

9 NOV. 1983

11e TVVL-TNO LEZINGENDAG

nachtverlaging in woningen

door ing. M. Dubbeld



MG-TNO 1983

INSTITUUT VOOR MILIEUHYGIENE EN GEZONDHEIDSTECHNIEK TNO

Publikatie no. 886

Postbus 214, 2600 AE Delft

11e TVVL-TNO-lezingendag
gehouden op 27 oktober 1983 te Delft
Georganiseerd door:



Nederlandse Technische Vereniging
voor Verwarming en Luchtbehandeling



Instituut voor Milieuhygiene en Gezondheidstechniek TNO
Afdeling Geluid, Licht en Binnenklimaat.

SAMENVATTING

In het kader van het onderzoekprogramma van de International Energy Agency (IEA) zijn in een aantal landen voor Annex III "Residential buildings energy analysis" een aantal activiteiten ontwikkeld.

Er is onder andere een handboek samengesteld met betrekking tot de principes van opzet van onderzoek, de instrumentatie en de meettechnieken voor het bepalen van energiebesparingen. Op de in het handboek genoemde onderzoeksmethoden wordt kort ingegaan en de samenhang tussen de woning, de installatie en het bewonersgedrag in relatie tot het energieverbruik wordt aangegeven.

Daarnaast is in de diverse deelnemende landen onderzocht het energiebesparend effect van nachtverlaging in woningen, zowel in flats als in eengezinswoningen. De diverse onderzoeken en de belangrijkste uitkomsten worden weergegeven. De gemeten energiebesparingen lopen uiteen van 4 tot 24 %. In flats wordt de besparing hoofdzakelijk verkregen door de lagere ruimtetemperatuur gedurende de gehele dag. In eengezinswoningen vindt de besparing hoofdzakelijk 's-nachts plaats.

Het corrigeren van de gemeten gasverbruiken voor andere weercondities wordt aan de hand van de multiregressiemethode toegelicht. Het schatten van de energiebesparing ten gevolge van nachtverlaging wordt uitgewerkt met behulp van de gemeten afkoelkrommen van de kamertemperatuur in een woning met een tweetal tweede-orde-systeem (wel en geen rekenmodel).

Met een meer geavanceerd rekenmodel (meerkamermodel) is voor een eengezinswoning berekend dat de energiebesparing door nachtverlaging 7,6 % bedraagt voor een gewone CV-ketel en 6,7 % voor een hoog-rendement ketel.

Tenslotte wordt naar aanleiding van de diverse onderzoeken aanbevolen de temperatuurregeling van de woonkamer in flats te verbeteren. In eengezinswoningen moet de warmtetoevoer naar de slaapkamers worden verminderd.

Het onderzoek werd financieel ondersteund door het Projectbureau Energieonderzoek TNO in het kader van het Nationaal Programma Energieonderzoek.

METHODEN VOOR HET BEPALEN EN PRAKTIJKMETINGEN VAN HET EFFECT
VAN NACHTVERLAGING IN WONINGEN.

Door: Ing. M. Dubbeld, Ing. Ph.J. Ham, L.L.M. van Schijndel,
R.S. Soeleman en Ing. W.R. van den Berg.

1. INLEIDING

In internationaal verband bestaat een aantal jaren samenwerking op het gebied van energieonderzoek. De 21 deelnemende landen zijn gebundeld in de International Energy Agency (IEA). Het onderzoekprogramma naar energiebesparing in gebouwen is verdeeld in twaalf werkgroepen (annexen).

In Annex III "Residential buildings energy analysis" nemen deel: België, Denemarken, Italië, Nederland, Turkije, Verenigde Staten, Zweden en Zwitserland. Het programma van deze Annex III is in drie taken gesplitst, te weten:

- A. Vergelijking van bestaande rekenprogramma's voor het voorspellen van het energieverbruik;
- B Samenstelling van een handboek met betrekking tot de principes van opzet van onderzoek, instrumentatie en meettechnieken;
- C Studie van het energiebesparend effect van nachtverlaging.

In het kader van taak C is in Nederland tevens in een proefproject van eengezinswoningen te Oosterhout in de praktijk gekeken naar de energiebesparing door toepassing van hoog-rendement ketels en naar het bewonersgedrag. Het onderzoek is opgezet in overeenstemming met de principes zoals die volgen uit de resultaten van taak B.

In deze publikatie wordt nader ingegaan op een aantal aspecten uit taak B en op resultaten uit taak C.

Het onderzoek werd financieel ondersteund door het Projectbureau Energieonderzoek TNO in het kader van het Nationaal Programma Energieonderzoek.

2. PRINCIPES VAN OPZET, INSTRUMENTATIE EN MEETTECHNIEKEN BIJ ENERGIE-BESPARINGSONDERZOEK.

De resultaten van taak B zijn internationaal verzameld en gebundeld in het boek "Guiding Principles Concerning Design of Experiments, Instrumentation and Measuring Techniques" [1]. Dit handboek wordt uitgegeven door de Swedish Council for Building Research te Stockholm, Zweden onder nr. D 11: 1983 *.

Het boek bestaat uit de volgende delen:

1. Basis principes;
2. De keuze van de methode van onderzoek;
3. Meettechnieken voor gebouwen, installaties, buitenklimaat;
4. Meten van het bewonersgedrag en het huishoudelijk energieverbruik.

Om het effect van een energiebesparende maatregel te kunnen bepalen is in het algemeen de volgende werklijn te onderscheiden:

1. Vraagstelling en doel van het onderzoek.
2. Schatten van de mogelijke besparing.
3. Bepalen van steekproefgrootte.
4. Beschrijving van het energieverbruiksproces.
5. Opzet van de metingen en de keuze van een werkmodel.
6. Oplossen meetproblemen; meettechnieken.
7. Meetperiode.
8. Rapportage.

Hierna wordt op een aantal van deze punten of op aspecten ervan kort ingegaan. De verschillende meettechnieken zijn in het handboek gedetailleerd weergegeven.

* Svensk Byggtjänst, Box 7853, S-103 99 Stockholm, Sweden.

Approx. price: SEK 80.-

2.1 Vraagstelling en doel van het onderzoek

De vraagstelling, meestal afkomstig van derden, kan zeer concreet zijn zoals: wat is de energiebesparing ten gevolge van nachtverlaging in bepaalde woningen met individuele c.v.-installatie?

Vaker is de oorspronkelijke vraag zeer algemeen en vaag en wordt deze tijdens of na het onderzoek bijgesteld.

Om tot een uitvoerbaar en bevredigend onderzoek te komen is het noodzakelijk dat de vraagstelling vooraf duidelijk wordt vastgesteld. Dit geeft immers de grenzen van het onderzoek aan en daarmee de (aantallen) grootheden die gemeten moeten worden.

Daarnaast leggen de financiële middelen en de tijdsduur ook nog hun beperkingen op.

2.2 Schatten van de mogelijke besparing

Het schatten van de mogelijke energiebesparing kan gebeuren met de graaddagenmethode of met eenvoudige modellen van de 1e of 2e orde.

2.3 Bepalen van de steekproefgrootte

Naarmate de vraagstelling algemener is geformuleerd zal men de te onderzoeken groep groter moeten kiezen. Hierdoor wordt de invloed van niet gemeten en onbekende grootheden kleiner.

De mogelijke bijdrage aan de energiebesparing door deze niet gemeten grootheden blijft dan echter onbekend.

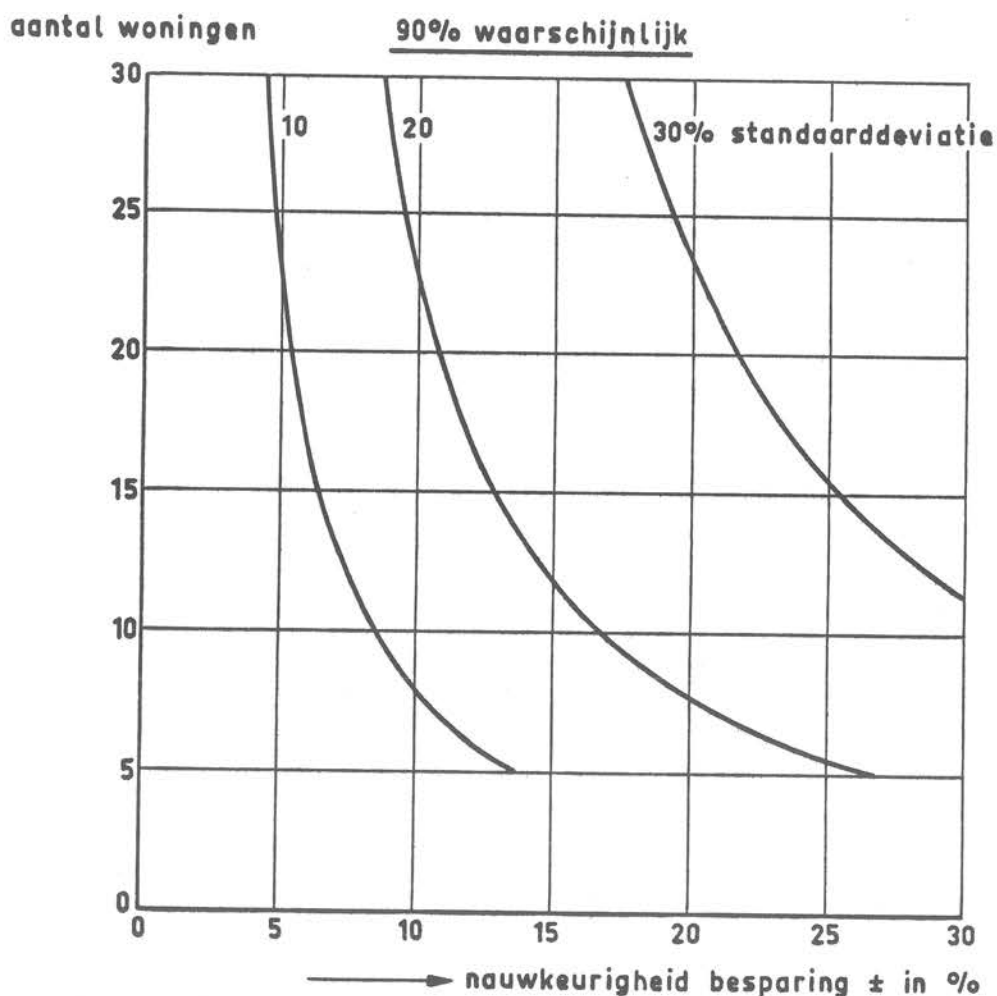
Is de vraagstelling meer concreet dan zal men het aantal te onderzoeken woningen en de variatie daarin kunnen beperken.

Voor de grootte van de proefprojecten in Nederland kiest men vaak 40 tot 60 woningen, waarin dan vier varianten worden betrokken. Hierdoor telt elke groep 10 tot 15 identieke woningen. Bij deze kleine groepen zullen meer gegevens moeten worden bepaald.

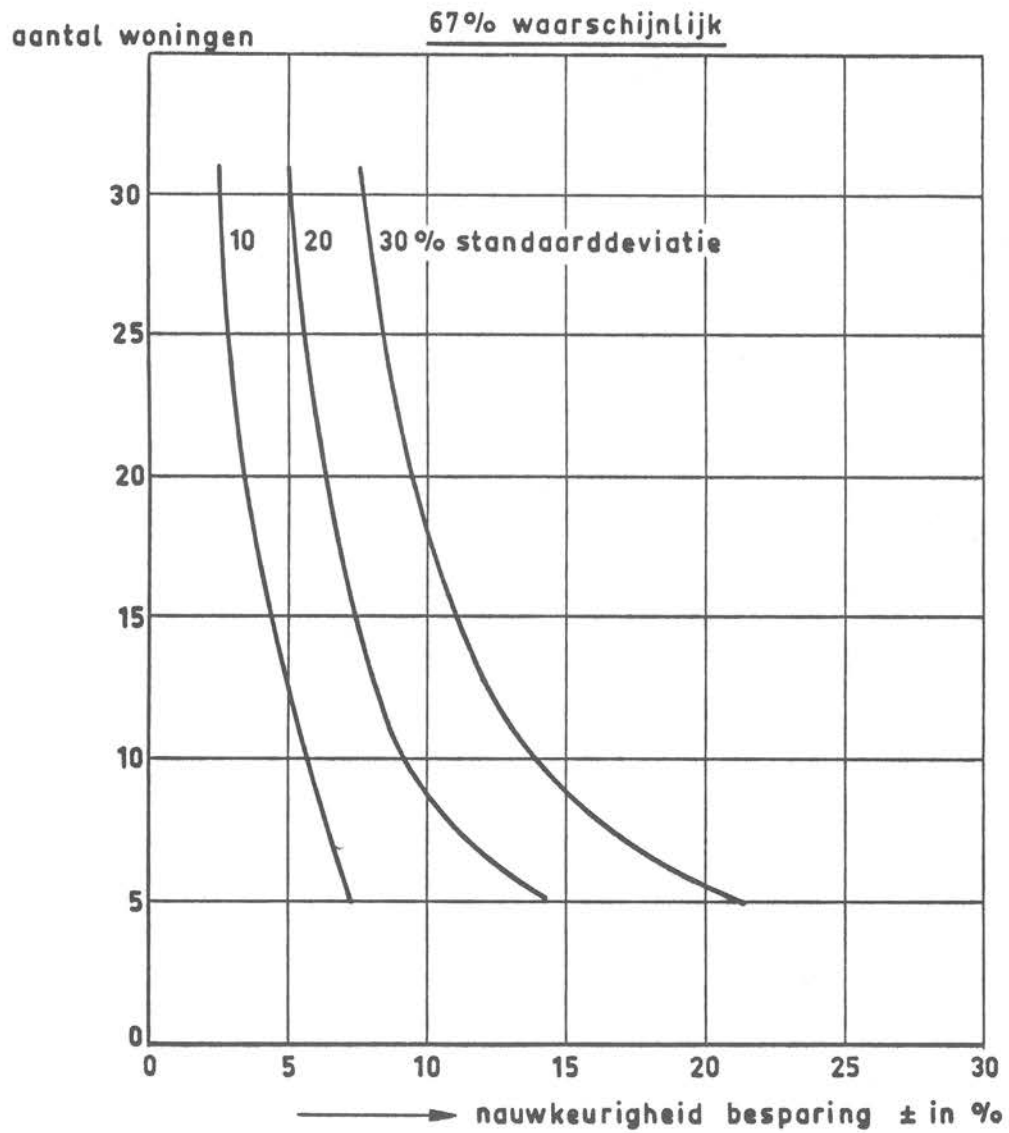
Wanneer voldoende bekend is over het gedrag van de bewoner in deze zin zou zelfs met één woning kunnen worden volstaan.

Wil men statistisch verantwoord werken dan geeft het handboek een schatting (zie tabel 1).

De steekproefgrootte wordt bepaald door de waarschijnlijkheid waarmee de gemeten besparing inderdaad optreedt, de gewenste nauwkeurigheid en de spreiding in de resultaten. (zie de figuren 1 en 2).



Figuur 1 Aantal woningen als functie van de nauwkeurigheid en de standaarddeviatie



Figuur 2 Aantal woningen als functie van de nauwkeurigheid en de standaarddeviatie

Voor de waarschijnlijkheid moet men minimaal 67 % kiezen. De nauwkeurigheid moet men groter kiezen, naarmate de besparingen kleiner zijn. Naarmate de spreiding in de gemeten verbruiken per groep, uitgedrukt in de standaarddeviatie, groter is neemt het aantal te onderzoeken woningen toe. Uit metingen van het energieverbruik in hetzelfde woningtype blijkt de standaarddeviatie meestal 20 % te bedragen. Door groepen met eenzelfde bewonersgedrag samen te stellen, kan men de standaarddeviatie kleiner kiezen en daarmee het aantal te onderzoeken woningen.

Tabel 1. Aantal te onderzoeken woningen.

Standaard- deviatie %	Nauwkeurigheid %	Waarschijnlijkheid	
		90 % aantal	67 % aantal
20	+ 20	8	3
	+ 10	23	9
	+ 5	-	31
10	+ 20	3	-
	+ 10	8	3
	+ 5	24	13

Uit tabel 1 kan worden geconcludeerd dat een steekproefgrootte van 20 à 30 woningen van één en hetzelfde type nodig is.

2.4 Beschrijving van het energieverbruiksproces

Het energieverbruik van een woning wordt veroorzaakt door een aantal systemen die elkaar onderling beïnvloeden. Deze systemen en de daarbij van belang zijnde factoren zijn:

Systemen	Bepalende factoren
Woning	. Isolatieniveau . Warmteaccumulatie . Interne warmtetransporten . Luchtdichtheid
Installatie	. Capaciteit en soort . Warmteverdeling naar plaats en tijd . Regeling - watertemperatuur - aan/uit - kamertemperatuur
Bewoner	. Interne warmteproductie . Keuze ruimtetemperatuur . Mate van ventileren . Reactie op het binnen- en buitenklimaat
Weer	. Temperatuur . Windsnelheid en -richting . Zon.

Als voorbeeld van deze onderlinge beïnvloeding het volgende.

Indien woningen beter worden geïsoleerd heeft dat een vermindering van de ketel- en radiatorcapaciteit tot gevolg. De interne warmtestromen en de warmteafgifte van leidingen gaan dan een grotere bijdrage leveren aan de verwarming van bijvoorbeeld een hoger gelegen verdieping.

Als reactie hierop kan de bewoner meer gaan ventileren op deze verdieping en de woonkamerdeur naar de hal kan gedurende een langere periode geopend zijn.

Deze interacties dienen bij voorkeur vóór het onderzoek te worden geconstateerd, waarna kan worden besloten of deze secundaire effecten door metingen of op andere wijze moeten worden bepaald.

De installaties moeten vooraf worden gecontroleerd op het naar behoren functioneren. Hierbij dient vooral aandacht te worden besteed aan:

- . water- en luchthoeveelheden (inregelen) [3]
- . thermostaatstanden en temperatuurversnellers [4]
- . ketelrendement
- . instelling van de stooklijn en nachtverlaging
- . uitschakelen installatie bij nachtonderbreking

Eigenlijk zou bij een correcte oplevering en instructie een dergelijke controle overbodig zijn, maar zowel in Nederland als bij de in het buitenland verrichte onderzoeken blijkt steeds dat hier in de praktijk het nodige aan ontbreekt.

De bewoners hebben een zeer grote invloed op het energieverbruik. Dit wordt onder andere aangetoond in het door Van Raay en Verhallen uitgevoerde onderzoek in Vlaardingen [2]. Hierbij is het gedrag voor wat betreft het gekozen temperatuur- en ventilatieniveau ingedeeld in drie groepen (tabel 2).

Tabel 2. Invloed temperatuur- en ventilatieniveau op het energieverbruik, gemeten door Van Raay en Verhallen [2].

Gemeten energieverbruik in m ³ gas bij n woningen				
ventilatie-niveau	Temperatuurniveau			
	laag	gemiddeld	hoog	
laag	1998 n = 18		2207 n = 45	verschil 209
gemiddeld		2404 n = 37		
hoog	2238 n = 23		2755 n = 22	verschil 517
	verschil 240		verschil 548	

Uit eigen onderzoek te Oosterhout blijkt dat de invloed van de woonkamertemperatuur op het energieverbruik voor de verschillende groepen woningen 8 à 10 % per °C bedraagt (figuur 3).

Een voorbeeld van een reactie op het buitenklimaat blijkt uit het openen van ramen. Uit verschillende onderzoeken [1] is de volgende relatie afgeleid voor het aantal ramen dat wordt geopend:

$$\frac{n \cdot \Delta t}{N} = 2 \text{ tot } 2,5$$

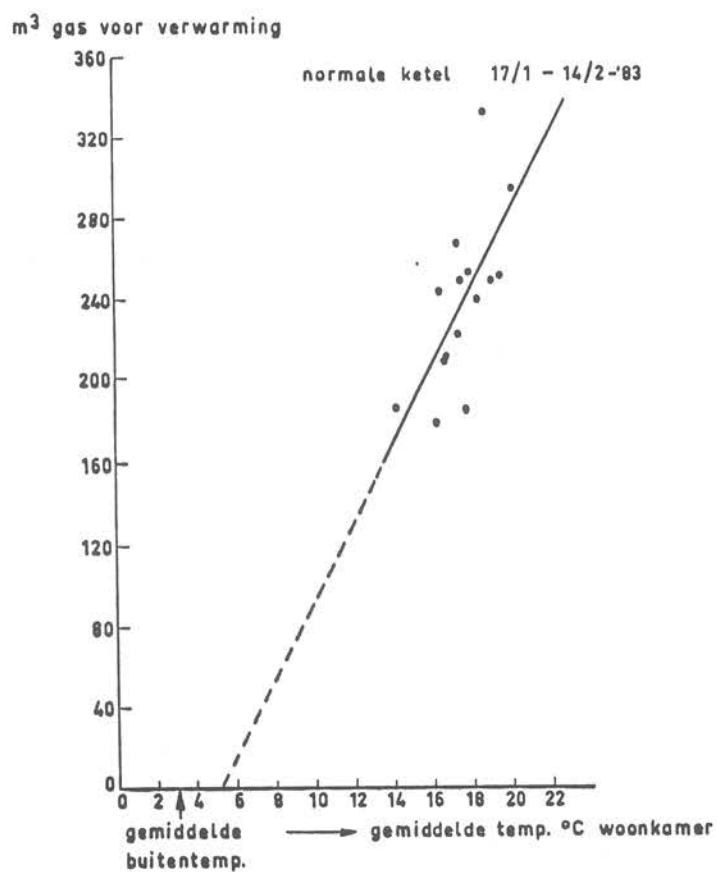
hierin is:

- n het aantal geopende ramen
- N het totaal aantal ramen
- Δt het temperatuurverschil tussen binnen en buiten

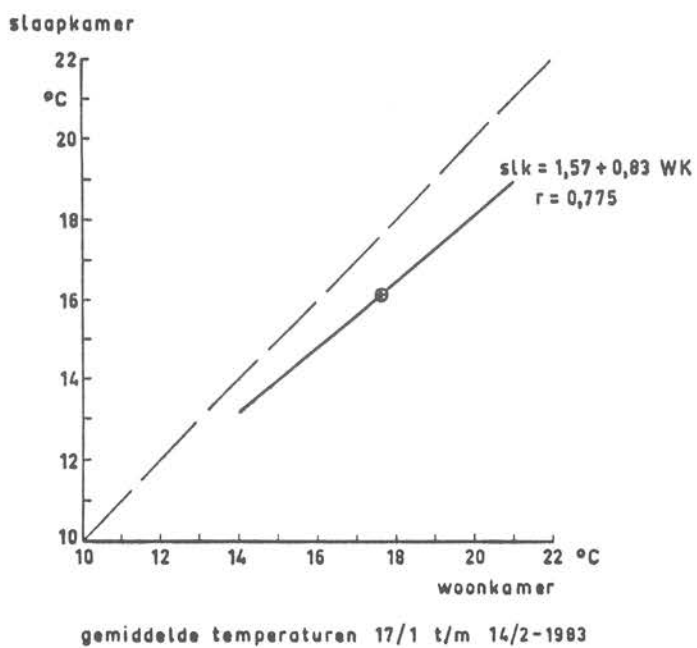
In het onderzoek te Oosterhout is aan de hand van gegevens, die door 36 bewoners in een dagboek werden verzameld, onder andere nagegaan wanneer en hoe lang de ramen worden geopend.

Uit figuur 4 blijkt dat naast de buitentemperatuur zowel wind als zon een belangrijke rol spelen in het ventilatiegedrag. Bij zonnig en "windstil" weer wordt aanzienlijk meer geventileerd dan op basis van de bovengenoemde relatie zou worden verwacht.

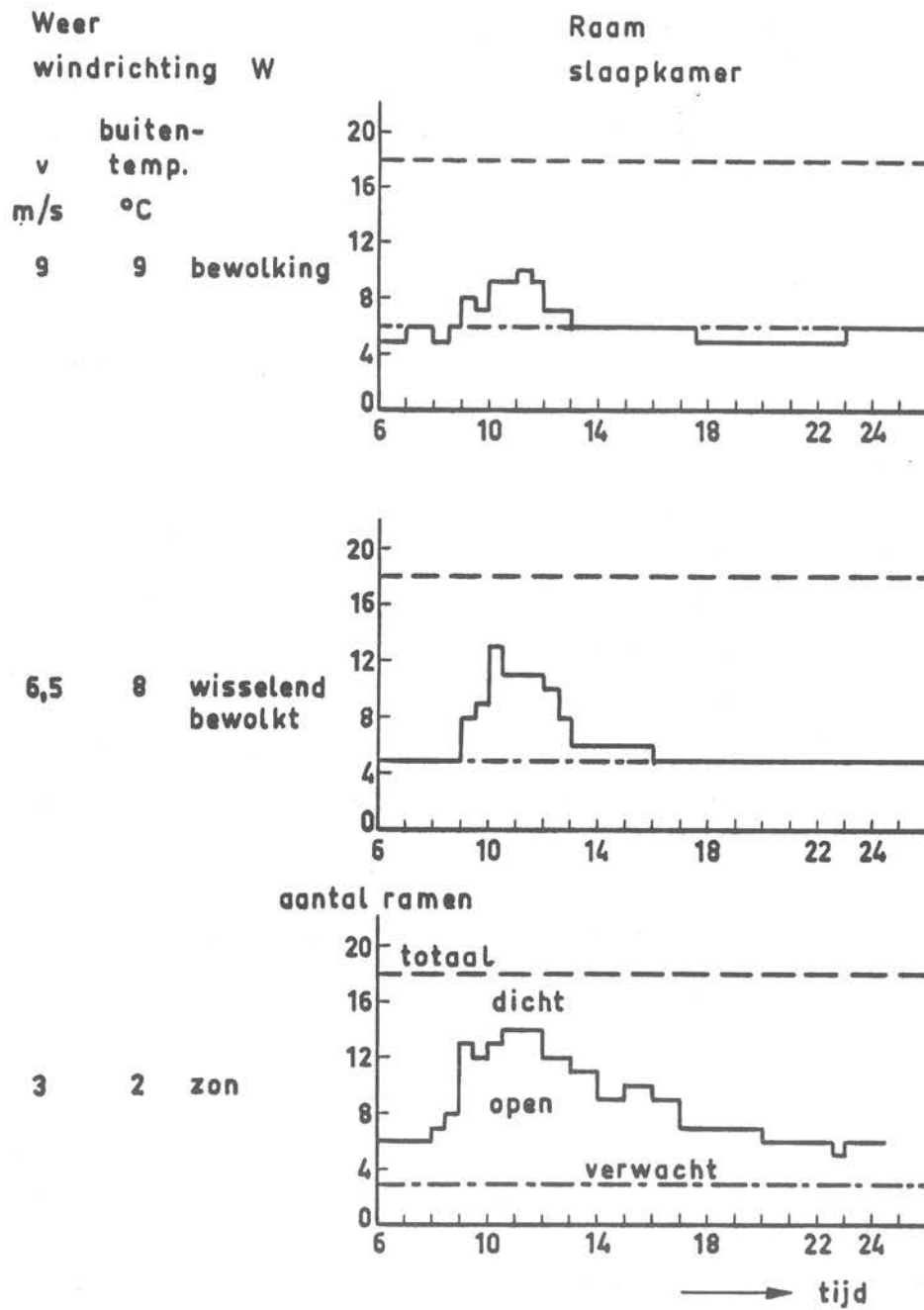
Uit de eveneens gemeten en gemiddelde woonkamer- en slaapkamertemperatuur blijkt dat ondanks de ventilatie de slaapkamertemperatuur maar 1 à 2 °C lager is dan de woonkamertemperatuur (figuur 5).



Figuur 3 Energieverbruik als functie van de ruimtetemperatuur



Figuur 5 Gemeten gemiddelde woon- en slaapkamertemperatuur



Figuur 4 Aantal geopende ramen

Uit een in december 1978 uitgevoerd onderzoek in Duitsland [5] blijkt dat overdag de slaapkamertemperatuur 5 à 6 °C lager is dan de woonkamertemperatuur.

In de goed geïsoleerde woning in Oosterhout zijn dergelijke temperatuurverschillen niet gemeten. De bewoner van een geïsoleerde woning moet om een frisse of koude slaapkamer te krijgen dus wel overmatig ventileren.

2.5 Opzet metingen en de keuze van een werkmodel

Bij het opzetten van de metingen dient men zich vooral af te vragen of en hoe de gemeten grootheden en het bewonersgedrag zullen worden gebruikt.

De metingen kunnen nodig zijn om verschil in gedrag te constateren, om de uitkomsten te corrigeren of om het gedrag te gebruiken als invoer voor rekenmodellen, waarmee het effect van verschillende maatregelen kan worden vergeleken.

Het laatste is vooral van belang voor onderzoek dat gericht is op het ontwikkelen van woning- en installatie-uitvoeringen, die beter zijn afgestemd op de behoefte van de bewoner en een lager energieverbruik tot gevolg hebben.

In principe worden voor praktijkmetingen drie methoden onderscheiden.

1. Test-Referentie

Hierbij wordt in dezelfde periode gemeten in twee identieke groepen woningen; één groep met en één groep zonder energiebesparende maatregel.

Bij voorkeur moet het energieverbruik van de Referentiegroep (zonder maatregel) over een langere periode bekend zijn, zodat beïnvloeding van het gedrag in de meetperiode door bijvoorbeeld prijsontwikkeling of het onderzoek zelf kan worden vastgesteld.

De uitkomsten zijn direct vergelijkbaar.

2. Voor en na

Hierbij wordt in één groep woningen vóór en ná het aanbrengen van een energiebesparende maatregel het energieverbruik gemeten.

In dat geval moet men de uitkomsten corrigeren voor het weer gedurende de verschillende meetperioden.

Dit kan op basis van bijvoorbeeld temperatuurverschil binnen-buiten, graaduren of graaddagen. In het algemeen zal men toch de voorkeur geven aan een multiregressie methode op basis van binnen- en buitentemperatuur, wind- en zoninvloed.

3. Aan en uit

Hierbij wordt in één groep woningen een energiebesparingsmaatregel afwisselend gedurende bijvoorbeeld 14 dagen wel of niet toegepast. Deze methode kan bijvoorbeeld bij nachtverlaging of bij het toepassen van luiken worden gebruikt.

Door zo'n maatregel over een langere periode afwisselend wel of niet te gebruiken kunnen de weersinvloeden in grote mate worden geëlimineerd. De gemeten besparingen behoeven geen nadere correcties.

3. SAMENVATTING

Voor het beantwoorden van de vraag hoeveel energie wordt bespaard is het niet voldoende om alleen het energieverbruik te meten. Er moeten ook metingen worden uitgevoerd en/of gegevens worden verzameld over het:

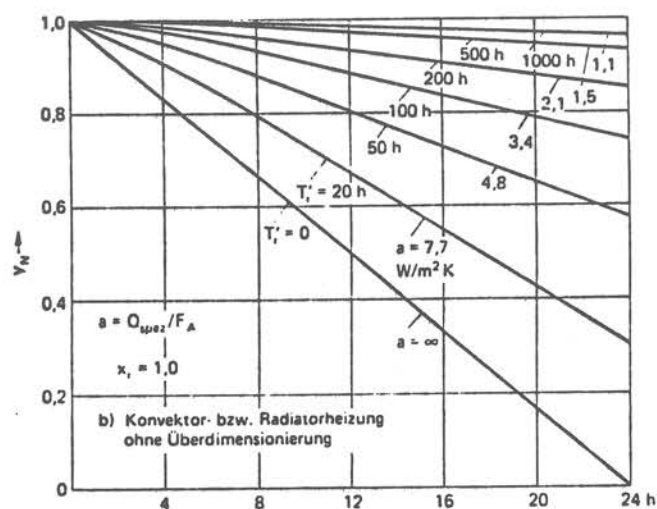
1. Bewonersgedrag met betrekking tot
 - . woonkamertemperatuur of thermostaatstand
 - . mate van ventilatie
 - . gebruik energiebesparende maatregel
 - . reacties op het veranderde binnenklimaat
2. Weergegevens.

De omvang van deze metingen is afhankelijk van de vraagstelling en het doel van het onderzoek.

4. NACHTVERLAGING

Over nachtverlaging is uit bestaande onderzoeken bekend dat het besparend effect wordt bepaald door de gebouwmassa, het isolatie- en ventilatieniveau en de tijdsduur van de nachtverlaging.

Door Gilli [15] is de verhouding tussen de warmtetoevoer met en zonder nachtverlaging berekend (zie figuur 6).



Figuur 6. Relatie energieverbruik met nachtverlaging.

Nederlandse woningen hebben een tijdconstante van ca. 50 tot 100 uur. De besparingen kunnen 6 tot 10 % bedragen wanneer nachtverlaging 8 uur per dag wordt toegepast.

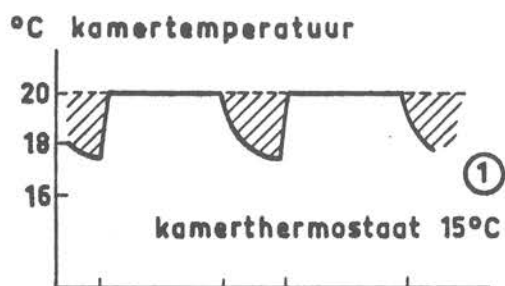
Kantoren worden in deze publikatie niet behandeld. Hiervoor wordt verwezen naar een artikel van Ackermans en Augenbroe [16]. Gecombineerd met een optimale regeling bleek voor kantoorvertrekken een besparing van 25 % mogelijk bij een nachttemperatuur van 16 °C.

Nachtverlaging is in principe op de volgende drie manieren mogelijk:

1. Door de kamerthermostaat op een lagere gewenste temperatuur in te stellen;
2. Door het verlagen van de stooklijn van de toevoerwatertemperatuur gedurende de nacht;
3. Door een stookonderbreking gedurende de nacht.

Met de kamerthermostaat wordt alleen gedurende de nacht energie bespaard.

Met de stooklijnverlaging gedurende de nacht is in de onderzochte gevallen de stooklijn voor de dag niet gewijzigd. Hierdoor wordt de dagtemperatuur met nachtverlaging lager dan zonder nachtverlaging (figuur 7).



Flats

Blokverwarming

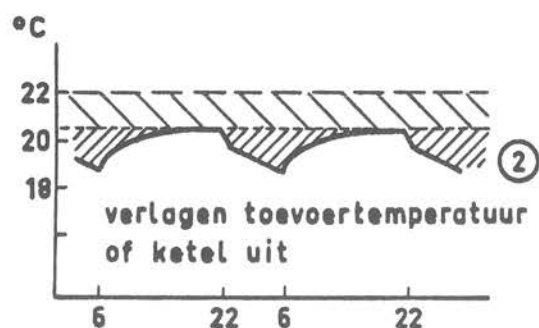
stooklijn
toevoertemp.
verlagen

Principe

2

Individuele ketel

kamerthermostaat 1



Eengezins



Verloop kamertemperatuur met
nachtverlaging

Figuur 7 Principes van nachtverlaging

De energiebesparing bestaat dan uit twee delen:

1. lagere nachttemperatuur,
2. lagere dagtemperatuur.

Stookonderbreking wordt wettelijk verplicht alleen in Italië toegepast; daar zijn echter geen metingen uitgevoerd.

In flats zal men met blokverwarming meestal stooklijnverlaging toepassen en met individuele ketels nachtverlaging door de kamerthermostaat.

In eengezinswoningen worden in verschillende landen zowel met de kamerthermostaat als met de stooklijn nachtverlaging toegepast.

In Nederland wordt hoofdzakelijk nachtverlaging via de kamerthermostaat toegepast.

5. NACHTVERLAGING IN FLAT MET INDIVIDUELE C.V.-INSTALLATIE

In een bewoonde hoekflat in Kijkduin met een individuele c.v.-installatie is in twee op een volgende stookseizoenen wel en geen nachtverlaging toegepast [6, 7].

Om het effect van de nachtverlaging te kunnen bepalen moeten de resultaten worden gecorrigeerd voor het weer in de twee stookseizoenen. Hiervoor is gebruik gemaakt van de multi-regressie-analyse. Om deze methode te kunnen toepassen zijn de volgende grootheden gemeten:

1. Energieverbruik
2. Variabelen die het verbruik bepalen
 - . buitentemperatuur }
 - . windsnelheid } meteo station
 - . globale zonstraling
 - . ventilatiegedrag dagboek of enquête
 - . binnentemperatuur meten of constant gedrag

De frequentie en het tijdstip waarop wordt gemeten moet voor alle grootheden gelijk zijn.

Met een regressie-analyse van het verband tussen het periodiek (dagelijks of wekelijks) waargenomen gasverbruik en een of meer klimaatvariabelen kan worden nagegaan welk percentage van de variantie (= variatie ten opzichte van het gemiddelde) van het gasverbruik wordt verklaard uit de varianties van de klimaatvariabelen.

Men verkrijgt daarmee vrij snel een indruk van de geschiktheid van het gegevensmateriaal voor het regressie-onderzoek.

Bovendien zal ook duidelijk worden welke klimaatvariabelen nog relevant zijn om in de regressie-analyse te worden beschouwd.

Tabel 3 geeft een voorbeeld van het resultaat van een uitwerking betreffende het wekelijks waargenomen gasverbruik van de onderzochte woning voor het stookseizoen 1973-1974.

Tabel 3. Percentages waarmee de variantie van het gasverbruik kan worden verklaard door de variantie van een of meer klimaatvariabelen.

Regressie	Percentage verklaard uit variantie			Totaal		Correlatie-coëfficiënt
	Tbuiten	Qzon	Vwind	Verkl.	Onverkl.	
Enkelvoudig	47,7			47,7	52,3	-0,690
Enkelvoudig		74,7		74,7	25,3	-0,864
Enkelvoudig			26,3	26,3	73,7	0,513
Tweevoudig	23,3	59,8		83,1	16,9	0,911
Tweevoudig	45,7		25,0	70,7	29,3	0,841
Drievoudig	27,3	47,9	14,3	89,5	10,5	0,946

Het beste resultaat wordt bereikt met de drie weervariabelen.
Het bijbehorend regressiemodel voor het energieverbruik is:

$$F = B_0 + B_1 \cdot OT + B_2 \cdot VW + B_3 \cdot QS \quad (1)$$

waarin B_0, B_1, B_2, B_3 zijn constanten

OT = buitentemperatuur

VW = windsnelheid

QS = globale zonstraling

F = brandstofverbruik.

Wanneer men de regressieformule (1) nader bekijkt moet men zich afvragen of deze het warmteproces voldoende beschrijft.

Wanneer alle variabelen zouden zijn opgenomen zou B_0 gelijk aan nul worden. Dat is niet zo, want vele variabelen worden buiten beschouwing gelaten zoals regen, vochtigheid, sneeuw, interne warmteproductie e.d.

Tevens zijn de weervariabelen geen directe maat voor de warmtestromen. Het warmteverlies door transmissie en ventilatie wordt door het temperatuurverschil tussen binnen en buiten bepaald.

De hoeveelheid ventilatielucht is een functie met

$$C \cdot VW^{4/3} \text{ of } C \cdot VW$$

Hierin neemt C evenredig toe met het geopende raamoppervlak.
De regressieformule voor het bepalen van het energieverbruik zou fysisch beter worden beschreven door de formule:

$$F = B_0 + B_1 \cdot TD + B_2 \cdot TD \cdot VW^{4/3} + B_3 \cdot QS \quad (2)$$

Waarin B_0, B_1, B_2 en B_3 zijn constanten

TD = temperatuurverschil binnen-buiten

VW = windsnelheid

QS = globale zonstraling

F = brandstofverbruik

Het energieverbruik kan statistisch gezien met regressieformule 2 niet beter worden verklaard dan met formule 1.

In de woning te Kijkduin werd nachtverlaging toegepast door van 23 tot 8 uur de kamerthermostaat van 23 °C naar 15 °C te zetten. De gemiddelde temperatuur over 24 uur bedraagt dan 22 °C. Zonder nachtverlaging is de temperatuur constant 23 °C. De bewoner heeft een vrij constante leefwijze. Op basis van weekanalyses zijn de volgende regressiemodellen verkregen:

Zonder nachtverlaging:

$$F = 0,68 + 0,89 \text{ TD} + 0,0106 \text{ TD} \cdot \text{VW}^{4/3} - 0,53 \text{ QS} \quad (3)$$

Met nachtverlaging:

$$F = 6,12 + 0,55 \text{ TD} + 0,0133 \text{ TD} \cdot \text{VW}^{4/3} - 0,52 \text{ QS} \quad (4)$$

Het blijkt dat de regressieconstanten B_0 en B_1 met of zonder nachtverlaging grote verschillen vertonen. Dit komt omdat met nachtverlaging het energieverbruik maar 15 uur door het temperatuurverschil binnen-buiten wordt bepaald, waardoor B_1 evenredig afneemt. De extra warmte die bij het opstoken wordt geleverd komt in de term B_0 terug.

Zonder nachtverlaging is het volgende gemeten:

$$F = 0,68 + 0,89 \cdot \overset{\text{TD}}{17,78} + 0,0106 \cdot \overset{\text{TD.VW}^{4/3}}{230,68} - 0,53 \cdot \overset{\text{QS}}{5,38} = 16,15 \text{ m}^3\text{gas/dag}$$

Voor nachtverlaging kan nu het energieverbruik worden berekend met formule (4). Hierbij wordt TD met 1 °C verminderd, omdat de gemiddelde binnentemperatuur met nachtverlaging 1 °C lager is.

$$F = 6,12 + 0,55 \cdot 16,78 + 0,0133 \cdot 217,68 - 0,52 \cdot 5,38 = 15,37 \text{ m}^3\text{gas/dag}$$

De energiebesparing is dan $16,15 - 15,37 = 0,78 \text{ m}^3\text{gas/dag}$ ofwel 4,8 %. Men kan de besparing ook berekenen door uit te gaan van het gemeten stookseizoen met nachtverlaging. In dat geval is de besparing 2,7 %. In het algemeen kan men dus stellen dat de besparing 3 à 5 % bedraagt.

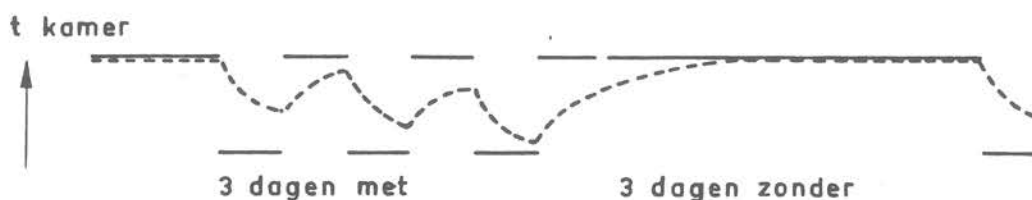
Wanneer de regressiemodellen de situatie exact zouden beschrijven dan zou er geen verschil mogen zijn. De beschrijving blijft echter een benadering.

In het algemeen mag men verwachten dat de multiregressiemethode een betrouwbare methode is, mits men het juiste model kiest en de variabele aanpast aan de gemeten condities.

Over het waarom van de besparing of andere combinaties kan geen uitspraak worden gedaan.

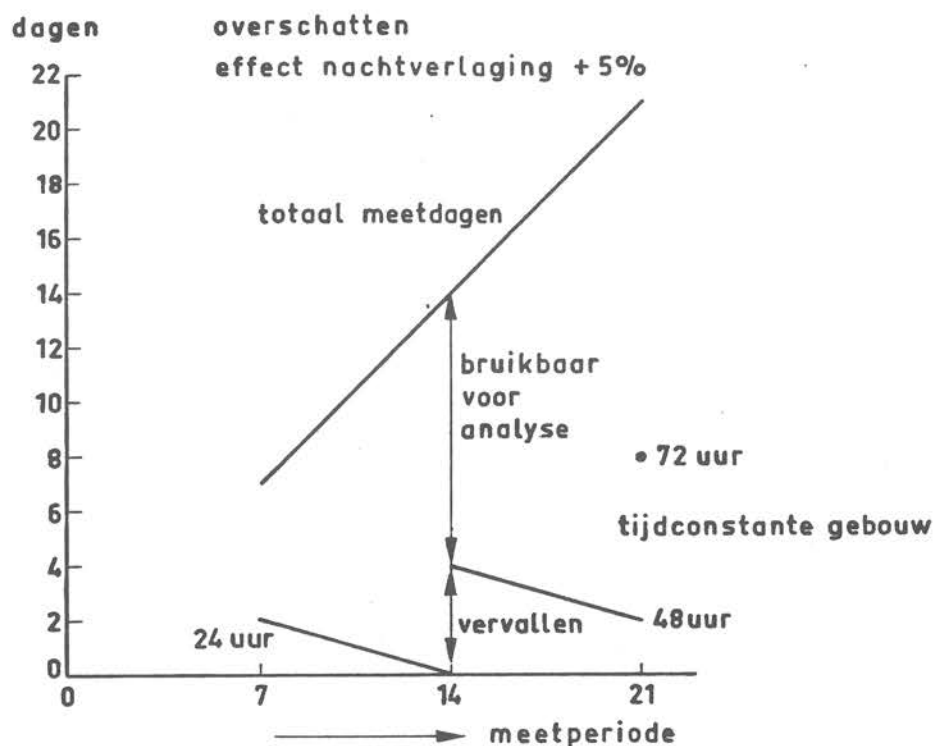
6. NACHTVERLAGING IN FLATS MET CENTRALE TOEVOERWATERTEMPERATUURREGELING

In Zweden [8] en Denemarken [9] zijn metingen verricht in flats met een toevoerwatertemperatuurregeling. Hierbij werd afwisselend een week met en een week zonder nachtverlaging gemeten om de weersinvloeden uit te schakelen. De zogenaamde aan/uitmethode. Een bezwaar van deze methode is dat door de nachtverlaging het gehele temperatuurniveau daalt, hetgeen enige dagen in beslag neemt (figuur 8).



Figuur 8 Temperatuurverloop na het invoeren van nachtverlaging

Hierdoor kunnen de eerste dagen van een meetperiode niet worden gebruikt, omdat de besparing dan wordt overschat. Het aantal bruikbare dagen van een meetcyclus is weergegeven in figuur 9.



Figuur 9. Aantal bruikbare dagen als functie van de tijdconstante van het gebouw

De tijdconstante van flats ligt meestal tussen de 1 à 2 dagen. Bij een tijdconstante van twee dagen is een meetcyclus van twee weken nodig, waarbij alleen de laatste 10 dagen bruikbaar zijn.

In Denemarken [9] heeft men getracht dit probleem op te lossen door in twee identieke flats met dezelfde installaties om en om afwisselend nachtverlaging toe te passen. Dit mislukte omdat de energieverbruiken van de flats niet gelijk waren en omdat de 20 °C verlaging van de toevoerwatertemperatuur in één flat niet kon worden gerealiseerd.

Uiteindelijk zijn alleen voor één flat twee perioden met een zelfde gemiddelde buitentemperatuur vergeleken. De betreffende flat heeft een specifiek warmteverlies per 100 m² vloeroppervlak van 135 W/K en de toevoerwatertemperatuur werd van 22,30 tot 06.00 uur 20 °C verlaagd.

In de gemeten periode daalde de gemiddelde temperatuur van 21,8 °C naar 19,4 °C, dus met 2,4 °C bij +5 °C buiten. De fluctuatie van de temperatuur over de dag bedroeg 0,7 °C. De gemeten besparing bedraagt 13 %, maar er werden wel veel klachten ontvangen van bewoners die de temperatuur te laag vonden.

In Zweden [8] werden in een groot aantal verschillende flats het energieverbruik met en zonder nachtverlaging gemeten. Voor de nachtverlaging is gedurende 6 uur de toevoerwatertemperatuur 10 °C verlaagd. Gemiddeld daalde de binnentemperatuur hierdoor 0,5 °C. De energiebesparing door de continu lagere binnentemperatuur is 3 % en door de lagere nachttemperatuur 1 %. Dus totaal 4 %.

Uitgaande van de situatie dat veel mensen met continudienst juist in flats wonen is het zeer de vraag of nachtverlaging in flats door verlaging van de centrale toevoer watertemperatuur wel mogelijk is.

In Zwitserland [17] wordt het energieverbruik bepaald door de gemeten verbruiken als functie van de gemeten buitentemperatuur uit te zetten. Met behulp van lineaire regressie kan men dan het verband tussen de buitentemperatuur en het energieverbruik vaststellen. Correcties voor bewonersgedrag, wind- en zoninvloed blijven hierbij buiten beschouwing, ondanks dat deze het resultaat wel beïnvloeden. In twee flats met een tijdconstante van circa 100 uur werden metingen verricht. De flats hebben een centraal gestookte installatie met de volgende stooklijninstelling:

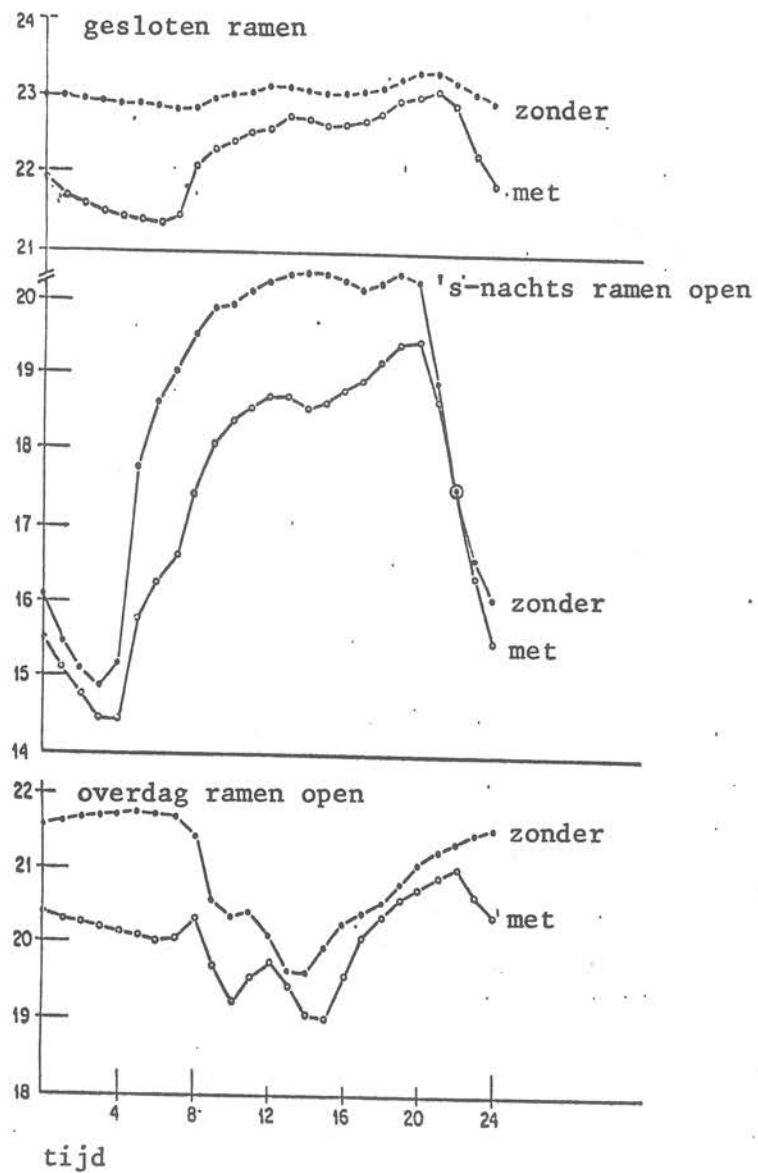
$$\begin{array}{lll} \text{dag} & t_{\text{aanvoer}} = 50,3 - 1,26 & t_{\text{buiten}} \\ \text{nacht} & t_{\text{aanvoer}} = 35,7 - 1,13 & t_{\text{buiten}} \end{array}$$

De watertemperatuurverlaging bedraagt 12 tot 16 °C en wordt toegepast van 21.30 tot 06.30 uur. In januari 1981 is met nachtverlaging gestookt en in februari 1981 zonder. De besparing bleek 12 tot 13 % te bedragen en was ver boven alle verwachtingen. Deze besparing kan niet mede veroorzaakt zijn door de zon omdat in de periode zonder nachtverlaging juist meer zonwarmte werd toegevoerd.

Doordat in een aantal kamers de binnentemperatuur is meegemeten kon worden afgeleid dat met nachtverlaging het temperatuurverschil tussen binnen en buiten 6 % lager was. De hoeveelheid interne en door de zon geleverde warmte is geschat op 30 %. Hierdoor wordt circa 9 % van de besparing veroorzaakt door de lagere binnentemperatuur. Wanneer de toevoerwatertemperatuur zou worden gecorrigeerd, zodat dezelfde binnentemperatuur zou zijn ontstaan, dan is de besparing ten gevolge van nachtverlaging 2,9 %. Tevens wordt aangenomen dat de bewoners hun ramen meer geopend hebben gedurende de periode dat geen nachtverlaging werd toegepast. De gemeten kamertemperaturen zijn in figuur 10 gegeven.

Uit deze onderzoeken blijkt duidelijk dat het alleen meten van het energieverbruik en corrigeren met de buitentemperatuur onvoldoende informatie geeft over de bijdrage van een maatregel aan de energiebesparing. Gezien de gemeten binnentemperatuur mag men verwachten dat de besparing verkregen door een betere regeling van de kamertemperatuur zonder nachtverlaging aanzienlijk hoger zal uitvallen.

kamertemperatuur in °C



Figuur 10. Kamertemperatuur met en zonder nachtverlaging in enkele kamers.

7. NACHTVERLAGING IN FLATS MET KAMERTHERMOSTAATREGELING

In New York staan twee identieke torenflats van 40 verdiepingen met elk 1600 appartementen, het Manhattan Plaza Complex [10]. Deze torens worden elektrisch verwarmd en gekoeld met 3000 individuele fancoil units. De zware constructie, het grote aantal flats en de verschillen in leefgewoonten maken energiebesparing door nachtverlaging schijnbaar onmogelijk.

Alle fancoil units zijn voorzien van apparatuur die via het lichtnet hoogfrequente signalen ontvangen waarmee schakelaars kunnen worden geopend of gesloten. Hiermee wordt in de winter de apparatuur weersafhankelijk gestuurd en in het voor- en naseizoen wordt de apparatuur tussen 15,5 en 24 °C buitentemperatuur uitgeschakeld. Gedurende de dag wordt de verwarming of de koeling uitgeschakeld om 8, 11, 13, 20 en 24 uur. Door het indrukken van een knop kan de bewoner de unit weer in bedrijf stellen. De units worden weer gestart tussen 6 en 7 uur, in 3 groepen, om een belastingspiek om 8 uur te voorkomen. De besparingen werden gemeten als voor- en na-metingen, waarbij het weer werd gecorrigeerd op basis van graaddagen. Hierbij bleek de besparing op de verwarming in de winter 24 %.

Dit effect werd bereikt door:

- 1) weersafhankelijke regeling,
- 2) dag- en nachtverlaging, indien niet uitgeschakeld,
- 3) uitschakelen boven buitentemperaturen van 15,5 °C.

8. FLATS IN NEDERLAND

Het centraal toepassen van nachtverlaging in flats levert betrekkelijk weinig besparing op en geeft voor de bewoners sneller aanleiding tot klachten.

De in Amerika bereikte besparing van 24 % wordt hier al bijna bereikt door het toepassen van warmtemeters. Hiermee wordt 18 % bespaard. Desondanks kan er in flats wel degelijk nog worden bespaard omdat het bij regeling van de toevoerwatertemperatuur heel moeilijk is om de ruimtemtemperatuur te regelen met een radiatorafsluiter.

Met name in de woonkamer kan een thermostatische radiatorafsluiter de temperatuurregeling verbeteren en energie besparen. Dit moet echter dan wel worden gecombineerd met een tijd klok voor nachtverlaging of een automatische dag- en nachtverlaging, die gedurende een aantal uren kan worden overbrugd.

Bij nieuwbouw zal men geen verticale verwarmingsleidingen in de slaapkamers moeten aanbrengen, omdat deze daardoor te warm worden en extra ventilatie noodzakelijk maakt.

9. NACHTVERLAGING IN EENGEZINSWONINGEN

9.1 Bepalen van het effect van nachtverlaging uit gemeten afkoelkrommen

Uit een analyse van de afkoel- en opwarmkrommen van de ruimtetemperatuur kan men afleiden dat het temperatuurverloop met een tweede-orde-systeem kan worden benaderd.

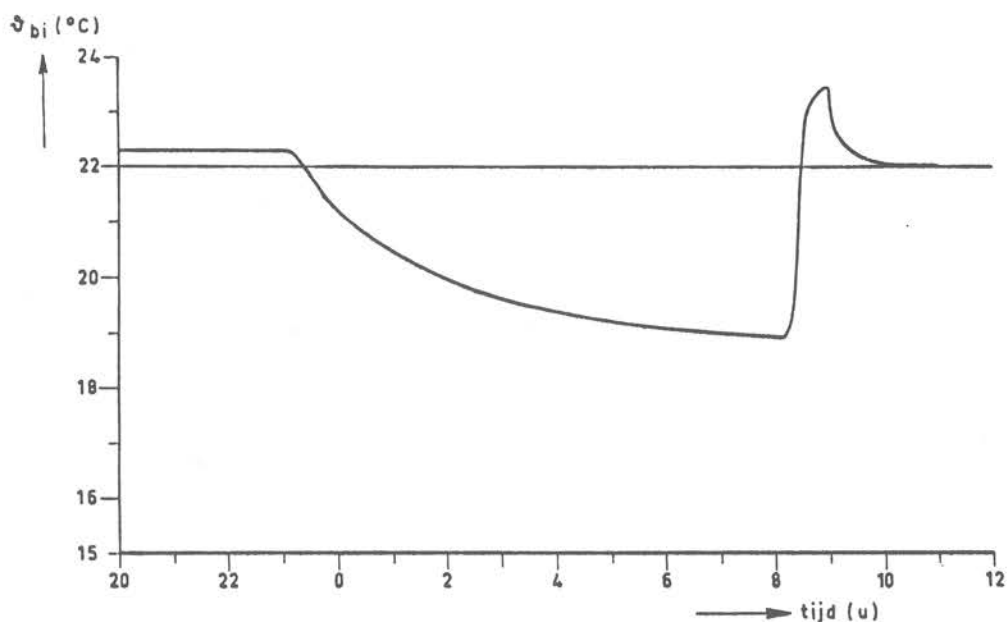
Wanneer men veronderstelt dat het warmteverlies van binnen naar buiten evenredig is met het temperatuurverschil binnen/buiten kan voor verschillende temperatuurniveaus de besparing worden berekend.

De besparing op het energieverbruik is dan nog niet bekend want daarvoor is het nodig om te weten hoeveel warmte van interne bronnen en de zon wordt toegevoerd. Deze bijdrage moet worden geschat. Tevens zal het temperatuurverloop in de woonkamer niet gelijk zijn aan dat van de overige vertrekken in de woning.

Omdat dit voor het afschatten van de mogelijke energiebesparing een gebruikelijke methode is, is hier een voorbeeld uitgewerkt.

Voor het bepalen van de afkoelkrommen zijn de binnen- en buitentemperatuur gedurende een aantal dagen continu geregistreerd. Het betreft hier een geïsoleerde eengezinshoekwoning met 50 % van de radiatoren in bedrijf. In figuur 11 is het gemeten temperatuurverloop gegeven.

temperatuur woonkamer



Figuur 11. Gemeten verloop van de woonkamertemperatuur op halve vertrekhoogte.

Uit de meetresultaten blijkt het volgende:

- het afkoelen gaat eerst snel en later langzaam,
- het opwarmen gaat veel sneller dan het afkoelen,
- er treedt een overshoot op gedurende een half uur,
- de gemiddelde buitentemperatuur bedroeg circa 6,5 °C

Afkoelen:

Na het uitschakelen van de thermostaat heeft men met de volgende effecten te doen:

- De radiatoren koelen langzaam af van circa 50 °C naar de binnentemperatuur.
- De luchttemperatuur die eerst hoger was dan de wandtemperaturen daalt tot een waarde die lager is dan de wandtemperaturen, zodat de binnenwandoppervlakken gaan afkoelen.
- De interne warmtebelasting neemt af.

- Meubilair koelt af.
- De ten gevolge van verwarming aanwezige temperatuurgradiënt in het woonvertrek neemt af.

In figuur 12 is het verloop $\theta_{bi} - \theta_{bu}$ logaritmisch als functie van de tijd uitgezet. Gezien het verloop van de afkoelkromme en de fysische verschijnselen in de woning kan men stellen dat het afkoelen van de woning kan worden benaderd met een tweede-orde-systeem. Volgens [1] geldt hiervoor:

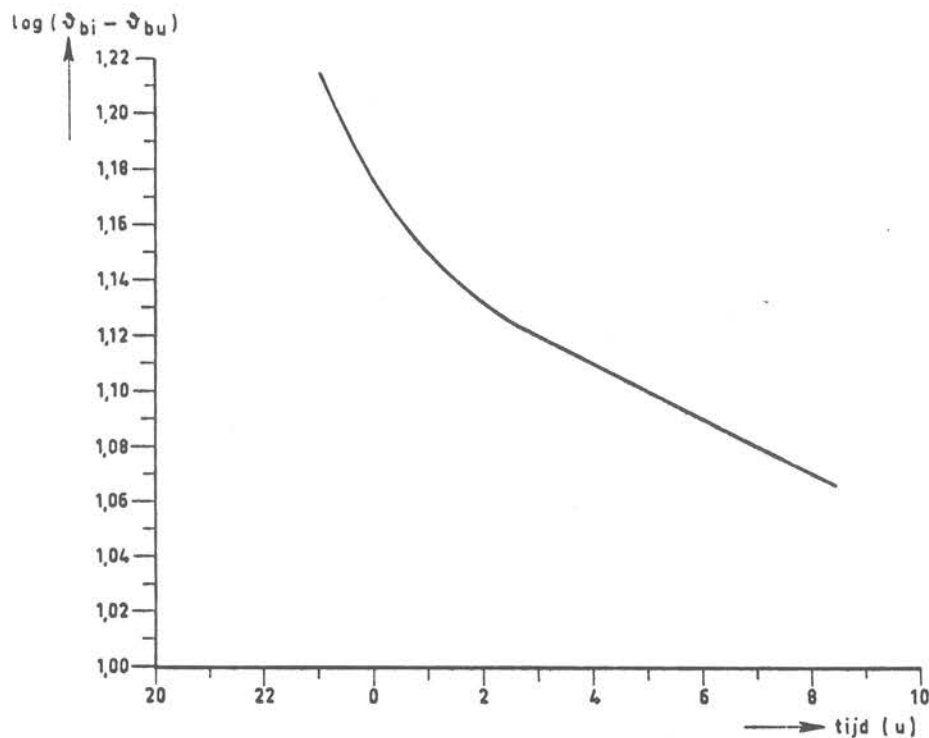
$$\theta_{bi} = (\theta_{bi} - \theta_{bu})_{t=0} \cdot \left\{ \frac{\tau_1(\tau_0 - \tau_2)}{\tau_0(\tau_1 - \tau_2)} e^{-t/\tau_1} + \frac{\tau_2(\tau_1 - \tau_0)}{\tau_0(\tau_1 - \tau_2)} e^{-t/\tau_2} \right\} + \theta_{bu} \quad (5)$$

waarin:

θ_{bi}	binnentemperatuur
θ_{bu}	buitentemperatuur
t	tijd in uren
τ_0, τ_1, τ_2	tijdconstanten

Volgens een in bijlage 1 beschreven methode kan uit dit verloop worden afgeleid dat er geldt:

$$\begin{aligned} \tau_0 &= 13 \text{ uur,} \\ \tau_1 &= 44 \text{ uur,} \\ \tau_2 &= 1,2 \text{ uur.} \end{aligned}$$



Figuur 12. Logaritmisch verloop van $(\vartheta_{bi} - \vartheta_{bu})$ tijdens het afkoelen van de woning.

Opwarmen:

Tijdens opwarmen heeft men te maken met de volgende effecten:

- De radiatoren warmen snel op tot circa 90 °C.
- De luchttemperatuur die eerst lager was dan de wandtemperaturen stijgt ten gevolge van de grote warmteafgifte der radiatoren tot een waarde die enkele K hoger is dan de wandtemperaturen, zodat de wandoppervlakken weer worden opgewarmd.
- De interne belasting neemt toe.
- Door de grote convectieve warmteafgifte van de radiatoren ontstaat een grote temperatuurgradiënt.

Neemt men aan dat de woning zich tijdens het opwarmen eveneens als een tweede-orde-systeem gedraagt dan geldt:

$$\theta_{bi} = \Delta\theta_{bi} \left\{ 1 - \frac{\tau_1(\tau_0 - \tau_2)}{\tau_0(\tau_1 - \tau_2)} e^{-t/\tau_1} - \frac{\tau_2(\tau_1 - \tau_0)}{\tau_0(\tau_1 - \tau_2)} e^{-t/\tau_2} \right\} + (\theta_{bi})_{t=0} \quad (6)$$

$(\theta_{bi})_{t=0}$ is de beginwaarde van de ruimtetemperatuur bij het opwarmen. Hierin kan $\Delta\theta_{bi}$ als volgt worden bepaald:

Bij een ontwerptemperatuur van 21 °C kan het verschil $\theta_{bi} - \theta_{bu}$ 31 K bedragen. Ten gevolge van toeslagen en afrondingen naar boven blijkt de maximale warmteafgifte van de radiatoren echter altijd hoger te zijn (gemiddeld een factor 10/7 voor Nederland).

De eindwaarde van de ruimtetemperatuur bedraagt zodoende:

$$\theta_{bu} + \frac{10}{7} \times 31 = \theta_{bu} + 44,3 \text{ °C.}$$

De temperatuurverhoging die de ruimtetemperatuur dus theoretisch zou moeten kunnen ondergaan bedraagt dan:

$$\Delta\theta_{bi} = 44,3 + \theta_{bu} - (\theta_{bi})_{t=0}.$$

Uit de gemeten opwarmcurve volgens figuur 11 blijkt dat de stijgsnelheid van de ruimtetemperatuur tijdens opwarmen ca. 5,5 K/h bedraagt. Aangezien de opwarmsnelheid in het begin bepaald wordt door τ_0 en het opwarmen aanvankelijk veel sneller plaatsvindt dan het afkoelen zal in (6) een lagere waarde voor τ_0 moeten worden ingevuld om de stijgsnelheid van 5,5 K/h te bereiken.

τ_0 werd hierbij empirisch bepaald op $\tau_0 = 4$ uur bij gelijkblijvende waarden voor τ_1 en τ_2 .

9.2 Globale berekening van het effect van nachtverlaging

Voor de in Nederland meestal toegepaste temperatuurinstellingen van de kamerthermostaat werd het effect van nachtverlaging berekend:

Met behulp van (5) en (6) kan nu het temperatuurverloop tijdens de nacht en tijdens het opwarmen 's-morgens voor diverse buitentemperaturen worden berekend. Hiermee kan de vermindering van het warmteverlies worden afgeleid voor het effect van nachtverlaging als functie van de buitentemperatuur.

Uitgangspunten:

- afkoelen en opwarmen volgens tweede-orde-systeem met verschillende waarden voor τ_0 ,
- nachtperiode loopt van 22.00 uur tot 7.00 uur,
- het overshoot-effect is niet in rekening gebracht,
- ingestelde waarden van de kamerthermostaat:

7 - 19 uur	20 °C,
19 - 22 uur	21 °C,
22 - 7 uur	15 °C,
- warmteverlies is evenredig met temperatuurverschil tussen binnen en buiten.

In figuur 13 zijn de berekende temperatuurverlopen weergegeven.

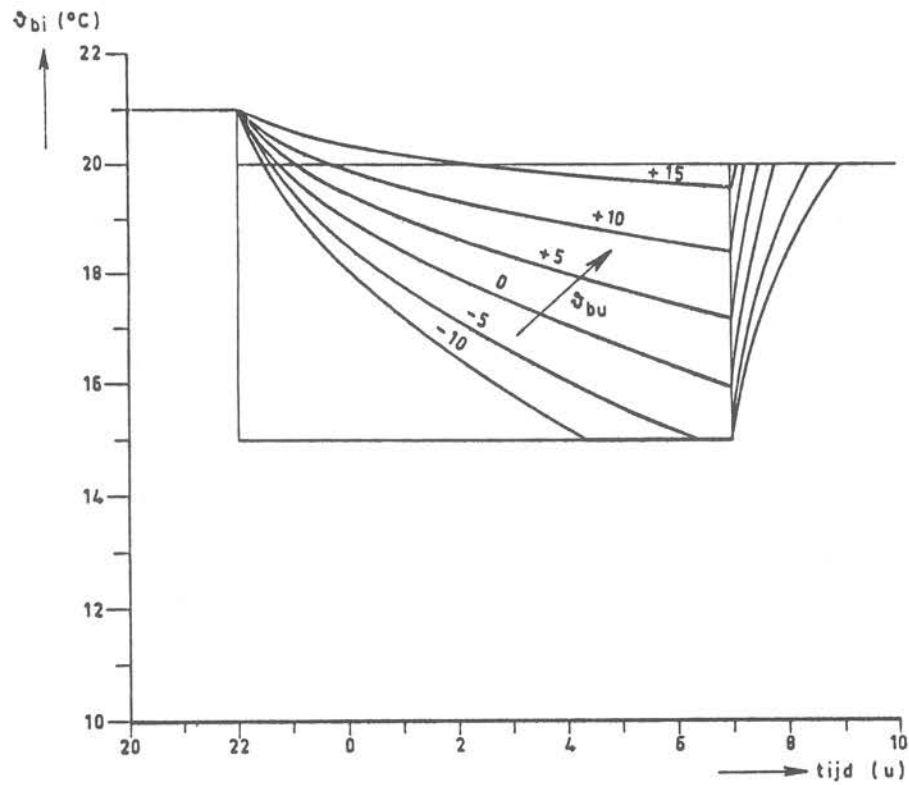
Er blijkt het volgende:

- Alleen bij $\theta_{bu} < -4$ °C wordt een ruimtetemperatuur van 15 °C bereikt.
- Het opwarmen verloopt trager naarmate de buitentemperatuur lager is; hierdoor wordt het effect van nachtverlaging verlengd.

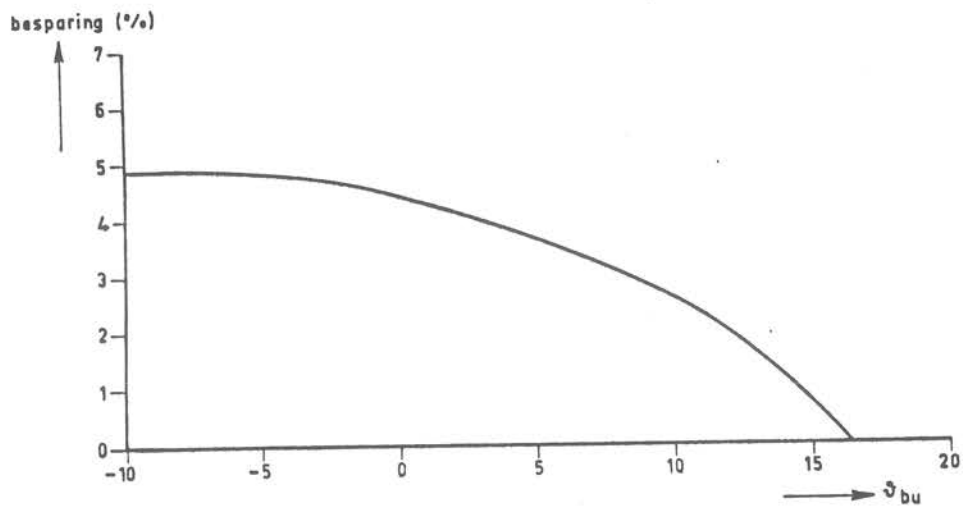
Door de verkregen waarden voor de gemiddelde nachtverlaging te vermenigvuldigen met de tijdsduur waarin deze optreedt verkrijgt men het aantal graaduren dat een maat is voor de besparing op de transmissie- en ventilatieverliezen. In tabel 4 is tevens het aantal graaduren vermeld, indien geen nachtverlaging wordt toegepast.

Tabel 4 Berekening van de procentuele vermindering van het warmteverlies bij verschillende buitentemperaturen.

Buitentemperatuur (°C)	-10	-5	0	5	10	15
Gemiddelde nachtemperatuur (°C)	16,84	17,23	17,87	18,42	19,09	19,77
Tijdsduur (h)	11	10,5	10	8,5	7	4
Aantal graaduren verlaging = $(20 - \theta_{\text{gem}}) \times \text{tijd}$	34,76	29,09	21,30	13,43	6,37	0,92
Aantal graaduren zonder verlaging (= 100 %)	723	603	483	363	243	123
Besparingspercentage (%)	4,8	4,8	4,4	3,7	2,6	0,7



Figuur 13. Berekende temperatuurverlopen bij nachtverlaging van 21 °C naar 15 °C en opwarming naar 20 °C.



Figuur 14. Besparingspercentage op de warmteverliezen van een woning door nachtverlaging als functie van de buitentemperatuur.

In figuur 14 is de berekende besparing als functie van de buitentemperatuur procentueel uitgezet. Uit weerkundige gegevens van De Bilt over 10 jaar kan worden afgeleid hoeveel nachten per stookseizoen bepaalde buitentemperaturen voorkomen. Hierbij is als stookseizoen aangenomen de periode 1 september tot en met 31 mei. Door per aangegeven temperatuurgebied het besparingspercentage te nemen en te vermenigvuldigen met het aantal nachten kan door sommatie en deling door het totaal aantal nachten het gemiddelde besparingspercentage worden berekend.

9.3 Conclusies

De gemiddelde vermindering van het warmteverlies door toepassing van nachtverlaging, gebaseerd op het temperatuurverschil binnen/buiten, blijkt volgens de toegepaste berekeningsmethode voor de onderzochte woning 3,4 % te bedragen.

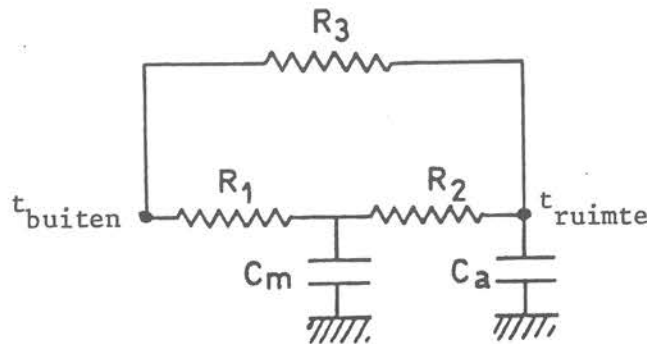
Indien men aanneemt dat de verwarmingsinstallatie slechts 70 % van het warmteverlies van de woning hoeft te leveren, dan bedraagt de energiebesparing:

$$\frac{10}{7} \times 3,4 = 4,9 \text{ \%}.$$

De uiteindelijke energiebesparing blijft met deze methode een schatting omdat niet vooraf kan worden bepaald welke deel van de warmte-toevoer wordt geleverd door de verwarming.

10. BEPALEN VAN HET EFFECT VAN NACHTVERLAGING MET EENVOUDIG MODEL

Om de interne warmtebronnen en de zon in rekening te brengen is in België [12] een vereenvoudigd tweede-orde-systeem gebruikt van een woning. Hiermee kan de energiebesparing worden geschat. Uitgedrukt in elektrische weerstanden en capaciteiten ziet zo'n model er als volgt uit:

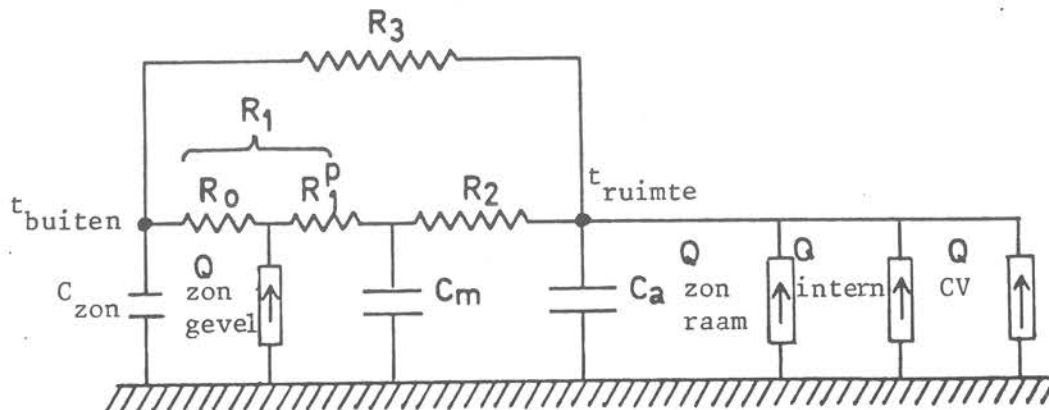


Figuur 15. Tweede-orde-model woning.

Hierin vormen R_1 , R_2 en C_m de gebouwmassa en het warmteverlies naar buiten, R_3 het warmteverlies door ramen en ventilatie en C_a de warmte-inhoud van de lucht vermenigvuldigd met een factor 4 tot 6.

Deze factor is nodig omdat in C_a niet alleen de lucht zit maar ook een deel van de wanden.

Aan dit model zijn een aantal invloedsfactoren toegevoegd zodat het schema als volgt verandert:



Figuur 16. Tweede-orde-model woning met warmtetoevoer van andere bronnen.

De toevoegingen zijn:

$q_{\text{zon gevel}}$	zonbelasting op gevel
$q_{\text{zon ramen}}$	zonbelasting via de ramen
$q_{\text{interne warmte}}$	warmteproductie personen en apparaten
q_{cv}	warmtetoevoer CV-installatie

Met dit eenvoudige model zijn eerst de gemeten afkoelkrommen in een woning nagerekend en waar nodig zijn de R- en C-waarden bijgesteld. Vervolgens is bepaald hoeveel energiebesparing met nachtverlaging kan worden bereikt. De betreffende woning heeft luchtverwarming die gelijktijdig naar alle kamers lucht toevoert. Het betreft hier ongeïsoleerde eengezinswoningen, twee onder een kap, met een vloeroppervlak van 100 m². De specifieke warmteafgifte is 602 W/K. Het energieverbruik is berekend voor 7 dagen in februari met 8 uur nachtverlaging door de kamerthermostaat van 19 naar 14 °C in te stellen. De gemiddelde buitentemperatuur is 6,5 °C en de globale horizontale zonstraling is 1000 Wh/m². Het effect van de nachtverlaging is voor een aantal woningvarianten berekend (tabel 5). De woningvarianten komen tot stand door het schatten van andere R- en C-waarden die voor de betreffende variant gelden.

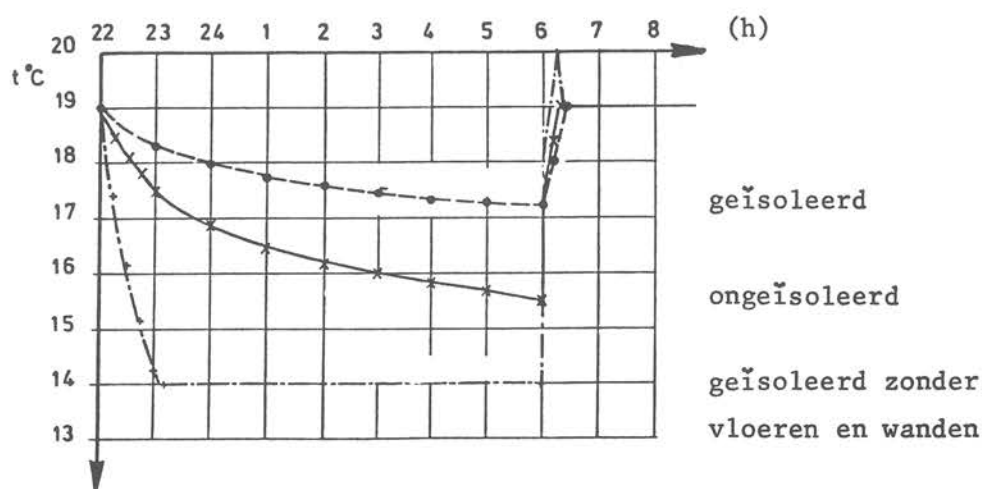
In de ongeïsoleerde woning is de energiebesparing 7,7 % en in de geïsoleerde woning 3,5 %. Bij het verlengen van de nachtverlaging neemt de energiebesparing duidelijk toe.

In de geïsoleerde woning is nog nagegaan wat het effect is van isolatie aan de binnen- of buitenzijde van de gevel. De invloed hiervan is te verwaarlozen.

Tabel 5. Energiebesparing door nachtverlaging gedurende 7 dagen in februari.

Woninguitvoering	Specifiek warmteverlies W/K	Continu kWh	Energie 5 °C nachtverlaging kWh	Besparing %	Tijdconstante uren
<u>Ongeïsoleerd</u>					
standaardwoning	602	1156	1067	7,7	49,5
11 uur nachtverlaging	602	1156	999	13,6	49,5
met bewoners 11 kWh/dag	602	1098	1014	7,7	49,5
zonder tussenvloer en binnenwanden	602	1154	1009	12,6	29,0
<u>Geïsoleerd en dubbelglas</u>					
standaardwoning	244	416	399	4,0	136
isolatie binnenzijde	240	408	392	3,8	132
isolatie buitenzijde	246	421	405	3,8	134
met bewoners 11 kWh/dag	244	358	345	3,5	136
zonder tussenvloeren en binnenwanden	243	416	359	13,7	76,2

Wanneer in het model de interne massa van de woningen wordt vermindert door de accumulatie van de tussenvloeren en de binnenmuren weg te laten neemt de besparing aanzienlijk toe. In dat geval is de nachttemperatuur al na 1 uur bereikt, terwijl in de standaardwoning de nachttemperatuur niet verder daalt dan 17,2 °C (figuur 17). Het is wel de vraag of op jaarbasis deze geringe massa ook zo'n grote besparing oplevert. Bij hogere buitentemperaturen zal ten gevolge van nachtverlaging namelijk minder besparing optreden. Tevens kan minder zonnewarmte worden opgeslagen in de woning waardoor de benutting van zonnewarmte in het voor- en najaar zal afnemen.



Figuur 17. Temperatuur met nachtverlaging voor één dag in februari.

11. PRAKTIJKMETINGEN IN RODENBERG BIJ BRUSSEL

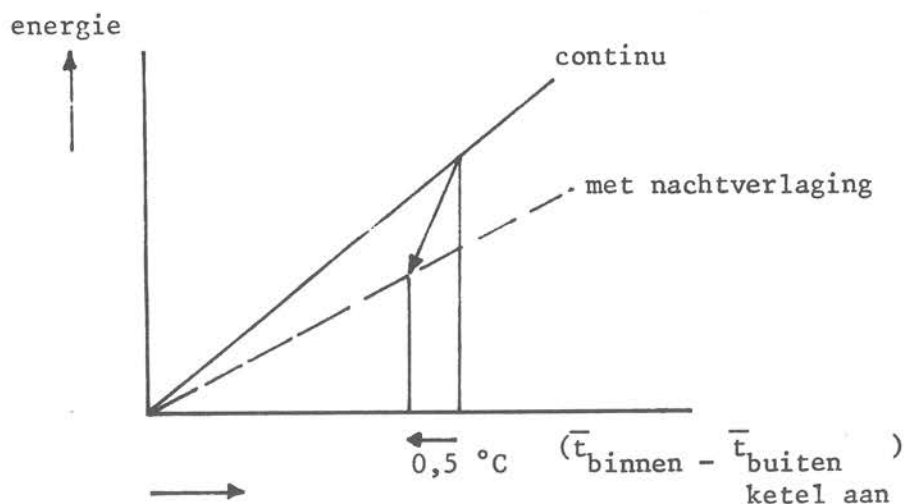
Het effect van nachtverlaging is ook in de praktijk gemeten in 88 woningen van hetzelfde type met lucht- of radiatorenverwarming [13]. Het energieverbruik per woningtype is voor het stookseizoen 1979-1980 in tabel 6 gegeven.

Tabel 6. Gemeten energieverbruik per woninginstallatie-combinatie.

	Geen nachtverlaging		Met nachtverlaging		Besparing
	$\bar{M}$	= 3057 m ³	$\bar{M}$	= 2540 m ³	
Radiatoren	st.dev.	= 623 m ³	st.dev.	= 782 m ³	17 %
	N	= 8	N	= 28	
	$\bar{M}$	= 3436 m ³	$\bar{M}$	= 2708 m ³	
Lucht	st.dev.	= 645 m ³	st.dev.	= 667 m ³	21 %
	N	= 6	N	= 28	
Verschil		11 %		6 %	

Bewoners die in het stookseizoen 1981-1982 met nachtverlaging begonnen gebruikten per graaddag 9 % minder energie dan het stookseizoen ervoor.

De gemeten besparingen lopen uiteen van ¹⁷6 tot 21 %. Het was niet mogelijk om na te gaan in hoeverre de verkregen besparing afkomstig was van andere maatregelen. Men kan verwachten dat bewoners die nachtverlaging toepassen ook andere maatregelen hebben genomen om energie te besparen. In een onbewoonde woning met luchtverwarming is achtereenvolgens met en zonder nachtverlaging het energieverbruik gemeten. Met lineaire regressie is vervolgens het energieverbruik bepaald als functie van het temperatuurverschil tussen de gemiddelde temperatuur binnen en buiten, wanneer de ketel in bedrijf is.



Figuur 18. Energieverbruik als relatie van $(\bar{t}_{\text{binnen}} - \bar{t}_{\text{buiten}})$ ketel aan

Door de nachtverlaging daalde de temperatuur gemiddeld 0,5 °C. Deze temperatuurdaling moet in de besparing worden meegenomen. Met nachtverlaging bleek het energieverbruik slecht te kunnen worden verklaard uit het temperatuurverschil tussen binnen en buiten. De correlatiecoëfficiënt was slechts 0,45. Zonder nachtverlaging bedroeg deze voor de dagverbruiken 0,85 en voor het gemiddelde weekverbruik 0,99. Door voor de situatie met nachtverlaging alleen de buitentemperatuur in beschouwing te nemen, gedurende de periode dat de ketel warmte moet leveren, kon de correlatiecoëfficiënt worden verhoogd naar 0,69. Uit de metingen blijkt dat de energiebesparing circa 10 % bedraagt. Dit is hoger dan de 7,7 % die met het eenvoudige rekenmodel is bepaald.

12. BEPALING VAN HET EFFECT VAN NACHTVERLAGING MET EEN MEERKAMERMODEL

Om het effect van nachtverlaging in een praktijk situatie in Nederland te bepalen bleek erg moeilijk. In het lopende onderzoek in Oosterhout met de HR-ketels pasten alle bewoners al nachtverlaging toe. Een praktijkmeting in bewoonde woningen in dit project was daarom niet mogelijk.

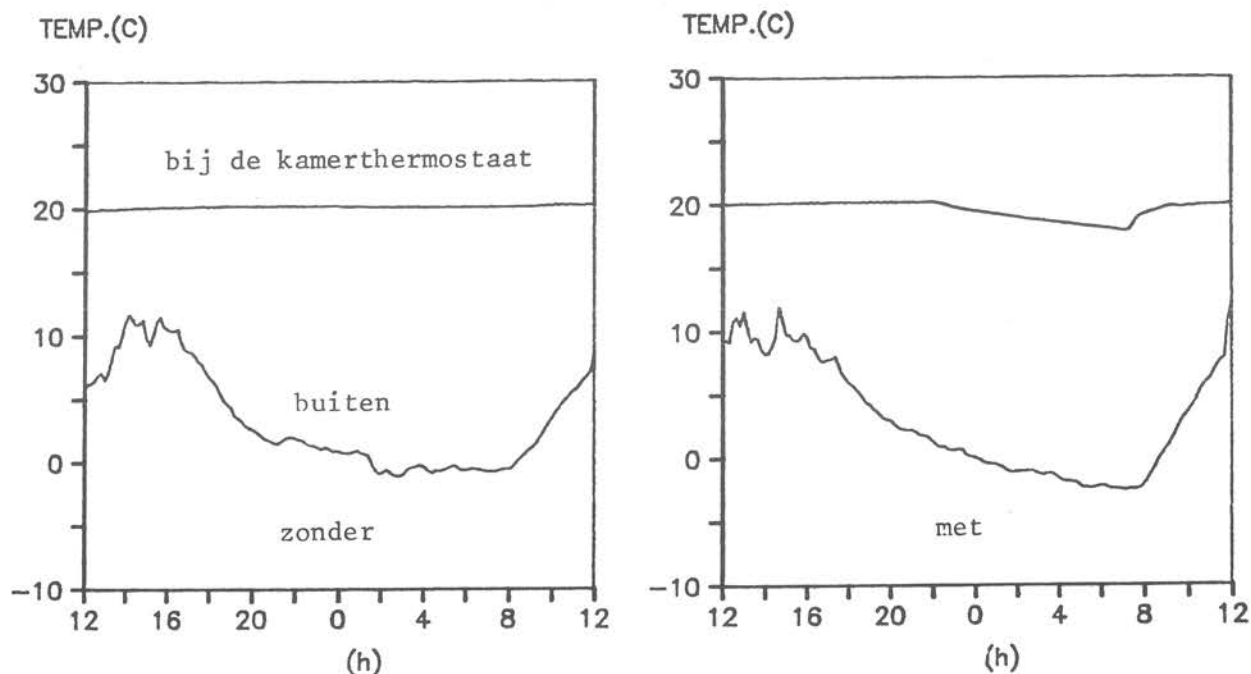
Het energiebesparingseffect van nachtverlaging is daarom met een meerkamermodel berekend [6]. Dit meerkamermodel bevat de onderdelen van Nederlandse woningen, zoals de warmtebron op zolder, leidingen door de slaapkamers, slaapkamers op de eerste verdieping, temperatuurgradiënt ten gevolge van de verwarming en het bewonersgedrag voor ventilatie en verwarming per kamer.

Om inzicht te krijgen in wat zich afspeelt aan warmteprocessen en ter controle van het rekenmodel zijn in een onbewoonde woning metingen verricht. Hierbij is ook met en zonder nachtverlaging gemeten. De resultaten van twee meetdagen met hetzelfde weertype met en zonder nachtverlaging zijn in de figuur 19 tot en met 22 vermeld. Er is nachtverlaging toegepast van 22 tot 7 uur 's-ochtends.

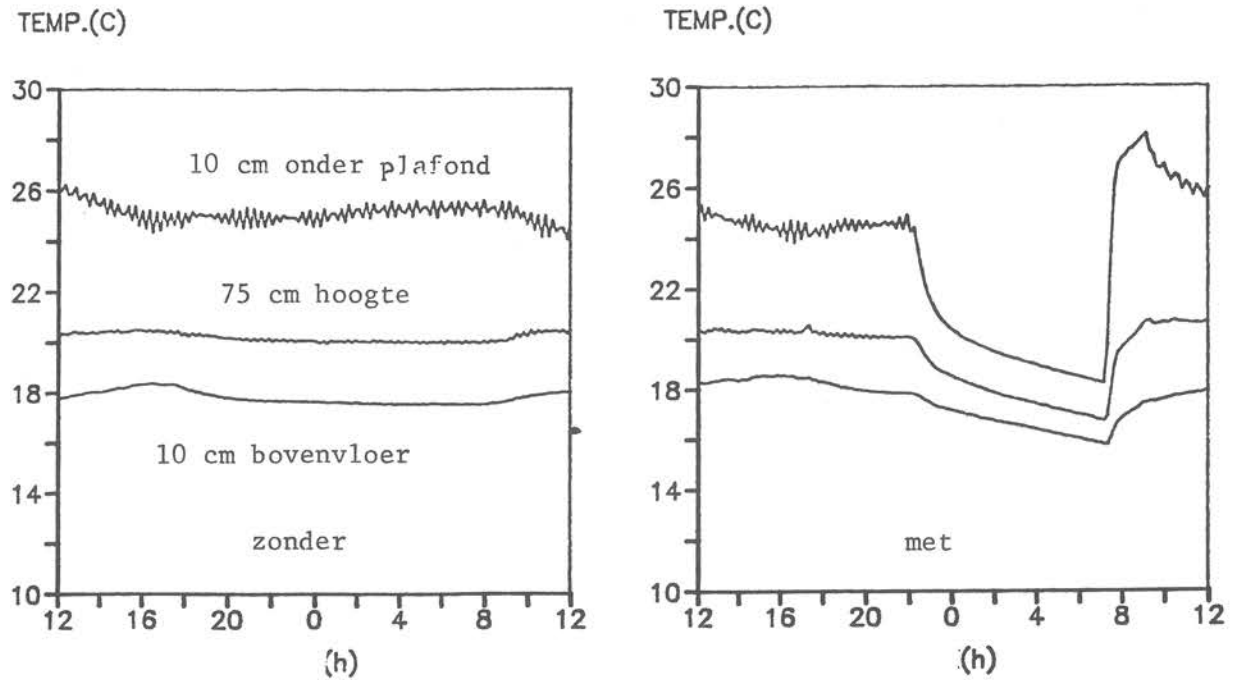
In figuur 20 is het temperatuurverloop op drie hoogten in de woonkamer uitgezet. Hieruit blijkt duidelijk de gradiënt in de woonkamer. Bij deze woning staat de radiator tegen een binnenmuur waardoor de gradiënt aanzienlijk hoger is dan normaal.

Wanneer men de afkoelkromme van de zolder en de badkamer (figuur 21) vergelijkt met de woonkamer dan blijkt dat de tijdconstanten voor alle kamers niet gelijk zijn. Tevens blijkt de zolder overdag warmer te worden dan de woonkamer.

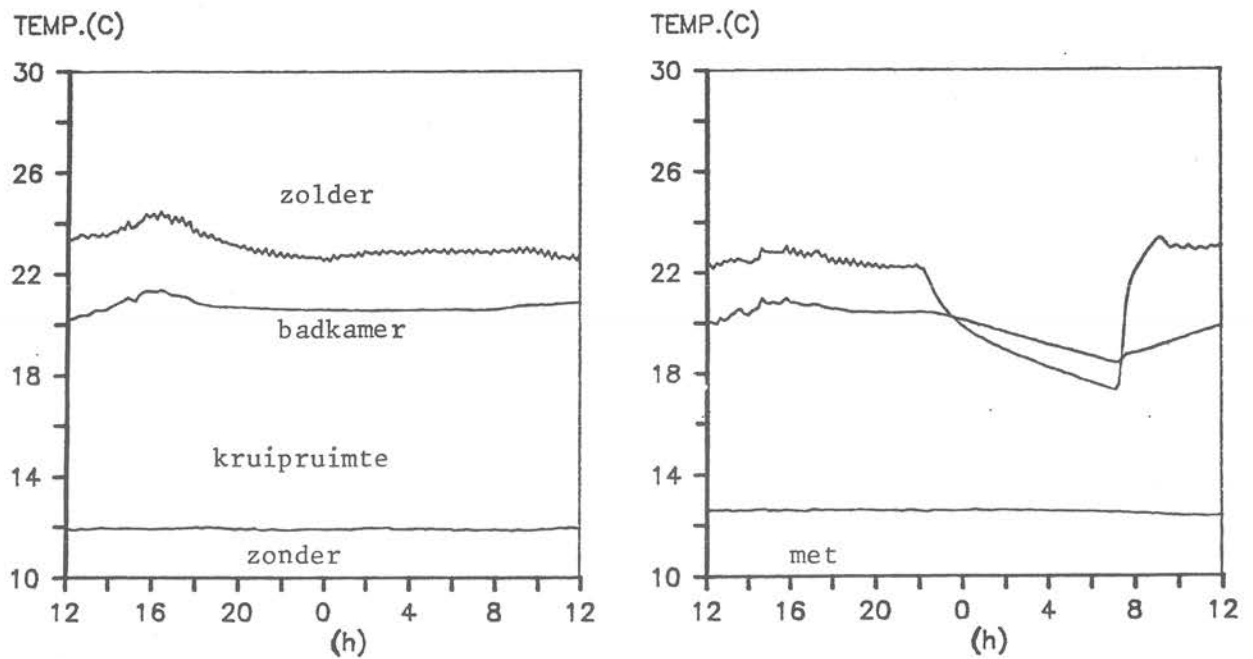
In de woonkamer en de keuken is aangegeven hoe het warmtetransport door het plafond verloopt. Tijdens het opwarmen van de woning zijn deze transporten aanzienlijk.



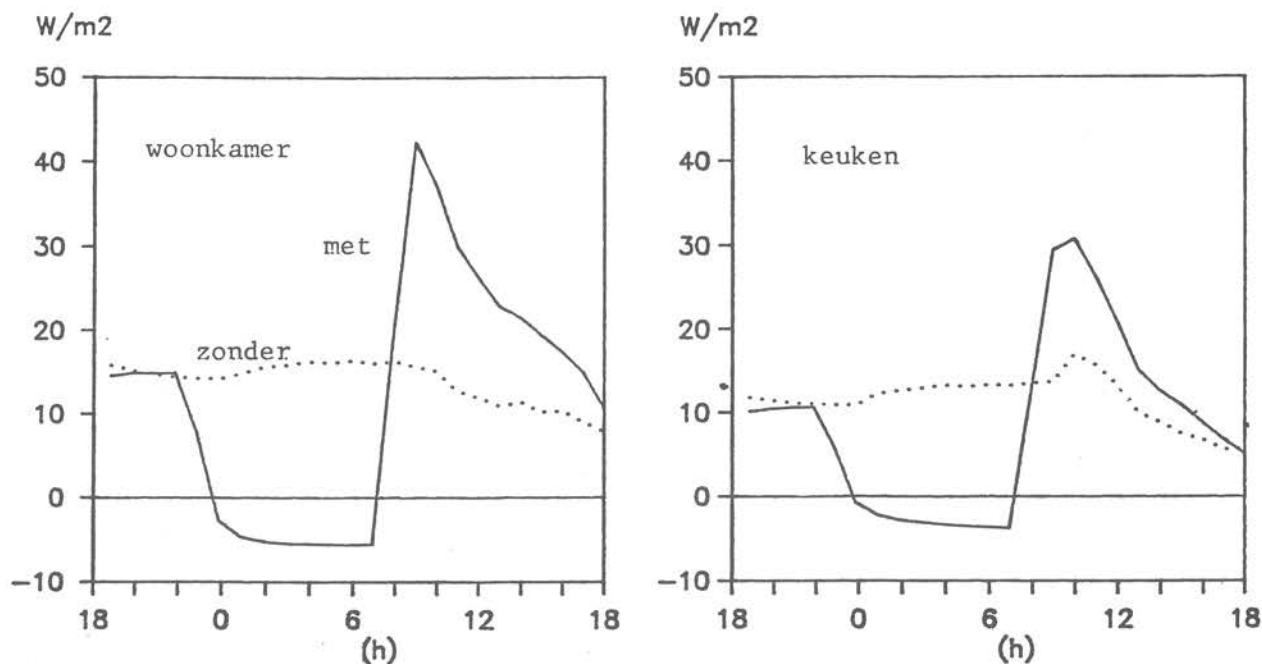
Figuur 19. Gemeten temperaturen.



Figuur 20. Gemeten luchttemperaturen in de woonkamer.



Figuur 21. Gemeten luchttemperaturen in verschillende ruimten.



Figuur 22. Gemeten warmtestromen door het plafond.

Het model moet voor de Nederlandse situatie dus de woningindeling met installatie en de optredende temperatuurgradiënten bevatten. Hiervoor is destijds in samenwerking met het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer een zogenaamd meerkamermodel ontwikkeld. Hierin kan de warmte naar buiten en intern door de constructie dynamisch worden berekend. Tevens zijn de warmteafgiften van de ketel, leidingen en radiatoren opgenomen zoals deze in normale installaties plaatsvinden. Daarnaast kan per kamer het gebruik van de verwarming, openen van ramen, het gebruik van vitrage, gordijnen, zonweringen en de interne warmtebelasting vrij worden gekozen.

Voor een eengezinswoning (bijlage 2) is het energieverbruik met en zonder nachtverlaging berekend. Voor de weergegevens is gebruik gemaakt van het verkorte referentiejaar [14] van Van Paassen, waarbij het effect van 14 dagen overeenkomen met drie maanden werkelijk weer. De berekening loopt van september tot en met mei.

Voor een normale CV-ketel en een hoog-rendement ketel is met en zonder nachtverlaging het volgende verbruik berekend (tabel 7)

Tabel 7. Berekend energieverbruik met meerkamermodel voor een stookseizoen.

	zonder nachtverlaging	met nachtverlaging
Transmissie + ventilatie kWh	17208	16421
warmtevraag kWh verwarming	10169	9374
Energieverbruik m ³ gas		
normale CV-ketel	1530	1413
hoog-rendement ketel	1254	1168
Seizoenrendement %		
normale CV-ketel	72	72
hoog-rendement ketel	88	87

Uit de berekeningen blijkt dat het totale warmteverlies door middel van transmissie en ventilatie verminderd met 4,7 %. De warmtevraag van de woning is echter afgenomen met 7,8 %.

De energiebesparing door nachtverlaging is 7,6 % voor een gewone CV-ketel en 6,7 % voor een hoog-rendement ketel. De besparing is met een HR-ketel minder omdat tijdens de opwarmperiode de watertemperatuur toeneemt, waardoor het rendement daalt.

Het toepassen van een hoog-rendement ketel bespaart 245 m³ gas ofwel 17,3 % wanneer nachtverlaging wordt toegepast. Dit resultaat komt goed overeen met de gemeten energiebesparing [3].

Voor een winterdag met een buitentemperatuur van 0 tot 4 °C is het effect op de resulterende temperatuur bepaald. Hierbij is rekening gehouden met afzonderlijke zichtfactoren van de wanden naar een persoon in het midden van de woonkamer. Het bleek dat de resulterende temperatuur overdag en 's-avonds gemiddeld 0,1 °C daalde wanneer nachtverlaging werd toegepast. De invloed hiervan is verder buiten beschouwing gelaten.

13. CONCLUSIES

In september 1983 hebben de verschillende deelnemende landen in Annex III hun resultaten besproken. Een deel van deze onderzoeken is in de diverse paragrafen behandeld. Uit de verrichte onderzoeken werden de volgende conclusies getrokken:

- Voor het bepalen van het effect van energiebesparende maatregelen moeten, naast het energieverbruik, ook gegevens worden verzameld van de binnentemperatuur en het bewonersgedrag.
- Voor het vergelijken van "gemeten" bewonersgedrag in een project is het verder van belang dat per woningtype een standaardgedrag bekend is.
- Om bij de opzet van metingen gedragsveranderingen vooraf in te schatten is meer kennis nodig over de reactie van bewoners op binnenklimaatfactoren.
- Omdat in veel gevallen de bewoner op een toenemende binnentemperatuur reageert met meer te ventileren, is het van belang na te gaan hoe gedragsbeïnvloeding met betrekking tot ventilatie mogelijk is.

Uit de gemeten binnentemperaturen kan men concluderen dat:

- Voor flats en gestapelde nieuwbouw met één centrale toevoerwater-temperatuurregeling zal door het verbeteren van de temperatuurregeling en met het toepassen van individuele nachtverlaging in de woonkamer nog veel energie kunnen worden bespaard.
- In de eengezinswoningen moet de temperatuur in de slaapkamers lager worden. Dit kan worden bereikt door minder warmte toe te voeren naar de slaapkamers (door de vloer en door de CV-leidingen) of door het toevoeren van onverwarmde ventilatielucht, die daarna ook elders in het huis wordt gebruikt.

Uit het handboek en de verrichte metingen blijkt dat:

- Het meten van energieverbruiken alleen onvoldoende is om het effect van een energiebesparende maatregel te bepalen.
Naast het energieverbruik moet ook het bewonersgedrag ten aanzien van temperatuur en ventilatiegedrag en de weergegevens worden gemeten.
- Er blijken aanzienlijke verschillen op te treden in de besparingen, hoewel men allemaal spreekt over besparing door nachtverlaging. Deze verschillen worden veroorzaakt door de wijze van nachtverlaging, de wijze van de samenstelling van de te vergelijken groepen en de wijze van corrigeren en vergelijken van de gemeten energieverbruiken.
Bij het noemen van de besparingen moeten de bijbehorende randvoorwaarden worden vermeld.

14. LITERATUUR

- | | | |
|-----|--|--|
| [1] | Fracastoro, G.V. en
M.D. Lyberg | Guiding principles concerning design of experiments, instrumentation and measuring techniques.
Swedish Council for Building Research D11; 1983. |
| [2] | Van Raaij, W.F. en
T.M.M. Verhallen | Patterns of residential energy behaviour.
Erasmus Universiteit Rotterdam, mei 1982, Paper on economic psychology, nr. 21. |
| [3] | Ham, Ph.J. | Energiebesparing in de praktijk door toepassing van HR-ketels.
TVVL-TNO-dag, oktober 1983. |
| [4] | Haas, S.A.M. de | Twee miljoen kamerthermostaten en hun instelling.
Verwarming en Ventilatie, juni 1983, nr.6, blz. 345. |

- [5] Künzel, H. Repräsentativumfrage über die Heiz- und Lüftungsverhältnisse in Wohnungen. Gesundheits Ingenieur, 1979, Heft 9, Seite 261.
- [6] Dubbeld, M. e.a. Evaluation of energy conservation measures for night set back. Publikatie 867, IMG-TNO, juni 1983.
- [7] De Gids, W.F. de, e.a. Investigation of the relationship between the natural ventilation of a flat and meteorological conditions. Publication 620, IMG-TNO, 1978.
- [8] Jensen, L. Assessment of night set back in apartment buildings. Tekniska Högskolan i Lund, januari 1983, Contract 810757-1.
- [9] Mørk, P. Night temperature set back in dwellings. Danish Building Research Institute, 1983.
- [10] Harrje, D.T. e.a. Temperature set back as a means to save energy in a variety of buildings in the United States. Princeton University, september 1983.
- [11] Ham, Ph.J. Untersuchung der dynamischen Eigenschaften von Temperaturfühlern für Lüftkanäle. HLH 27 (1976), nr. 9, blz. 65, IMG-TNO, publikatie 540.
- [12] Caluwaerts, P. en C. Masy Estimation of night time temperature set back using dynamic simplified models. WTCB Universiteit Luik, Belgisch technisch rapport, nr. 3, september 1983.

- [13] Caluwaerts, P. Synthesis of Belgian Experiments and simulations of night time temperature set back.
WTCB, Brussel, februari 1983.
- [14] Paassen, A.H.C. van A new approach to the calculation of the energy consumption in buildings based on methods of statistical analysis.
Proefschrift TH-Delft, oktober 1982.
- [15] Gilli, P.G. Wärmersparnis von Raumheizungen bei Betriebsunterbrechung ein einfaches Näherungsverfahren.
Gesundheits Ingenieur, nr. 102 (1981), Heft 5, Seite 227.
- [16] Ackermans, J.M.A.
 en G.L.M. Augenbroe Optimale nacht- en weekendverlaging in kantoorgebouwen met radiatorverwarming.
Verwarming en Ventilatie, augustus 1982, blz. 599.
- [17] Beek, F.M. e.a. Beleving en gebruik van ramen en woningen.
Nationale Woningraad, september 1981, Almere.
- [18] Gass, J. en
 H. Mühlebach Swiss investigation on energy conservation by the night set back of the feedwater temperature in Heating Systems.
Empa, Switzerland, juni 1983.

BIJLAGE 1

A METHOD TO DETERMINE THE TIME CONSTANTS OF A SECOND-ORDER-SYSTEM WITH ACCELERATED START

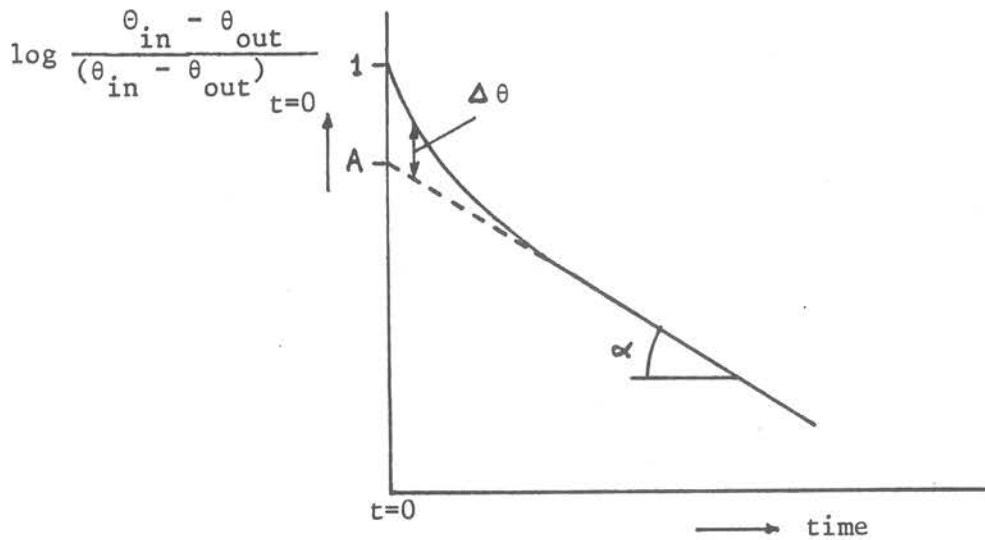


Figure 1. Second-order-system with accelerated start.

The cooling down-curve of θ_{in} is assumed to be a second-order-system of the form:

$$\theta_{in} - \theta_{out} = (\theta_{in} - \theta_{out})_{t=0} \times \left\{ A e^{-t/\tau_1} + B e^{-t/\tau_2} \right\}$$

(see figure 1)

It can theoretically be determined that τ_2 is always smaller than τ_1 , so after a while there is still only the influence of τ_1 ($t > \approx 4 \tau_2$). τ_2 produces an accelerated reaction at the beginning.

In figure 1 the dotted line represents the term $A e^{-t/\tau_1}$.

τ_1 can be derived from the slope with:

$$\tau_1 = \frac{p \cdot q \cdot \log e}{\text{tg } \alpha}$$

in which:

p = scalefactor for the logarithmic scale (distance between log 0,1 and log 1 in mm),

q = scalefactor for the time (hours/mm).

The value of A can be read from the logarithmic scale.

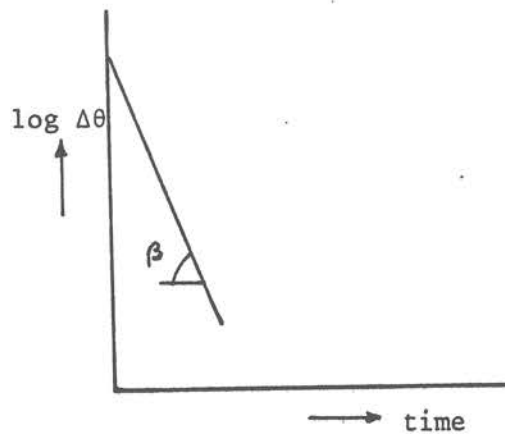
Each point of the dotted line can now be calculated with:

$$A e^{-t/\tau_1}$$

When plotting the difference $\Delta\theta$ again, the curve represents the term $B e^{-t/\tau_2}$. If the line is straight we have a pure second-order-system for which τ_2 can be derived from the slope with:

$$\tau_2 = \frac{p.q. \log e}{\text{tg } \beta}$$

Figure 2. Determining τ_2 .



If the line is not straight, it is a higher-order-system and we can either try to find a third time constant by repeating the last procedure or pull a straight line through the points for a second-order-approach. Theoretically it can be determined that there concerns:

$$A = \frac{\tau_1(\tau_0 - \tau_2)}{\tau_0(\tau_1 - \tau_2)} \quad \text{and} \quad B = \frac{\tau_2(\tau_1 - \tau_0)}{\tau_0(\tau_1 - \tau_2)} \quad (A + B = 1)$$

τ_0 is a constant with the unit time which can be derived from the slope of the very beginning of the curve (see figure 3) with:

$$\tau_0 = \frac{p.q. \log e}{\text{tg } \gamma}$$

However a safer way to determine τ_0 is to solve it from the given formula for A with the known values of τ_1 , τ_2 and A.

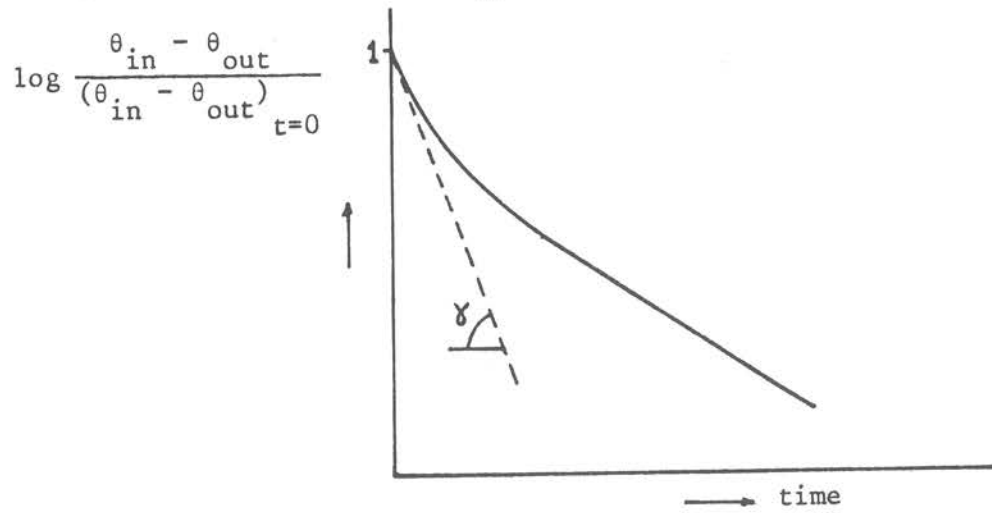


Figure 3. Determining τ_0 .

For more detailed information about the behaviour of second-order systems see [11].

BIJLAGE 2

A3.1 Ontwerp van de Nederlandse referentiewoning

De berekeningen zijn gemaakt voor een eengezinstussenwoning met een tuinkamer en een gesloten keuken (figuur 1).

De eerste verdieping van de woning bestaat uit drie slaapkamers en een badkamer. De zolder wordt afgesloten met een deur op de overloop van de eerste verdieping. Er is uitgegaan van een traditioneel gebouwde woning.

Isolatieniveau $It = 9$ en $\bar{k} = 1,12 \text{ W/m}^2\text{K}$,

specifiek warmteverlies bij 1 luchtwisseling per uur 264 W/K.

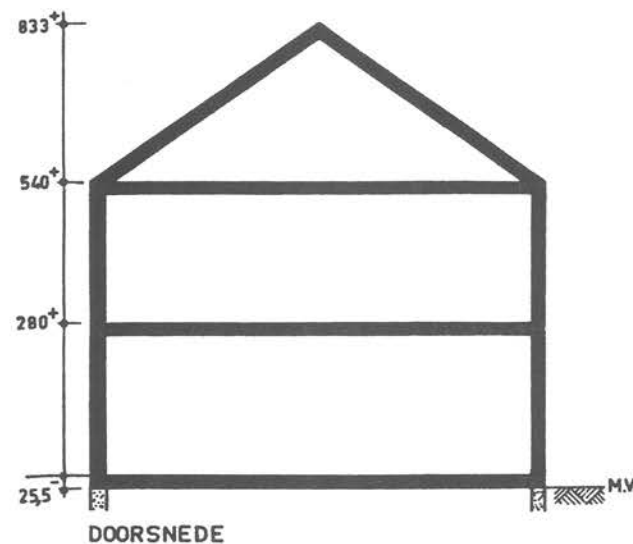
De gebruikte materialen zijn:

		k (W/m ² K)
Buitenmuur	geïsoleerd metselwerk	0,7
Binnenwand	gips	2,2
Woningscheidende wand	metselwerk	2,0
Begane grond	geïsoleerd systeemvloer	0,7
Tussenvloer	beton	2,5
Dak	spaanplaat met isolatie	0,7
Glas	begane grond, dubbel	3,0
	eerste verdieping, enkel	5,7

Figuur 1 Woningafmetingen



ZOLDER ⑧



OPPERVLAKKEN VAN DE CONSTRUCTIES 1*

TUSSENWONING:

gevel : 39,3 m²

dak : 53,5 m²

vloer : 44,9 m²

HOEKWONING:

gevel : 99,7 m²

dak : 56,6 m²

vloer : 44,9 m²

RAMEN EN DEUREN:

1) hal (voor deur + bovenlicht) 2,5 m²

2) toilet (raam) 0,2 m²

3) keuken (raam) 2,7 m²

4) woonk. (tuindeur + bovenlicht) 2,3 m²

5) woonkamer (raam) 4,4 m²

6) badkamer (raam) 0,7 m²

7) 3 sl.p.k. (ramen) 3x2,1m² = 6,3 m²

8) dak (raam) 1,4 m²

OPPERVLAK A_o 2*

TUSSENWONING:

A_o = 158,2 m²

HOEKWONING

A_o = 221,6 m²

INHOUD V 3*

TUSSENWONING:

V = 308,4 m³

HOEKWONING:

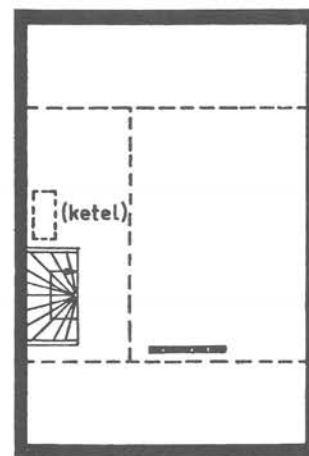
V = 325,6 m³

NOTEN:

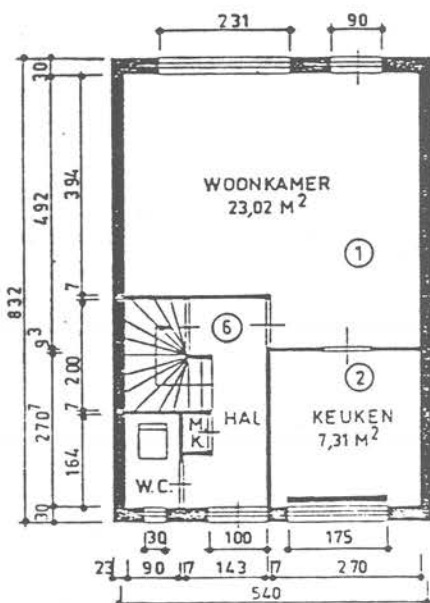
1* AFGEROND OP ÉÉN DECIMAAL

2* VOLGENS NEN 1068 (1981)-THERMISCHE ISOLATIE VAN GEBOUWEN.

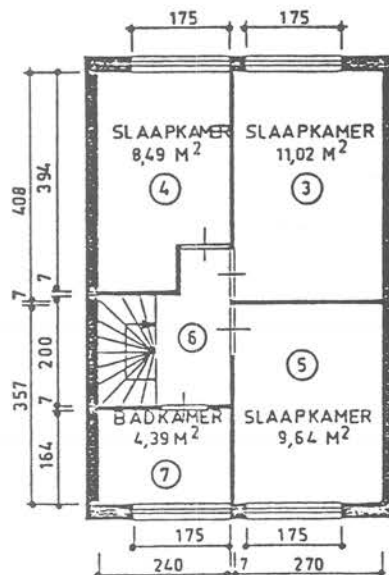
3* VOLGENS NEN 2320 (1965 MET AANVULLING 1975) THERMINOLOGIE VAN OPPERVLAKKEN EN INHOUDEN.



ZOLDER



BEGANE GROND



VERDIEPING

Voor het bewonersgedrag is uitgegaan van een gezin van vier personen waarvan er drie overdag buitenshuis verblijven.

Er is uitgegaan van de in Nederland gebruikelijke situatie dat vitrage aanwezig is [16]. 's Avonds en 's nachts worden de gordijnen gesloten.

Voor de radiatoren is aangenomen dat deze in de slaapkamers en de zolder geopend zijn van 18.00 uur 's avonds tot 8.00 uur 's morgens.

De douche blijft continu open. Doordat nachtverlaging wordt toegepast zal niet de gehele nacht warmte worden toegevoerd.

De radiatoren in de keuken en de woonkamer staan altijd open. De temperatuurinstelling in de woonkamer voor de verschillende perioden van de dag is 19/21/16 °C respectievelijk voor de dag/avond/nacht. Het gebruik van de gordijnen, het openen van ramen, de interne vrijkomende warmte en de verlichting zijn in bijgaand schema per kamer weergegeven.

In de keuken is continue intere warmteproductie aanwezig ten gevolge van de koelkast en een diepvriezer.

De verlichting in de woonkamer wordt op de aangegeven tijdstippen alleen ingeschakeld als de verlichtingssterkte bij het raam in de woonkamer aan de achtergevel minder dan 175 lux bedraagt. Deze verlichtingssterkte wordt bepaald voor een punt op 2 m afstand van het raam op 0,85 m hoogte.

Het bewonersgedrag kan als energiezuinig worden omschreven.

Door het gebruik van de woning zal de woonkamerdeur niet altijd gesloten zijn. Uit metingen te Oosterhout blijkt dat de deur ca. 33 % van de tijd openstaat. In het model is de deur gedurende 2 x 3 uur enigermate geopend.

Wat de zonbelasting betreft is ervan uitgegaan dat, indien de woonkamer 3 °C warmer wordt dan de ingestelde waarde, de gordijnen of een binnenzonwering wordt gesloten.

De natuurlijke ventilatie is in het model onder andere afhankelijk van de windsnelheid en het temperatuurverschil tussen binnen en buiten. Bij deze berekeningen komt de ventilatie ten gevolge van infiltratie door kieren en open ramen overeen met ca. 1,0 luchtwisselingen per uur.

Het interne luchttransport van de geïnfiltreerde lucht is gekozen overeenkomstig de meest voorkomende situatie.

Bij het openen van ramen is ervan uitgegaan dat de ramen 15 minuten zijn geopend. De ventilatiehoeveelheid wordt hierbij in het model over één uur verdeeld.

De toe- en de afvoer vinden dan in dezelfde ruimte plaats. De hoeveelheid ventilatielucht is hier ook een functie van de windsnelheid en het temperatuurverschil tussen binnen en buiten.

Bij windsnelheden boven 8 m/s en buitentemperaturen lager dan -3°C is aangenomen dat geen ramen worden geopend.

11e TVVL-TNO-lezingendag
gehouden op 27 oktober 1983 te Delft
Georganiseerd door:



Nederlandse Technische Vereniging
voor Verwarming en Luchtbehandeling



Instituut voor Milieuhygiene en Gezondheidstechniek TNO
Afdeling Geluid, Licht en Binnenklimaat.

