

Verdringingsventilatie-systeem in een kantoor



In kantoorgebouwen wordt in het algemeen het gehele vertrek van vloer tot plafond op de gewenste klimaatcondities gehouden. De luchttemperatuur in de verblijfszone is (nagenoeg) gelijk aan de temperatuur van de af-

voerlucht. De hierbij toegepaste systemen zorgen voor een volledige menging van de lucht in het vertrek. In principe is het echter alleen noodzakelijk dat in de verblijfszone de gewenste condities worden gehandhaafd. Bij toepassing van zogenaamde verdringingsventilatiesystemen verlopen de luchttemperatuur en de verontreinigingsniveaus met de hoogte in een vertrek. Deze systemen worden veelal gekarakteriseerd door een luchttoevoer op vloerniveau, afvoer in of dichtbij het plafond, een lage snelheid van de toevoerlucht en een temperatuur van de toevoerlucht enkele graden onder de vertrektemperatuur. De toegevoerde lucht verdeelt zich over het vloeroppervlak en stijgt daar waar zich warmtebronnen bevinden op. Verontreinigingen die worden geproduceerd nabij de warmtebronnen worden door de opstijgende luchtstromen meegevoerd.

- door ir. C.W.J. Cox, ing. P.A. Elkhuisen

Er ontstaat op deze wijze een zone met relatief lage luchttemperaturen en lage concentraties van verontreinigingen in het onderste deel van het vertrek en een zone met relatief hoge luchttemperaturen en hoge concentraties verontreinigingen in het bovenste deel van een vertrek. Dit resulteert in een hogere temperatuureffectiviteit (een grotere thermische behaaglijkheid) en een grotere ventilatie en ventilatie-effectiviteit (hogere luchtkwaliteit) in de verblijfszone bij een dergelijk systeem in vergelijking met een mengend systeem bij een zelfde ventilatiedebiet.

De hogere temperatuur- en ventilatie-effectiviteit bij verdringingsventilatiesystemen bieden mogelijkheden voor energiebesparing in de zomer. Bij een verdringingsventilatiesysteem is de luchttemperatuur in de verblijfszone lager dan de temperatuur van de afvoerlucht. Daardoor zal, bij dezelfde inblaastemperatuur en overigens gelijke condities, de temperatuur in de verblijfszone lager zijn dan die bij een mengend systeem. Voor het verkrijgen van eenzelfde comfort als bij een mengend systeem kan dan met een hogere inblaastemperatuur of eventueel met een lagere toevoervolu-

mestroom worden gewerkt. Eenzelfde beschouwing geldt ook voor het verontreinigingsniveau. Voor het verkrijgen van een gelijke luchtkwaliteit in de verblijfszone kan met een geringere toevoervolumestroom worden gewerkt.

In dit artikel worden de resultaten besproken van een meetonderzoek naar de werking van een verdringingsventilatiesysteem in de praktijk. Daarnaast komen berekeningen met een luchtstromingsprogramma aan de orde. De berekende luchttemperaturen, luchtsnelheden en de verdeling van verontreinigingen worden vergeleken met de in de praktijk gemeten waarden. De energiebesparingsmogelijkheden zijn gekwantificeerd door middel van berekeningen met een dynamisch model. De resultaten van dit onderzoek zijn gebruikt bij het samenstellen van de ISSO publicatie 40 [1] 'Werkplekklimatisering door verdringingsventilatie in een kantooromgeving' waarin ingegaan wordt op het bereiken comfort en het te verwachten energiegebruik. De ISSO-publicatie geeft verder ontwerprichtlijnen.

BESCHRIJVING VAN HET KANTOORVERTREK

De metingen zijn uitgevoerd in een kantoorvertrek in het gebouw van BRN Catering in Capelle aan den IJssel. Het meetvertrek is gesitueerd op de tweede verdieping, onder het dak. De kamer heeft één buitengevel (zie figuur 1). Het gebouw is aan de buitenzijde bekleed met gerint glas. Tussen de dubbele beglazing en het gerinte glas is zonwering (horizontale jaloezieën) geplaatst.

* TNO Bouw, afdeling Binnenmilieu, Bouwfysica en Installaties, Delft

De luchttoevoervoorziening (type IAR 07-05, Repus-systeem, Aerotherm; 0,48 m breed, 0,68 m hoog) is in een hoek van zijwand en gevel geplaatst. De onderzijde van de opening bevindt zich 0,27 m boven de vloer. De lucht wordt ingeblazen via nozzles en een geperforeerde plaat (diameter perforaties 3 mm, netto doorlaat 20%). Het luchtafvoerornament bevindt zich in het plafond, circa 1 m van de gangwand.

De temperatuur van de toevoerlucht wordt centraal geregeld, bij een buitentemperatuur van 0 °C of lager op 20 °C, bij buitentemperaturen boven 20 °C op 16 °C. De koeling van de toevoerlucht wordt pas ingeschakeld bij een buitentemperatuur boven 20 °C. De toevoerluchttemperatuur is altijd lager dan de vertrektemperatuur. De toe- en afvoerdebieten zijn constant gedurende werktijd. Tijdens de metingen bedroeg het toevoerdebiet 200 m³/uur (4,5 luchtwisselingen per uur). Het afvoerdebiet bedroeg slechts 92 m³/uur. Het verschil tussen toe- en afvoer werd gecompenseerd door exfiltratie via de kier onder de deur, kieren tussen toevoerkanaal en vloer en kieren tussen wanden en plafond. Uit metingen is afgeleid dat de exfiltratie bij de deur circa 40 m³/uur bedroeg, die bij het toevoerkanaal circa 25 m³/uur en die bij het plafond circa 40 m³/uur. Bij een aantal metingen is het afvoerdebiet verhoogd tot het toevoerdebiet.

De interne warmtebelasting varieerde gedurende werktijd van 14 tot 20 W/m² tijdens de metingen in de winterperiode en van 20 tot 33 W/m² in de zomerperiode. Aanvullende gegevens over gebouw en installatie zijn opgenomen in tabel 1, 2 en 3.

METINGEN

Luchttemperaturen in het kantoorvertrek zijn op vier niveaus (0,1; 0,6; 1,1 en 1,7 m) op vijf posities gemeten. Daarnaast zijn de temperaturen van de toevoerlucht en de afvoerlucht, de luchttemperaturen in de aangrenzende vertrekken en de oppervlaktetemperaturen van de wanden, raam, vloer en plafond gemeten. Tevens werden de globetemperatuur (in het midden van het vertrek), de inkomende zonnestraling en luchtsnelheden (met richtingsongevoelige anemometers) vastgelegd. De metingen werden bestuurd met behulp van een personal computer die stond

Randvoorwaarde/Parameter	Omschrijving	
Afmetingen	4,5 x 3,5 x 2,7 m	d x b x h
Type	tussenvertrek met 1 buitengevel	gelijke condities in naburige vertrekken
Oriëntatie buitengevel	Zuid-West	
Raamoppervlak	3 m ²	
Bouwfysische gegevens van het raamsysteem	ZTA = 0,25 U = 1,10 W/(m ² .K)	
Bouwfysische gegevens van de gevel	U = 0,37 W/(m ² .K)	
Interne warmtelast	1 persoon	100 W
	1 pc	150 W
	indirecte verlichting	70 W
	Totaal 20 W/m ²	per m ² netto vloeroppervlak

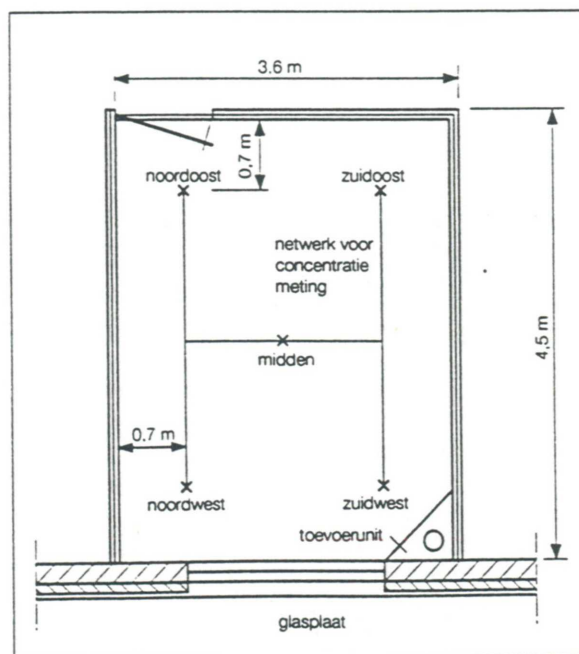
BESCHRIJVING VAN HET MEETVERTREK
-TABEL 1-

Randvoorwaarde/Parameter	Omschrijving	
Luchtdebiet totaal ventilatie	200 m ³ /uur per vertrek 50 m ³ /uur (buitenlucht minimaal per vertrek)	
Bedrijfstijd	5 dagen per week, 07:00-18:00 uitgeschakeld in weekend	
Nachtventilatie inschakelen	Ti > 20 °C Ti-Te > 6 °C	alleen in zomerperiode
uitschakelen	Ti < 16 °C Ti-Te < 6 °C	alleen in zomerperiode

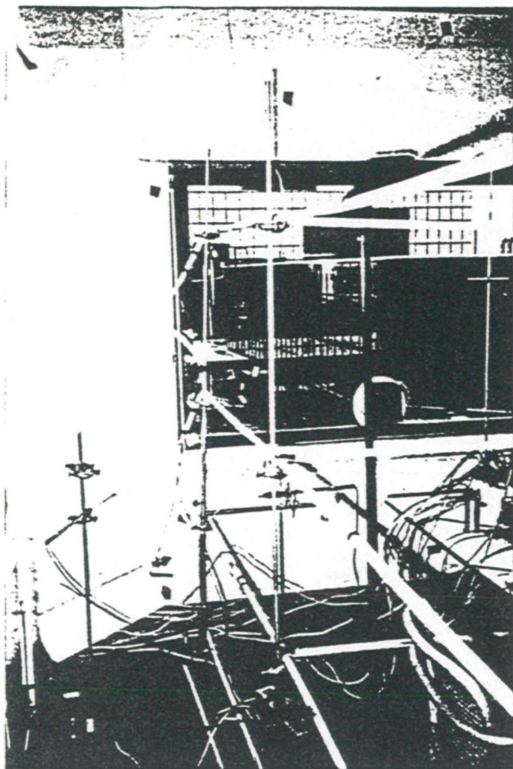
BESCHRIJVING VAN DE LUCHTBEHANDELINGSINSTALLATIE
-TABEL 2-

Randvoorwaarde/Parameter	Omschrijving
Installatietype	elektrische convector in vensterbank
Capaciteit	600 W per vertrek
Bedrijfstijd	5 dagen per week, 07:00-18:00, uitgeschakeld in weekend
Setpoint	inschakelen 21 °C

BESCHRIJVING VAN DE LOKALE VERWARMINGSINSTALLATIE
-TABEL 3-



PLATTEGROND VAN HET
MEETVERTREK
-FIGUUR 1-



MEETOPSTELLING
-FIGUUR 2-

opgesteld in een aangrenzend vertrek. Van elke grootheid werden over 5 minuten gemiddelde waarden opgeslagen op floppy-disk voor latere verwerking.

Voor de bepaling van de ventilatie-effectiviteit werd tracergas toegevoerd aan het vertrek. De concentratie werd achtereenvolgens gemeten op vier hoogten (0,1; 0,6; 1,1 en 1,7 m), in het toevoerkanaal en in het afvoer-rooster. Om de gemiddelde waarde op de vier hoogten in het vertrek te kunnen bepalen werd op alle hoogten een netwerk van buizen in de vorm van een "H" geïnstalleerd. Drie uiteinden van de H waren afgesloten. Aan de vierde zijde was een slang aangesloten die naar de meeteenheid leidde. Via kleine gaatjes werd lucht in de buizen gezogen. Van elke "H", het toevoerkanaal en het afvoer-rooster werd door middel van een pomp een lucht-tracergas-mengsel aangezogen en aangeboden aan een gasanalysator (Miran 80, Foxboro International). Elke 40 seconden werd een nieuw monster geanalyseerd. Ook deze meting werd bestuurd met behulp van een personal computer. Het luchtstromingspatroon in het vertrek werd zichtbaar gemaakt met behulp van kunstmatige rook. Dit werd vastgelegd met een video-camera voor analyse achteraf. De interne

warmte-afgifte van een personal computer en een persoon werden gesimuleerd met behulp van lampen in blikken. De metingen zijn uitgevoerd van 10 maart tot 22 maart en van 26 juli tot 10 augustus 1989. Figuur 2 toont de meetopstelling.

ANALYSE

De *temperatuur-effectiviteit* wordt berekend uit de temperatuur van de afgezogen lucht, de temperatuur van de toevoerlucht en de luchttemperatuur in het vertrek als:

$$E_t = (\Theta_e - \Theta_s) / (\Theta_w - \Theta_s)$$

met:

E_t temperatuur - effectiviteit (-)

Θ_e temperatuur van de afgezogen lucht ($^{\circ}\text{C}$)

Θ_s temperatuur van de toevoerlucht ($^{\circ}\text{C}$)

Θ_w luchttemperatuur in de verblijfszone ($^{\circ}\text{C}$)

Er wordt verondersteld dat bij een mengend systeem (met volledige menging) de temperatuur van de afvoerlucht gelijk is aan die in de verblijfszone en dus een temperatuur-effectiviteit gelijk aan 1 wordt bereikt. Een temperatuur-effectiviteit groter dan 1 impliceert een lagere temperatuur in de verblijfszone dan bij het afvoerpunt. Met betrekking tot koeling betekent dit een hogere effectiviteit in vergelijking met een mengend systeem.

De *stationaire ventilatie-effectiviteit* wordt op dezelfde wijze berekend als:

$$E_v = (C_e - C_s) / (C_w - C_s)$$

met:

E_v stationaire ventilatie-effectiviteit (-)

C_e concentratie in de afgezogen lucht (ppm)

C_s concentratie van de toevoerlucht (ppm)

C_w concentratie in de verblijfszone (ppm)

Ook hier wordt voor een mengend systeem een effectiviteit van 1 verondersteld. Een waarde hoger dan 1 impliceert een hogere effectiviteit bij het afvoeren van verontreinigingen uit de verblijfszone. Indien toevoer van verontreiniging in het vertrek plaatsvindt wordt de vergelijking:

$$E_v = C_e / C_w$$

HET LUCHTSTROMINGSPROGRAMMA

Voor deze studie is gebruikt gemaakt van het bij TNO ontwikkelde berekeningsprogramma voor luchtstromingen WISH3D [2]. Het programma is gebaseerd op de eindige-volume-methode. Met behulp van dit programma kan een laminaire en turbulente 3D-luchtstroming worden berekend in rechthoekige vertrekken. Voor de berekening wordt gebruik gemaakt van een indeling van het vertrek in kleine volumecellen (het rekenrooster). Het computerprogramma lost de tijdsafhankelijke vergelijkingen op voor behoud van massa, impuls, energie, en mogelijke gasvormige verontreinigingen voor iedere volumecel op.

De lucht wordt in het model beschouwd als een ideaal gas en een niet samendrukbaar fluïdum. De turbulentie is gemodelleerd met het welbekende k- ϵ model, resulterend in extra transportvergelijkingen voor k (de kinetische energie van turbulente fluctuaties) en ϵ (de energiedissipatie van deze turbulente fluctuaties).

Een aanzicht van het vertrek zoals gebruikt in de berekeningen is weergegeven in figuur 3. Het raam (in de achterwand), de toevoerunit in de linkerhoek en de afvoer in het plafond zijn duidelijk zichtbaar. In het midden van de kamer zijn een tafel en een stoel (zonder poten) geplaatst, waarop warmtebronnen zijn geplaatst om personen en apparatuur te kunnen simuleren. Een (niet-lineair) rekenrooster van totaal 44.100 volumecellen ($49 \times 30 \times 30$) is gebruikt.

RESULTATEN

Functionaliteit van het systeem

Ten gevolge van de relatief lage luchttoevoertemperatuur treedt de laagste vertrektemperatuur op bij de vloer. De temperatuur neemt toe met de hoogte tot circa 1,1 m. Daarboven is er praktisch geen verandering van de temperatuur met de hoogte. Een voorbeeld van het verticale profiel van de luchttemperatuur is gegeven in figuur 4.

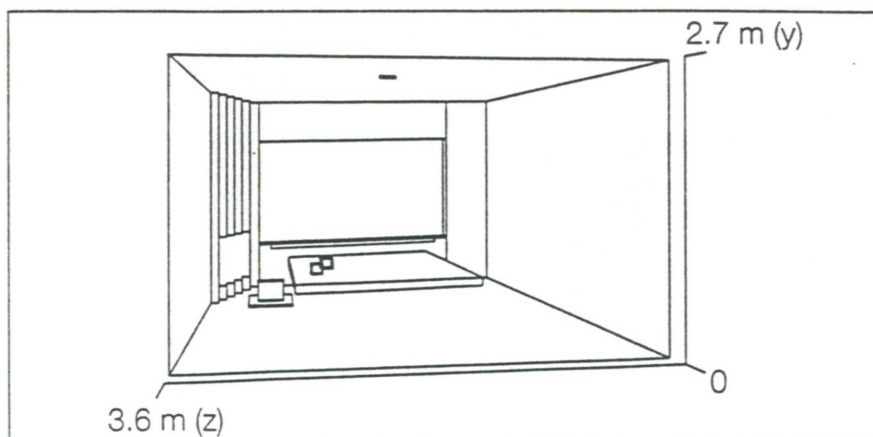
In de wintersituatie, met een inblaas-temperatuur circa 2 K lager dan de vertrektemperatuur, bedraagt het verschil in luchttemperatuur tussen 0,10 m en 1,70 m hoogte 1,5 à 2 K. In de zomersituatie is het verschil, bij een inblaas-temperatuur van 19

à 20 °C (geen koeling), 2,0 à 2,5 K. Bij ingeschakelde koeling, met een inblaastemperatuur van circa 18 °C, bedraagt het verschil 3,0 à 3,5 K. Dichtbij de toevoer liep dit verschil op tot 5 K. NEN-ISO 7730 [3] geeft als aanbeveling een maximum temperatuurverschil tussen hoofd en enkels van 3 K. De verticale stratificatie van de luchttemperatuur komt ook tot uiting in de waarden van gemiddelde temperatuureffectiviteit van elk niveau (zie tabel 4).

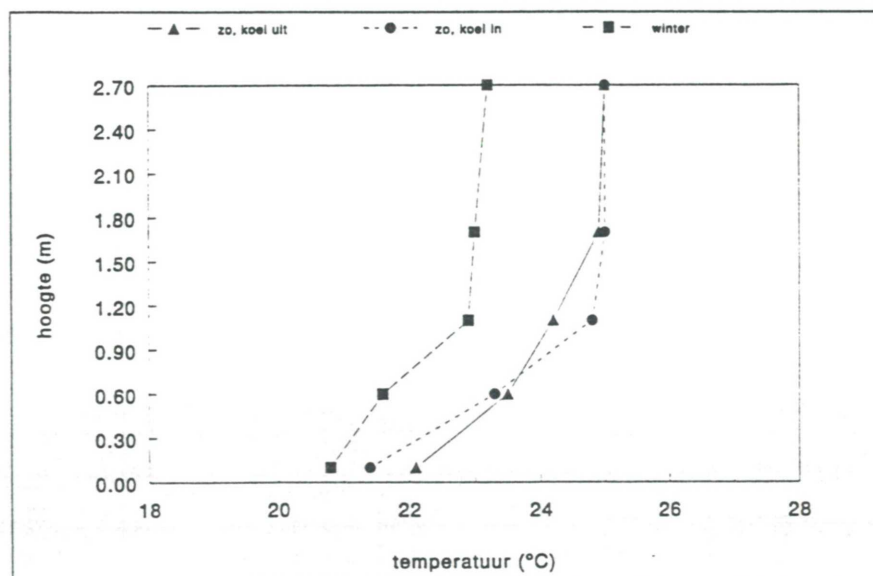
Voor de niveaus 1,1 en 1,7 m is de temperatuureffectiviteit nagenoeg gelijk aan 1. Ten opzichte van een mengend systeem wordt dus geen verbetering bereikt. De gemiddelde temperatuureffectiviteit van de niveaus 0,1; 0,6 en 1,1 m bedroeg evenwel 1,6. De verschillende interne en externe warmtelasten (buitentemperatuur en zonnestraling) hadden nagenoeg geen effect op de temperatuureffectiviteit. Personen die in de kamer liepen verstoorde de verdeling van de temperatuur niet.

Op een tweetal posities werden relatief hoge luchtsnelheden gemeten: 0,35 en 0,16 m/s. Deze posities liggen in de toevoerluchtstroom. Op andere posities was de luchtsnelheid lager dan 0,1 m/s. Op de beide bovengenoemde posities werd een turbulentie-intensiteit (gedefinieerd als de verhouding tussen de standaardafwijking van de luchtsnelheid en de gemiddelde luchtsnelheid) gemeten van respectievelijk 63% en 28%. Het luchtstromingspatroon wordt nader besproken bij de vergelijking van de metingen en de berekeningen.

De resultaten van de metingen van de ventilatie-effectiviteit worden gegeven in tabel 5. De ventilatie-effectiviteit, sterk afhankelijk van de plaats van de bron in de kamer, is een maat voor de gradiënt van de verontreinigingsconcentratie en een maat voor het afvoeren van deze verontreinigingen. Deze ventilatie-effectiviteit is voor de hoogten 0,10 m en 0,60 m groter dan 1. Voor de ademzone (1,1 - 1,7 m) is de ventilatie-effectiviteit nagenoeg gelijk aan 1. Dit betekent dat geen verbetering ten opzichte van een mengend systeem wordt bereikt. Het effect van een lopende persoon op de concentratieverdeling is groot. Dit effect is echter tijdelijk.



AANZICHT VAN HET VERTREK ZOALS GEBRUIKT BIJ DE LUCHTSTROMINGSBEREKENINGEN
-FIGUUR 3-



VERTICAAL PROFIEL VAN DE GEMIDDELTE LUCHTTEMPERatuur OP VERSCHILLENDE HOOGTEN
-FIGUUR 4-

Temperatuur toevoerlucht	Hoogte boven de vloer (m)			
	0,10 m	0,60 m	1,10 m	1,70 m
wintersituatie	2,5 - 2,6	2,2 - 2,3	1,2 - 1,3	1,1
zomersituatie 18°C (koeling ingeschakeld)	2,0 - 2,2	1,5 - 1,7	1,1 - 1,2	1,0 - 1,1
19 tot 22°C (koeling uitgeschakeld)	2,0 - 2,6	1,5 - 2,0	1,2	1,1

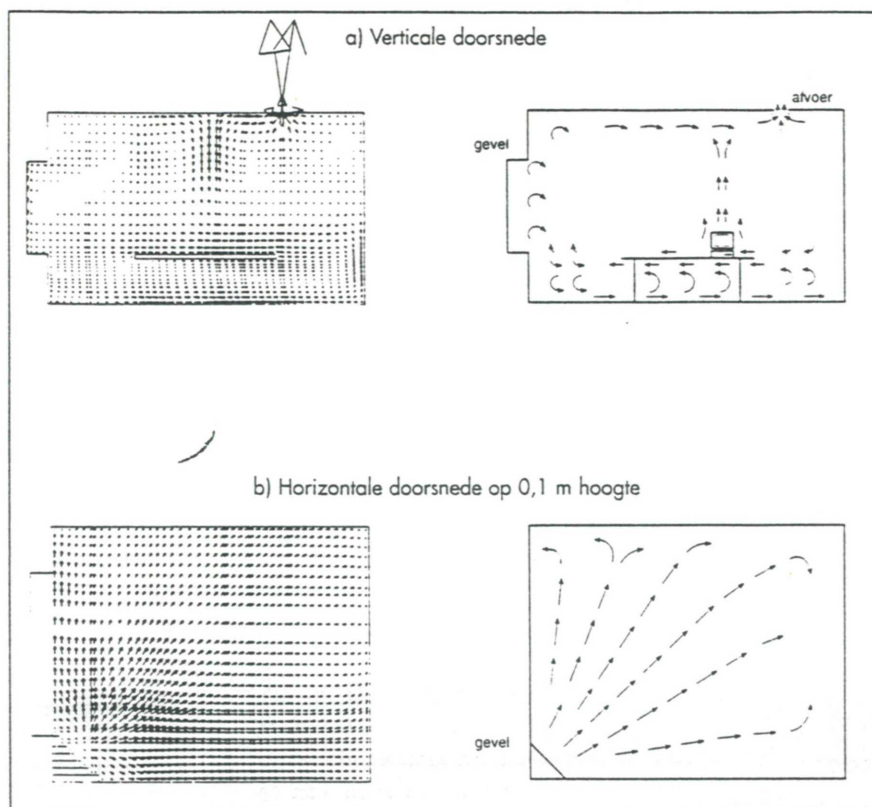
TEMPERATUUREFFECTIVITEIT OP VERSCHILLENDE HOOGTEN (ZOMER)
-TABEL 4-

Bron positie	Hoogte boven de vloer (m)				
	Hoogte	0,10 m	0,60 m	1,10 m	1,70 m
afvoerdebit 92 m³/h					
Midden	0,10 m	-	3,0	0,6 - 0,7	0,6 - 0,7
Midden	1,10 m	5,6	5,0	-	0,8
Noord-oost	1,10 m	6,0	5,3	-	0,9
afvoerdebit 210 m³/h					
Midden	1,10 m				
geen personen aanwezig		10 - 12	8 - 10	-	1,1
twee personen aanwezig lopend		4,5 - 5	3,5 - 4	-	0,9

GEMIDDELTE VENTILATIE-EFFECTIVITEIT OP VERSCHILLENDE HOOGTEN VOOR VERSCHILLENDE POSITIES VAN DE BRON (ZOMERMETINGEN)
-TABEL 5-

Parameter	Waarde	Eenheid
Volumestroom toe- en afvoer	210	m ³ /h
Temperatuur van de inblaaslucht	18,0	°C
Turbulentie-intensiteit van de inblaaslucht	35	%

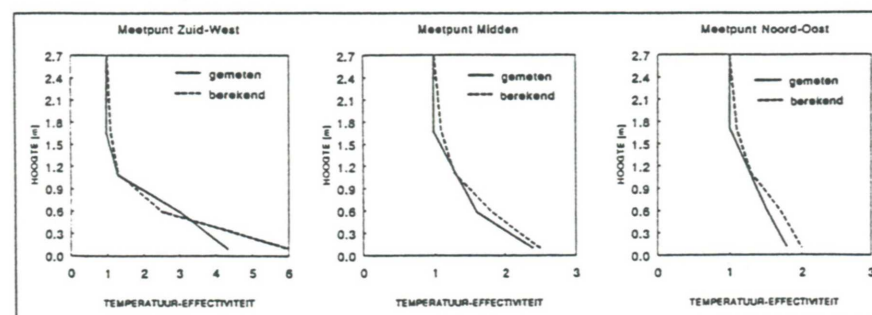
RANDVOORWAARDEN M.B.T. DE LUCHTINBLAAS
-TABEL 6-



GEMETEN EN BEREKEND LUCHTSTROMINGSPATROON
-FIGUUR 5-

Meetpunt	Meethoogte (m)	Gemeten snelheid (m/s)	Berekende snelheid (m/s)
zuid-west	0,1 m	0,08	0,13
zuid-west	0,6 m	0,28	0,19
midden	1,1 m	0,05	0,03
midden	1,7 m	0,05	0,04
noord-oost	0,1 m	0,10	0,07

GEMETEN EN BEREKEND LUCHTSNELHEDEN OP DIVERSE POSITIES
-TABEL 7-



GEMETEN EN BEREKEND TEMPERATUUREFFECTIVITEIT
-FIGUUR 6-

VERGELIJKING VAN METINGEN EN BEREKENINGEN

Luchtstroming

Voor de vergelijking van de metingen en de berekeningen is uitgegaan van de situatie dat de randvoorwaarden (en dus de luchtstroming) redelijk stabiel waren. Gekozen is voor de situatie op 9 augustus 1989 om circa 12 uur. In tabellen 6 en 7 staan de op dat tijdstip gemeten condities, die in de berekeningen als randvoorwaarden zijn meegenomen.

Het luchtstromingspatroon is vergeleken voor twee doorsneden: het verticale symmetrievlak van de kamer en een horizontaal vlak van 10 cm boven de vloer (figuur 5). Er blijkt een goede overeenkomst tussen het waargenomen en het berekende luchtstromingspatroon. In beide doorsneden tekent zich duidelijk af:

Verticale doorsnede:

- een sterke luchtstroming nabij de vloer;
- een terugstroming onder en boven het tafelblad;
- een sterke opwaartse stroming nabij de computer;
- een opwaartse stroming nabij het raam;
- een stroming langs het plafond in de richting van de afvoer.

Horizontale doorsnede:

- een sterke luchtstroming nabij de vloer in de richting van de tegenover gelegen hoek waarbij de toegevoerde lucht zich als het ware over de vloer uitspant.

Voor een vergelijking geeft tabel 7 de absolute luchtsnelheden voor een aantal meetposities weer. Bij vergelijking van de berekende snelheden met de gemeten waarden blijkt dat deze voor een tweetal posities significant van elkaar afwijken. Dit is voor de beide zuid-west posities. De luchtsnelheden op deze posities zijn nabij de inblaas sterk afhankelijk van de plaatselijke menging. Het verschil is mogelijk te verklaren door de wijze waarop de inblaas in het model is gemodelleerd. De inblaas is met een gemiddelde instroomsnelheid gemodelleerd, terwijl er in de werkelijke situatie talrijke kleine nozzles zijn toegepast waarbij de luchtsnelheid niet homogeen is. Voor de overige meetposities komen de luchtsnelheden tussen de berekeningen en de metingen goed overeen.

Temperatuur- en ventilatie-effectiviteit

Bij het evalueren van de temperatuurverdeling is gebruik gemaakt van de temperatuureffectiviteit. In figuur 6 is de temperatuureffectiviteit als functie van de hoogte voor drie meetposities weergegeven. Alleen in het lage deel van het vertrek is een temperatuurgradiënt aanwezig. Boven de 1,1 m is er vrijwel geen wijziging meer in de luchttemperatuur. Voor alle drie de posities komen gemeten en berekende temperatuurverdeling goed overeen. De grootste verschillen treden op voor de posities zuid-west, nabij de toevoerunit.

Bij het evalueren van de verspreiding van verontreiniging is gebruik gemaakt van de ventilatie-effectiviteit. De ventilatie-effectiviteit als functie van de hoogte is gegeven in figuur 7. Metingen hebben aangetoond dat de ventilatie-effectiviteit sterk afhangt van de positie van de verontreinigingsbron [4]. In de werkelijke situatie zijn de verontreinigingsbronnen op andere posities gelokaliseerd dan bij de berekeningen. Om deze reden is een directe vergelijking niet mogelijk. In de verblijfszone (hoogte = 1,0 m) is, zowel in de gemeten als in de berekende situatie, de ventilatie-effectiviteit gelijk aan 1. Dit is dezelfde waarde die geldt voor systemen met volledige menging. Nabij de vloer treden de grootste verschillen tussen berekende en gemeten waarden op.

ENERGIEGEBRUIK

Een mogelijke reden om een systeem met verdringingsventilatie toe te passen is de verwachting dat dit systeem een lager energiegebruik heeft dan een ventilatiesysteem met volledige menging. Deze verwachting is gebaseerd op een aantal specifieke eigenschappen van het verdringingsventilatiesysteem. Doordat een groot deel van de warmte zich hoog in het vertrek bevindt (uit zich in een temperatuurverschil tussen vloer en plafond) zal :

- de temperatuur van de afvoerlucht hoger zijn dan de vertrektemperatuur, waardoor de koelcapaciteit (per m³) van de circulatielucht is toegenomen;
- bij toepassing van een thermisch open plafond, meer energie in het plafond worden opgeslagen dan bij een volledig mengend systeem. Voorwaarde hierbij is dat deze warmte met nachtventilatie effectief wordt afgevoerd.

Daarnaast kan lucht worden toegevoerd met een temperatuur die slechts enkele graden lager is dan de vertrektemperatuur. Hierdoor kan in de zomerperiode langer gebruikt worden gemaakt van vrije koeling (koeling door de buitenlucht) zodat de koelmachine minder snel hoeft te worden ingeschakeld.

De vergelijking tussen het energiegebruik van een ventilatiesysteem met volledige menging en een systeem met verdringingsventilatie wordt gemaakt voor een gelijk gemiddeld comfort in het vertrek, dat voor deze berekeningen wordt verwezenlijkt door uit te gaan van gelijke luchttemperaturen in het vertrek.

Modellering

Voor het berekenen van het energiegebruik en de optredende lucht- en oppervlakteremperaturen wordt in het algemeen gebruik gemaakt van een gebouwsimulatiemodel, waarmee de optredende warmteprocessen worden gesimuleerd.

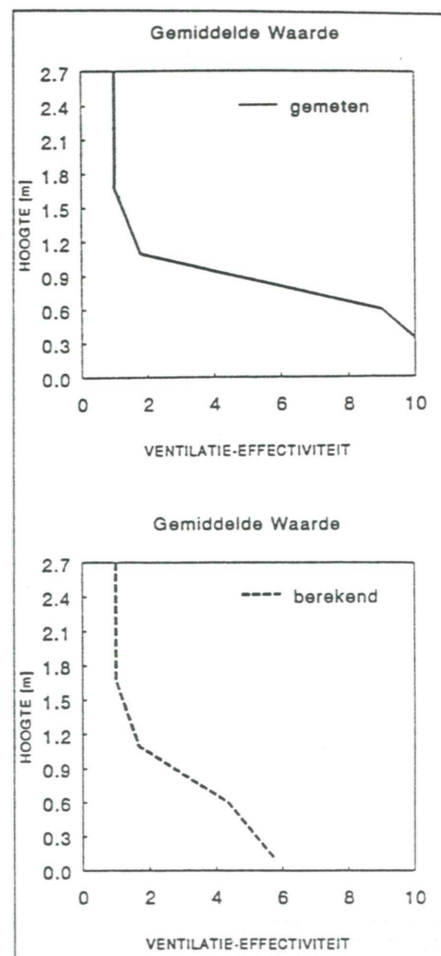
Het conventionele rekenmodel

De energiegebruiksberkeningen zijn uitgevoerd met het gebouwsimulatieprogramma VA114 van de VABI (Vereniging voor Automatisering in de Bouw- en Installatietechniek) [5]. Het model VA114 berekent per vertrek één gemiddelde luchttemperatuur en gaat dus uit van ideale menging. Alle convectieve warmteprocessen in het vertrek zijn dus aan deze temperatuur gekoppeld. Een schema van het convectieve deel van dit model is weergegeven in figuur 8.

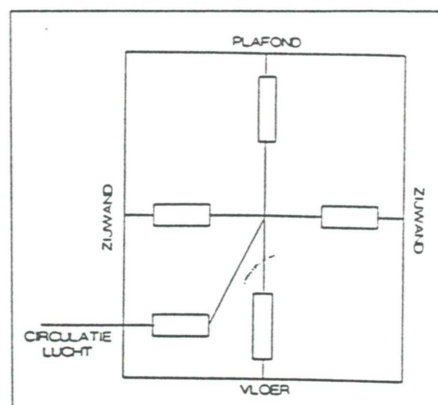
De te verwachten energiebesparing van het systeem met verdringingsventilatie wordt voor een deel veroorzaakt door het temperatuurverschil in het vertrek. Om deze besparing te kunnen inschatten is het van belang dat bij de berekeningen dit temperatuurverschil in te brengen is. Om dit te bereiken is het bestaande model aangepast.

Het rekenmodel t.b.v. verdringingsventilatie

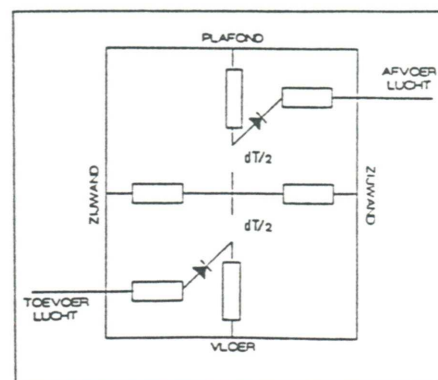
Bij verdringingsventilatie is er een temperatuurverschil over de hoogte van het vertrek aanwezig. Een aantal convectieve warmteprocessen moeten nu niet meer aan de gemiddelde



GEMETEN EN BEREKENDE VENTILATIE-EFFECTIVITEIT
-FIGUUR 7-



SCHEMA VAN CONVECTIEVE WARMTE-OVERDRACHT IN
HET CONVENTIONELE REKENMODEL
-FIGUUR 8-



SCHEMA VAN CONVECTIEVE WARMTE-OVERDRACHT IN
HET REKENMODEL VOOR VERDRINGINGSVENTILATIE
-FIGUUR 9-

Ventilatie-systeem	Luchtdebiet (m ³ /uur)	Verschuiving stooklijn (K)	Koel behoefte (kW.h)
Verdringend	200	0	135
Volledig mengend	350	0	210
Volledig mengend	200	-2	240

KOELBEHOEFTE IN DE ZOMERPERIODE

-TABEL 8-

Ventilatie-systeem	Lokaal afge-geven (kW.h)	Centraal afge-geven (kW.h)	Warmte behoefte (kW.h)
Verdringend	130	20	150
Volledig mengend	85	35	120

WARMTEBEHOEFTE IN DE WINTERPERIODE

-TABEL 9-

vertrekluchttemperatuur worden gekoppeld maar aan een temperatuur die verband houdt met de hoogte in het vertrek.

Deze warmteprocessen zijn :

- warmteopslag in vloer en plafond (accumulatie)
- warmteproces t.g.v luchttoevoer/-afvoer (ventilatie)

Een schema van het uiteindelijke model is weergegeven in figuur 9. De temperaturen nabij de vloer en het plafond worden hier gecorrigeerd ten opzichte van de gemiddelde vertrekktemperatuur.

Uit verschillende onderzoeken [6,7] is gebleken dat het temperatuurverschil in het vertrek voornamelijk afhangt van de koellast en de in het vertrek aanwezige luchtstroming. Uit dit laatste blijkt al dat het een zeer complex proces is. Om deze reden is in het rekenmodel het temperatuurverschil over de hoogte ($d\theta$) tijdens bepaalde bedrijfsperiodes constant verondersteld. De grootte van deze $d\theta$ is afgeleid uit de metingen [4].

Opzet van de berekeningen

Voor het systeem met verdringingsventilatie verloopt het comfort met de hoogte t.g.v. de verticale temperatuurverdeling in het vertrek. Voor de berekeningen is in eerste instantie uitgegaan van een gelijk comfort (lees luchttemperatuur) op de halve hoogte van het vertrek, nl. op 1,35 m. Voor zittende personen, een situatie die normaliter voorkomt in een kantoor situatie, worden echter eisen gesteld conform

NEN-ISO 7730 voor een hoogte op 0,60 m. Om deze reden is ook een vergelijking gemaakt voor deze hoogte.

De berekeningen zijn opgesplitst in twee delen, nl:

- energiegebruik tijdens de zomerperiode (mei-oktober);
- energiegebruik tijdens de winterperiode (november-april).

Het recirculatie-regime is:

- maximale recirculatie bij buiten-temperatuur $< 4^{\circ}\text{C}$ en $> 20^{\circ}\text{C}$,
- geen recirculatie bij buitentemperatuur tussen 14 en 20°C ,
- overgangsgebied tussen 4 en 14°C .

In de winterperiode wordt er lokaal op een vertrekktemperatuur geregeld zodat voor deze periode het resulterende comfort voor alle berekeningen gelijk is. In de zomerperiode is dit niet het geval (er is geen lokale koelunit aanwezig). Voor het systeem met volledige menging in de zomerperiode zijn twee invoerparameters van de installatie gewijzigd om een gelijk comfort als bij het systeem met verdringingsventilatie te verkrijgen. Deze twee invoerparameters zijn :

- het aantal luchtwisselingen;
- verschuiving van de stooklijn.

Het energiegebruik in de zomerperiode

Bij een vergelijking van de resultaten van de basisberekeningen is het belangrijk dat dit gebeurt bij een gelijk comfort. In dit geval dus bij gelijke vertrekluchttemperaturen. In de zomerperiode zijn de volgende gemiddelde temperatuurverschillen

tussen vloer en plafond gemeten

dagbedrijf : $d\theta = 3,8\text{ K}$

nachtventilatie : $d\theta = 1,9\text{ K}$

In tabel 8 staat de door de installatie te leveren koelenergie voor de beide ventilatiesystemen vermeld.

Het systeem met verdringingsventilatie levert gedurende de zomerperiode een forse besparing van de koelbehoefte op. Deze besparing wordt onder andere veroorzaakt doordat de afvoerlucht bij het systeem met verdringingsventilatie een hogere temperatuur heeft dan bij een systeem met volledige menging. Het koelend vermogen van de ventilatielucht neemt hierdoor toe. Naarmate het temperatuurverschil in het vertrek toeneemt, zal dus de door de installatie te leveren koelbehoefte afnemen. Dit resulteert voor het systeem met volledige menging (voor een gelijk comfort) in een lagere stooklijn, waardoor minder gebruik kan worden gemaakt van vrije koeling met de buitenlucht. Zoals uit tabel 8 blijkt moet de stooklijn 2 K dalen in temperatuur. De door de installatie te leveren koelbehoefte neemt hierdoor toe met 105 kW.h.

Een andere mogelijkheid is het vergroten van het aantal luchtwisselingen in het vertrek, wat uiteindelijk effect heeft op het energiegebruik van de ventilatoren. Het luchtdebiet moet hierbij worden opgevoerd van 200 naar 350 m³/uur. De door de installatie te leveren koelbehoefte neemt hierdoor toe met 75 kW.h.

Het energiegebruik in de winterperiode

Uit de metingen [4] is gebleken dat het temperatuurverschil tussen vloer en plafond gedurende een winterperiode kleiner is dan tijdens de zomerperiode. Ook in de literatuur wordt hier melding van gemaakt [6]. Dit is onder meer een gevolg van de gewijzigde buitencondities. Voor de winterperiode zijn de volgende gemiddelde temperatuurverschillen tussen vloer en plafond gemeten :

dagbedrijf : $d\theta = 1,5\text{ K}$

nachtventilatie : $d\theta = 0,75\text{ K}$

In tabel 9 staat de door de installatie te leveren warmte voor de beide ventilatiesystemen vermeld.

De meeste warmte bevindt zich nabij het plafond, wat voor de winterperiode ongunstig is. Naarmate het temperatuurverschil in het vertrek toeneemt

zal ook de retourtemperatuur toenemen. Aangezien er gedeeltelijke recirculatie plaatsvindt zal de centrale installatie minder warmte hoeven te leveren om de gewenste temperatuur van de toevoerlucht te kunnen verzekeren.

Voor de lokale installatie geldt een omgekeerde gevoeligheid. Hier zal naarmate het temperatuurverschil over de vertrekhoogte toeneemt het koelend vermogen van de circulatie-lucht toenemen. Om de gewenste temperatuur in het vertrek te kunnen handhaven zal de lokale verwarmingsinstallatie dus meer warmte moeten leveren. Het effect op de totale warmtebehoefte (dus lokaal en centraal) is dusdanig dat de warmtebehoefte toeneemt bij de aanwezigheid van een verticaal temperatuurverschil. De door de installatie te leveren warmtebehoefte neemt hierdoor toe met 30 kW.h.

Koel- en warmtebehoefte zijn niet zonder meer bij elkaar op te tellen of van elkaar af te trekken. Daartoe dienen beide posten eerst te worden omgerekend naar een primair energiegebruik van de klimaatinstallatie uitgedrukt in m³ aardgas equivalent. De netto besparing is dan 12 tot 20%. Voor een comforthoogte van 0,60 m zijn soortgelijke berekeningen uitgevoerd. Voor de koelbehoefte geldt nu een besparing van 150 kW.h. De warmtebehoefte is hierbij toegenomen met 59 kW.h. De referentiehoogte (hoogte thermostaat) heeft dus een aanzienlijke invloed op de uiteindelijke besparing die bij toepassing van een systeem met verdringingsventilatie te behalen is.

CONCLUSIES

In een vertrek met een verdringingsventilatiesysteem werd een gemiddelde temperatuureffectiviteit van 1,6 gevonden op 0,1; 0,6; 1,1 en 1,7 m hoogte. Dit betekent een verbetering ten opzichte van een conventioneel, mengend systeem. De verticale temperatuurverdeling in het vertrek was afhankelijk van de inblaas temperatuur. Er werd geen duidelijk effect van de interne warmtebelasting, de zoninstraling, de buitentemperatuur, de volumestroom van de afvoerlucht en in het vertrek lopende personen op de temperatuurverdeling waargenomen. De waarde van de ventilatie-effectiviteit in de

ademzone was nagenoeg gelijk aan 1. Dit betekent dat er geen verbetering in vergelijking met een mengend systeem is bereikt. De gemeten waarden van de ventilatie-effectiviteit zijn sterk afhankelijk van de plaats van de bron in het vertrek. Bij de interpretatie van meetwaarden dient men zich dit goed te realiseren.

De juiste werking van het systeem is onder andere afhankelijk van een goede balans tussen de volumestroom toevoerlucht en de volumestroom afvoerlucht. Bij verdringingsventilatiesystemen dient met name exfiltratie van toevoerlucht via kieren en naden bij de vloer (denk vooral aan de deur!) te worden voorkomen.

Het met het programma WISH3D berekende luchtstromingspatroon kwam goed overeen met het in werkelijkheid optredende patroon in het meertrek. De berekende luchtsnelheden in het vertrek kwamen over het algemeen goed overeen met de gemeten waarden, behalve op posities vlakbij de luchttoevoer waar verschillen tot 0,09 m/s (32%) werden geconstateerd. Dit wijst op de noodzaak van een goede modellering van toevoerstromen bij het gebruik van luchtstromingsprogramma's. De waarden van de temperatuureffectiviteit uit de berekeningen kwamen goed overeen met de waarden op basis van de metingen. Een redelijke overeenkomst tussen de waarden voor de ventilatie-effectiviteit op basis van de berekeningen en die op basis van de metingen werd gevonden. Er kan worden geconcludeerd dat WISH3D een waardevol hulpmiddel kan zijn voor het voorspellen van luchtstromingen in vertrekken. Het model kan worden gebruikt bij het optimaliseren van ventilatiesystemen.

Op basis van berekeningen met een dynamisch gebouwsimulatiemodel bleek dat de koelbehoefte bij een verdringingsventilatiesysteem met 35 tot 43 % daalde ten opzichte van de behoefte bij een volledig mengend systeem. Deze besparing is het gevolg van de relatief lage luchttemperatuur bij het systeem met verdringingsventilatie. Voor het systeem met verdringingsventilatie leidt de relatief lage luchttemperatuur in de verblijfszone nu tot een toename van de benodigde warmtebehoefte van het vertrek. Voor de gemeten omstan-

digheden komt de toename van de warmtebehoefte overeen met 30 kW.h (25 %). Door het toepassen van warmteterugwinning kan deze toename worden geminimaliseerd. De netto besparing bij toepassing van verdringingsventilatie in het beschouwde kantoorvertrek bedraagt 12 tot 20%. De bovenstaande verschillen in warmte- en koelbehoefte gelden voor een referentiehoogte van 1,35 m. Indien een gelijk comfort op 0,6 m hoogte dient te worden gerealiseerd bedraagt de afname van de koelbehoefte 150 kW.h en de toename van de warmtebehoefte 59 kW.h. De referentiehoogte (lees de hoogte van de thermostaat) heeft dus een aanzienlijke invloed op de uiteindelijke besparing die bij toepassing van een systeem met verdringingsventilatie te behalen is.

LITERATUUR

- 1 ISSO publikatie 40
Werkplekklimatisering door verdringingsventilatie in een kantooromgeving. Stichting ISSO, december 1994.
- 2 Lemaire, A.D.
Praktische toepassing van een stromingsmodel bij de beheersing van het binnenmilieu. Bouwfysica, vol. 5, 1994, nr. 4
- 3 NEN-ISO 7730
Gematigde thermische binnencondities. Bepaling van de PMV- en de PPD-waarde en specificatie van de voorwaarden voor thermische behaaglijkheid. Nederlands Normalisatie-instituut, Delft, 1989
- 4 Cox, ir. C.W.J.; *Een praktijkonderzoek naar de werking van een verdringingsstelsel in een kantoorruimte*. MT-TNO rapport nr. R90/296 Delft, 23 juli 1990
- 5 Nieuwkerk, J. van; Plokker, ir. W.; Wijsman, ir. A.; Velde, ing. A. van der *Handleiding Gebouwsimulatieprogramma VA114, deel I*. Bureau van de VABI, TNO Bouw Delft, 1993
- 6 Kooi, dr. ir. J. van der; *Klimaatkamermetingen aan een verdringingsventilatiesysteem*. TU Delft rapport nr. K-155 Delft, juni 1989
- 7 Seppänen, P.E. O.A.; *Comparison of conventional mixing and displacement air conditioning and ventilating systems in U.S. commercial buildings*. Ashrae Transactions 1989, Volume 95, Part 2