

"Onderzoek in een proefkamer met massa; dynamische metingen onder gestimuleerde praktijkomstandigheden"*

door ing. L.J. van Wees en G. Been**



1. Inleiding

Het initiatief voor het hierna besproken onderzoek ontstond in 1984.

In deze periode was het algemene onderzoekprogramma van het Ministerie VROM in een gevorderd stadium en waren de aanvulling op de ISSO publicatie no. 9 en het kennisoverdrachtprogramma van het Bouwcentrum in voorbereiding.

In dit kader bestond er behoefte aan een onderzoek dat enkele nog openstaande punten zou kunnen invullen. Deze betroffen met name de dynamische effecten van de massa van energiezuinig gebouwde woningen met luchtverwarming.

In overleg tussen NEOM B.V., het Ministerie VROM, ACI en Van Buuren-van Swaay en mede gefinancierd door ACI en Wilma.

Het onderzoek werd behalve door bovengenoemde partijen begeleid door Cauberg-Huygen Raadgevende Ingenieurs B.V. en ad hoc door vertegenwoordigers van het ISSO, MT-TNO en het Bouwcentrum.

2. Doelstelling

De destijds bekende resultaten van andere onderzoeken hadden betrekking of wel op metingen in het veld dan wel op onderzoek aan een proefkamer zonder massa. Beide omstandigheden leveren beperkingen op.

Bij het nu besproken onderzoek was het de opzet deze beperkingen te vermijden door praktijkomstandigheden zo dicht mogelijk te benaderen in een beheersbare en dus reproduceerbare omgeving.

Uiteraard wordt een nieuwe beperking aangebracht, zodra onvermijdelijk gekozen moet worden een deel van een woning op een bepaalde wijze en met bepaalde materialen te bouwen.

Er is naar gestreefd het onderzoek te verrichten met toepassing van bouwconstructies overeenkomende met die

van de gemiddelde energiezuinige woning met massa in de sociale- en premiesector.

De primaire onderzoeksfacetten zijn:

- de kwaliteit van het binnenklimaat, onder te verdelen naar de beoordeling van de behaaglijkheid bij stationair verwarmen en bij koel inblazen bij luchtverwarming voorkomt.

- het afkoel- en aanwarmgedrag.

De te onderzoeken invloedsfactoren zijn variaties in:

- omgevingscondities
- diepte van het vertrek
- plaats van het (de) toevoerrooster(s)
- luchthoeveelheid
- soort inblaasrooster.

Lopende het onderzoek ontstond de behoefte enkele speciale onderwerpen, al of niet in verkennende of globale zin te bekijken, te weten:

- het dynamisch gedrag van de 1ste verdiepingsvloer.
- de effecten van de regeling
- de plaats van de afvoeropening
- de invloed van meubilair op het afkoel- en aanwarmgedrag.
- een vergelijking met centrale verwarming zowel voor het binnenklimaat als het afkoel- en aanwarmgedrag.

3. Opbouw proefinstallatie

Op de volgende beelden is in vogelvlucht de opbouw van de proefwoning te zien.

Gemeten werden alle belangrijke parameters van het binnenklimaat, de omgeving en de installatie, te weten:

- Luchttemperaturen en snelheden in een ruimtelijk raster en op referentiepunten.
- Zwarte bol temperaturen
- Omgevingstemperaturen
- Oppervlaktetemperaturen van vlakken aan binnen- en buitenzijde
- Kerntemperaturen in constructies
- Behaaglijkeids-indices (PMV/PPD)
- Warmtestromen door verdiepingsvloer
- Toevoer luchthoeveelheid
- Luchthoeveel- en afvoertemperaturen.

* Lezing gehouden ter gelegenheid ter de aanvulling op ISSO-publicatie 9 "Luchtverwarming in woningen op 5 februari 1986"

** Installatiegroep Van Buuren-van Swaay B.V. te Zoetermeer

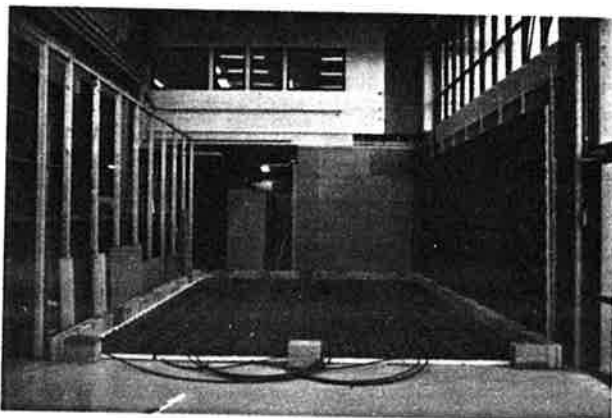


Foto 1: De nagebouwde woonkamer is aan vier zijden omhuld door een spouw, waarmee de temperaturen van de kruipruimte, slaapkamer en buurwoningen gesimuleerd kunnen worden. Hiervoor is materiaal voor een vloerverwarmingssysteem gebruikt.



Foto 2: De vloer is een polystyreen broodjesvloer met een k -waarde van ca. $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Foto 3: De 1ste verdiepingsvloer is gemaakt van kanaalplaten van een k -waarde van ca. $2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. De woningscheidende wanden zijn opgebouwd uit 10 cm kalkzandsteenblokken met in werkelijkheid een k -waarde van ca. $2 \text{ W/m}^2\text{K}$.

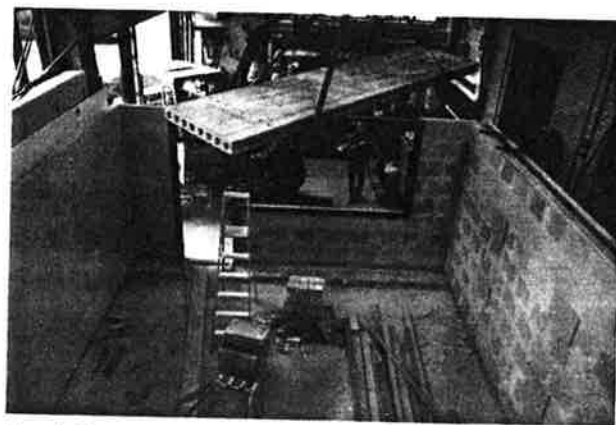
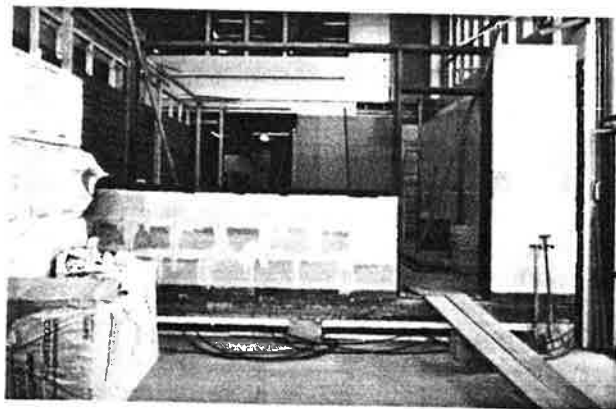
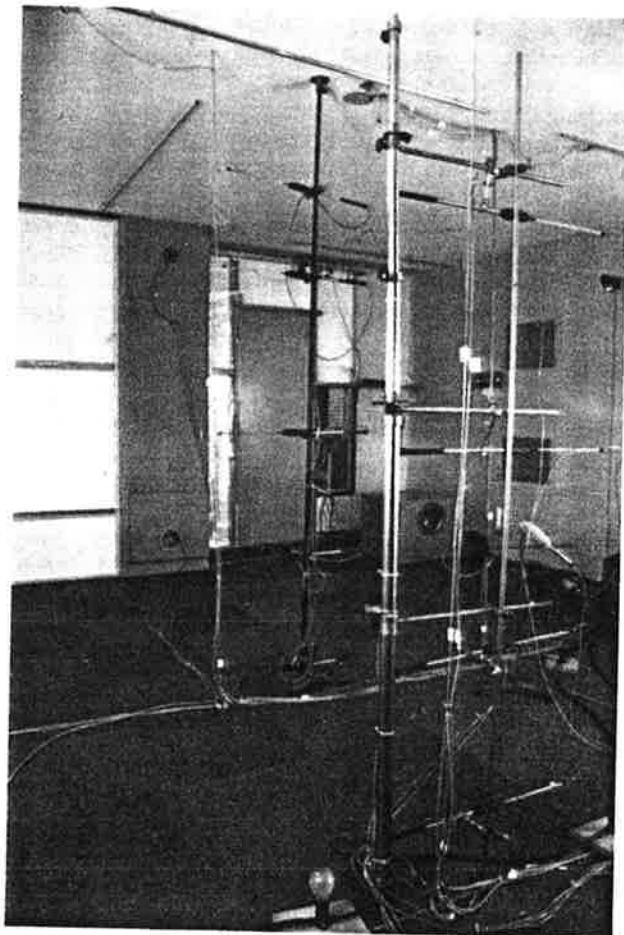


Foto 4: De gevel bestaat uit een binnenblad van 8 cm steenwol opgesloten tussen 12 mm gipsplaten en een buitenblad van 10 cm kalkzandsteen.

In de gevel is een raam opgenomen met thermopane beglazing van $1,50 \times 2,50 \text{ m}$, alsmede een hardhouten deur voorzien van ca. $0,8 \text{ m}^2$ thermopane.

Foto 5: De achterwand is zwaar geïsoleerd en grenst aan een praktisch neutrale omgeving (Proefhal).

Inwendig is een geïsoleerde verplaatsbare wand met inblaaszuil aangebracht. Hiermee kan de diepte van het vertrek, de wijze van inblazen en het soort rooster zeer eenvoudig gevarieerd worden. De toevoerlucht wordt betrokken van de installatie van de naast gelegen klimaatkamer en kan daarmee op de vereiste hoeveelheid en condities geregeld worden.



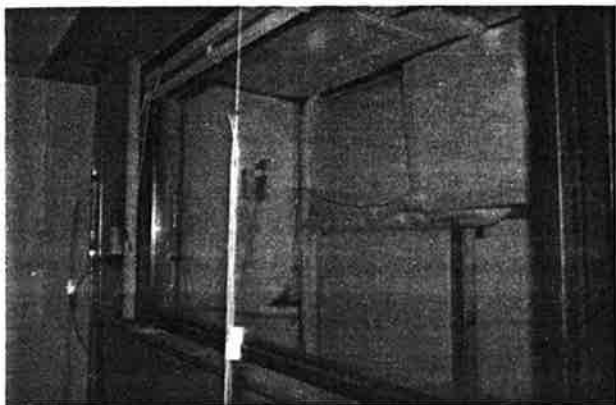


Foto 6: Aan de gevelzijde is een koude erker gebouwd, waarin door een koelsysteem een temperatuur van tenminste -7°C onderhouden kan worden.



Foto 7: In totaal zijn ruim 100 opnemers aangebracht die met een computergestuurd data-acquisitiesysteem zijn verbonden. Hier enkele sensors op het referentiepunt.

4. Verloop van het onderzoek (onderzoeksboom)

De eerder genoemde variabelen waarvan de invloed onderzocht moest worden leiden zelfs bij een bescheiden aantal variaties tot een zeer groot aantal mutaties. Het is in een dergelijk geval bijna nog belangrijker toe bepalen wat niet dan wat wel gemeten moet worden.

Hiertoe is een onderzoeksboom opgezet die bij aanvang en gedurende het onderzoek gebruikt is om te snoeien (fig. 1). Uiteindelijk zijn ca. 40 meetseries uitgevoerd met variaties met 3 sets omgevingscondities, 2 vertrekdieptes, 3 plaatsen van luchttoevoer, 5 roostersoorten, 3 luchthoeveelheden en variaties in inblaastemperatuur en verwarmingsvermogen.

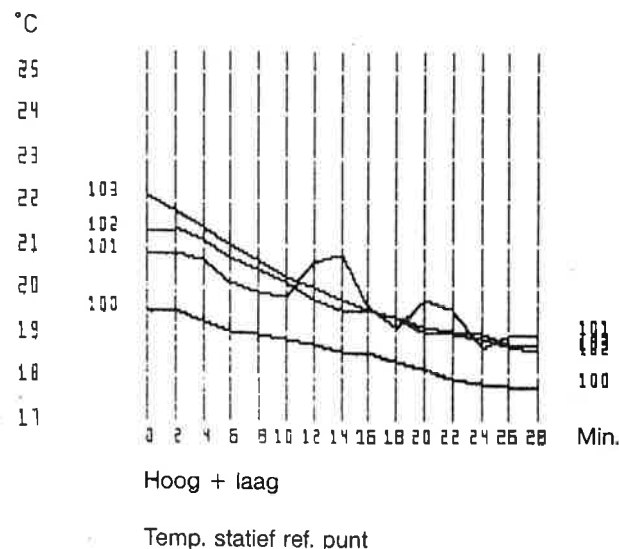
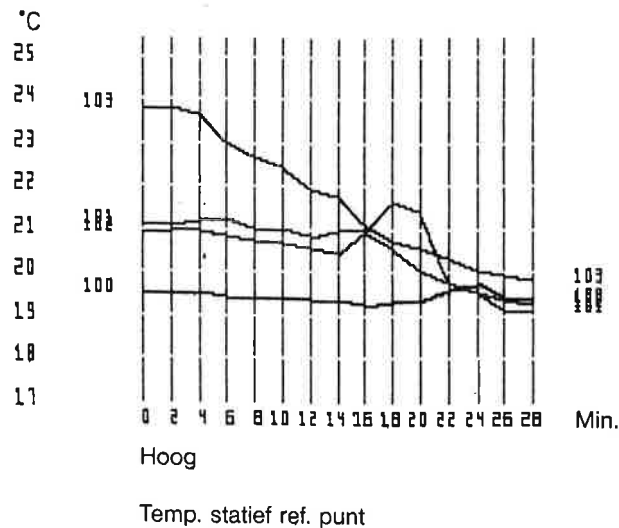
Daarnaast zijn 2 meetseries aan een zgn. bewonersweek uitgevoerd. Hierop wordt later ingegaan.

In het kader van deze lezing is het uiteraard onmogelijk volledig verslag te doen. Hierna volgen echter enige beelden die illustreren hoe de resultaten en conclusies tot stand zijn gekomen.

5. Comfortmetingen

Hierbij is uitgegaan van de gedachte dat bij luchtverwarming het inblazen van warme lucht voor het comfort minder kritisch is dan het, over korte of langere tijd, inblazen van koude lucht. Het is daarom zinvol met hierop gerichte meetseries te beginnen.

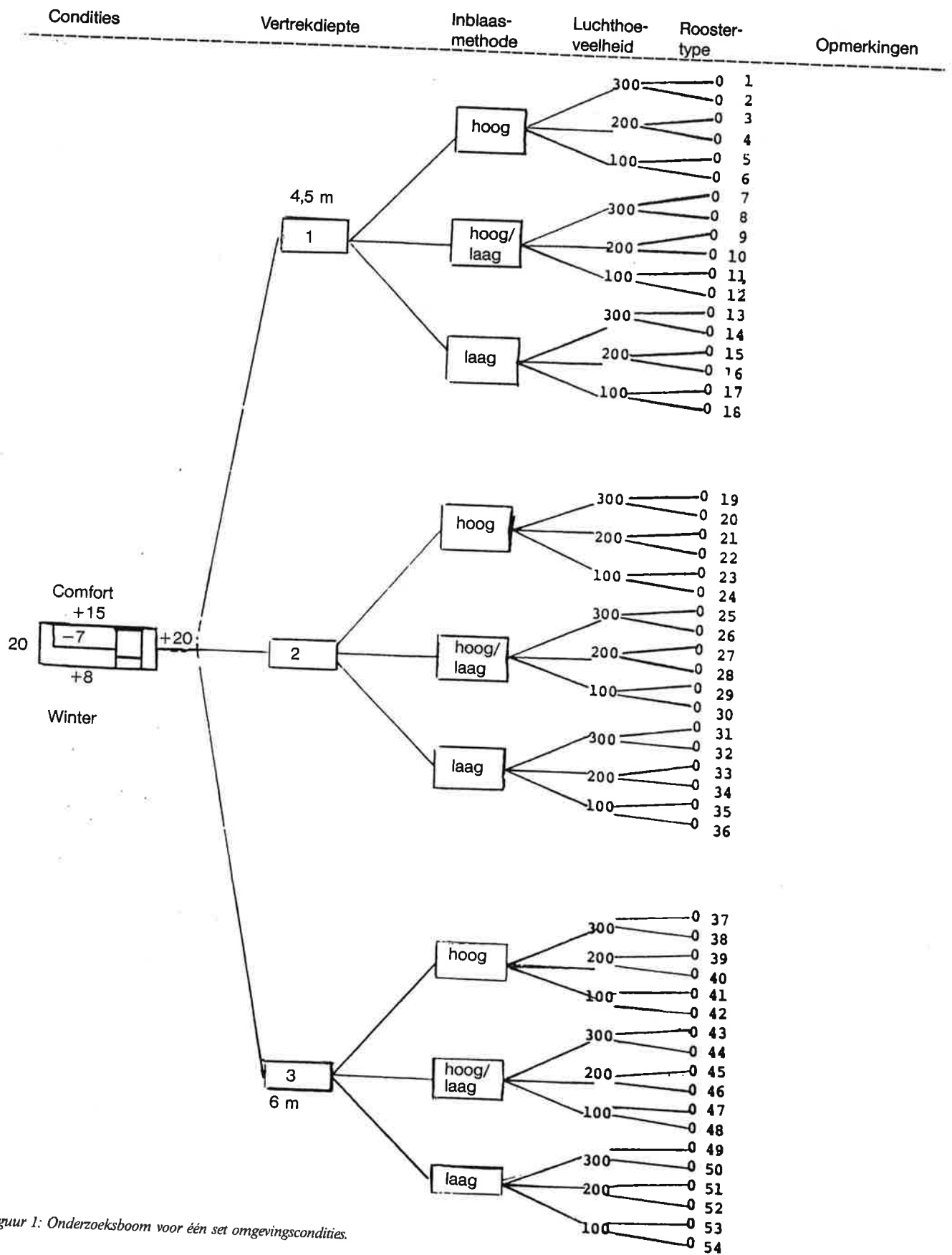
Koel inblazen kan zowel het gevolg zijn van de normale regeling als van langdurige grote interne belasting of tapwatervoorrang. In de laatste gevallen kan koel inblazen geruime tijd duren.



Figuur 2: Vergelijking reactie luchttemperaturen op koel inblazen resp. bij hoog en hoog/laag inblazen.

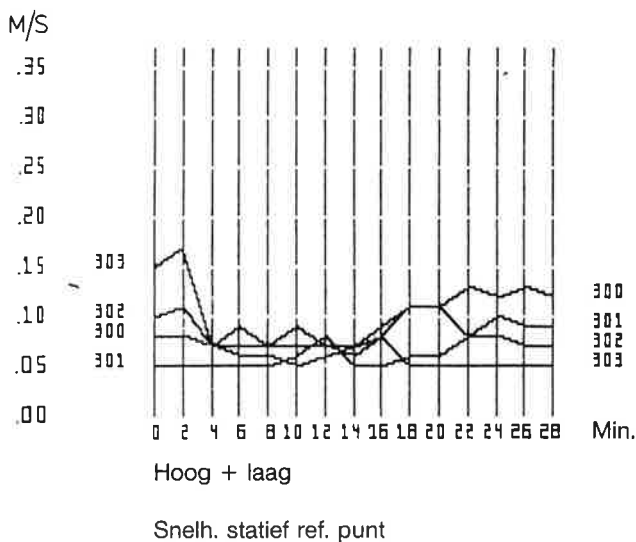
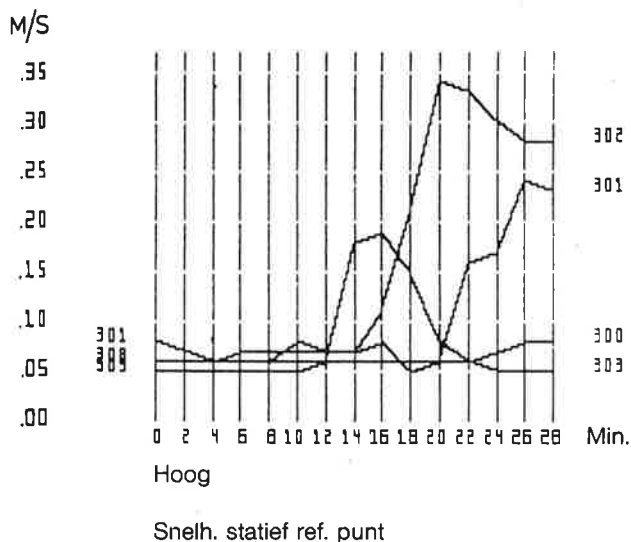
Figuur 2 laat een kenmerkend verschil zien tussen de reactie van de ruimtetemperatuur bij hoog- resp. hoog/laag inblazen van koude lucht (15°C).

Getoond worden de meetpunten boven elkaar op het referentiestatief (100 t/m 103 resp. op 10, 60, 110 en 170 cm). Bij hoog inblazen bestaat er bij aanvang, uitgaande van een stationaire situatie, een aanzienlijk grotere gradiënt dan bij hoog/laag inblazen de temperaturen sneller rea-



Figuur 1: Onderzoekboom voor één set omgevingscondities.

geren op het wegvallen van verwarmingsvermogen, met name ook de temperatuur vlak boven de vloer. Dit komt doordat de warmtebuffer hoog in het vertrek en van de 1ste verdiepingvloer bij hoog/laag inblazen kleiner is dan bij hoog inblazen.



Figuur 3: Vergelijking reactie luchtsnelheid op koel inblazen resp. bij hoog en hoog/laag inblazen.

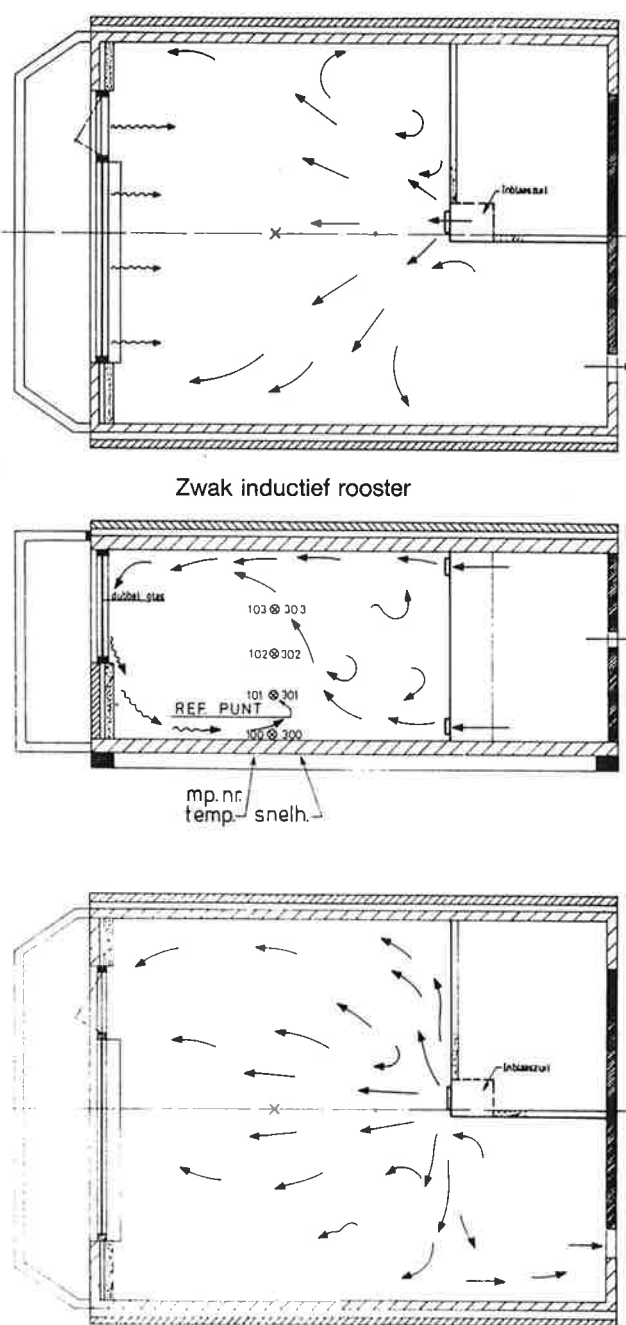
Figuur 3 laat dezelfde vergelijking zien als de vorige, echter voor de luchtsnelheden. Bij hoog inblazen begint de luchtstraal te vallen zodra de inblaasstemperatuur lager wordt dan de vertrektemperatuur.

Goed is te zien dat de straal achtereenvolgens de meetpunten 303, 302, en 301 passeert die resp. op 170 cm, 110 cm, en 60 cm hoogte liggen.

Bij deze vergelijking werd 100 m³/h lucht ingeblazen door één hooggeplaatste rooster resp. door één hoog en een laag geplaatst rooster met een 50/50% luchtverdeling.

Bij 100 m³/h over dit overigens wel inducerend rooster blijft de straal dus niet goed aanliggen.

Bij hoog/laag inblazen lijken er geen problemen. Bij een luchthoeveelheid van 200m³/h over deze rooster bleken de



Figuur 4: Vergelijking luchtstromingspatroon bij hoog + laag inblazen links met "conventionele" roosters, rechts met een combinatie van bijzonder inducerende roosters.

snelheden vóór het lage rooster echter te hoog. Op zich zelf een aanwijzing voor het vermijden van hoge snelheden over het laag geplaatste rooster.

Op figuur 4 wordt getoond hoe een oplossing voor het probleem van het laag geplaatste rooster gevonden is.

Het luchtstromingspatroon van een bijzonder inducerend rooster is op de rechterhelft van de figuur goed te zien. De werking is in principe gelijk aan de bekende plafond anemostaat die hier in een verticaal vlak geplaatst is.

De indringdiepte is zeer kort, ook over de vloer. Het onderste rooster ondersteund en stabiliseert het uitblaasptraan van het bovenste rooster en daarmee de totale luchtwerfel. Er zijn meetseries gedaan aan situaties waarbij langdurig koel ingeblazen werd in thermisch evenwicht met een interne belasting. Het bleek, dat deze situatie i.h.a. minder kritisch is dan korstendig koel inblazen (zonder thermisch evenwicht). Gaat dit laatste goed dan levert langdurig koel inblazen ook geen problemen op.

Bij vrijwel alle proeven bleek dat de horizontale gradiënt opvallend gunstig was en er geen hinderlijke koude val bij de gevel optrad, dit aanvankelijk met uitzondering van de plaats bij de deur (tuindeur) waarvan het onderpaneel een te lage isolatiewaarde had. Dit wijst weer op de ontwerpregel dat de gevel bij centraal inblazen geen hogere transmissie mag hebben dan ca. 100 W/m².

6. Afkoel- en aanwarmingproeven

Deze proeven waren van belang aangezien de hoogte van de benodigde aanwarmtoeslag voor de goed geïsoleerde woning een openstaande vraag was of tenminste bevestiging behoefde. Uit een rapport van een onderzoek aan een rekenmodel van IMG-TNO (rapport G560) volgden aanwarmtoeslagen die belangrijke consequenties voor de warmteverliesberekening en installatietechniek zouden hebben.

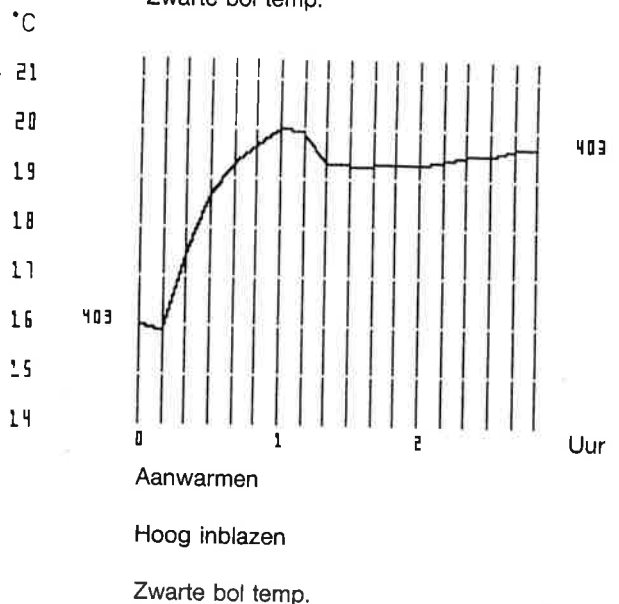
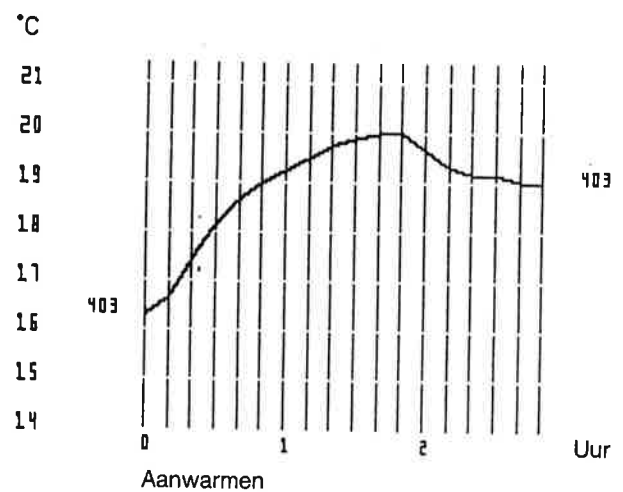
Met de volgende figuren worden enkele resultaten getoond. Vooraf moet gezegd worden dat (na ampele discussie) het aanwarmen bij het bereiken van een zwarte bol temperatuur van 20°C als voltooid beschouwd werd. De gewone droge bol temperatuur is duidelijk geen goed criterium aangezien daarbij de stralingsinvloed niet in rekening gebracht wordt.

In vergelijking getoond op figuur 5 is goed te zien dat bij hoog/laag inblazen het aanwarmen in ca. 60 minuten voltooid is. Bij hoog inblazen vergt dit bij hetzelfde aanwarmvermogen ca. 100 minuten.

Bij het aanwarmen werd 300 m³/h van ca. 60°C ingeblazen. Zodra een zwarte bol temperatuur van 20°C bereikt was, werd teruggeschakeld op 200 m³/h bij dezelfde temperatuur.

Belangwekkend is dat bij hoog/laag inblazen dit gereduceerde vermogen na de schrik voldoende is voor een herstel van de ruimtetemperatuur, terwijl bij hoog inblazen het vermogen te kort schiet.

Figuur 6 levert de verklaring van de lange aanwarmduur bij hoog inblazen. De temperatuur gradiënt groeit hierbij sterk tijdens het aanwarmen. Een niet efficiënt proces. Hoog/laag inblazen vertoont een gunstiger beeld.



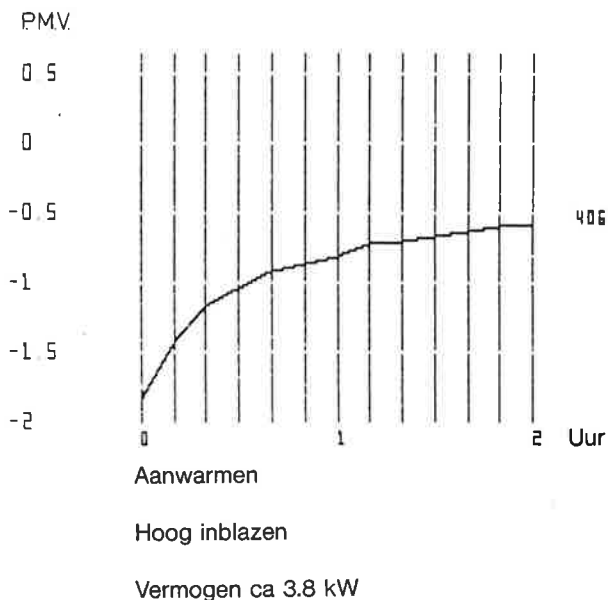
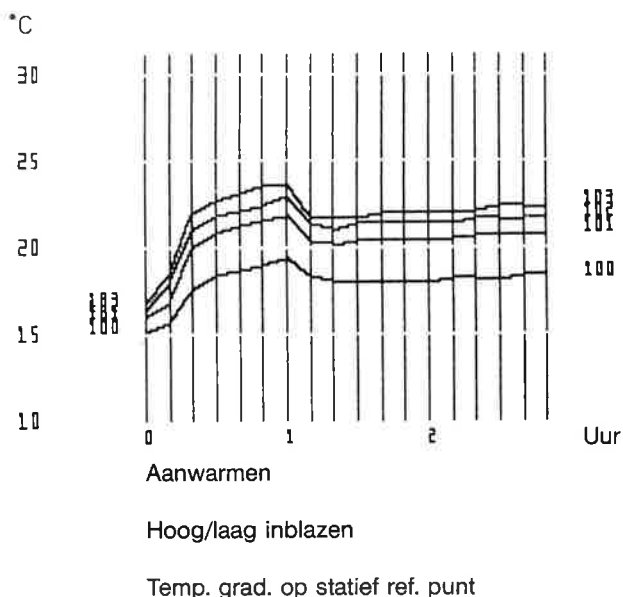
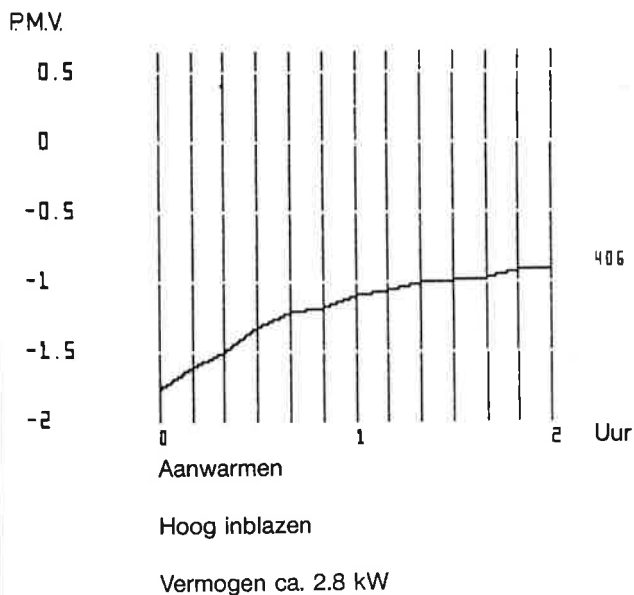
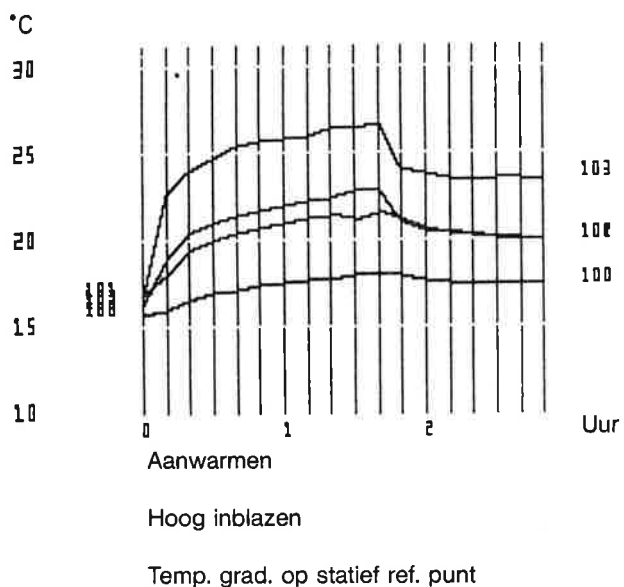
Figuur 5: Verschil in aanwarmtijd bij hoog resp. hoog + laag inblazen.

Figuur 7 beantwoordt de vraag hoe gevoelig de aanwarmduur is voor verkleining van het aanwarmvermogen. Getoond wordt in dit geval het verloop van de behaaglijkheidsindex (PMV).

Het blijkt dat een verkleining van de gebruikte aanwarmtoeslag met 1 Kw in dit geval een gevoelige verlenging van de aanwarmduur teweeg brengt.

Een onderzoek naar de invloed van de luchthoeveelheid liet zien dat hetzelfde aanwarmvermogen echter door meer lucht met een lagere temperatuur toe te voeren geen oplossing is voor het aanwarmprobleem bij hoog inblazen. De toegepaste luchthoeveelheid bleek (bij gelijk aanwarmvermogen) slechts een geringe invloed te hebben.

Beoordeling van de resultaten van een groot aantal meetseries leidde tot de conclusie dat de oplossing getoond in figuur 5C zowel voor de behaaglijkheid als de aanwarmtijd

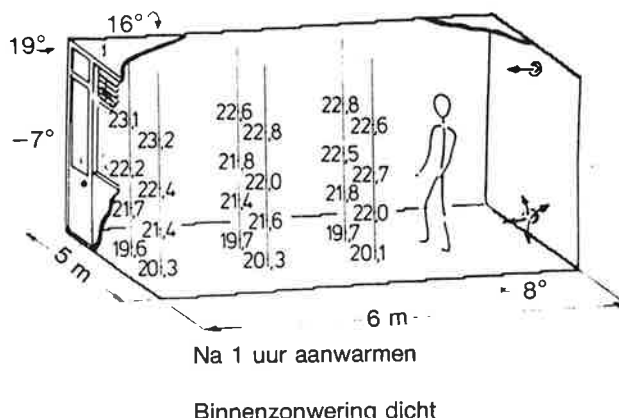


Figuur 6: Het verloop van de gradiënten bij het aanwarmen.

Figuur 7: Invloed van de hoogte van het aanwarmvermogen.

aanbeveling verdient. Uiteraard kan niet gezegd worden dat dit de enige in aanmerking komende oplossing is. Figuur 8 toont het bereikte binnenklimaat na 1 uur aanwarmen volgend op een afkoelperiode van 8 uur, waarbij de ruimtetemperatuur gedaald was tot ca. 16 °C. In deze figuur valt eens te meer op de invloed van een te lage isolatie-waarde van het deurpaneel. Dit in aanmerking genomen is de temperatuurverdeling goed.

Lopende het onderzoek ontstond de behoefte de onderzochte deelfacetten integraal te toetsen onder bewonersomstandigheden. Daartoe is een programma voor een gestimuleerde bewonersweek opgesteld met aanwezigheidschema's voor interne belasting, bediening van gordijnen c.q. zonwering, thermostaat instellingen e.d. De analyse van de resultaten is nog niet voltooid.



Figuur 8: Binnenklimaat voor de Saint na 1 uur aanwarmen.

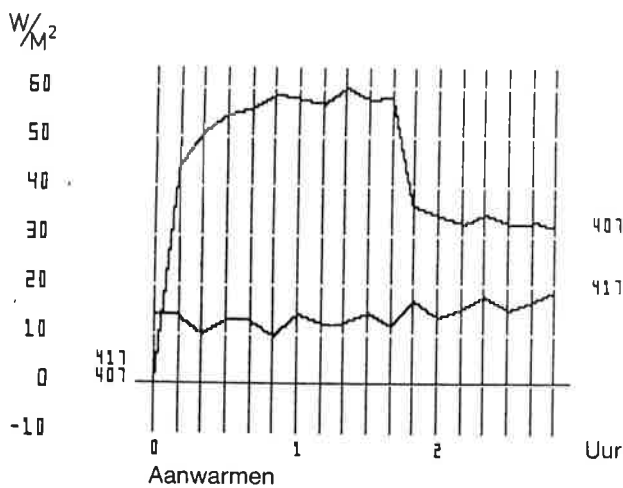
Bij de hierna te behandelen speciale onderwerpen komen echter wel enkele karakteristieke tussenresultaten aan de orde.

7. Speciale onderwerpen

Het belangrijkste van de speciale onderwerpen is wellicht het gedrag van de 1ste verdiepingsvloer. Deze vloer is (ongeisoleerd) ongetwijfeld een belangrijke "schuldige" aan het verschil tussen hoog en hoog/laag inblazen. (Ondermeer door IMG-TNO in rapport C547 genoemd).

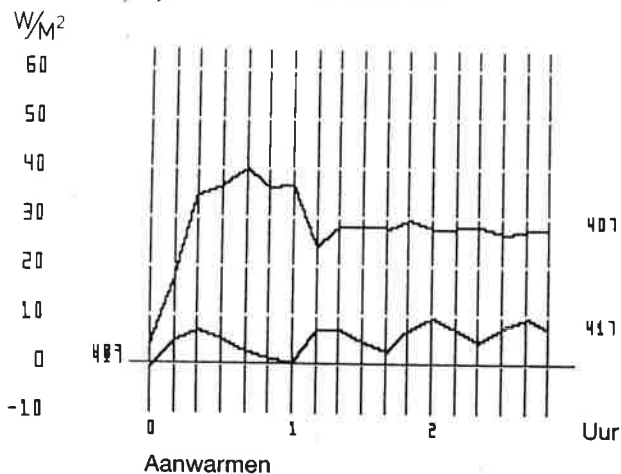
Op figuur 9 is het verschil te zien tussen warmtestromen die de vloer in en uitgaan resp. voor hoog en hoog/laag inblazen.

De bovenste lijn is de warmtestroom de vloer in, de onderste vloer uit op de 1ste verdieping.



Hoog inblazen

Warme
Waterstromen 1e verd. vloer



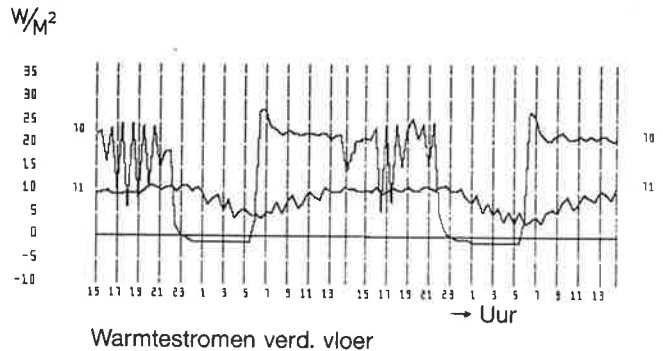
Hoog laag inblazen

Warmtestromen 1e verd. vloer

Figuur 9: Warmtestromen 1ste verdiepingsvloer bij aanwarmen meetpunt 407 onderzijde vloer, meetpunt 417 bovenzijde vloer.

Het oppervlak tussen beide lijnen is in principe een maat voor de oplading van de vloer.

Later is in een gesimuleerde bewonersweek dit effect voor hoog/laag inblazen over meerdere dagen gevolgd. Figuur 10 laat hier enkele resultaten van zien.



Warmtestromen verd. vloer

Simulatie bewonersweek

Figuur 10: Warmtestromen 1ste verdiepingsvloer tijdens simulatie bewonersweek meetpunt 70 onderzijde vloer, meetpunt 71 bovenzijde vloer.

De velden tussen de lijnen van meetpunt 70 en meetpunt 71 (resp. onder- en bovenzijde van de 1ste verdiepingsvloer) geven de "oplading" en de "ontlading" van de vloer weer. Uit het verschil blijkt dat er over een etmaal meer de vloer ingaat dan er aan de bovenzijde uitkomt. Ook in de praktijk zal dat door randeffecten van de vloeraansluitingen het geval zijn.

Opvallend is dat de teruggave aan de woonkamer (het gebied van meetpunt 70 onder 0) slechts gering lijkt te zijn. Dit is te verklaren uit het feit dat oplading en ontlading van de vloer zich afspeelt op een laag temperatuurniveau. Dit ligt slechts weinig boven de nachttemperatuur van het vertrek. De warmte afgifte naar de 1ste verdieping varieerde bij deze proef globaal tussen 5 en 10 W/m².

P.M. Het betreffende meetpunt lag betrekkelijk ver van het rooster op een punt met redelijk representatieve oppervlaktetemperaturen.

Tijdens de bewonersweek is ook het effect beoordeeld van normale aan/uit thermostaat met warmteversneller, op de vertrekcondities. In het kader van de voordracht moet volstaan worden met een enkel facet.

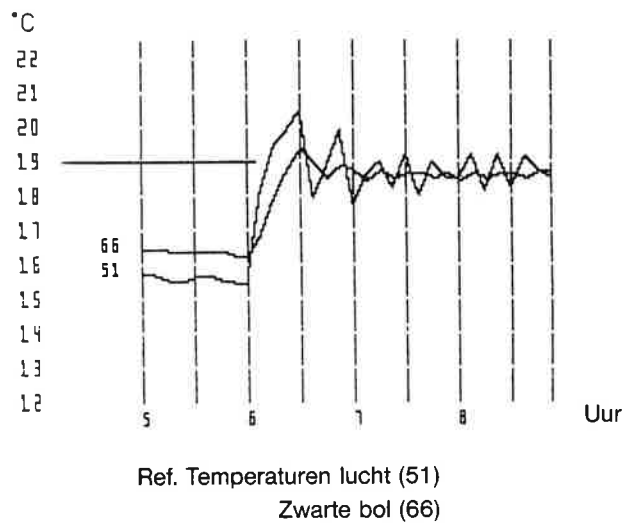
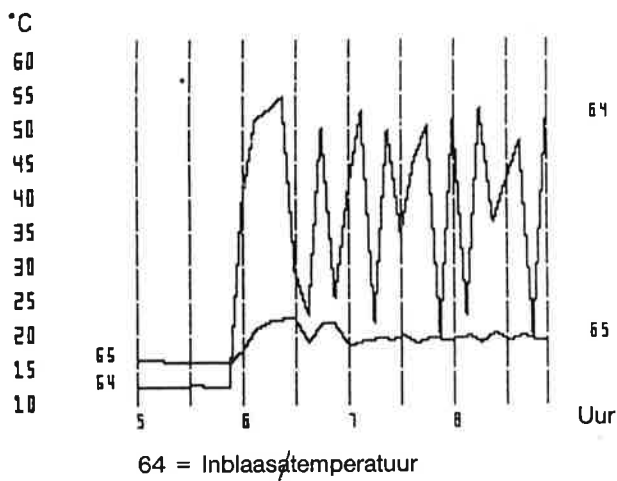
In figuur 11 die betrekking heeft op hoog/laag inblazen onder gematigde condities is te zien dat de thermostaat 3 à 4x per uur schakelt (een bekende waarde). De inblaasttemperatuur varieerde daarbij van 50°C tot ca. 20°C.

De ruimtetemperatuur varieert als gevolg daarvan met ca. 1 graad.

Volgens de literatuur is deze snelheid en omvang van temperatuurverandering waarschijnlijk nog net aanvaardbaar. Duidelijk is echter dat een naar temperatuurverdeling geoptimaliseerd ontwerp gevoeliger wordt voor regeleffecten. Hier is nader onderzoek nodig. Een betere dan aan/uit regeling is aan te bevelen.

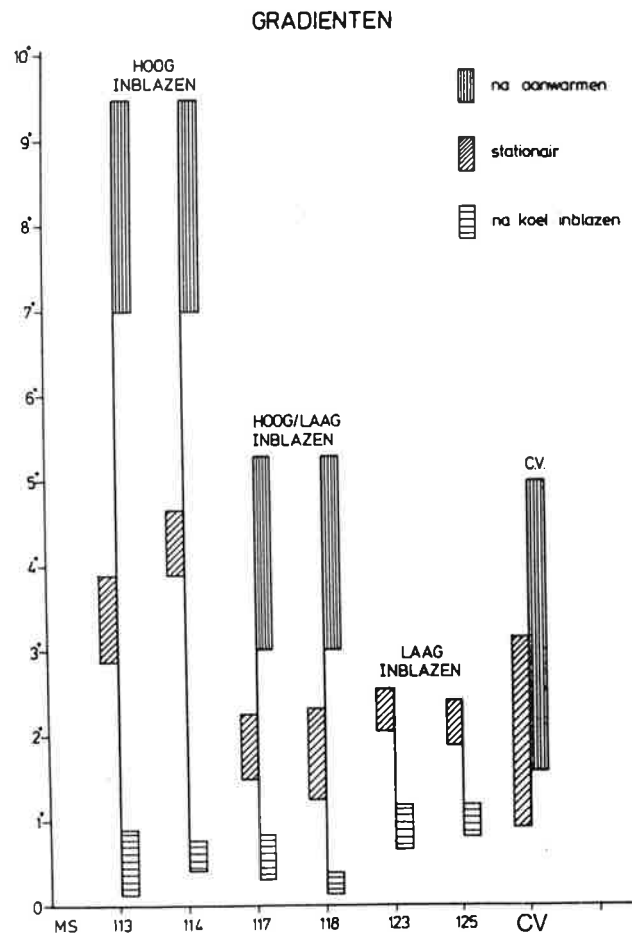
Over de invloed van de plaats van de afvoer en het meubilair is kortheidshalve slechts het volgende te vermelden.

Bij laag geplaatste afvoer is de temperatuurverdeling en de

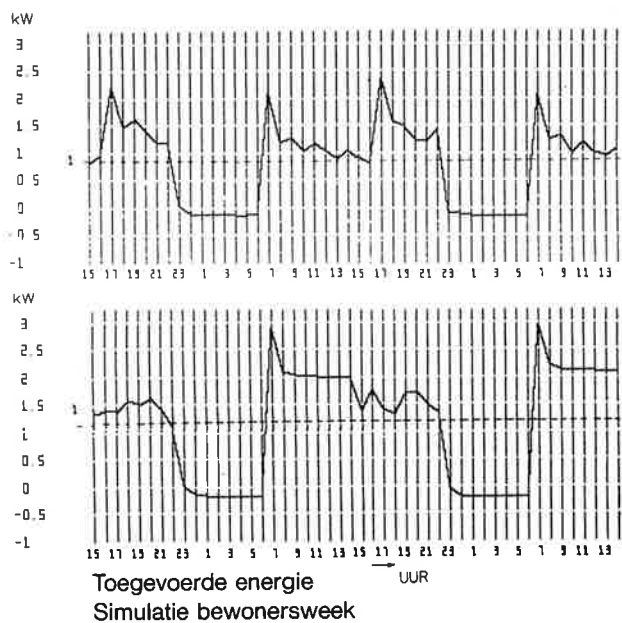


Figuur 11: Reactie van ruimtemtemperatuur op fluctuerende inblaasstemperatuur.

benutting van het verwarmingsvermogen beter dan bij hoog geplaatste afvoer. Het meubilair koelt de ruimtelucht iets dieper af en warmt het vertrek iets trager dan zonder meubilair. Het gaat daarbij om 10 à 15 min. verschil. De gedachte ontstaat hierbij dat het relatief grote overdrachtsoppervlak een bijzondere rol speelt in de uitwisseling van straling van de omgeving naar de ruimtelucht. Tenslotte is een vergelijkende meetserie gedaan met radiatorverwarming. De radiator had hierbij een capaciteit equivalent aan die van het luchtverwarmingssysteem. Noch in aanwarmduur noch in temperatuurverdeling lijken er doorslaggevend verschillen met een optimaliseerd luchtverwarmingssysteem. In figuur 12 is samengevat hoe de gradient liggen bij de onderzochte verwarmingssystemen. Door bewerking van de meetgegevens in de database (inmiddels 20 MB groot) kunnen niet rechtstreeks gemeten grootheden berekend worden. Figuur 13 toont het resultaat van de berekening van de toegevoerde energie over twee etmalen van de bewonersweek,



Figuur 12: Vergelijkend overzicht gradiënt.



Figuur 13: Toegevoerde energie tijdens simulatie bewonersweken. Boven met etmaalcyclus 16/19-21°C, onder met etmaalcyclus 16-21°C.

uitgaande van de toegevoerde luchthoeveelheid en het verschil in de toevoer- en afvoerluchttemperatuur.

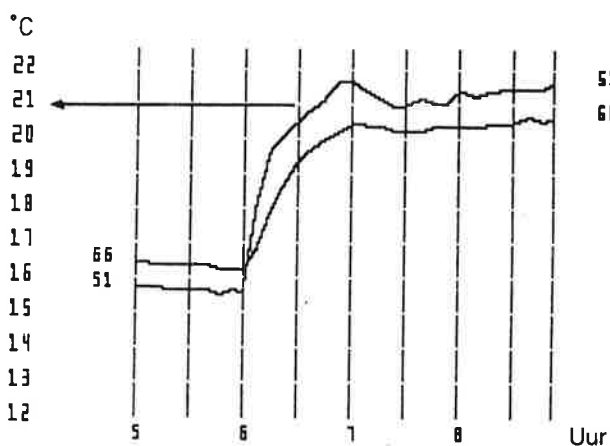
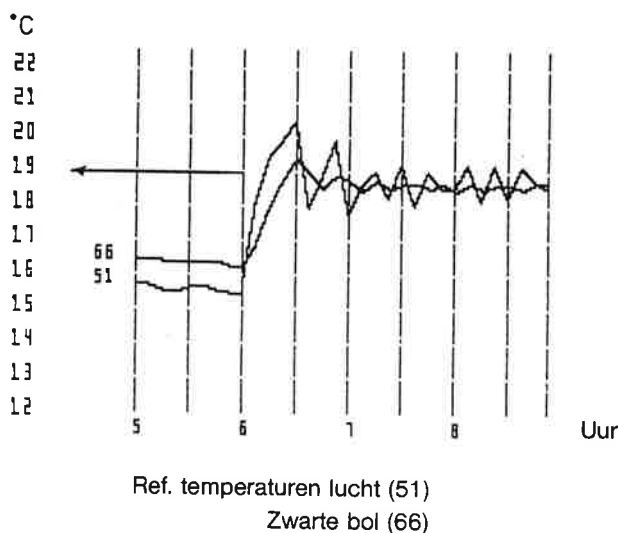
De stippellijn geeft het berekende etmaal-gemiddelde van de toegevoerde energie aan. Dit kan vergeleken worden met het stationaire warmteverlies waaruit dan de invloed van nachtverlaging op het energieverbruik volgt.

Dergelijke bewerkingen staan nog op het programma.

Figuur 17 geeft informatie over het aanwarmen, onder commando van een "gewone" thermostaat, tijdens de gestimuleerde bewonersweken. Met name is hierin het verschil tussen het verloop van de luchttemperatuur en de zwarte boltemperatuur te zien.

De linkerhelft toont de situatie met een "dagverlaging" op 19°C (verder aanwarmen tot 21°C na 16.00 h.).

Het zal duidelijk zijn dat de beoordeling van het aanwarmgedrag en het benodigde vermogen sterk afhankelijk is van de aangelegde normen.



Figuur 14: Aanwarmen tijdens de bewonersweken.
Links etmaalcyclus 16-19-21°C, rechts etmaalcyclus 16-21°C.

8. Samenvatting van de belangrijkste conclusies

1. Door centraal hoog en laag in te blazen is in de woonkamer van een goed geïsoleerde woning met massa "in het zicht" een goed klimaat te bewerkstelligen mits voor de toevoerrooster, wat betreft type en plaats, een adequate oplossing gekozen wordt.
2. Bij hoog/laag inblazen is de verticale temperatuurgradiënt, de aanwarmduur en het voor het vertrek benodigde vermogen aanzienlijk gunstiger dan bij hoog inblazen.
3. Bij hoog/laag inblazen worden hogere eisen gesteld aan de regeling dan bij hoog inblazen.
4. Bij een aanwarmtoeslag van ca. 2 kW op een netto warmteverlies van 1,6 kW bleek de aanwarmduur bij de aanwarmproeven ca. 70 min. en onder gestimuleerde bewonersomstandigheden ca. 50 min. te bedragen. Dit geldt voor hoog/laag inblazen.
5. Het bedrag van de 1ste verdiepingsvloer is zeer bepalend voor de verschillen tussen hoog en hoog/laag inblazen. Isoleren van het plafond zal tot afzwakking van de verschillen leiden.
6. De droge bol temperatuur is ook bij het onderzochte type woning geen goede referentie voor het binnenklimaat aangezien stralingseffecten een rol blijven spelen.
7. Door de relatief grote invloed van de massa op het dynamisch gedrag van een "zwarte" energiezuinig ontworpen woning moet men attent zijn op de verschillen tussen het woonvertrek en de overige vertrekken.

9. Slotopmerkingen

De hiervoor getoonde beelden zijn uiteraard niet compleet zonder de beproevings parameters. In het kader van de voordracht was het niet mogelijk deze te bespreken. Voor belangstellenden staat echter te zijner tijd het eindverslag van het onderzoek ter beschikking.