

# Onderzoek in de klimaatproefkamer van TNO-bouw



door ing. P.J. Ham\*



J.M. Koppers\*

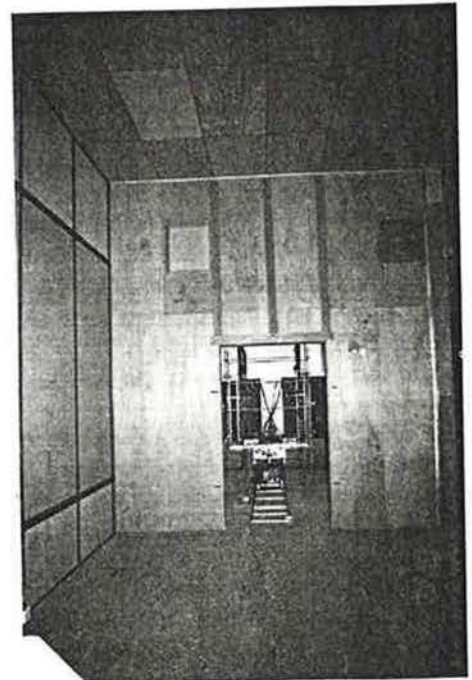
*Investigation in the climate testing facility of TNO-Building and Construction Research*

## Inleiding

De proefkamer is opgesteld in een geklimatiseerde hal van 18 x 9 x 7 m. De vloer van de proefkamer bevindt zich op een hoogte van 1 m boven de vloer van de hal; het beschikbare vloeroppervlak beslaat 10 x 6 m. Op deze vloer kunnen verplaatsbare wandpanelen worden aangebracht met een hoogte van 4 m die precies aansluiten op een vaste plafondconstructie die dezelfde afmetingen heeft als de vloer. Vervolgens wordt een verlaagd systeemplafond aangebracht zoals dit in de te onderzoeken situatie zal worden toegepast. Hierin kunnen eventueel de geïntegreerde verlichtingsornamenten en installatievoorzieningen worden opgenomen. De binnenwanden, de vloer en het vaste plafond zijn uitgevoerd als goed geïsoleerde panelen (12 mm multiplex +150 mm polystyreen + 10 mm multiplex).

Zowel aan een korte als aan een lange zijde van de proefkamer bevindt zich een luchtplenum waarvan de afmetingen kunnen worden aangepast aan de kamerafmetingen. In deze beide plenums kunnen buitencondities worden gesimuleerd van -15 °C tot +40 °C. De vaste gevelconstructies langs de plenums bestaan uit hardhouten kozijnen van  $b \times h = 1,20 \times 4$  m met een borstweringhoogte van 0,65 m en enkele of dubbele beglazing tot een hoogte van 3 m. Door het aanbrengen van isolatieplaten op het glas kunnen de raamafmetingen worden aangepast aan de te onderzoeken situatie. Door het aanbrengen van isolatie op de borstweringpanelen kan de isolatiewaarde hiervan op de gewenste waarde worden gebracht. Het is ook mogelijk de gevels uit te voeren met dubbele beglazing maar dit is in de meeste gevallen voor een goede simulatie niet nodig:

De invloed van het buitenklimaat op het binnenklimaat is bij een gesloten gevel slechts merkbaar via de optredende oppervlaktetemperatuur van het binnenste raamvlak. Deze temperatuur kan bij dubbele beglazing voor een gegeven buitensituatie met of zonder zonnbelasting worden berekend. In de proefkamer kan dit worden gesimuleerd met een aangepaste plenumtemperatuur waardoor het enkele glas dezelfde oppervlaktetemperatuur verkrijgt. Directe zonnbelasting in het vertrek kan, afhankelijk van de situatie, worden



**Figuur 1. Proefkamer met meetstatief**

nagebootst met elektrisch verwarmde binnenwanden, binnenzonwering en/of als een convectieve warmtebron. Wanneer geen hoekvertrek maar een tussenvertrek moet worden beschouwd, worden voor één der gevelconstructies geïsoleerde wandpanelen geplaatst. Het plenum wordt daarbij niet meer geconditioneerd zodat hierin dezelfde temperatuur zal heersen als in de geklimatiseerde hal.

## Beschikbare installaties

Voor de klimatisering van beide plenums en de levering van gekoelde of

## Samenvatting

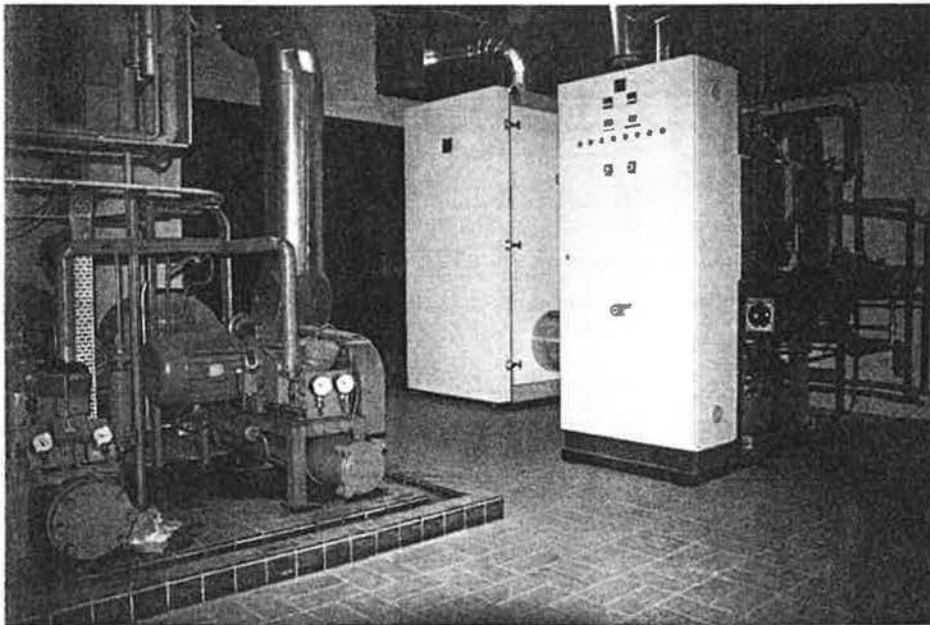
Om in een ontwerp stadium te onderzoeken of een gekozen gevelconstructie in combinatie met een systeem voor verwarming, koeling en ventilatie voldoet, kan gebruik worden gemaakt van de klimaatproefkamer van TNO-Bouw te Delft. Hierin kan een te onderzoeken situatie (kantoor, woonkamer, enz.) met diverse installatievarianten op schaal 1:1 worden nagebootst.

De gebruiksmogelijkheden van de proefkamer worden aan de hand van enkele voorbeelden van uitgevoerde onderzoeken toegelicht.

## Summary

To investigate whether a chosen façade construction in combination with a system for heating, cooling and ventilation during the design stages is adequate, utilisation can be made of the climate testing facilities available at TNO Building and Construction Research in Delft. In this a situation to be investigated can be imitated (office, living room, etc) with numerous installation variations with a scale of 1:1. The utilisation possibilities of the testing facility is explained in a few examples of investigations carried out.

\* TNO-Bouw, afdeling Binnenmilieu, Bouwfysica en Installaties



**Figuur 2. Technische ruimte met koelmachines**

verwarmde lucht aan de proefkamer zijn de volgende installaties aanwezig:

- regelbare koelmachines + 4 regelbare ventilatoren voor algemene doeleinden;
- 3 regelbare koeling- of verwarmingsunits met ventilatoren.

Voor de levering van gekoeld en verwarmd water zijn de volgende installaties aanwezig:

- een verplaatsbare regelbare elektrische boiler voor warmwateropwekking (0-13,5 kW),
- een verplaatsbare aan/uit geregelde koelunit.

### Meetfaciliteiten

Om het klimaat in de proefkamer onder stationaire condities te kunnen beoordelen wordt gebruik gemaakt van een automatisch meetstatief dat met behulp van servomotoren in drie richtingen kan worden bewogen. Het meetstatief wordt in de ruimte op rails geplaatst die zich in de lengterichting (x-richting) in het vertrek bevinden en waarover het gehele meetstatief kan worden verplaatst. Op het meetstatief bevinden zich 36 meetpunten voor temperatuur en luchtsnelheid die tegelijkertijd binnen bepaalde grenzen vanuit de statiefpositie in de richting van de zijwanden (y-richting) en in de hoogte (z-richting) kunnen worden verplaatst. Uiteraard kunnen ook andere meetinstrumenten op het statief worden geplaatst (b.v. zwarte-bol temperatuur). Met een hiervoor in eigen beheer ontwikkeld meet- en besturingsprogramma worden de meetgegevens verzameld in een tevoren te definiëren en vrij te kiezen aantal meetvlakken en posities in de

ruimte.

De meetpunten en het statief worden vanuit het programma steeds naar een gewenste positie gedirigeerd waarna deze positie gedurende een zekere, instelbare tijd blijft gehandhaafd. In deze tijd worden de meetpunten in hoog tempo uitgelezen waarbij de door de meetinstrumenten afgegeven elektrische signalen direct worden omgerekend in de te bepalen fysische grootte. Behalve de gemiddelde waarden worden tevens de laagst en de hoogst voorgekomen waarden vastgelegd alsmede de standaardafwijking, hieruit kan bij de luchtsnelheidsmeting b.v. de turbulentiegraad worden afgeleid.

Voor het uitwerken van de meetresultaten kan gebruik worden gemaakt van een voor dit doel ontwikkeld hulpprogramma waarmee in de beschouwde meetvlakken de isothermen (lijnen met gelijke temperatuur) en isovellen (lijnen met gelijke luchtsnelheid) kunnen worden geplott.

Behalve de variabele meetpunten op het statief kunnen nog maximaal 160 vaste meetsignalen worden verwerkt. Hierbij kan worden gedacht aan:

- diverse oppervlaktetemperaturen in de ruimte;
- warmtestroommeting; de proefkamer is voorzien van een aantal warmtestroommeters in de wandpanelen waarmee een sluitende warmtebalans ( $\pm 25$  W) kan worden opgesteld;
- temperatuurmeetpunten ter controle van de randcondities, zoals wateraanvoer en -retour, luchtaanvoer en -afvoer, plenumtemperaturen, enz;
- lucht- en waterdebieten; alle lucht- en

watersystemen zijn uitgerust met meetflenzen of debietmeters die door middel van elektrische drukverschilometers kunnen worden uitgelezen.

Ter bepaling van plaatselijke ventilatie in de ruimte kan verder gebruik worden gemaakt van tracergas-technieken en voor het zichtbaar maken van stromingsverschijnselen zijn een 'gaswolscanner', een rook- en bellengenerator alsmede lichtbronnen voor spleetverlichting beschikbaar. Deze lichtbronnen zijn zodanig ontworpen dat geen emissie van warmte plaatsvindt waardoor verstoring van het stromingsprofiel zou kunnen ontstaan.

### Meetmethoden

De luchtsnelheden in de ruimte worden bepaald met richting-ongevoelige thermoelektrische anemometers die in eigen beheer worden gefabriceerd en geijkt in een windtunnel voor lage luchtsnelheden. De nauwkeurigheid van de anemometers bedraagt ca 10% bij lage luchtsnelheden ( $v > 0,10$  m/s) en ca 5% bij  $v = 0,4$  m/s.

Voor de temperatuurmetingen wordt gebruik gemaakt van koper-constantaan thermokoppels. De hiermee opgewekte thermo-emk's worden stroomloos gemeten m.b.v. een Data-Acquisitie systeem. De nauwkeurigheid waarmee deze emk's worden uitgelezen bedraagt  $\pm 1 \mu V$ .

Voor het meten van de turbulentie-intensiteit kan gebruik gemaakt worden van een drietal anemometers met zeer kleine tijdconstante (0,2 s). Voor het bepalen van de comfort-parameters kan desgewenst gebruik gemaakt worden van een klimaat-meetset.

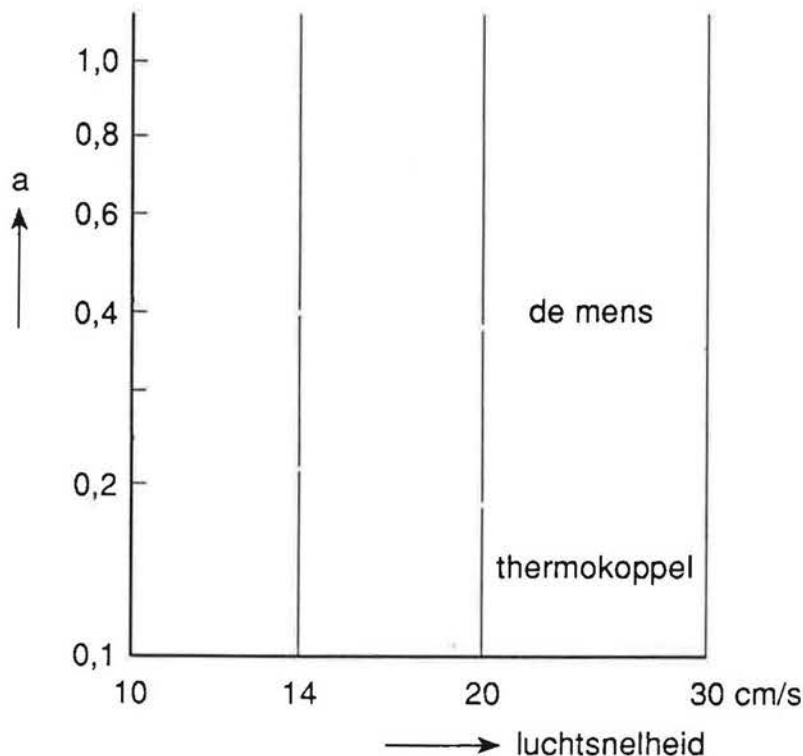
### Bepaling van de comforttemperatuur

De thermische behaaglijkheid in een vertrek wordt o.a. bepaald door een combinatie van de luchttemperatuur ( $\Theta_{lucht}$ ) en de gemiddelde stralingstemperatuur ( $\Theta_{str}$ ); men spreekt in dit verband over de comforttemperatuur ( $\Theta_{corr}$ ) waarvoor geldt:

$$\Theta_{corr} = (1-a) \cdot \Theta_{lucht} + a \cdot \Theta_{str} \quad (1)$$

Hierin is (a) de stralingsgevoeligheid die bij gemiddelde condities in de ruimte ca 0,4 bedraagt en die bij toenemende luchtsnelheid verder afneemt (figuur 3).

In de proefkamer worden de luchttemperaturen bepaald met thermokoppels die in zekere mate ook stralingsgevoelig zijn. Deze stralingsgevoeligheid werd in een windtunneltje bepaald waarin de



**Figuur 3. Stralingsgevoeligheid van de mens en van een thermokoppel als functie van de luchtsnelheid**

stralings- en luchttemperatuur onafhankelijk stapvormig kunnen worden veranderd. De resultaten zijn eveneens in figuur 3 weergegeven. Het blijkt dat het door een thermokoppel afgegeven sig-

naal geen goede maat is voor het comfortgevoel van de mens. Daarom wordt veelal gebruik gemaakt van een zwarte bol waarin het thermokoppel is ondergebracht en die ongeveer dezelfde stra-

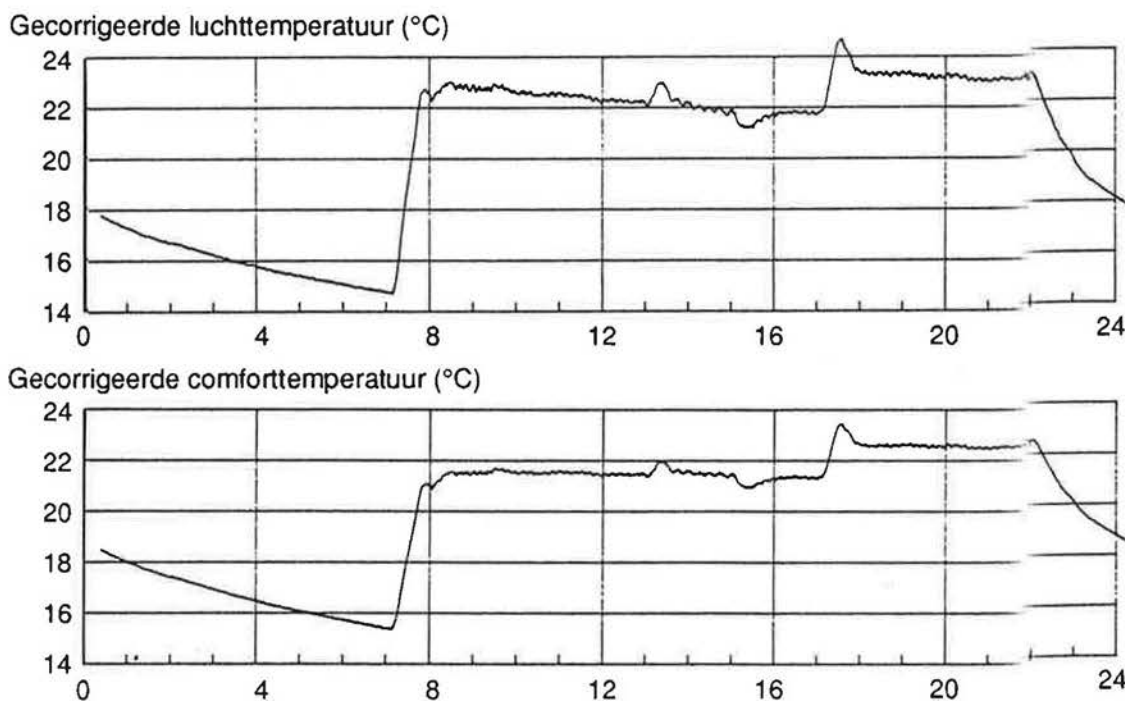
lingsuitwisseling heeft als de mens. Het gebruik van de zwarte bol introduceert echter een grotere traagheid bij de metingen wat vooral bij onderzoek naar het dynamische gedrag van installatie-onderdelen bezwaarlijk is. Er wordt daarom de volgende procedure gevolgd:

Doordat de oppervlaktetemperaturen van alle stralende vlakken op elk moment bekend zijn, kunnen per meetpunt de zichtfactoren en daarmee de gemiddelde stralingsstemperatuur worden berekend. Doordat ook de luchtsnelheid in hetzelfde meetpunt wordt gemeten, kan de werkelijke luchttemperatuur worden afgeleid en kan tenslotte de comforttemperatuur worden berekend. Deze procedure is in het uitwerkprogramma opgenomen. In figuur 4 is een voorbeeld van een, op deze wijze uitgewerkte, meting te zien.

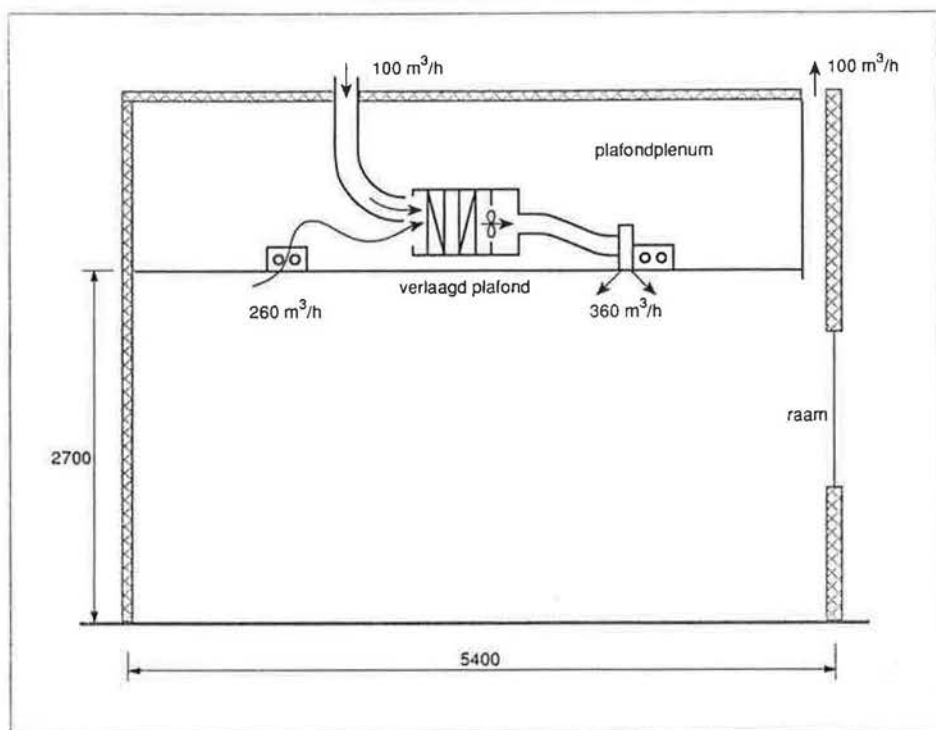
#### Enkele voorbeelden van uitgevoerde onderzoeken

##### Plafond met geïntegreerde fancoil-unit

In figuur 5 is een dwarsnede gegeven van een proefkamer-indeling waarbij zich boven het plafond een fancoil-unit bevindt die gedeeltelijk met recirculatielucht en gedeeltelijk met voorbehandelde verse lucht wordt gevoed.



**Figuur 4. Gecorrigeerd verloop van de lucht- en comforttemperatuur, zoals afgeleid uit een proefkammermeting**



**Figuur 5. Langsdoorsnede van de proefkamer met de installatie boven het verlaagde plafond**

De luchttoevoer vindt plaats via lijnroosters in het plafond. Zowel voor de zomer- als voor de wintersituatie werd onderzocht hoe de lijnroosters moeten worden ingesteld om een tochtvrije werkomgeving te verkrijgen. Tevens werd de invloed van het toepassen van een 'klimaatraam' onderzocht. In figuur 6 is een meetresultaat getoond waaruit blijkt dat in de werkomgeving een zeer stabiel binnenklimaat kan worden verkregen.

**Klimaatproblemen in een high-care couveuseafdeling**

In een high-care couveuseafdeling van een ziekenhuis ontstonden problemen met condensatie binnen in een couveuse. Als oorzaak werd gevonden, dat de wijze van luchttoevoer, in combinatie met een later aangebrachte koof en een flinke warmteproductie, nabij de couveuse tot zeer hoge luchtsnelheden langs de couveusewand leidde (zie figuur 7). Hierdoor werd de couveusewand plaatselijk te veel afgekoeld.

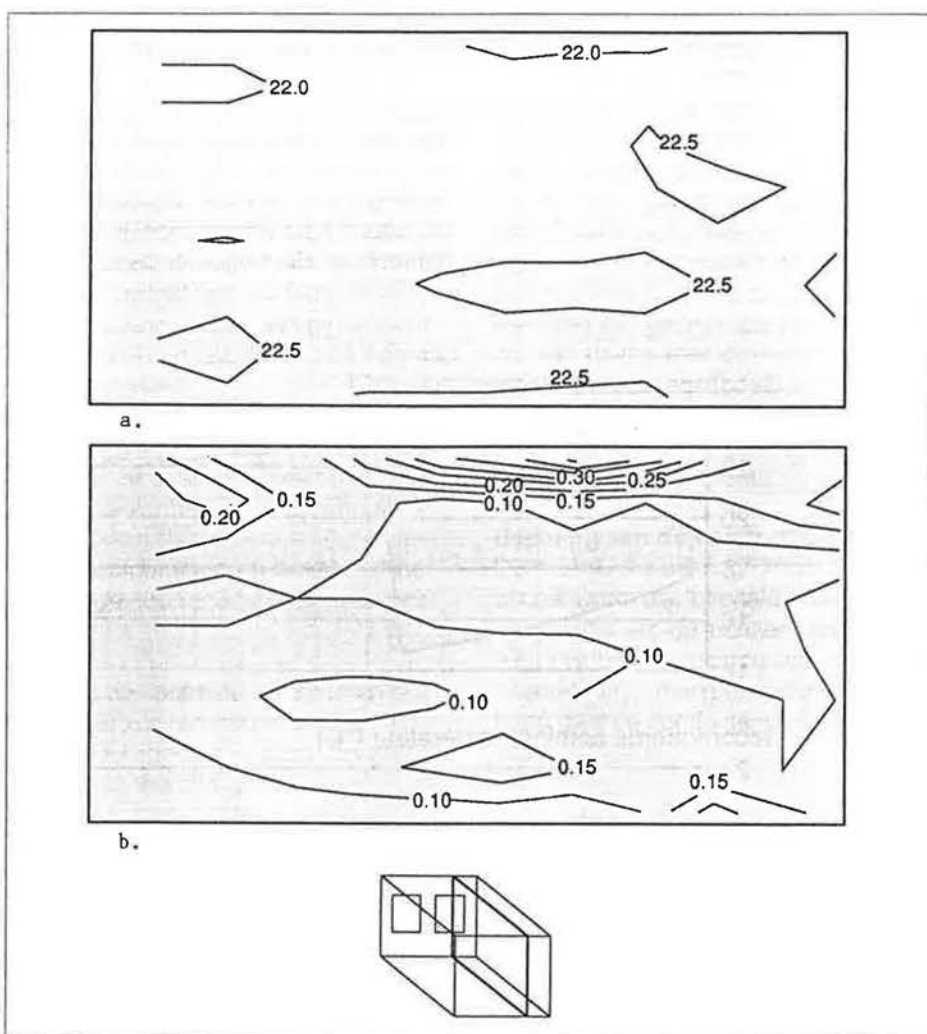
In de proefkamer werd bepaald dat dit zonder ingrijpende veranderingen te ondervangen was door toepassing van een gewijzigd inblaasornament in combinatie met spleet-afvoer vanuit het verticale vlak van de koof. Het inblaasornament is voorzien van een tweetal roosters waaruit turbulentie-arme luchttoevoer plaatsvindt met een luchtsnelheid van 0,35 m/s. Als bijkomend voordeel werd geconstateerd dat de temperatuur bij de couveuses met 1,5 K toe-

neemt ten opzichte van de gelijkblijvende gemiddelde ruimtetemperatuur (ca 26 °C). Dit betekent dat de temperatuur in de verblijfszone van het personeel lager is geworden waardoor, in combinatie met de hogere luchtsnelheden onder de roosters, een beter werkklimaat is ontstaan.

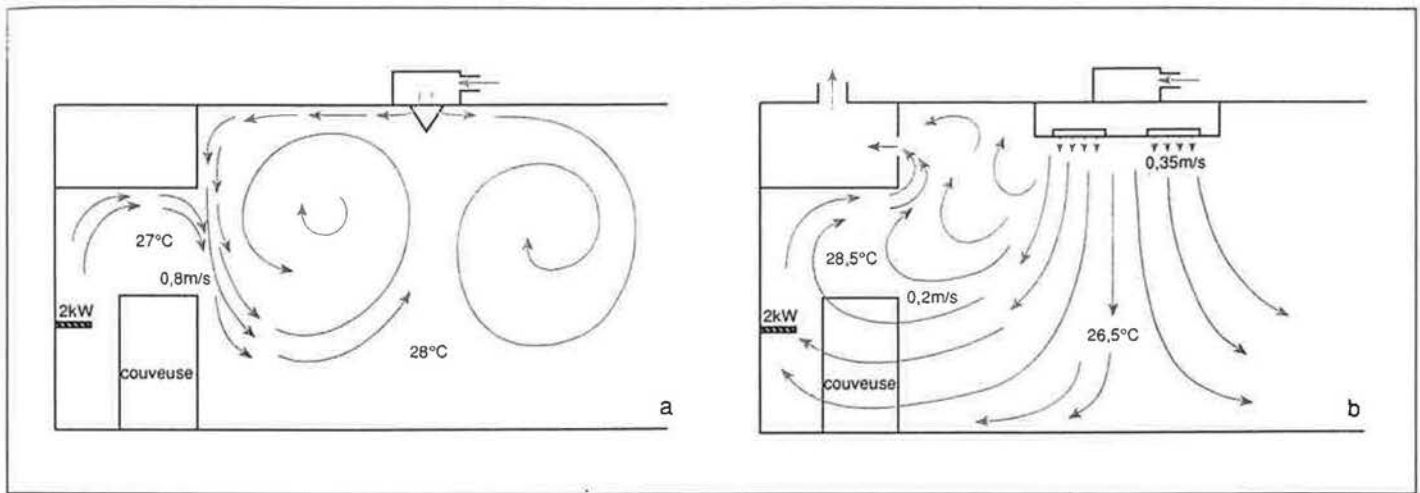
**Consumenten-onderzoek naar klokthermostaten**

In opdracht van een buitenlandse consumentenorganisatie werd een onderzoek ingesteld naar de regeltechnische eigenschappen van een tiental klokthermostaten. Hiertoe werd de proefkamer uitgevoerd met betegels op de vloer en een warmte-accumulerende gipswand waarop de klokthermostaten beurtelings werden gemonteerd (zie figuur 8).

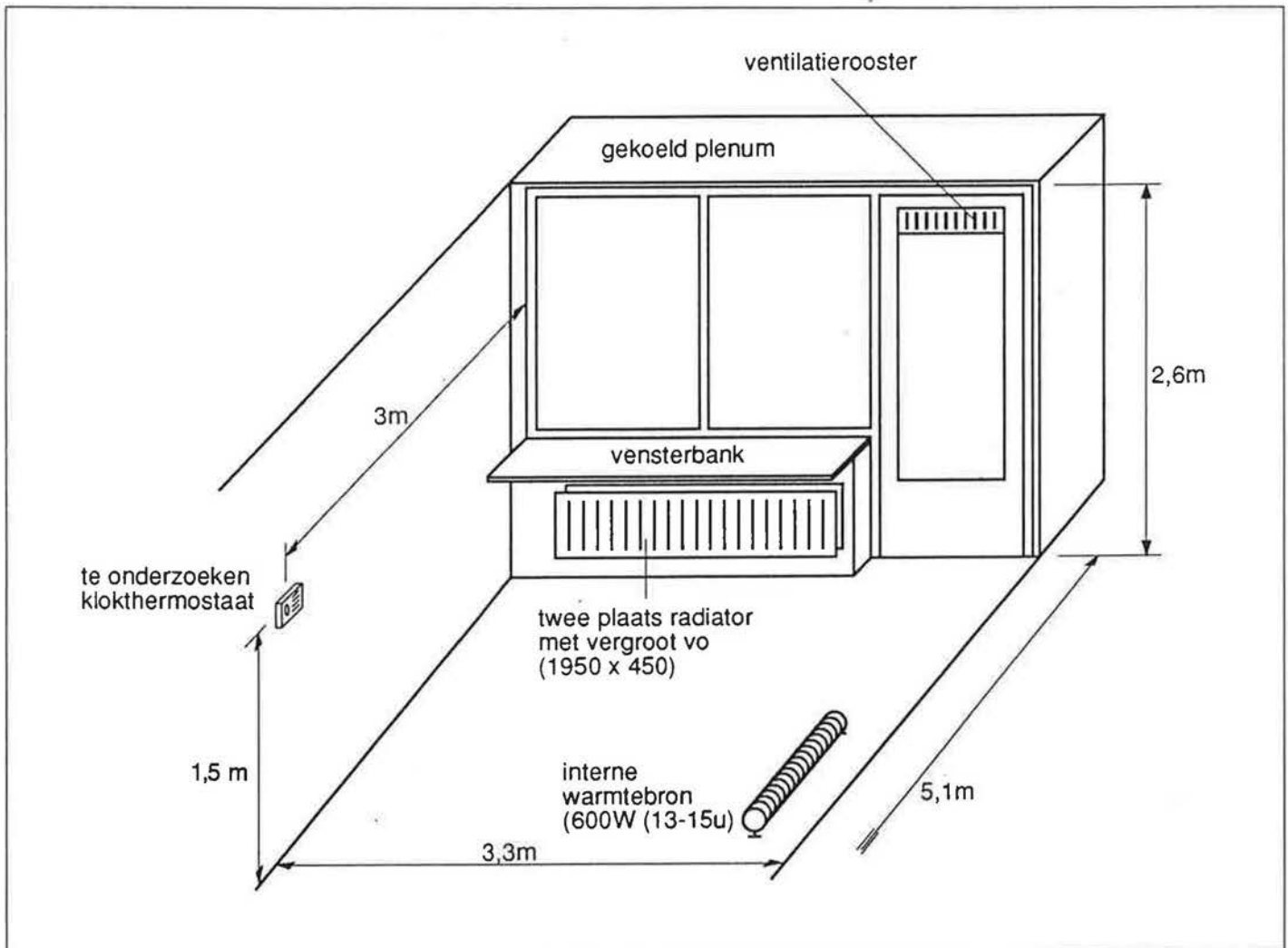
In de proefkamer was een gemiddelde wintersituatie ingesteld waarbij een zekere ventilatie met buitenlucht plaatsvond (90 m³/h). Buiten de proefkamer



**Figuur 6. Meetresultaten in een meetvlak bij luchttoevoer vanuit een lijnrooster in het plafond (zomersituatie)**  
**a) isothermen (°C)**  
**b) isovellen (m/s)**



**Figuur 7. Geconstateerde luchtbewegingen vóór en na wijziging van het ventilatiesysteem in een couveuse afdeling.**  
**a. oorspronkelijke situatie**  
**b. met aangepast inblaasornament**



**Figuur 8. Indeling van de proefkamer bij onderzoek aan klokthermostaten**

bevond zich een radiatorcircuit waarvan de in de proefkamer geplaatste radiator deel uitmaakte en waarbij de verwarmingsketel door de klokthermostaat aan/uit werd geregeld.

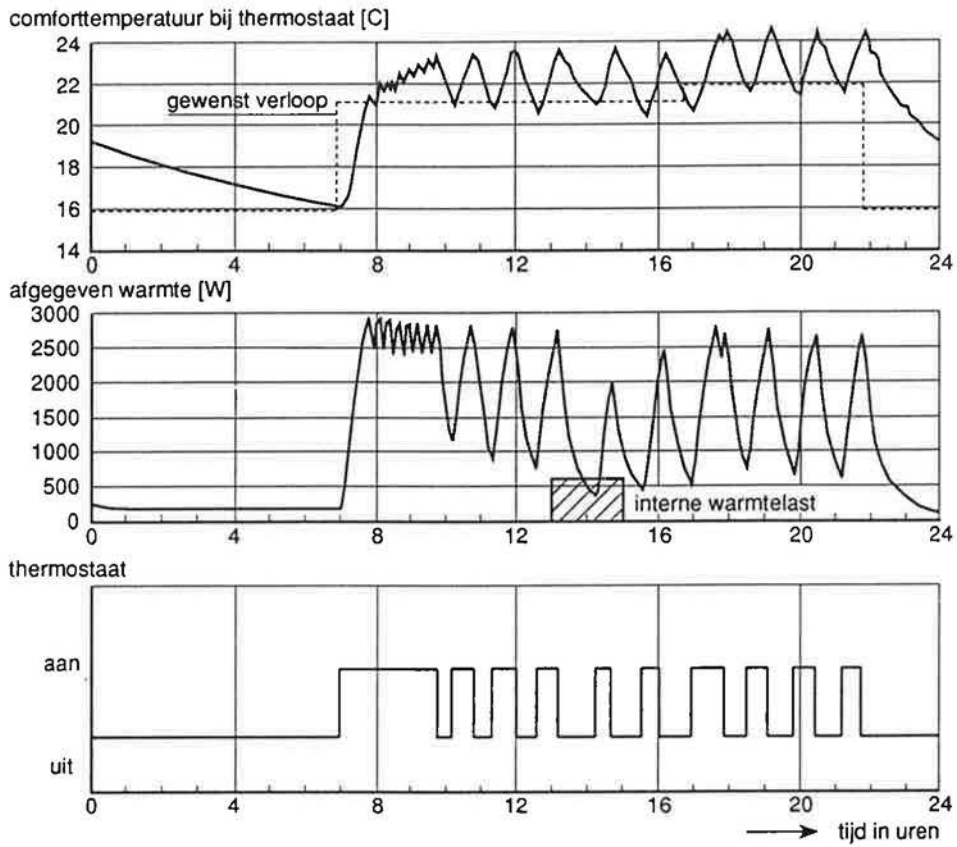
Het klokprogramma hield in dat om 7.00 uur de ingestelde waarde d.m.v. het tijdmechanisme van de nachttemperatuur (16 °C) op de dagtemperatuur (21 °C)

werd gebracht. Van 13.00 uur tot 15.00 uur werd een interne convectieve warmtebron ingeschakeld waarmee enige zonbelasting werd nagebootst. Vervolgens werd de thermostaatinstelling om 17.00 uur verhoogd naar 22 °C en om 22.00 uur verlaagd naar de nachttemperatuur.

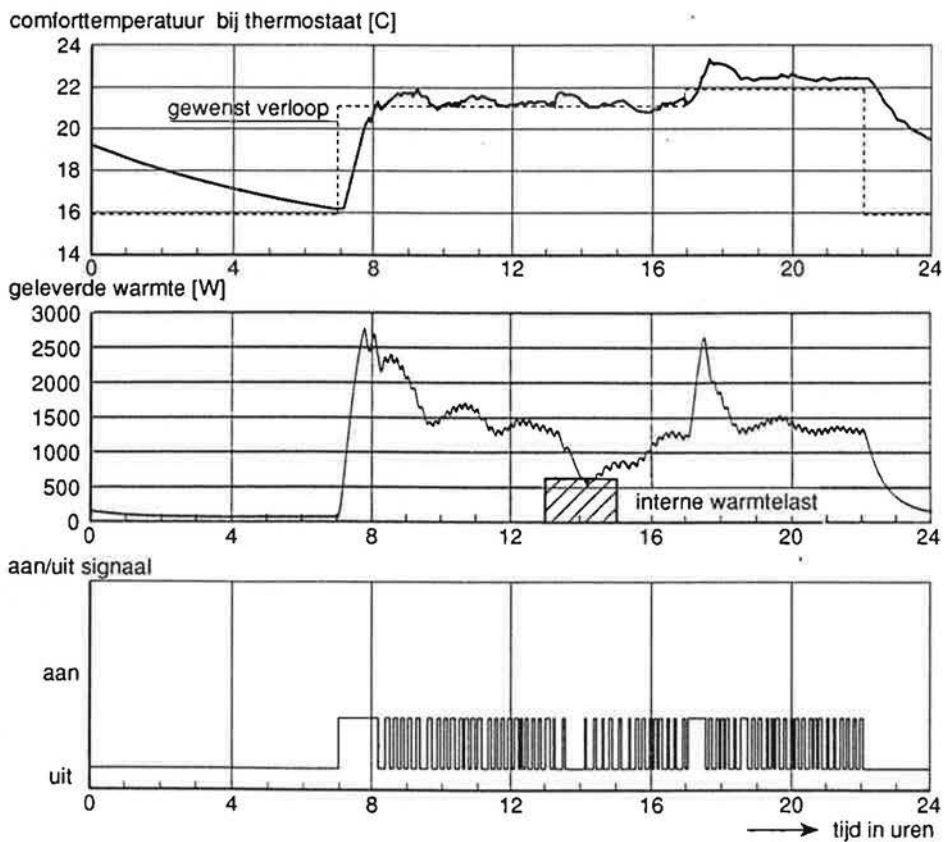
In de figuren 9 en 10 zijn als voorbeeld

de meetresultaten weergegeven, respectievelijk voor een als 'slecht' en een als 'redelijk' beoordeelde klokthermostaat. Uit het onderzoek bleek dat het merendeel der onderzochte klokthermostaten tot de beoordeling 'slecht' behoorden.

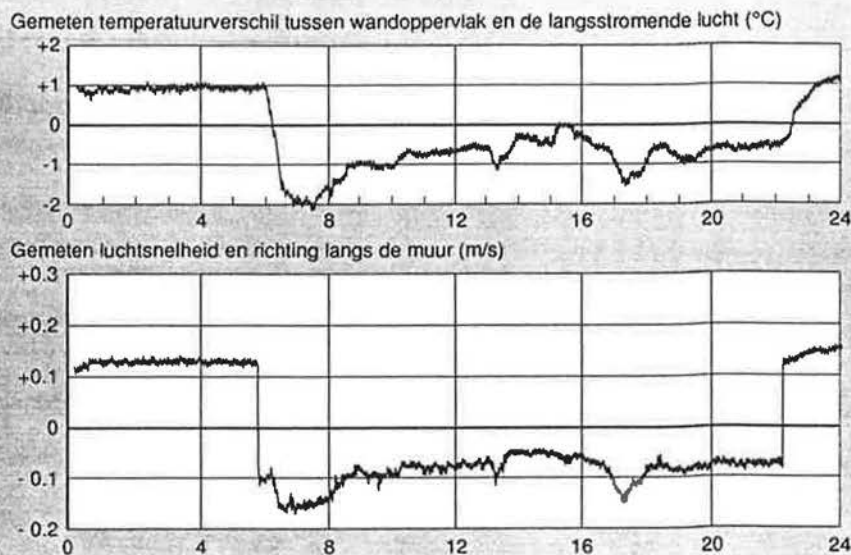
In opdracht van de fabrikant van het als 'redelijk' gewaardeerde exemplaar werd



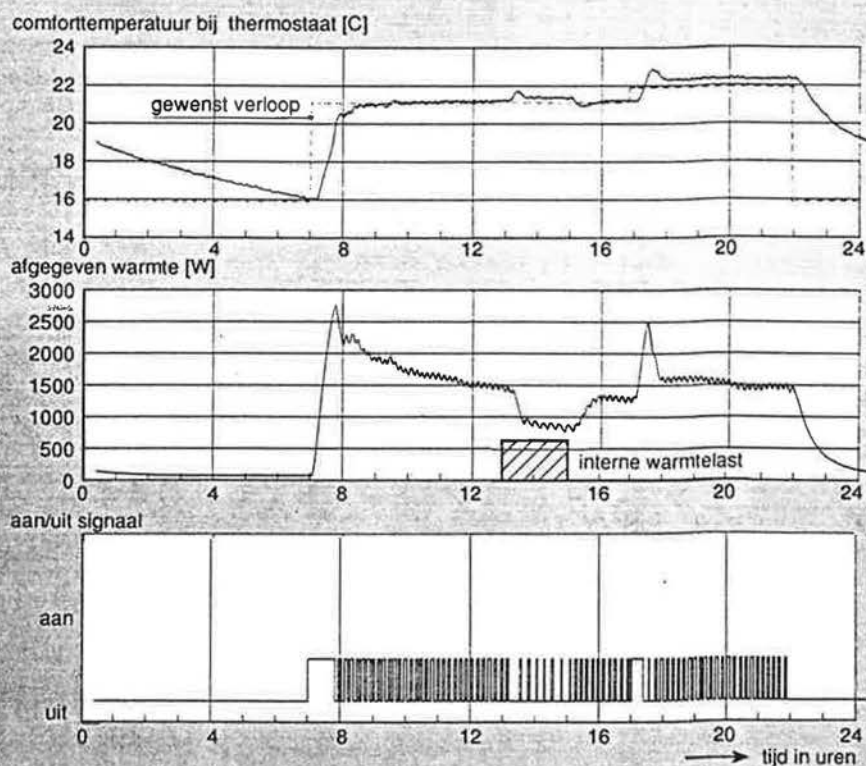
Figuur 9. Meetresultaten van een als 'slecht' beoordeelde klokthermostaat



Figuur 10. Meetresultaten van een als 'redelijk' beoordeelde klokthermostaat



**Figuur 11. Gemeten verschil tussen wand- en luchttemperatuur en de gemeten luchtsnelheid langs de wand**



**Figuur 12. Meetresultaten van een als goed beoordeelde klokthermostaat na wijziging van de plaats van de temperaturopnemer.**

een aanvullend onderzoek verricht om het produkt te verbeteren. Hierbij werd het micro-klimaat nabij de thermostaat beschouwd waarbij o.a de luchtsnelheid, stromingsrichting en temperatuurverschil tussen de wand en de lucht werd bepaald (zie figuur 11).

Het blijkt dat tijdens het opwarmen van de kamer de wandtemperatuur lager is dan de luchttemperatuur waardoor de stromingsrichting langs de wand op dat moment omlaag is gericht. Wanneer in

de nacht niet wordt verwarmd is de wand warmer dan de lucht en treedt een opwaarts gerichte luchtstroming op. Er kan nu het volgende worden geconcludeerd:

- Wanneer er wordt verwarmd en de (klok)thermostaat derhalve regelend moet optreden, is de stromingsrichting langs de wand omlaag gericht.
- Voor een snelle reactie van de thermostaat dient daarom een goede warmte-overdracht met de omlaag stromende lucht plaats te vinden. De

temperaturopnemer dient derhalve boven in de thermostaat te zijn gemonteerd, direct onder een luchtinlaatopening in de thermostaatbehuizing.

Door vervolgens de temperaturopnemer aldus te verplaatsen werden de regeleigenschappen aanzienlijk verbeterd, zoals uit de meetresultaten volgens figuur 12 blijkt. Voor de bijbehorende lucht- en comforttemperatuur in de ruimte, zie figuur 4.