

Bureagebonden verdringingsventilatie

Citation for published version (APA):

Loomans, M. (1999). Bureagebonden verdringingsventilatie: studie naar de toepasbaarheid. *TVVL Magazine*, 1999(11), 26-34.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/11/1999

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Bureaugebonden verdringingsventilatie

Dit artikel geeft een samenvatting van een experimentele en numerieke studie naar een ventilatieconcept dat verdringingsventilatie en werkplekklimatisering combineert, het zogenoemde bureaugebonden verdringingsventilatie concept, kortweg BGV (Desk Displacement Ventilation- of DDV-concept in het Engels). In deze studie wordt met behulp van stationaire en tijdsafhankelijke resultaten de toepasbaarheid van het BGV-concept voor standaard kantoorconfiguraties besproken. Bij de evaluatie van het concept is onder andere gekeken naar het micro/macroklimaat en het thermisch comfort. De resultaten laten zien dat de scheiding tussen het micro- en macroklimaat niet scherp is, terwijl dit juist een belangrijke karakteristiek van werkplekklimatisering is. Verder beperken de thermische comfortcondities nabij het bureau het koelvermogen van dit systeem. Tenslotte voldoen de tijdsafhankelijke karakteristieken van het concept niet aan de hier geponeerde eisen voor werkplekklimatiseringssystemen. De eindconclusie luidt derhalve dat er niet zondermeer een specifiek voordeel is te behalen door dicht bij een verdringingsventilatie-unit te gaan zitten.

*-door M.G.L.C. Loomans**

Wanneer meer dan één persoon zich in een ruimte bevindt, dan kunnen ventilatieprincipes voor de gehele ruimte, zoals meng- en verdringingsventilatie, er niet voor zorgen dat de thermische condities in een klein volume rondom een gebruiker van die ruimte (het microklimaat) altijd voldoen aan diens eisen. Daarnaast, houden centraal ge-regelde airconditioningssystemen geen rekening met de significante verschillen in eisen over het thermisch comfort zoals die bestaan tussen verschillende personen. Dit gebrek aan mogelijkheden voor de gebruiker om individueel invloed uit te oefenen op het binnenklimaat heeft belangrijk bijgedragen aan het grote aantal bouwgerelateer-

de klachten. Deze klachten, in combinatie met de grotere waarde die aan de energetische aspecten van het conditioneren van de binnenuimte wordt gehecht, hebben er toe geleid dat er nog steeds naar betere alternatieven wordt gezocht om het binnenklimaat voor de individuele gebruiker te optimaliseren. Deze alternatieven focussen enerzijds op een meer natuurlijke wijze van klimatiseren, waarbij individuele controle op het klimaat wel wordt meegenomen [11], of anderzijds, wanneer mechanische ventilatie noodzakelijk is, op systemen die slechts de bedoeling hebben om de thermische condities in de directe omgeving van de gebruiker van zo een systeem te beïnvloeden, zogenoemde werkplekklimatiseringssyste-



Dhr. M.G.L.C. Loomans

men [2]. Deze laatstgenoemde systemen creëren een microklimaat binnen een macroklimaat door de geconditioneerde toevoerlucht nabij de werkplek te introduceren, dus dichtbij de gebruiker. Door de lokale zones die op die manier ontstaan kunnen de eisen over het thermisch comfort in het macroklimaat enigszins worden afgezwakt, zodat bijvoorbeeld de energie-efficiëntie kan worden verbeterd [3]. Het belangrijkste voordeel van werkplekklimatiseringssystemen is vooralsnog echter de mogelijkheid tot een individuele controle van de thermische condities in de microzone, waardoor de tevredenheid van de gebruiker kan worden vergroot.

Werkplekklimatiseringssystemen voor kantooromgevingen zijn al in de jaren 70 ontwikkeld om de thermische condities nabij de gebruiker te corrigeren. Verschillende meubilair- en vloergebonden toevoersystemen voor kantoor- en vergaderruimten zijn bijvoorbeeld beschreven in [13]. Een wijdverspreide introductie van dit soort systemen werd echter belemmerd door de investerings-

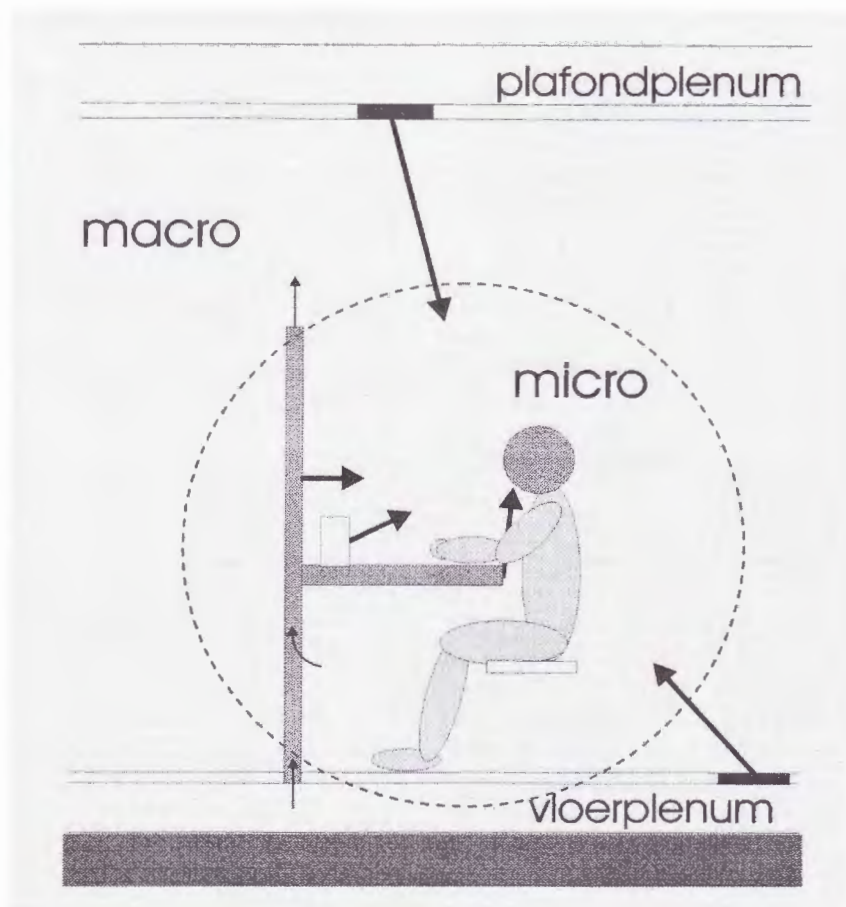
* TNO Bouw, Divisie Gebouw en Installatie, Delft
Het in dit artikel beschreven onderzoek is uitgevoerd als onderdeel van een promotiewerk aan de Technische Universiteit Eindhoven, onder de supervisie van prof. P.G.S. Rutten.

kosten en de praktische beperkingen van de technische implementatie. Heden ten dage vormen deze oorspronkelijke ontwerpen van individueel regelbare toevoersystemen echter nog steeds de basis voor nieuwe ontwikkelingen op dit gebied. Een overzicht van de huidige beschikbare systemen kan bijvoorbeeld worden gevonden in [3]. Figuur 1 maakt duidelijk dat inmiddels nagenoeg alle posities rond de gebruiker gebruikt kunnen worden om een microklimaat te creëren. Normaal gesproken introduceren dit soort systemen de lucht via relatief kleine toevoeropeningen, met een relatief hoge snelheid en turbulentie-intensiteit.

In tegenstelling tot de karakteristieken van de hierboven genoemde werkplekklimatiseringssystemen, wordt hier het BGV-concept geïntroduceerd (figuur 2). De bedoeling van dit concept is om een microklimaat te creëren door de toevoerlucht onder het bureau, dicht bij de gebruiker, toe te voeren. Hierbij worden de regels van het verdringingsventilatieprincipe toegepast: toevoer van de lucht over een relatief groot oppervlak met een relatief lage snelheid (0,1...0,3 m/s). In dit concept wordt een verdringingsventilatie-unit onder het bureaublad geplaatst, tegen de achterzijde van het bureau. In deze unit kan een ventilator worden geïntegreerd om geconditioneerde lucht uit een vloerplenum te halen. Het toeren-tal van de ventilator bepaalt dan het toevoerdebiet. De temperatuur kan worden gecontroleerd via een elektrische naverwarming of door recirculatie met behulp van een mengventiel. Daarnaast bestaan er nog andere mogelijkheden om de lucht te distribueren en toe te voeren, waarbij eveneens controle op het debiet en de temperatuur mogelijk is, bijvoorbeeld een tweekanaalsysteem [16].

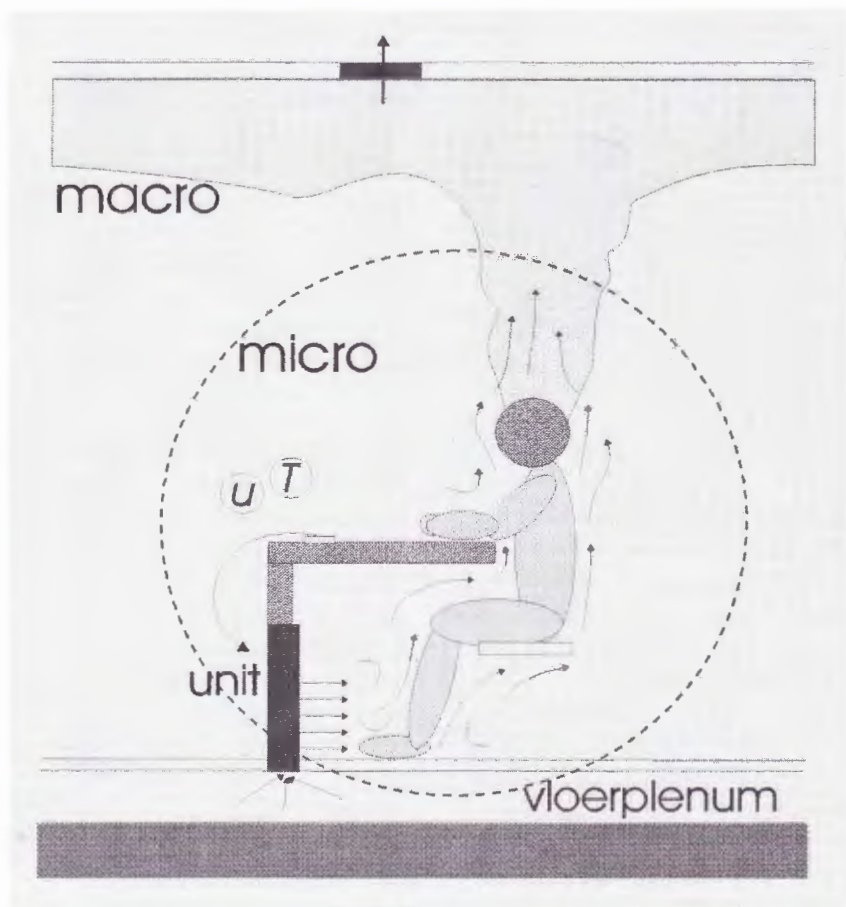
Het BGV-concept probeert de positieve eigenschappen van verdringingsventilatie, bijvoorbeeld de hogere ventilatie-effectiviteit in vergelijking tot mengventilatie, met die van werkplekklimatisering, bijvoorbeeld de controle op de thermische comfortcondities, te combineren. Dit concept is al eens succesvol toegepast. Dit betrof een dealers room in Sydney, Australië.

Het BGV-concept werd voor het eerst toegepast door P.G.S. Rutten toen hij



Overzicht van de toegepaste locaties voor op werkplekklimatisering gebaseerde toevoersystemen

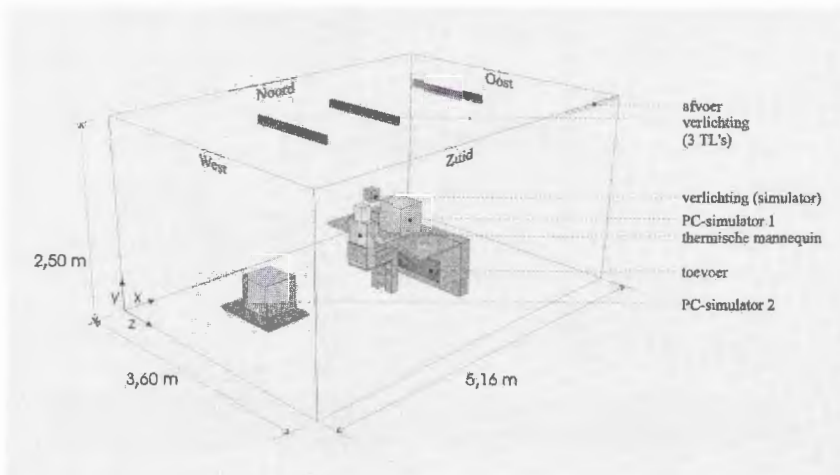
-FIGUUR 1-



Het bureaugebonden verdringingsventilatiesysteem

-FIGUUR 2-

werkzaam was bij Lincolne Scott Australia Pty Ltd), waarbij sprake was van een grote koellast. De prestaties van het BGV-concept voor normale kantoorconfiguraties zijn echter nog niet duidelijk. Wanneer de toevoertemperatuur lager is dan de gemiddelde ruimtetemperatuur, wordt relatief koele lucht direct nabij een kritische positie van het lichaam ingebracht, dus bij de enkels. Hoewel het thermische comfort onder directe controle van de gebruiker staat, is niet duidelijk:



De gemodelleerde kantoorruimte

-FIGUUR 3-

- of daadwerkelijk een micro-/macroklimaat wordt gecreëerd;
- wat de prestaties zijn van het BGV-concept in termen van koelvermogen en verontreinigingsafvoereffectiviteit, bij een breed gebied van instelpunten zoals opgegeven door de gebruiker;
- wat de macroklimaatcondities zijn (gegeven een microklimaat) en onder welke omstandigheden additionele koeling en verse lucht noodzakelijk zijn.

ONDERZOCHE CONFIGURATIE

Experimentele opstelling

De experimenten in dit onderzoek zijn uitgevoerd in een op ware grootte ontworpen klimaatkameropstelling. De modelkantoorruimte, $L \times B \times H = 5,16 \times 3,6 \times 2,7 \text{ m}^3$ (0,2 m plenumhoogte meegerekend), was opgebouwd in de (grotere) klimaatkamer van de capaciteitsgroep FAGO ($5,16 \times 9,7 \times 2,7 \text{ m}^3$) op de Technische Universiteit Eindhoven. Alle wanden van deze klimaatkamer kunnen op een vooraf ingestelde temperatuur worden geregeld met behulp van de klimaatkamerregeling.

Een luchtbehandelingsstelsel werd gebruikt om geconditioneerde lucht aan een op overdruk staand vloerplenum toe te voeren.

In figuur 3 is een schematische weergave van de modelkantoorruimte gegeven. De afmetingen en het toegepaste coördinatenstelsel zijn in de figuur opgenomen. De belangrijkste elementen in de ruimte zijn ook afgebeeld. De toevoer, een standaard verdringingsventilatioerooster, is gepositioneerd onder de tafel en de afvoer be-

vindt zich in de zuidoost hoek van de ruimte, nabij het plafond. In deze experimentele opstelling was het niet mogelijk om de toevoerparameters nabij het rooster/bureau in te stellen of te corrigeren. De configuratie staat dit in principe echter wel toe. De temperatuurregeling was opgenomen in de klimaatkamerregeling. Het toevoerdebiet werd handmatig vastgesteld. Er zijn verschillende warmtebronnen in de ruimte geplaatst. De koellast hiervan is gemeten met behulp van een wattmeter. Omdat de persoon die aan het bureau zit een essentieel onderdeel vormt van het BGV-concept, is er een vereenvoudigde versie van een thermische mannequin ontworpen en gebouwd. Deze thermische mannequin representeert het menselijk lichaam, zowel wat betreft de geometrie als de warmteverdeling over het lichaam. In de thermische mannequin zijn gloeilampjes en ventilatoren gebruikt als warmtebronnen. De warmteverdeling over de mannequin is geverifieerd door een vergelijking van de oppervlaktetemperatuur van de thermische mannequin met die van een echt persoon, met behulp van infraroodthermografie.

Omnidirectionele lage-snelheidshetebolanemometers en thermokoppels zijn gebruikt om respectievelijk de luchtsnelheid en de luchttemperatuur te meten. De wandtemperaturen zijn met behulp van weerstandsthermometers (PT-100) gemeten. Een volledige beschrijving van de experimentele opstelling is gegeven in [14].

Numerieke techniek

Om het luchtstromingspatroon in de BGV-configuratie te simuleren is gebruik gemaakt van Computational Fluid Dynamics (CFD). De gesimuleerde configuratie komt overeen met de in figuur 3 afgebeelde experimentele configuratie. Hierbij is gebruik gemaakt van een ongelijkmatig rechthoekig grid. De numerieke resultaten die hier zijn beschreven, zijn verkregen met een lage-Reynoldsgetal RNG-k- ϵ turbulentiemodel [9], waarbij de grenslaag nabij de wand is berekend met behulp van standaard wandfuncties. De gemiddelde warmteoverdrachtscoëfficiënt (α) was hierbij in de definitie van de constante temperatuur randconditie opgenomen om de warmtestroom aan de wand te berekenen. Gemiddeld over alle onderzochte situaties zijn de volgende waarden gebruikt: vloer, $\alpha_{\text{gem}} = 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$; plafond, $\alpha_{\text{gem}} = 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$; wand, $\alpha_{\text{gem}} = 2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Deze coëfficiënten zijn afgeleid uit uitgebreide stationaire klimaatkamerexperimenten voor dezelfde configuratie [14]. Het gebruik van de standaard wandfuncties om de warmtestroom aan de wand te berekenen leidde tot een onderschatting van de werkelijke waarde met, gemiddeld, een factor twee. De warmtebronnen in de ruimte zijn gemodelleerd met een constante warmtestroomrandconditie. De met behulp van het CFD-model berekende resultaten laten een goede overeenkomst zien met de gemeten temperatuurverdeling en de gemiddelde turbulentieintensiteit in de ruimte [14].

STATIONAIR GEDRAG

Stromingspatroon

Het stationaire stromingspatroon zoals dat met het BGV-concept wordt gecreëerd is zowel experimenteel als numeriek voor een zestal verschillende debieten ($q_v = 0,010$ tot $0,047 \text{ m}^3/\text{s}$) en een tweetal koellastvarianten ($Q = 125$ en 500 W) onderzocht. In de eerste koellastvariant vormde de thermi-

sche mannequin de enige warmtebron. In de tweede variant waren alle aanwezige warmtebronnen geactiveerd. In het onderzoek is de aandacht onder andere gericht geweest op situaties waarbij een verdringingsventilatiestromingspatroon werd gecreëerd ($\theta_{\text{wand,gem}} - \theta_{\text{toevoer,gem}} = 1$ tot 3K). Figuur 4 toont een typisch voorbeeld van de temperatuurs- en snelheidsverdeling in het centrale vlak van de configuratie waarin het BGV-concept is toegepast. De bij deze resultaten behorende randcondities zijn samengevat in tabel 1.

Volumedebiet	$q_v = 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$
Totale koellast (51% convectief)	$Q = 485 \text{ W}$
Temperatuurverschil	$\theta_{\text{wand,gem}} - \theta_{\text{toevoer,gem}} = 2,5 \text{ K}$

Randcondities (figuur 4)

-TABEL 1-

Figuur 4a laat zien dat de temperatuurgradiënt nabij de persoon, met name nabij de benen, groter is dan op posities verder weg. Ook is er een verschil in temperatuurgradiënt zichtbaar aan beide zijden van het bureau. Deze karakteristieken en het snelheidsveld geven de lokale invloed van het systeem weer.

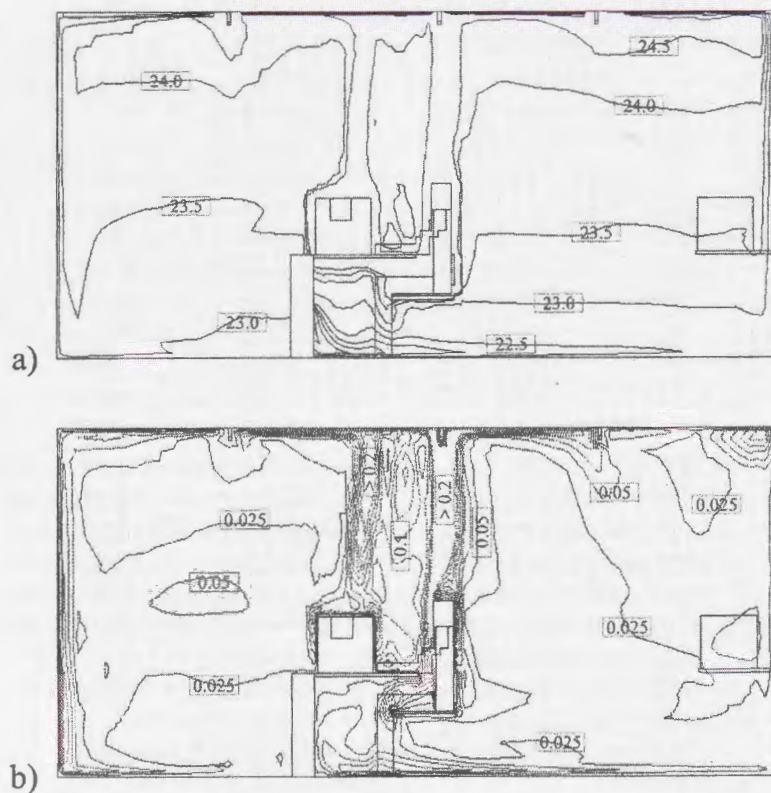
Daarnaast is de persoon aan het bureau de enige warmtebron die lucht vanuit de toevoerlaag nabij de vloer kan induceren. Omdat het scheidingsvlak tussen de laag met koelere en schonere toevoerlucht en de warme en meer vervuilde bovenlaag beneden hoofd-niveau ligt, zal de lucht nabij de mond van een beduidend betere kwaliteit zijn dan op andere posities in de ruimte die op een zelfde hoogte liggen. Dit effect wordt bevestigd door lokale gemiddelde luchtleeftijdsmetingen voor dezelfde configuratie, die zijn uitgevoerd door [15]. Wanneer deze resultaten echter, met behulp van het door [4] gedefinieerde 'personal exposure model', worden vergeleken met resultaten voor configuraties met standaard verdringingsventilatie [4], dan blijkt dat de effectiviteit van entrainment van de toegevoerde lucht naar de grenslaag langs het lichaam (η_p) niet te zijn verbeterd. (Met entrainment wordt be-

doeld: de opname van omgevingslucht in de convectieve pluim). Om deze vergelijking mogelijk te maken is verondersteld dat de lokale gemiddelde luchtleeftijd evenredig is met de verontreinigingsconcentratie. De stationaire resultaten voor de BGV-configuratie zijn in [14] nader vergeleken met metingen uit de literatuur, die zich concentreerden op configuraties met standaard verdringingsventilatie. Deze vergelijking maakt duidelijk dat de verschillen tussen de resultaten voor het BGV-concept en die voor een ruimte met standaard verdringingsventilatie verwaarloosbaar zijn. De verklaring hiervoor ligt in het feit dat het grootste deel van de toegevoerde koelere lucht zich eerst over het hele vloeroppervlak zal uitspreiden alvorens terug te keren naar de warmtebron (de gebruiker) en in de thermische pluim daarvan te worden opgenomen. Het debiet in deze thermische pluim is op vloerniveau te klein om alle toegevoerde lucht in een keer op te nemen. Daarnaast wordt op hogere posities in de ruimte lucht in de pluim geïnduceerd als gevolg van entrainment. Deze effecten konden worden bevestigd door

visualisatie van het stromingspatroon met behulp van rook.

Thermisch comfort

Omdat de toevoertemperatuur lager is dan de ruimtetemperatuur en omdat de lucht wordt toegevoerd nabij een kritische positie van het lichaam, namelijk de enkels, worden de toevoercondities in belangrijke mate bepaald door de eisen voor het thermisch comfort. Hoewel de gebruiker in principe controle heeft over deze condities, zijn, ter illustratie, voor de uitgevoerde metingen de heersende thermische condities afgeleid. Om de PMV, PPD en PD-waarden te bepalen [7,8] zijn snelheids- en temperatuurmetingen nabij de enkel gebruikt. De PMV-relatie is echter afgeleid voor thermisch uniforme condities. Omdat in het BGV-concept de thermische condities nabij de enkel het meest kritisch zullen zijn is aangenomen dat deze condities voor het hele microklimaat gelden. Uit de op deze manier verkregen resultaten kan worden geconcludeerd dat, volgens de definitie van PMV, de thermische condities enigszins koel zijn (PMV = -0.5 tot -1; PPD = 10% tot



Typisch voorbeeld van het numeriek gesimuleerde temperatuur- (a; in °C) en snelheidspatroon (b; in m/s) op het centrale vlak in een kantoorconfiguratie dat is uitgerust met het BGV-concept

-FIGUUR 4-

26%). Voor de meeste van de onderzochte situaties wordt daarmee dus niet voldaan aan de eisen zoals geformuleerd in de ASHRAE standard 55-1992: PPD < 10%. Omdat de snelheden erg laag blijven wordt, met uitzondering van het hoogste onderzochte debiet, wel voldaan aan de eisen over tocht (PD < 15%). Om de PMV-waarde te vergroten zou de toevoertemperatuur moeten worden verhoogd. Dit leidt dan echter wel tot een reductie in de koelcapaciteit van het systeem.

Het verticale temperatuurverschil tussen 0,1 m en 1,1 m hoogte was voor alle onderzochte situaties kleiner dan 3 K. Dit voldoet daarmee aan de hiervoor opgestelde eisen [1]. Skistad [17] raadt echter aan om de verticale temperatuurgradiënt te beperken tot 2 K, omdat bij verdringingsventilatie hogere luchtsnelheden verwacht mogen worden rondom de enkels. Wanneer hiervan wordt uitgegaan, wordt in de meeste van de onderzochte situaties de eis niet gehaald.

Naast klimaatkamermetingen met de vereenvoudigde thermische mannequin zijn er ook een aantal indicatieve tests gedaan met medewerking van proefpersonen die gedurende 1,5 uur in de experimentele opstelling aan het bureau zaten te werken. In totaal hebben vijf personen geoordeeld over de thermische comfort condities bij $q_v = 0,019 \text{ m}^3/\text{s}$, $\theta_{\text{wand}} \approx 23^\circ\text{C}$ en een toevoertemperatuur tussen 17°C en 24°C . De testpersonen waren in dit geval de enige warmtebronnen in de ruimte en zij waren niet in staat om de thermische condities te veranderen. De warmteweerstand van de kleding werd geschat op 0,5 tot 0,6 clo en het metabolisme op 60 tot $70 \text{ W}/\text{m}^2$. De proefpersonen moesten een vragenlijst invullen die was ontworpen volgens de beschrijving van Gan and Croome [10]. In deze vragenlijst werd gevraagd om het thermisch comfort te waarderen op een zeven-punts schaal, onderverdeeld naar het thermisch comfort op hoofd-, borst-, bovenbeen- en enkelniveau, tenslotte werd om een algehele impressie van het thermisch comfort gevraagd.

Uit deze indicatieve experimenten, konden de volgende conclusies worden getrokken: Het algehele thermisch comfort bij de gegeven randcondities varieerde van enigszins koel (PMV = -1)

bij een toevoertemperatuur tussen 17°C en 22°C tot neutraal (PMV = 0) bij 24°C . Er waren echter wel grote verschillen tussen de verschillende niveaus. Op enkelniveau varieerden de condities van koel (PMV = -2), bij 17°C toevoertemperatuur, tot enigszins koel bij 24°C . Op hoofdniveau werden de thermische condities voor alle onderzochte toevoertemperaturen als neutraal aangeduid.

Conclusies stationaire gedrag

De experimentele en numerieke resultaten voor het stationaire gedrag van het BGV-concept laten zien dat het concept in eerste instantie voldoet aan de verwachtingen: het systeem bepaalt de thermische condities in de directe omgeving van de gebruiker, hoewel in hoofdzaak nabij vloerniveau. Uit het gevisualiseerde stromingsveld (numeriek en met behulp van rook) moet echter worden geconcludeerd dat de grenzen van het aanwezige microklimaat veel minder scherp zijn dan verondersteld. Dit wordt gesteund door de lokale gemiddelde luchtleeftijdsmetingen van Roos [15] en de vergelijking met Brohus [4]. Deze resultaten laten een grote overeenkomst tussen het standaard verdringingsventilatie principe en het BGV-concept zien. Omdat de toevoer dicht bij de gebruiker is geplaatst, zijn de toevoercondities erg belangrijk. Wanneer wordt verondersteld dat in kantooromgevingen normaal gesproken koeling nodig is, dan laten de gemeten condities en de resultaten met behulp van de testpersonen zien dat de toevoertemperatuur relatief hoog moet zijn ($>20^\circ\text{C}$) om een thermisch comfortabele situatie te creëren. Het toevoerdebiet kan echter niet significant worden verhoogd vanwege het risico van tocht. Het convectieve koelvermogen dat met een BGV-unit kan worden verkregen is daardoor dus laag (orde van grootte 100 W ; $q_v \approx 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$, $\theta_{\text{wand, gem}} - \theta_{\text{toevoer, gem}} \approx 3 \text{ K}$). Onder normale omstandigheden zal dus additionele koeling nodig zijn om de kantoorruimte te klimatiseren, bijvoorbeeld met behulp van een koelplafond.

Met de hierboven besproken stationaire resultaten was het niet mogelijk om een belangrijke specificatie van werkplekklimatiseringssystemen te onderzoeken: het effectieve resultaat van een verandering in de toevoercondities. Omdat de toevoer dichtbij de gebrui-

ker is gesitueerd en individuele controle mogelijk is, blijft daarom de vraag open of het BGV-concept als een werkplekklimatiseringssysteem kan functioneren. Dit is het onderwerp van de volgende sectie.

TIJDSAFHANKELIJK GEDRAG

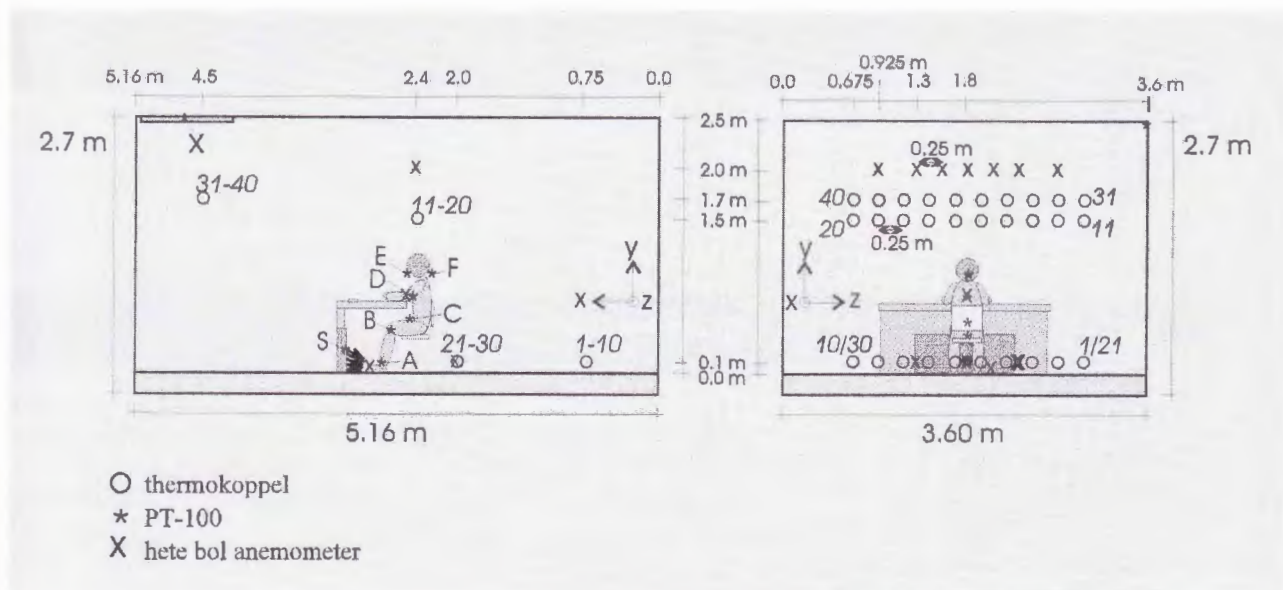
Introductie

Een belangrijke eis voor een individueel regelbaar werkplekklimatiseringssysteem is een korte *responsietijd* tussen het moment waarop de gebruiker een van de systeemparemeters verandert en het moment waarop deze gebruiker het resultaat van die regelactie daadwerkelijk gewaar wordt. Er is echter maar weinig bekend over dit gecombineerde fysische, fysiologische en psychologische onderwerp. Omdat in de literatuur geen kwantitatieve gegevens zijn gevonden, is voor dit onderzoek een responsietijd van maximaal een minuut aangehouden. Wanneer het gewaar worden van de regelactie langer dan een minuut duurt, dan kan er niet meer worden gesproken van een werkplekklimatiseringssysteem. In dat geval kan het systeem niet anticiperen op de snelle fysiologische veranderingen en dus de thermische comforteisen. Vanuit een psychologisch standpunt bezien: de gebruiker verwacht een nagenoeg direct voelbaar resultaat na een verandering van het instelpunt. Alleen daarmee wordt de controle over het systeem bevestigd.

Het resulterende effect van een verandering van de toevoercondities nabij de gebruiker, $(\theta_{\text{eind}} - \theta_{\text{start}})_i$, verschilt van de absolute verandering van de toevoercondities, $(\theta_{\text{eind}} - \theta_{\text{start}})_{\text{toevoer}}$. Dit effect wordt aangeduid als de amplitude van de stapresponsie en wordt hier verder aangeduid met 'stapresponsie'. De stapresponsie is gedefinieerd als de verhouding tussen de verandering op een bepaald punt in de ruimte ten opzichte van de instelpuntverandering aan de toevoer bij hernieuwde stationaire omstandigheden. Voor bijvoorbeeld een verandering in de toevoertemperatuur zou dit geschreven worden als,

$$\text{stapresponsie} = \frac{(\theta_{\text{eind}} - \theta_{\text{start}})_i}{(\theta_{\text{eind}} - \theta_{\text{start}})_{\text{toevoer}}} \quad (1)$$

De stapresponsie zou bij voorkeur een waarde in de buurt van één moeten



Configuratie voor tijdsafhankelijke experimenten

-FIGUUR 5-

hebben. Een kleine waarde voor de stapresponsie betekent een grote demping.

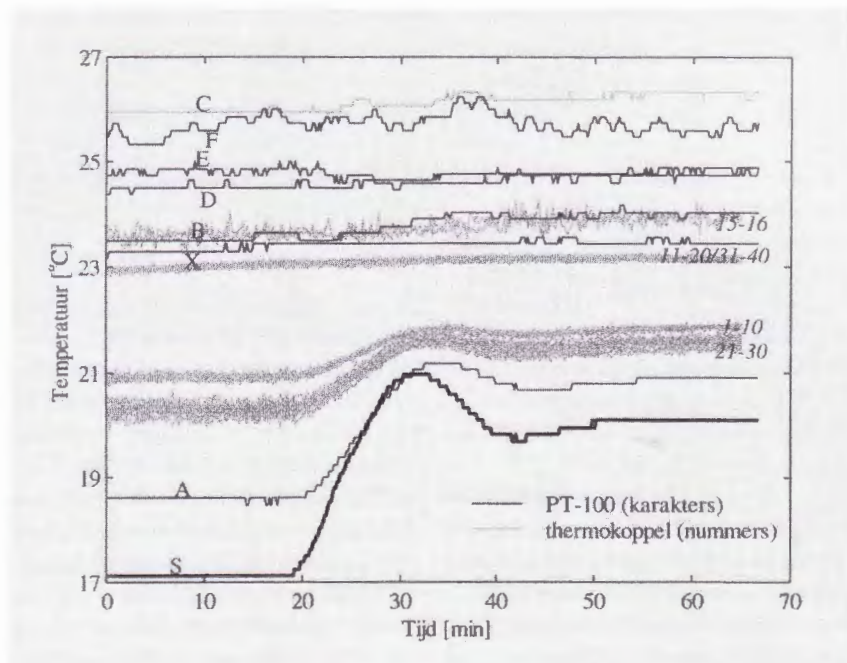
De demping is gedefinieerd als

$$\text{Demping} = (1 - \text{stapresponsie}) \times 100\% \quad (2)$$

Voor individueel regelbare systemen die de lucht met een relatief hoge snelheid in de richting van de gebruiker toevoeren [3] zal de responsietijd voor een verandering in de toevoersnelheid normaal gesproken weinig problemen opleveren. Dit geldt ook voor de stapresponsie aangezien entrainment van omgevingslucht beperkt blijft wanneer de afstand tussen de toevoer en de gebruiker relatief klein is. Voor het BGV-concept zijn deze niet-stationaire parameters kritischer. Ze zijn daarom langs experimentele en numerieke weg onderzocht. Voor de numerieke studie is gebruik gemaakt van een relatief eenvoudig een-dimensionaal model van het stromingsprobleem.

Tijdsafhankelijke experimenten

Voor de experimentele aanpak is de hierboven beschreven experimentele opstelling enigszins aangepast. Er zijn extra temperatuuropnemers geplaatst nabij de thermische mannequin, nabij de 'enkel', het 'kruis', de 'nek' en de 'mond'. De temperaturen boven 'enkel'-niveau zijn gemeten in de grenslaagstroming van de mannequin, op 0,02 m ± 0,005 m afstand van het oppervlak van de mannequin. Deze temperaturen zijn gemeten met PT-100's. De andere meetsonen (anemometers en thermo-



Temperatuur als functie van de tijd voor het beschreven experiment

-FIGUUR 6-

koppels) zijn op verschillende hoogtes en afstanden tot de toevoer gepositioneerd. Gedurende alle hierna uitgevoerde metingen zijn deze posities niet veranderd. Deze meetopstelling is samengevat in figuur 5.

Een meting werd uitgevoerd over een periode van 65 minuten, waarbij de thermische mannequin de enige warmtebron vormde. Voor aanvang van de metingen werd met behulp van de klimaatkamerregeling voor een stationaire situatie gezorgd. Deze condities werden geregistreerd gedurende een periode van ongeveer 20 min, waarna een 'stap'

van +3 K in de toevoertemperatuur werd geïntroduceerd. De eindwaarde voor de toevoertemperatuur werd met de hand geregeld gedurende het resterende deel van de registratietijd. De wandtemperaturen bleven onder controle van de klimaatkamerregeling. Het volumedebiet was bij de meeste tijdsafhankelijke metingen geregeld op $q_v = 0,019 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tijdsafhankelijke experimentele resultaten

Omdat de geregistreeerde snelheden geen problemen opleveren voor het thermisch comfort is de discussie van de resultaten

PT-100								
	$(\theta_{\text{eind}} - \theta_{\text{start}})_{\text{toevoer}}$	A	B	C	D	E	F	X
1.	2,96°C	0,78	0,18	0,13	0,12	-0,02	0,04	0,04
2.	2,95°C	0,78	0,15	0,11	0,09	-0,02	0,04	0,02

thermokoppels								
	$(\theta_{\text{eind}} - \theta_{\text{start}})_{\text{toevoer}}$	1-10	11-20	15-16	21-30	31-40		
1.	2,96°C	0,31	0,05	0,11	0,42	0,05		
2.	2,95°C	0,29	0,03	0,10	0,44	0,03		

Meetresultaten stapresponsie, zie formule (1)

-TABEL 2-

gericht op de temperatuurmetingen. Figuur 6 laat een typisch resultaat zien van het temperatuurverloop op verschillende posities nabij de thermische mannequin (PT-100's) en in de ruimte (thermokoppels). Deze resultaten gelden voor een situatie waarbij het verdringingsventilatie-stromingspatroon gehandhaafd blijft na de temperatuurstap (van 17°C tot 20°C). De karakters en getallen in de figuur verwijzen naar de meetposities zoals die in figuur 5 zijn aangegeven. De resultaten voor de stapresponsie zijn samengevat in tabel 2. Zij zijn bepaald uit $(\theta_{\text{eind}} - \theta_{\text{start}_i}) / (\theta_{\text{eind}} - \theta_{\text{start}_{\text{toevoer}}})$, waarbij i de met een specifieke PT-100 of met een aantal thermokoppels gemeten luchttemperatuur representeert. Om de reproduceerbaarheid van deze experimenten aan te tonen is in de tabel het resultaat

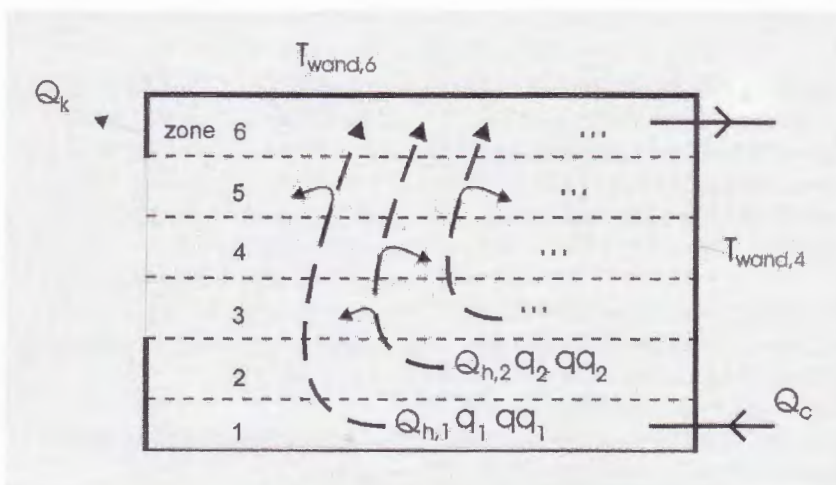
van een tweede meting gegeven. Gegeven de meetnauwkeurigheid (= registratienauwkeurigheid voor de PT-100) heeft de stapresponsie een nauwkeurigheid van $\pm 0,05$ bij waarden voor de stapresponsie die kleiner zijn dan 0,3. Dit verklaart de negatieve waarde die op positie E is bepaald.

De resultaten laten een nagenoeg directe respons nabij de 'enkels' van de thermische mannequin zien (positie A). Dit punt bevindt zich op slechts 0,3 m van de toevoer. De demping als gevolg van entrainment is echter al 22%. Op andere posities neemt de demping snel toe tot 80% en hoger. Wanneer we deze resultaten vergelijken met de demping bij de afvoer (positie X) of ter hoogte van de thermokoppels in de ruimte (zie tabel 2), dan kan worden gecon-

cludeerd dat de temperatuurstijging nabij de thermische mannequin overeenkomt met de gemiddelde temperatuurstijging in de gehele ruimte. *Er is dus geen specifiek voordeel te behalen door dicht bij een verdringingsventilatie-toevoerunit te gaan zitten.*

De stapresponsie kan worden bepaald met behulp van objectieve criteria: de gemiddelde start- en eindtemperatuur. Gezien het verloop van de temperatuurstap is dit echter niet mogelijk voor de responsietijd. Een orde van grootte kan alleen grafisch worden afgeschat. Uit figuur 6 lijkt het duidelijk dat de responsietijd nabij een groot deel van het lichaam langer is dan de gepostuleerde maximale responsietijd.

Een verbetering van de stapresponsie en de responsietijd is verder onderzocht met configuraties waarbij ondermeer het ruimtevolume in het onderste deel van de ruimte ~25% was verkleind. Wanneer na de temperatuurstap een verdringingsventilatie stromingspatroon werd gehandhaafd, bleven de verschillen met de hierboven beschreven resultaten in het algemeen echter klein en beperkten ze zich tot het onderste deel van de ruimte. Boven het niveau van de 'benen' werd nabij de thermische mannequin geen significante verbetering van de stapresponsie gemeten. Bij een 1,5 keer hoger debiet nam de stapresponsie nabij de thermische mannequin met ongeveer 30% toe.



Zonemodel van de ruimte (q_i en $q q_i$ zijn factoren die een correcte representatie van de temperatuurgradiënt in de ruimte mogelijk maken)

-FIGUUR 7-

numerieke aanpak zich gericht op de niet-stationaire effecten van een ruimte met een standaard verdringingsventilatie-unit aan de wand. Dit staat een relatief eenvoudige eendimensionale numerieke benadering toe.

In dit geval wordt er dus uitgegaan van een 'worst-case' scenario voor het BGV-concept. Daarnaast wordt het door dit uitgangspunt mogelijk om een vergelijking te maken met de resultaten zoals die zijn gevonden nabij de thermische mannequin wanneer het BGV-concept wordt toegepast. Indien de verschillen in de tijdsafhankelijke parameters significant zijn, dan kan het BGV-concept een verbetering van de efficiëntie van het verdringingsventilatiesysteem opleveren, in vergelijking tot de standaard toepassing. Tenslotte is, vanwege de experimentele beperkingen, de responsietijd bijna niet aan de orde gekomen. Deze parameter kan echter eenvoudig uit de numerieke resultaten worden afgeleid.

Het model is gebaseerd op de bij een verdringingsventilatiestromingspatroon karakteristieke temperatuurstratificatie. De ruimte is gerepresenteerd met een aantal gestapelde zones (zie figuur 7). De warmte wordt getransporteerd door convectie (Q_c) en door geleiding aan de wanden (Q_k). Verder kan er in iedere zone een warmtebron worden geïntroduceerd ($Q_{h,i}$). Vervolgens wordt de warmtebalans voor iedere zone opgelost. De modelering is nader beschreven in [14].

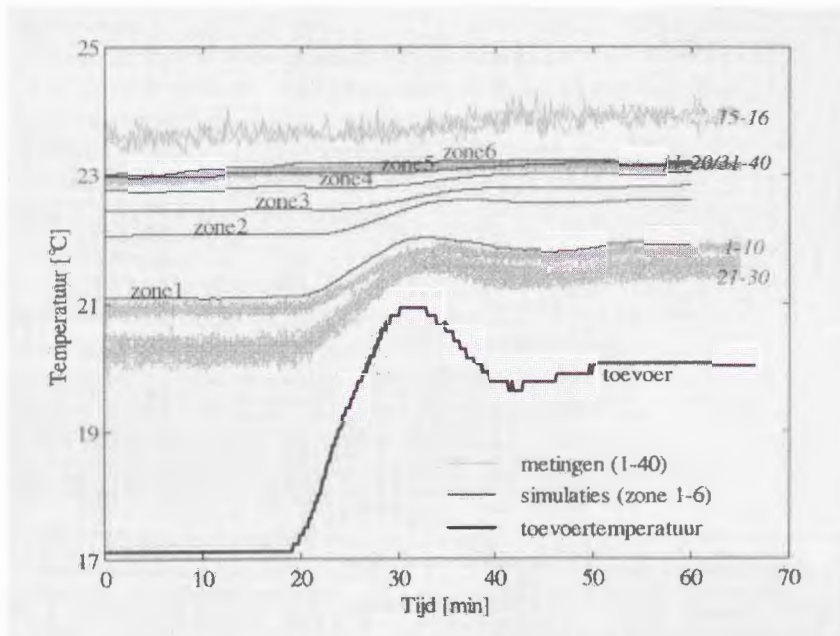
Het numerieke model is gefit aan de thermokoppelmetingen uit de tijdsafhankelijke experimenten. Voor de warmteoverdrachtscoëfficiënten zijn resultaten uit de stationaire metingen en simulaties gebruikt [14] en gegevens uit de literatuur [5]. Een vergelijking tussen meting en simulatie is weergegeven in figuur 8. De voor het model afgeleide coëfficiënten bleken geschikt voor de tijdsafhankelijke toepassing in de range van $q_v = 0,010$ tot $0,039 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tijdsafhankelijke numerieke resultaten

Voor een echte stap in de temperatuur en/of het volumedebiet wordt de responsietijd (τ_r) bepaald volgens de $1-e^{-1}$ methode. De stapresponsie ($\Delta\theta_{\text{zone},i} / \Delta\theta_{\text{toevoer}}$) is gedefinieerd als het temperatuurverschil in een zone tussen de eind- en startwaarde, relatief tot de temperatuurstep aan de toevoer. Bij

een stap in het volumedebiet is dit relatief tot het resulterende temperatuurverschil in zone 1. Deze parameters zijn onderzocht voor een temperatuurstep, een stap in het volumedebiet en een gecombineerde stap in temperatuur en volumedebiet. Verder zijn de gevoeligheid van de responsietijd en de staprespons voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt en het ruimtevolumen onderzocht. De resultaten uit deze parameterstudie zijn samengevat in [14].

terwijl een duidelijk hogere waarde moet worden nagestreefd. De responsietijd is veel langer dan de gepostuleerde waarde van 1 minuut. Alleen minder realistische (grote) veranderingen van de toevoercondities kunnen de thermische condities in het microklimaat voldoende snel naar de wensen van de gebruiker corrigeren. Zeer waarschijnlijk zal dit echter het algehele thermische comfort negatief beïnvloeden.



Vergelijking van de simulatieresultaten met het zonemodel en thermokoppeldata (zie figuur 8)

-FIGUUR 8-

Hier wordt alleen het resultaat voor de hierboven beschreven meting gegeven. Uitgaande van de gemeten randcondities, wordt de responsietijd berekend op $\sim 0,5$ min en ~ 3 min voor respectievelijk zone 1 ($y = 0$ tot $0,4$ m) en 2 ($y = 0,4$ m tot $0,8$ m). De stapresponsie wordt berekend op respectievelijk $0,17$ and $0,10$. De tijdsafhankelijke karakteristieken van het in de experimenten onderzochte BGV-systeem zijn dus gelijk aan die van een standaard verdringingsventilatiesysteem (vergeleijk met de resultaten in tabel 2).

Conclusies tijdsafhankelijke gedrag

De tijdsafhankelijke metingen en simulaties bevestigen de eerdere conclusies: In een standaard kantoorconfiguratie is het BGV-concept niet in staat om een duidelijk microklimaat te creëren. Wanneer aan de toevoercondities een realistische verandering wordt opgelegd, dan is de stapresponsie nabij de gebruiker in de orde van grootte van $0,1$,

CONCLUSIES

Wanneer de resultaten van het stationaire en tijdsafhankelijke gedrag voor het BGV-concept worden gecombineerd, dan moet de eindconclusie luiden dat het bureaugebonden verdringingsventilatie (BGV-) concept niet kan worden gebruikt als individueel controlebaar werkplekklimatiseringssysteem voor standaard kantoorconfiguraties, tenzij er speciaal aandacht wordt geschonken aan de ruimteconfiguratie. Omdat het toevoerdebiet laag moet blijven ($< 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$), kunnen de thermische condities nabij het vloerniveau niet tot op hoofd niveau worden gehandhaafd. Oorzaken hiervoor zijn de entrainment en menging van de ruimtelucht aan de grenslaag van de convectieve pluim met de omgevende lucht. De korte afstand van de gebruiker tot de toevoerunit maakt hierbij geen verschil. Het systeem functioneert als een standaard verdringingsventilatiesysteem.

De veronderstelde eisen voor een individueel controlebaar systeem, een snelle responsie en weinig demping, kunnen niet door een verdringingsventilatiestromingspatroon worden bewerkstelligd. Dit geldt voor standaard verdringingsventilatiesystemen, maar ook voor vloergebonden roosters, die bij koeling de lucht met een lage snelheid de ruimte inbrengen (in de orde van grootte van 0,1...0,5 m/s). Een snelle verandering van de condities in het microklimaat moet worden verkregen met behulp van een parallel systeem, bijvoorbeeld een hoge luchtsnelheidsstelsel of een stralingspaneel dichtbij de gebruiker.

Het feit dat het BGV-systeem succesvol is geïntroduceerd in de dealers room in Sydney, Australië (zoals vermeld in de introductie), was het resultaat van een correcte configuratie van het systeem. Lange rijen van BGV-systemen aan beide zijden van een smalle gang beperken de mogelijkheden voor de toevoerlucht om zich te verspreiden als bij een standaard verdringingsventilatiestromingspatroon. In plaats daarvan wordt de lucht in verticale richting gedwongen langs de gebruiker. Omdat het volume in de onderste zone klein is kan de responsietijd kort zijn. De demping kan beperkt blijven omdat de warmteoverdracht aan de vloer relatief klein is in vergelijking tot de hierboven beschreven experimentele configuratie. Een recente toepassing van het BGV-concept, beschreven in [12], op nieuw voor een dealers room, maakt ook gebruik van de voordelen van dezelfde ontwerpcriteria als bij de dealers room in Sydney.

Er worden echter ook intenties voor andere mogelijke toepassingen van een combinatie van verdringingsventilatie en microklimaat gerapporteerd [6]. De hierboven beschreven resultaten laten echter duidelijk zien dat de voordelen die worden verwacht, wanneer verdringingsventilatie naar de gebruiker toe wordt gebracht, niet opwegen tegen de beperkingen van het thermisch comfort. Daarnaast blijft het koelvermogen dat met een BGV-systeem kan worden bereikt beperkt tot ongeveer 50 tot 100 W. Dit is normaal gesproken ver beneden de convectieve koellast die in een standaard kantoor aanwezig is.

Desondanks zijn er bepaalde toepassingen te noemen waar het BGV-concept wel een interessant alternatief zou kunnen bieden. Bijvoorbeeld in een receptiebalie in een atrium, of in concentratiewerkplekken (zogenoemde cocoons) in moderne kantoorinrichtingen. In geval van een balie in een atrium, dit is meestal een klein onderdeel van een grote ruimte die lastig te klimatiseren is. Door de toepassing van het BGV-concept zou achter de balie een microklimaat kunnen worden gerealiseerd. Daarvoor is het wel noodzakelijk dat de toegevoerde lucht in het baliegedeelte blijft. De lucht moet dan worden opgevangen in een soort kuip. Concentratiewerkplekken in moderne kantoorinrichtingen zijn vaak zeer kleine afgesloten kantoorruimten waar de lucht, als gevolg van de afmetingen van de ruimte, dichtbij de gebruiker moet worden toegevoerd. De voor het BGV-concept karakteristieke lage snelheden kunnen dan de kans op tochtklachten verminderen, terwijl de afmetingen van de ruimte een positieve invloed hebben op de tijdsafhankelijke parameters van het systeem. Deze voorbeeldtoepassingen zijn niet nader onderzocht binnen het hier beschreven onderzoek.

LITERATUUR

1. ASHRAE. 1992. *ANSI/ASHRAE Standard 55-1992, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Airconditioning Engineers, Inc., USA.
2. Bauman, F., Arens, E., Fountain, M., Huizenga, C., et al. 1994. *Localized thermal distribution for office buildings*, final report - phase III, Center for Environmental Design Research, University of California, Berkeley, USA.
3. Bauman, F.S.B. en Arens, E.A. 1996. *Task/Ambient conditioning systems: Engineering and application guidelines*. report CEDR-13-96, University of California at Berkeley.
4. Brohus, H. 1997. *Personal Exposure to Contaminant Sources in Ventilated Rooms*, thesis, Aalborg University, Aalborg, Denemarken.
5. Chen, Q. en Jiang, Z. 1992. *Significant questions in predicting room air motion*, ASHRAE Transactions, vol.98 part 1, pp.929-939.

6. Diehl, J.; en Schiller, H. 1997. *Entwicklungsstand, neue Systeme, Trends in der Raumtechnik*. Heizung, Lüftung, Haustechnik (HLH), Vol. 48 no.11, pp.30-37 (in het Duits).
7. Fanger, P.O. 1970. *Thermal Comfort*, thesis, Technical University of Denmark, Lyngby, Denemarken.
8. Fanger, P.O., Melikov, A.K., Hanzawa, H. en Ring, R. 1988. *Air turbulence and sensation of draught*, Energy and Buildings, 12, pp.21-39.
9. Fluent, Inc. 1998. *Fluent/UNS*, release 5.0, Lebanon, USA.
10. Gan, G. en Croome, D.J. 1994. *Thermal comfort models based on field measurements*, ASHRAE Transactions, vol.100 part 2, pp.782-794.
11. Hawkes, D. 1996. *The Environmental Tradition*, E&FN Spon, London, Great Britain.
12. HLH. 1997. *Individuelle RLT-Lösungen aus dem Labor*, Heizung, Lüftung, Haustechnik (HLH), Vol.48 no.3, pp.120 (in het Duits).
13. Krantz. 1984. *Air distribution systems*, report No. 3554 E, Krantz Products, Colchester, Groot-Britannië.
14. Loomans, M.G.L.C. 1998. *The measurement and simulation of indoor air flow*, thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Nederland (http://www.tue.nl/bwk/bfa/research/aio_research.html).
15. Roos, A. 1998. *On the effectiveness of ventilation*, thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Nederland.
16. Rutten, P.G.S. 1996. *The twin duct variable air volume system*, Proc. Indoor Air '96, vol.1, pp.307-312, Nagoya, Japan.
17. Skistad, H. 1994. *Displacement Ventilation*, Research Studies Press Ltd., Somerset, Groot-Britannië.