventilatie met warmteterugwinning en natuurlijke ventilatie met speciale regelbare gevelopeningen voor een effectieve koeling.

Een digitaal regelsysteem wordt toegepast om het lage energiegebruik daadwerkelijk te realiseren en te hoge binnentemperaturen te vermijden. Met computersimulaties zijn de effecten van de verschillende installatie-onderdelen op het energiegebruik en/of de behaaglijkheid bepaald.

Summary

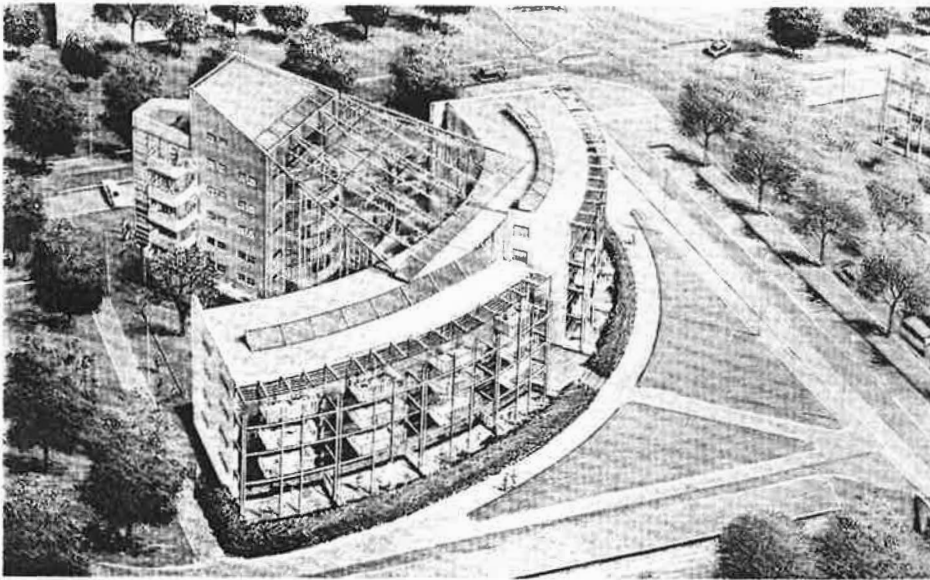
Optimum installation designs were studied in an apartment building with an extreme low energy consumption. The study was directed on a specific project called "Urban Villa Amstelveen" consisting of 42 dwellings and a conservatory. Applied were passive solar energy for heating, solar boiler system for domestic hot water, balanced ventilation with heat recovery and natural ventilation with special adjustable air inlets in the facade for an effective cooling.

Digital control was used to realise actually a low energy consumption and to avoid too high indoor temperatures. The influence of the various components of the installation on energy consumption and/or comfort was determined by computer simulations.



Figuur 1. Schematisch vooraanzicht "Urban Villa" [1]

* Technische Universiteit Delft, Faculteit
Werktuigbouwkunde en Maritieme Techniek, Vakgroep Proces en Energie.



Figuur 2. Appartementencomplex Amstelveen [6]

Uitgangspunten

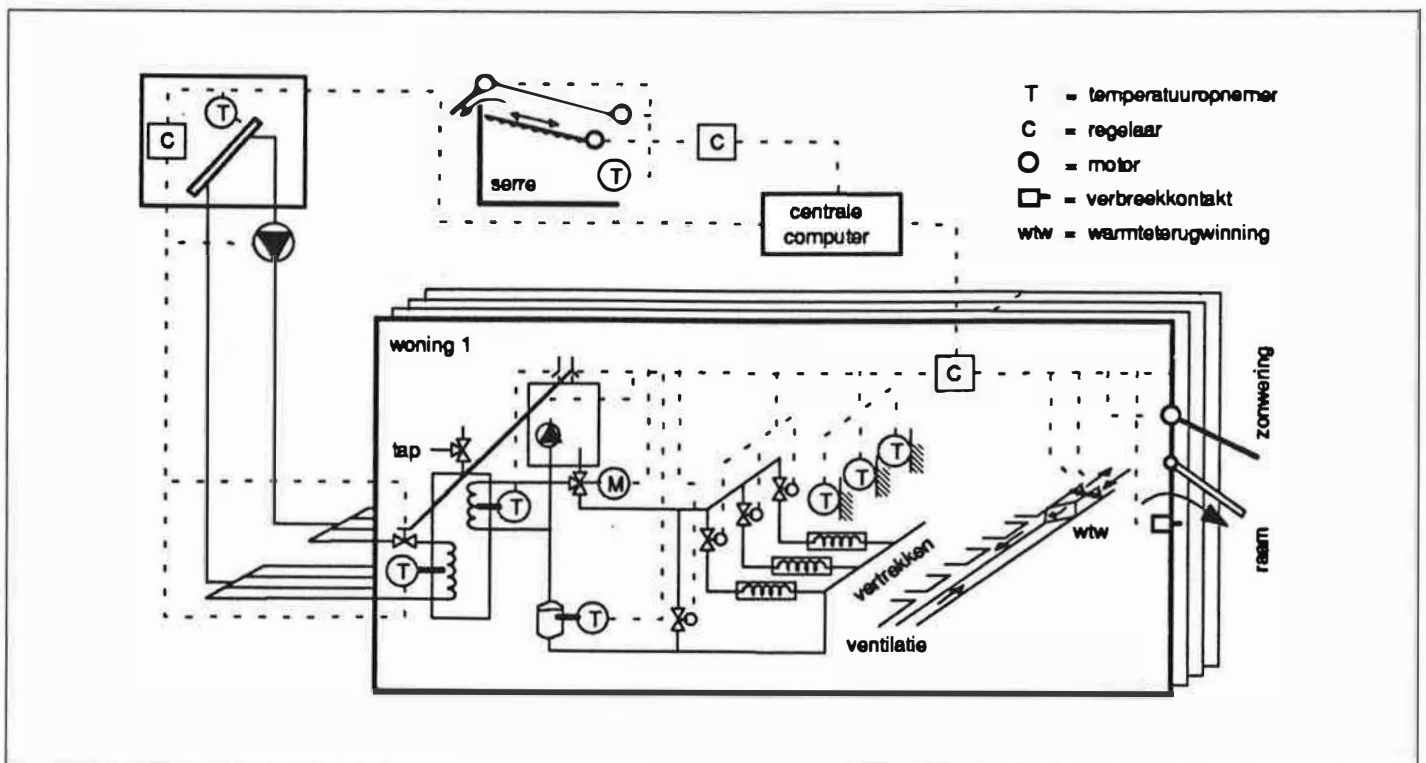
De appartementen zijn bedoeld voor moderne tweeverdienersechtparen of welvarende alleenstaanden. Om optimaal gebruik te maken van de zonnestraling, hebben de appartementen een groot glasoppervlak op het zuiden (40%), voornamelijk bestaande uit super-isolerend dubbelglas met een U-waarde van 0,7, en klepramen voorzien van Translucent Isolerend Materialen (TIM). Door een goede isolatie zal de totale U-waarde van de gevel lager zijn dan $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Aan de noordkant van de energiezuini-

ge appartementen bevindt zich een serre. Voor de simulaties is als uitgangspunt genomen, dat de woning wordt bewoond door een tweeverdienersechtpaar (door de week overdag afwezig). Deze bewoners gaan zodanig met verlichting en apparatuur om dat dit tezamen met de eigen warmte-ontwikkeling een interne warmtebelasting van $2518 \text{ kWh}/\text{jaar}$ voorstelt. Dit komt direct als warmte in de woning terecht en heeft hierdoor invloed op de warmtevraag. De ramen aan de zuidzijde van het appartement zijn voorzien van een zonnescherm dat 70 % van de invallende

zoninstraling kan tegenhouden. Bovendien zijn speciale regelbare gevelopeningen aangebracht om oververhitting te voorkomen. Omdat het hier koopwoningen betreft is zoveel mogelijk de voorkeur gegeven aan individuele installaties.

Verwarming

Uit simulaties van één van de appartementen volgde dat deze een warmtevraag van $141 \text{ kWh}/\text{jaar}$ heeft, voornamelijk geconcentreerd in de wintermaanden (84 %). Bijna tweederde van deze warmtevraag komt uit de woonkamer. Het lage gebruik is het gecombineerde resultaat van isolatie, warmterugwinning bij ventilatie, gebruik van de serre als voorverwarmer van ventilatielucht en van het grote raamoppervlak georiënteerd op het zuiden. Tevens zijn simulaties uitgevoerd met een model van bewoners met een nonchalant gedrag. Verondersteld wordt, dat deze bewoners hun raam open zetten afhankelijk van de buitentemperatuur (bij $1 \text{ }^\circ\text{C}$ dicht; bij $21 \text{ }^\circ\text{C}$ een ventilatievoud van $6 \text{ m}^3/(\text{m}^3\text{h})$). Een op deze manier geventileerde slaapkamer gaf een toename in de warmtevraag van 50 %. Wordt tevens de woonkamer op deze wijze geventileerd dan neemt de warmtevraag zelfs met een factor 12 toe. Uiteraard zijn deze waarden betrokken op een theoretisch bewonersmodel, dat in de praktijk anders zal zijn. Wel geven deze cijfers duidelijk aan dat nonchalant



Figuur 3. Overzicht van de installaties van de energiezuinige appartementen

bewonersgedrag grote invloed kan hebben op het energiegebruik.

Berekeningen volgens NEN 5066, waarbij rekening wordt gehouden met een toeslag voor de opwarming van 2 K/h, resulteren in een ketelcapaciteit van 5 kW. Dit is beduidend hoger dan bij continu-bedrijf nodig zou zijn. Toch is de toeslag toegepast, omdat onverhoedse dalingen van de temperatuur zullen optreden. Op een zonnige dag in het voorjaar laat men bijvoorbeeld de deuren te lang open staan, met als gevolg dat 's avonds de woning veel te koud is geworden. Is in zo'n geval de verwarming "exact" gedimensioneerd dan duurt het uren voordat de woning weer op temperatuur is. De bewoners zullen dan gefrustreerd reageren met "in een energiezuinige woning is het vaak te koud".

Als ketel is gekozen voor een HR-ketel die in elke woning wordt geïnstalleerd. Deze ketel dient voldoende capaciteit te hebben om 8 liter warm water per minuut te leveren. Daarvoor dient de ketel een vermogen van 28 kW te hebben. Dit vermogen is dus maatgevend voor de keuze van de ketel. Door het verlagen van de branderdruk wordt verondersteld dat het vermogen van de ketel met behoud van rendement kan worden teruggeregeld tot ca. 5 kW. Dit is in verhouding tot het gevraagde vermogen nog te groot. Om te voorkomen dat de ketel hierdoor gaat pendelen is aan de installatie een buffervat van 50 liter toegevoegd, zie figuur 3. Na iedere warmtevraag zal de buffer door de ketel weer op temperatuur worden gebracht.

Voor de overdracht van de warmte naar de vertrekken wordt gebruik gemaakt van spirobuizen. De spirobuis is een uitwendig 16 mm dikke koperen of stalen buis, waaromheen een ruimtelijke structuur van koperdraad is gesoldeerd. De regeling is dusdanig ontworpen dat ieder vertrek een ander temperatuurniveau kan hebben. De bepaling van de klepstand wordt gedaan door de digitale woningregelaar. De bewoners kunnen voor de vertrekken een tijd klok instellen en deze eventueel tijdelijk handmatig aanpassen.

Zonneboilers

Om zoveel mogelijk gebruik te maken van zonne-energie, worden op het dak van het gebouw zonnecollectoren geplaatst met een oppervlak van 4,5 m² per woning. Deze dienen het tapwater in de boiler van de woningen voor te ver-

warmen. Voor de uiteindelijke keuze zijn drie varianten overwogen:

1. een centrale collector met opslag en individuele naverwarming.
2. een centrale collector met individuele opslag en naverwarming.
3. als 2, echter nu wordt het opslagvat tevens gebruikt als buffer voor ruimteverwarming.

Systeem 1 heeft als nadeel dat de circulatiepomp continue moet draaien, wat nadelig is voor het energiegebruik. Systeem 3 heeft als nadeel dat het grotere vat extra warmteverliezen veroorzaakt. Het voordeel van systeem 3 zou moeten zijn dat de zonne-energie tevens een deel van de ruimteverwarming verzorgt. Onderzoek wees echter uit dat een overschot aan zonnewarmte zelden samenvalt met een warmtevraag door het appartement [3]. De belangrijkste reden hiervan is, dat door het grote glasoppervlak de woning al gebruik maakt van (passieve) zonne-energie. Uiteindelijk is de keuze gevallen op systeem 2 dat een overall- besparing oplevert van 1040 kWh/jaar (dekkingsgraad 64 %). De regeling van de collector gebeurt centraal, waarbij de gehele installatie is gesplitst in vier systemen voor elk vier woningen. De pomp van het collector-circuit wordt automatisch gestart zodra er een warmtevraag is van één van de vier opslagvaten voor tapwater. De regeling voor de temperatuur van het tapwater gebeurt in de woningen zelf. In verband met de legionellabacterie dient de temperatuur van het tapwater minimaal

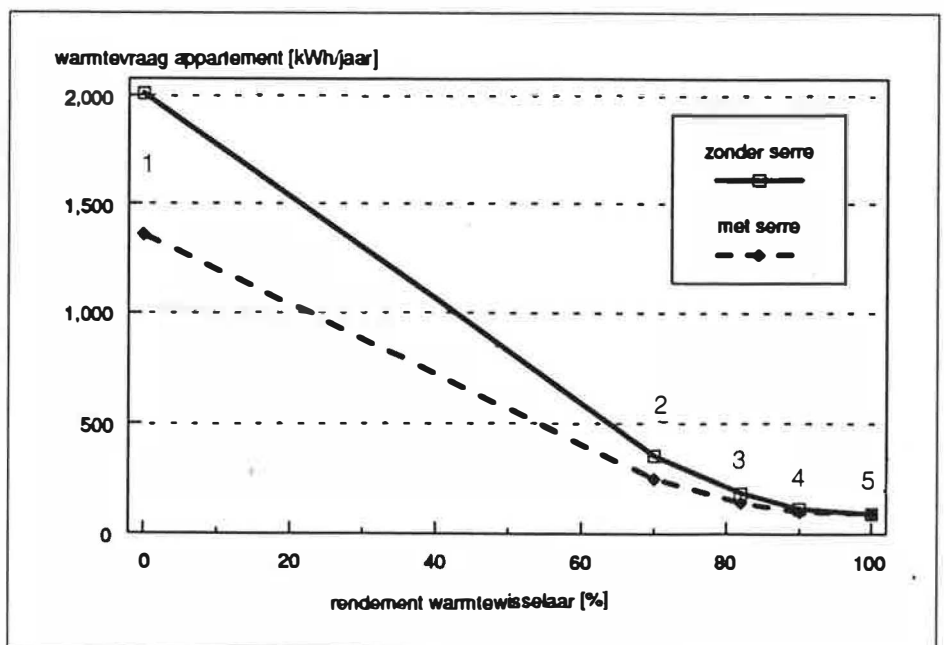
65 °C te bedragen. Bij een temperatuur onder de 65 °C bovenin het vat zal daarom de ketel het vat via een warmtewisselaar opwarmen. Is de temperatuur hoger dan 65 °C dan zal koud water worden bijgemengd.

Ventilatie

Een groot deel van het warmteverlies ontstaat door ventilatie. Mechanische ventilatie van een goed geïsoleerde woning is noodzakelijk om een goede toevoer van frisse lucht te verkrijgen en tevens voor de afvoer van vocht. Om het energiegebruik te beperken is besloten tot het gebruik van warmtewisselaars die warmte van de afvoerlucht afstaan aan de toevoerlucht. Hiernaast wordt gebruik gemaakt van de serre als voorverwarmer van ventilatielucht. Uit simulaties bleek dat de gemiddelde serretemperatuur 4 K hoger ligt dan de buitentemperatuur. De invloed van het rendement van de warmtewisselaar al dan niet in combinatie met de serre staat weergegeven in figuur 4. Daarin zijn de gegevens voor de volgende situaties gemarkeerd:

1. geen warmtewisselaar (0 %)
2. een enkele kruisstroomwarmtewisselaar (70 %)
3. twee in serie geschakelde kruisstroomwarmtewisselaars (82 %)
4. een regeneratieve warmtewisselaar (90 %)
5. geen ventilatie (100 %)

Energetisch gezien zou de keuze moeten vallen op een regeneratieve warmte-



Figuur 4. Invloed van serre en type warmtewisselaar op de warmteaanvraag van de appartementen

wisselaar, maar deze is niet goed in staat om de lucht te ontvochtigen, doordat ook een deel van het vocht wordt teruggewonnen. Uiteindelijk is daarom gekozen voor twee in serie geschakelde kruisstroomwarmtewisselaars. Om te voorkomen dat in de winter de inblaasttemperatuur van de ventilatielucht lager wordt dan 15 °C, wordt tevens gebruik gemaakt van de serre als voorverwarmer van de ventilatielucht. Tevens zal de serre een kleine vermindering van de warmtevraag opleveren (42 kWh/jaar per woning). Bij de TU Delft, vakgroep Proces en Energie is het rendement van de dubbele warmtewisselaar gecontroleerd [4]. Uit de metingen volgde dat het rendement tussen de 67 en de 80 % ligt, afhankelijk van het temperatuurverschil tussen binnen en buiten en het aantal luchtwisselingen per uur. Doordat warmte geproduceerd door de ventilatoren ook nuttig kan worden gebruikt, zal de totale opbrengstfactor wel 82 % bedragen.

Uit simulaties bleek dat warmteterugwinning gedurende ongeveer de helft van het jaar onnodig of zelfs niet wenselijk is vanwege een te hoge inblaasttemperatuur van de ventilatielucht. Aangezien de ventilatoren veel elektriciteit verbruiken, is het gewenst om de toevoerventilator uit te schakelen als warmteterugwinning niet nodig is. Om toevoer van frisse lucht te garanderen, wordt de bewoner erop geattendeerd dat een bepaald klepraam moet worden opengezet. Wordt deze inderdaad geopend dan zal de regeling dit via een verbreekcontact registreren en wordt de toevoerventilator uitgeschakeld. Dit kan een elektriciteitsbesparing opleveren van bijna 60 kWh/jaar.

Natuurlijke ventilatie voor koeling

In woningen die gebruik maken van passieve zonne-energie dreigt met name in de zomer het gevaar van oververhitting. Om dit energiezuinig te kunnen ondervangen is koeling met natuurlijke ventilatie noodzakelijk. Simulaties toonden aan dat een ventilatievoud van $n = 6 \text{ m}^3/(\text{m}^3\text{h})$ nodig is om aan een hoog comfortniveau te voldoen. In figuur 5 staat een overzicht van het aantal temperatuuroverschrijdingen als functie van het ventilatievoud.

Om het ventilatievoud van 6 op een inbraakvrije manier te bereiken zijn bovenramen en een ventilatievoorziening in de borstwering noodzakelijk. In figuur 6 is te zien hoe dit is gerealiseerd. Experimenteel onderzoek bij de TU Delft ten behoeve van het Passief

Klimaat systeem toonden aan, dat de openingen op de volgende eenvoudige wijze bepaald kunnen worden [5].

Bij geopende toestand van de beide raamopeningen geldt dat de gemiddelde luchtsnelheid 0,5 m/s is. Hierbij komt de lucht via de benedenopening in het vertrek en verlaat het weer via het bovenraam. De vrije doorgangen van de boven- en benedenopening moeten hierbij gelijk zijn.

De hoeveelheid ventilatielucht door de

vrije doorgang van de opening A_v is dus gelijk aan:

$$\Phi_v = 0,5 A_v \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1)$$

met:

Φ_v = Hoeveelheid ventilatielucht (m^3/s),

A_v = Vrije doorgang van de ventilatie opening (m^2).

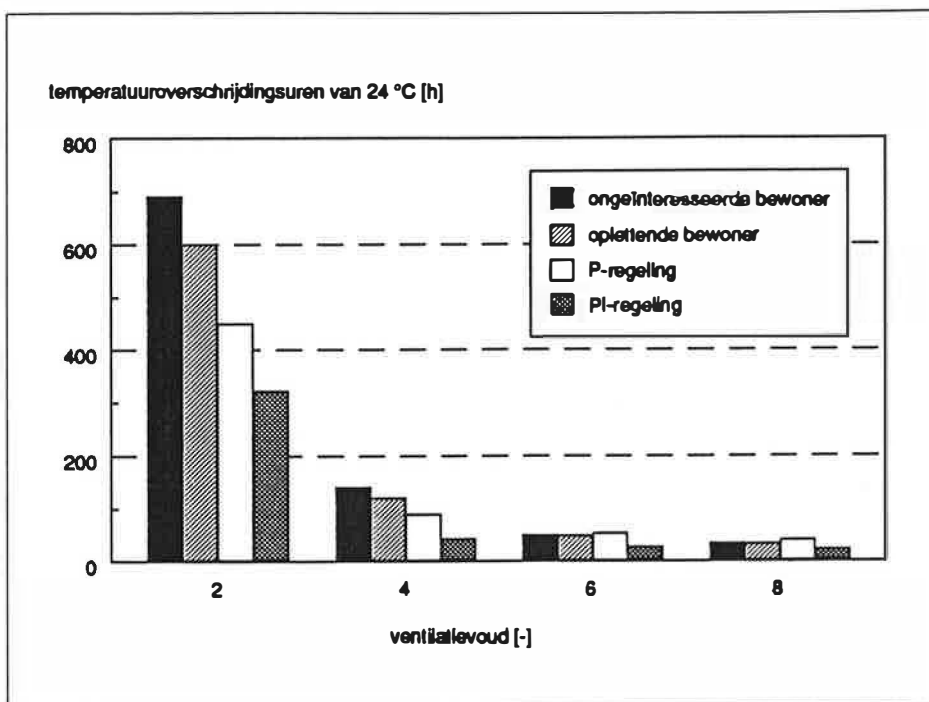
Voor het klepraam boven geldt:

$$A_v = A_w \sin \alpha_w \quad (\text{m}^2) \quad (2)$$

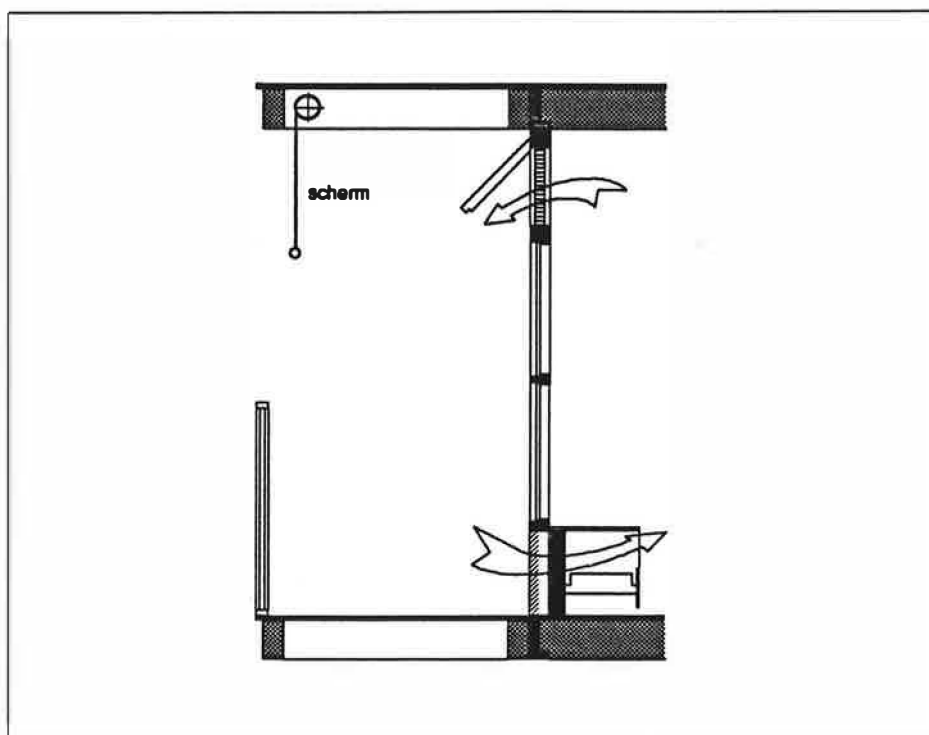
met:

A_w = raamoppervlak (m^2)

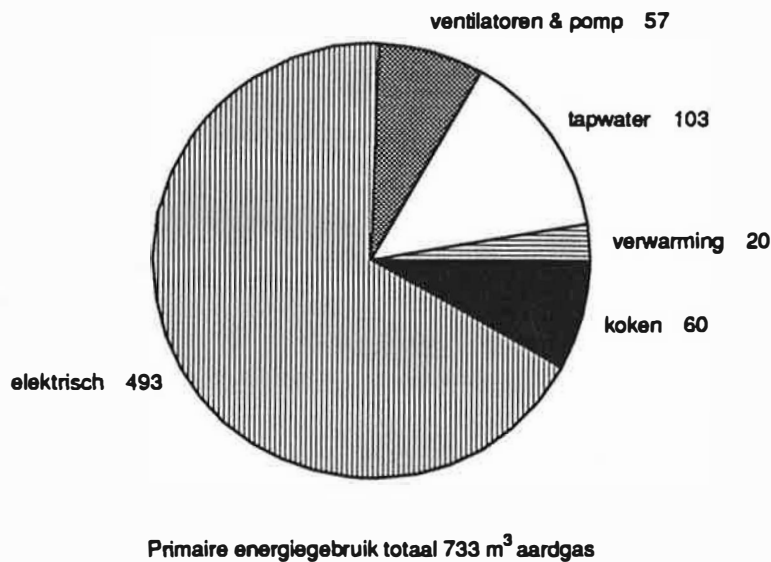
α = hoekstand raam ($^\circ$)



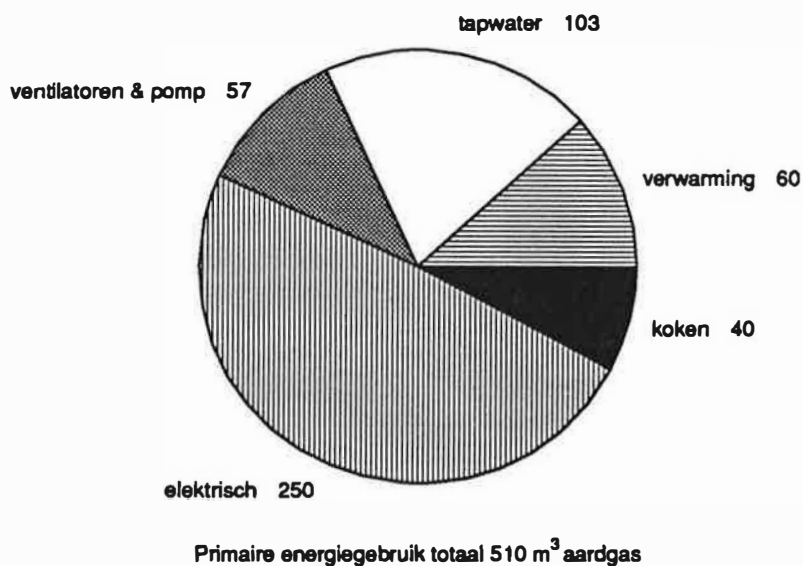
Figuur 5. Temperatuuroverschrijdingsuren van de woonkamer als functie van het ventilatievoud (bewoners aanwezig in de woonkamer)



Figuur 6. Doorsnede van de voorgevel van de energiezuinige appartementen



Figuur 7. Verwachte verdeling primaire energiegebruik in m³ aardgas



Figuur 8. Primaire energieverdeling voor een energiezuinige bewoner in m³ aardgas

Voor het benedenraam geldt:

$$A_v = C_r A_d \quad (\text{m}^2) \quad (3)$$

met:

C_r = een compensatiefactor afhankelijk van het type rooster

A_d = het doorlatend oppervlak van het rooster. (m²)

Voor het realiseren van een ventilatievoud n in een ruimte met volume V moet volgens formule (1) het ventilatieoppervlak gelijk zijn aan:

$$A_v = 2V \frac{n}{3600} \quad (\text{m}^2) \quad (4)$$

Zo dienen bijvoorbeeld beide te openen geveldelen in de woonkamer van 68 m³ voor een ventilatievoud van $n = 6$ m³/(m³h) een minimale grootte van 0,23 m² te hebben. Overwogen is de openingen automatisch te regelen. Hiervoor zijn twee verschillende bewonersmodellen doorgerekend en vergeleken met die van een automatische P of PI-regeling. In het eerste bewonersmodel ('ongeïnteresseerd') opent de bewoner alleen het raam indien hij of zij aanwezig is, terwijl in het andere model ('oplet-

tend') de bewoner gebruik maakt van de inbraakvrije ventilatievoorzieningen zodat de ramen ook overdag open kunnen staan.

Uit de simulatieresultaten, weergegeven in figuur 5, blijkt dat bij een voldoende grootte van de gevelopening de resultaten bijna gelijk zijn. Daarom is besloten om geen automatische regeling te implementeren. Voor de zonwering geldt dit niet. Om te hoge binnentemperaturen bij afwezigheid te voorkomen dient de zonwering automatisch te worden

gestuurd. Het neerlaten van de zonwering gebeurt alleen als de zonnearmte op dat ogenblik niet nuttig is.

Regeling

Het digitale regelsysteem is onder te verdelen in de volgende delen (zie figuur 3):

- De centrale regelaar;
- De regeling voor de serre (in dit artikel niet behandeld);
- De regeling voor de collector;
- De woningregelaar.

De werking van de regeling is grotendeels verwerkt bij de beschrijving van de componenten. De centrale regelaar dient voor coördinatie en voor de gegevensverwerking. Het gebruik van een digitale regelaar is noodzakelijk om de componenten optimaal op elkaar te kunnen afstemmen. Zodoende kunnen situaties, waarin bijvoorbeeld wordt verwarmd zonder gebruik van warmterugwinning, worden voorkomen. Hier staat tegenover dat deze regeling zeer duur is en hierdoor deels in strijd is met het streven dat de energiebesparing rendabel moet zijn.

Een dergelijk digitaal regelsysteem is nog niet eerder op deze wijze in een woning toegepast. Om problemen door kinderziekten te vermijden worden alle regelfuncties, die direct met de woning samenhangen, van te voren getest in het laboratorium van Koudetechniek en Klimaatregeling van de TU Delft. Een belangrijk onderdeel van de test is de regeling van de spirobuizen met thermische kleppen, die zich min of meer als open/dicht-kleppen zullen gedragen. Ook de regeling van kleine warmtebehoeften met een grote ketelcapaciteit zal worden getest.

Energiegebruik

Op basis van berekeningen kan een verdeling worden gegeven van het verwachte energiegebruik van een appartement. Om een goed beeld te krijgen zijn twee extremen beschouwd:

- een modern tweeverdienerspaar met een zeer frequent gebruik van alle mogelijke apparatuur, die de moderne mens geboden wordt.
- een energie bewust paar dat probeert zoveel mogelijk elektriciteit te besparen door gebruik te maken van spaarlampen, geen video, magnetron en koelvriescombinatie bezit en selectief gebruik maakt van de wasmachine.

In beide gevallen blijkt het energiegebruik voor de klimaatinstallatie slechts een fractie van de elektrische energie-

consumptie. In figuur 7 en 8 is dit weer gegeven. Verdere energiebesparende maatregelen kunnen zich daarom het beste toespitsen op deze sector. Deze maatregelen kunnen bestaan uit energiezuinige apparaten gekoppeld aan fotovoltaïsche cellen. Een groot deel zal echter afhangen van de bewoners want energiezuinig wonen vraagt een zekere mentaliteitsverandering.

Conclusies

- De warmtebehoefte kan tot bijna nul worden gereduceerd. Aangehouden is dat een nonchalant bewonersgedrag de behoefte kan doen toenemen tot 1750 kWh/jaar.
- De capaciteiten van de ketel en de spirobuizen zijn gebaseerd op de eis dat de woning na een onverhoedse daling van de woningtemperatuur met 2K binnen het uur weer op de gewenste waarde moet worden gebracht. De hieruit volgende opwarmcapaciteit is nodig om te vermijden dat de woning te langzaam opwarmt als de binnentemperatuur door welke oorzaak dan ook te laag is geworden. Immers de warmtebehoefte is zo gering dat zonder deze toeslag de installatie zeer klein zou worden. Het zou dan vele uren duren alvorens een temperatuurverhoging van 2K wordt bereikt.
- Een centraal zonnecollectorsysteem met een opslagvat per woning bleek een optimale oplossing (dekkingsgraad 64 %). Koppeling van het tapwatersysteem met de verwarming bleek niet zinnig.
- Warmterugwinning uit de ventilatielucht met het hoogst mogelijke rendement moet worden nagestreefd. Uit experimenteel onderzoek bleek dat een opbrengstfactor van 82 % te behalen is.
- Een ventilatievoud van 6 is nodig om te hoge binnentemperaturen te voorkomen. Met regelbare openingen aan de boven- en onderkant van de gevel kan dit inbraakvrij worden gerealiseerd.
- Een automatisch regelbare zonwering is noodzakelijk
- Het streven naar een extreem laag energiegebruik met een maximum aan comfort vereist een digitaal regelsysteem. Helaas staan momenteel de baten in geen verhouding tot de kosten. Misschien zullen de in ontwikkeling zijnde 'home automation systems' daar verandering in brengen.

- De hoeveelheid energie die nodig is voor de klimaatregeling in de Urban Villa kan dermate worden gereduceerd dat het elektriciteitsgebruik van audiovisuele- en huishoudelijke apparatuur gaat domineren. Onderzoek naar energiebesparing zal zich dus meer op het energiegebruik van dit soort apparatuur moeten richten.

Samenwerking

Aan het IEA-project "Urban Villa Amstelveen" nemen deel:

- Architectenbureau Zavrel (M. Baake, Z. Zavrel)
- Damen, Gorter & Van Rooy (A. Poel)
- TU Delft, Faculteit Werktuigbouwkunde en Maritieme Techniek, Vakgroep Proces en Energie. Sectie Energievoorziening: C. Kalkman, R.W.J. Kouffeld, C.A.G.M. van Lange. Sectie Koudetechniek en Klimaatregeling: A.H.C. van Paassen, E.J.H. Swinkels, R.J.A.M. van Zutphen
- De Wit Adviesbureau (K. de Wit, C.B. Zanddijk)
- BAM Vastgoedbeheer (P. Hameetman)

De extra kosten van het project, inclusief bijbehorend onderzoek, worden gefinancierd door de Nederlandse Maatschappij van Energie en Milieu (NOVEM).

Literatuur

- 1 Zavrel, Z. *Development of the Netherlands project at Amstelveen as a part of the IEA-task XIII, C.I.B.* International Symposium "Energy Efficient Buildings", 9-11 March 1993, Stuttgart, Germany
- 2 Lange, C.A.G.M. van Werkdocument Nederland IEA taak XIII TU Delft 1991, *afstudeerrapport EV*
- 3 Swinkels, E.J.H. *Simulatie van installaties in IEA-project 'Urban Villa'* TU Delft 1993, rapport nr. KK-192
- 4 Kalkman, C. *Ruimteverwarming, tapwaterverwarming en ventilatie in extreem energiezuinige appartementsgebouwen* TU Delft 1992, rapport nr. EV-1662
- 5 Paassen, A.H.C. van; Lute, P.J. *Natural Ventilation and Automation with Manual Overriding are Healthy Solutions* Seminar Healthy Buildings in Relation to Building Services, 1992
- 6 Brochure van BAM Vastgoed Ontwikkeling B.V. Deventer